

Bergische Universität Wuppertal
Fachbereich D - Abteilung Sicherheitstechnik
Fachgebiet Sicherheitstechnik / Arbeitssicherheit



FP 354 „Gefährdungsbeurteilung Gefahrstoffe“

Wissenschaftlicher Abschlussbericht

Projekt:	Validierungsuntersuchung eines Berechnungsverfahrens zur Gefährdungsbeurteilung von Tätigkeiten mit Gefahrstoffen
Laufzeit:	01.09.2013 bis 28.02.2014
Gefördert von:	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
Projektleiterin:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Anke Kahl
Projektmitarbeiter:	M.Sc. Florian Pillar Tristan Gusek
Autor des Abschlussberichtes:	M.Sc. Florian Pillar

Bergische Universität Wuppertal
Fachbereich D - Abteilung Sicherheitstechnik
Fachgebiet Sicherheitstechnik / Arbeitssicherheit
Gaußstraße 20
42119 Wuppertal

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Anke Kahl, Projektleiterin

M.Sc. Florian Pillar, Projektmitarbeiter

Wuppertal, den 30.05.2014

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Validierungsuntersuchung eines Berechnungsverfahrens zur Gefährdungsbeurteilung von Tätigkeiten mit Gefahrstoffen“ wurden vergleichende Bewertungen von Mess- und Berechnungsergebnissen durchgeführt. Ziel war es, valide Aussagen zu Genauigkeit und potentiellen Einsatzmöglichkeiten eines neuen Berechnungsverfahrens herauszustellen.

Dazu wurden zunächst in einem definierten Versuchsraum und unter wechselnden Rahmenbedingungen zwei Reinstoffe, Propan (gasförmig) bzw. Isopropanol (flüssig), gezielt freigesetzt und entstehende, zeitabhängige Luftkonzentrationen messtechnisch erfasst. Im Anschluss wurden die Messergebnisse in das neue Berechnungsverfahren eingespeist. Dabei erfolgten ebenfalls Variationen und Modifizierungen von ggf. bedingt genau oder bekannten Rahmenbedingungen. Die Berechnungsergebnisse wurden mit den Messergebnissen (Referenzwerte) verglichen. Die Gesamtuntersuchung enthielt Detailanalysen zu integrierten Verdunstungsmodellen, dem grundlegenden Ausbreitungsmodell sowie zur Verknüpfung der verschiedenen Module des Berechnungsverfahrens. Die daraus folgende Bewertung der Ergebnisse bezieht sich sowohl auf die einzelnen Module (u.a. Informationsermittlung, Abschätzung der Stofffreisetzung, Abschätzung der Stoffausbreitung) als auch auf das Berechnungsverfahren als in sich abgeschlossene Anwendung.

Die allumfängliche Validierung des konzipierten Berechnungsverfahrens kann Annahmen zur Richtigkeit und Genauigkeit basierend auf den Untersuchungen nur bedingt bestätigen. Dies begründet sich einerseits auf der Inanspruchnahme verschiedener Bedingungen der erzielten Messwerte (Lüftungsverhältnisse, Parameter der Stofffreisetzung etc.). Andererseits lässt sich diese Aussage untermauern durch die erhebliche Unterschätzung der Freisetzungsbedingungen, die im weiteren Verlauf zur Unterschätzung ortsbezogener Stoffkonzentrationen führt. Dies ist u.a. auf den Parameter der Luftgeschwindigkeit als Merkmal der Anwendungsbereiche zurückzuführen.

Unter definierten Rahmenbedingungen bestehen Übereinstimmungen von Ergebnissen der Ausbreitungsberechnungen mit den Messwerten, so dass das Ausbreitungsmodell (Modul zur Erfassung der Stoffausbreitung) unter begrenzten Voraussetzungen zur Anwendung im Arbeits- und Gesundheitsschutz als valide angesehen werden kann. Aus den Untersuchungen mit Ergebnisabweichungen können darüber hinaus wichtige Erkenntnisse zur Modellsensitivität und zu Anforderungen an einen praktischen Einsatz abgeleitet werden.

Neben dem Ergebnisvergleich werden das methodische Konzept des Berechnungsverfahrens und die erforderliche Verknüpfung der verschiedenen Module formal-funktional bestätigt. Die Ergebnisse weisen ebenfalls auf besondere Aspekte zur Identifizierung und Analyse potentieller Berechnungsfehler hin (z.B. abweichende Temperaturverläufe).

Als zentrales Ergebnis des geförderten Forschungsvorhabens kann die Formulierung eines Anwendungsbereiches herausgestellt werden, in dem das neue Berechnungsverfahren zu unterschiedlichen Fragestellungen der stofflichen Ausbreitung Antwort gibt. Die Interpretation umfasst weiterhin eine Zusammenstellung von Voraussetzungen, die für einen praktischen Einsatz gegeben sein müssen. Gleichzeitig ist festzustellen, dass ein allgemeingültiger praktischer Einsatz des Berechnungsverfahrens nicht ohne die o.g. Einschränkungen formuliert werden kann.

Inhaltsverzeichnis

1 Zielstellung des Forschungsvorhabens	1
1.1 Problem- und Aufgabenstellung	1
1.2 Forschungsziel	2
2 Methodisches Vorgehen	3
2.1 Geplante Forschungsstrategie	3
2.2 Umsetzung und Durchführung der Untersuchungen	4
2.2.1 Versuchsaufbauten	5
2.2.2 Versuchsdurchführung	9
2.3 Durchführung von Berechnungen	13
2.4 Vergleichsstrategie	18
3 Darstellung der Untersuchungsergebnisse	20
3.1 Messergebnisse	20
3.2 Berechnungsergebnisse	20
4 Bewertung und Validierungsaussagen	22
4.1 Untersuchungsschritt 1: Untersuchungen mit Propan	22
4.1.1 Szenarien mit Luftführung über Nebenräume	22
4.1.2 Szenarien ohne Luftführung über Nebenräume	24
4.1.3 Gesamtinterpretation Untersuchungsschritt 1	25
4.2 Untersuchungsschritt 2: Untersuchungen mit Isopropanol	26
4.2.1 Ausbreitungsberechnungen auf Grundlage gemessener Emissions- Massenströme	27
4.2.2 Berechnungsverfahren einschließlich Berechnungen zur Stoffemission	33
4.2.3 Gesamtinterpretation Untersuchungsschritt 2	41
5 Fazit, Anwendbarkeit und Ausblick	43
5.1 Gesamtergebnis der Untersuchungen	43
5.2 Ableitung von Einsatzbedingungen und Verwendungsmöglichkeiten	44
5.3 Weiterverwendung der Ergebnisse und ergänzende Arbeiten	47
A Liste verwendeter Größen	48
B Planungsgrundlage: Validierungskonzept	49
C Sicherheitskonzepte	72
D Rahmenbedingungen der Propan-Versuche (Zusammenfassung)	84
E Rahmenbedingungen der Isopropanol-Versuche (Zusammenfassung)	86
F Zusammenfassung Berechnungs-Eingangswerte zu Propan-Versuchen	88

G	Zusammenfassung Berechnungs-Eingangswerte zu Isopropanol-Versuchen	91
H	Beispiel: Quantitative und qualitative Darstellung Messergebnisse	94
I	Beispiel: Quantitative und qualitative Darstellung Berechnungsergebnisse	96
J	Vergleiche der Mess- und Berechnungsergebnisse	98
J.1	Vergleiche zu Propan-Versuchen (Untersuchungsschritt 1)	98
J.1.1	Szenarien mit Luftführung über Nebenräume	98
J.1.2	Szenarien ohne Luftführung über Nebenräume	118
J.2	Vergleiche zu Isopropanol-Versuchen (Untersuchungsschritt 2)	141
J.2.1	Ergebnisse der Emissionsberechnung	141
J.2.2	Szenarien mit Luftführung über Nebenräume, gemessene Emissions- Massenströme	142
J.2.3	Szenarien ohne Luftführung über Nebenräume, gemessene Emissions- Massenströme	165
J.2.4	Szenarien mit Luftführung über Nebenräume, berechnete Emissions- Massenströme	181
J.2.5	Szenarien ohne Luftführung über Nebenräume, berechnete Emissions- Massenströme	198
K	Quantitative Vergleiche der Mess- und Berechnungsergebnisse	212
K.1	Vergleiche zu Propan-Versuchen (Untersuchungsschritt 1)	212
K.2	Vergleiche zu Isopropanol-Versuchen (Untersuchungsschritt 2)	214
L	Fotodokumentation	216

1 Zielstellung des Forschungsvorhabens

In der heutigen betrieblichen Praxis findet eine Vielzahl an Chemikalien, die i.d.R. als Gefahrstoffe eingestuft sind, in unterschiedlichen Anwendungsbereichen Einsatz. Sowohl beim Inverkehrbringen als auch bei der betrieblichen Verwendung von Gefahrstoffen sind nach EG/1907/2006 (REACH-Verordnung)¹ bzw. nach Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG)² und Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)³ Analysen und Bewertungen möglicher Expositionen von Beschäftigten erforderlich, die im Sinne von Expositionsszenarien bzw. Gefährdungsbeurteilungen durchzuführen sind. Dabei sind neben Messungen und Analogiebetrachtungen Berechnungsverfahren als qualifizierte Expositionsabschätzungen zulässig, sofern sie dem Stand der Technik entsprechen.

Bevor ein neu konzipiertes Berechnungsverfahren eingesetzt werden darf, ist es daher erforderlich, dass die Übereinstimmung mit den methodischen sowie fachlich-inhaltlichen Anforderungen auf Validität überprüft wird. Dazu muss eine Validierung des Verfahrens vorgenommen werden, die nachvollziehbare Rückschlüsse auf Genauigkeit der Berechnungen, Einsatzmöglichkeiten sowie Anwendungsbedingungen zulässt.

1.1 Problem- und Aufgabenstellung

Im Rahmen eines Forschungsansatzes wurde im Fachgebiet Sicherheitstechnik / Arbeitssicherheit des Fachbereichs D - Abt. Sicherheitstechnik der Bergischen Universität Wuppertal ein neues Berechnungsverfahren⁴ zur stofflichen Gefährdungsbeurteilung entwickelt. Diese Konzeption bildet die Grundlage zum beschriebenen Forschungsvorhaben. Das Verfahren bezieht u.a. Modelle aus anderen ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen ein, die auf die Abschätzung von Stoffemission und -ausbreitung abgestellt sind und z.T. über spezifische Validierungen verfügen. Insbesondere wird ein Modell des Brandschutzingenieurwesens („Fire Dynamics Simulator“, kurz FDS⁵, des NIST⁶, USA), das auf die Ermittlung der Rauchausbreitung in Räumen ausgerichtet ist, zur Abschätzung der Stoffausbreitung genutzt.

Die bestehenden Validierungsuntersuchungen zu FDS beziehen sich auf Effekte, die im Zuge eines Brandes und dadurch erhöhten Temperaturen eintreten. Untersuchungen zur Betrachtung der Stoffausbreitung bestehen nicht, so dass keine Aussagen zur möglichen Genauigkeit der Berechnungen vorliegen. Aufgrund dessen und durch die Verknüpfung mit anderen Modellen und

¹ Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18.12.2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Agentur für chemische Stoffe, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/84 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/755/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EWG und 2000/21/EG der Kommission, Fassung 2006 (zuletzt geändert Mai 2007); in Amtsblatt Nr. L 136, 2007

² Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG), Fassung August 1996 (zuletzt geändert Februar 2009), in Bundesgesetzblatt I, 2009

³ Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung - GefStoffV), Fassung 2010 (zuletzt geändert Juli 2011); in Bundesgesetzblatt I, 2011

⁴ Detaillierte Angaben zur Modellentwicklung: siehe www.arbeitssicherheit.uni-wuppertal.de unter „Forschung“

⁵ Detaillierte Angaben zum Modell: siehe www.fire.nist.gov

⁶ National Institute of Standard and Technology

Ansätzen weist das neu konzipierte Berechnungsverfahren keine Validierung auf. Ohne entsprechende Nachweis der Validität ist ein betrieblicher Einsatz des neuen Berechnungsverfahrens nicht zu empfehlen.

1.2 Forschungsziel

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Durchführung von Validierungsuntersuchungen des neu konzipierten Berechnungsverfahrens. Dabei wird der Fokus nicht auf die praktische Betrachtung konkreter Arbeitsschutz-Fragestellungen, sondern auf die Erarbeitung der wissenschaftlichen Grundlage für Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen in Form von experimentellen Untersuchungen gelegt. Somit soll die wissenschaftlich-methodische Begründung für die betriebliche Verwendbarkeit geschaffen werden.

Anhand der Validierungsuntersuchungen sollen die Verwendbarkeit sowie mögliche Einsatzgrenzen des Verfahrens grundsätzlich geklärt und ein entsprechender Anwendungsnachweis erbracht werden. Die Berücksichtigung der wissenschaftlichen Gütekriterien der Objektivität, der Reliabilität sowie der Validität des Verfahrens dient als Grundlage der Untersuchungen, die beispielhaft durchgeführt werden.

2 Methodisches Vorgehen

Zur Bearbeitung der Aufgabenstellung ist ein methodisches Konzept erforderlich, das die Untersuchungen auf das Forschungsziel abstellt und eine möglichst standardisierte Vorgehensweise vorgibt. Vor Beginn der Versuche und Berechnungen wurde daher zunächst ein grundlegendes Validierungskonzept¹ erarbeitet, das die methodischen Schritte und - sofern möglich - grundlegende Rahmenbedingungen definiert. Die methodischen Hintergründe und Überlegungen sind in Kap. 2.1 dargestellt. Die konkrete Umsetzung, ggf. erforderliche Anpassungen und Abweichungen sowie die durchgeführten messtechnischen Versuche werden in Kap. 2.2 dargelegt. Kap. 2.3 beschreibt die korrespondierenden Berechnungen zur Stoffausbreitung bzw. zur Kombination von Stofffreisetzung und -ausbreitung. Die mathematische Vergleichsstrategie der ermittelten Mess- und Rechenergebnisse wird in Kap. 2.4 ausgewiesen.

2.1 Geplante Forschungsstrategie

Die methodische Bearbeitung der Aufgabenstellung erfolgt anhand aufeinander aufbauender Arbeitspakete (vgl. Antrag auf Zuwendung zum vorliegenden Forschungsvorhaben). Diese verfolgen sowohl die Planung als auch die Durchführung und Auswertung der Validierungsuntersuchungen:

1. Erarbeitung eines strukturierten Validierungskonzepts (geplante Dauer ca. 1 Monat²),
2. Durchführung der experimentellen Versuche zur Referenzwertermittlung (geplante Dauer ca. 1,5 Monate),
3. Durchführung von Vergleichsrechnungen zu den experimentellen Untersuchungen (geplante Dauer ca. 1,5 Monate),
4. Durchführung von Sensitivitätsuntersuchungen (geplante Dauer ca. 1 Monat),
5. Ergebnisvergleich und statistische Auswertung (geplante Dauer ca. 1 Monat),
6. Bewertung der praxisorientierten Einsatzmöglichkeiten des neuen Berechnungsverfahrens (zugehörig zu Ergebnisvergleich und Auswertung, geplante Gesamtdauer ca. 1 Monat).

Das Validierungskonzept stellt die konkreten Untersuchungsdetails dar und strukturiert die Arbeitspakete der Versuche, der Vergleichsrechnungen sowie der zugehörigen Vergleiche in weitere Untersuchungsschritte. Daraus resultiert eine konkrete Vorgehensweise. Da die detaillierte methodische Konzeption im erarbeiteten Validierungskonzept (vgl. Anhang B) beschrieben ist, werden im Anschluss lediglich die vorgeplanten, generellen Ansätze als Überblick aufgezeigt.

Die Validierungsuntersuchungen basieren auf Vergleichen von Mess- und Berechnungsergebnissen. Dazu wurden zunächst Messungen zum stoffbezogenen Verhalten durchgeführt, die im

¹ vgl. Anhang B

² Eine Aufstellung der tatsächlichen Bearbeitungsdauern der verschiedenen Arbeitspakete ist in Kap. 5.1 enthalten.

Anschluss nachgerechnet wurden. Die Messungen erfolgten dazu unter möglichst kontrollierten Bedingungen, wozu ein definierter Raum³ genutzt wurde. Die Rahmenbedingungen wurden je Versuch dokumentiert und in den entsprechenden Berechnungen verwendet. Die Versuche fokussierten die zeitabhängige Messung von Luftkonzentrationen des verwendeten Versuchsstoffs an jeweils verschiedenen Messpunkten.

In **Untersuchungsschritt 1** wurde zunächst alleine die Genauigkeit der Berechnungen zur Stoffausbreitung, die innerhalb des Berechnungsverfahrens mit dem Modell FDS umgesetzt werden, betrachtet. Dazu wurde Propan als Gas unmittelbar an die Raumluft freigesetzt, ein Phasenübergang findet nicht statt. Die zugehörigen Berechnungen waren ebenfalls ausschließlich auf die Stoffausbreitung ausgerichtet, die übrigen Bestandteile des Berechnungsverfahrens wurden an dieser Stelle nicht untersucht.

Untersuchungsschritt 2 bezog dagegen das gesamte Verfahren ein, indem die Versuche durch die Verdunstung von Isopropanol realisiert wurden. Dies eröffnete einerseits die Möglichkeit, die Ausbreitungsrechnungen mit einem zweiten Stoff zu überprüfen. Andererseits konnte über die Verwendung des Berechnungsverfahrens, d.h. inklusive Abschätzung der Stoffemission sowie Nutzung der internen Verknüpfungen, eine Gesamtuntersuchung angestrebt werden.

Die Untersuchungsschritte wurden zunächst in sich geschlossen als Versuche und im Anschluss als Berechnungen durchgeführt. Die Ausgestaltung der weiteren Arbeitspakete beruht auf den Erkenntnissen, die aus einer ersten übersichtlichen Auswertung gewonnen wurden. Insbesondere die Aufstellung von Sensitivitätsrechnungen ergab sich aus auftretenden Detail-Fragestellungen.

2.2 Umsetzung und Durchführung der Untersuchungen

Das Validierungskonzept definiert das grundlegende Vorgehen und die Ansätze, die im Rahmen der Versuche und Berechnungen umgesetzt werden müssen. Auf Vorgaben zur Versuchsanzahl wurde im Vorfeld verzichtet, da diese u.a. aus Erkenntnissen der ersten praktischen Anwendungen abgeleitet werden sollten. Weiterhin konnten unterschiedliche Parameter (z.B. thermodynamische Umgebungsbedingungen) nicht oder nur eingeschränkt (bspw. Lüftungsbedingungen) vorgegeben werden. Diese wurden im Zuge der Versuche je Einzelfall ermittelt.

Nachfolgend werden für die Versuche die Aufbauten für die Stofffreisetzung sowie die Installation der Messtechnik beschrieben. Es folgen Erläuterungen zu den durchgeführten Versuche samt einzelfallspezifischer Rahmenbedingungen sowie ggf. gewählten Abweichungen von den Planungen.

Hinweis:

Zur Realisierung der Versuchsaufbauten sowie bei der messtechnischen Ausstattung konnte vielfach auf vorhandene Materielien des Fachgebiets Sicherheitstechnik, der Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege sowie auf Leihgaben anderer Stellen zurückgegriffen werden, so dass die erforderlichen Anschaffungen nur einen geringen Teil ausmachten. Die tatsächlich notwendigen Anschaffungen sind in der Abrechnung der Projektkosten aufgeführt, Gegenstände der kostenneutralen Ausstattung gehen aus dieser nicht hervor.

³ Laborraum des Messtechnischen Dienstes, Fachbereich Gefahrstoffe, der Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW), Bezirksverwaltung Köln, Bonner Straße 337, 50968 Köln

2.2.1 Versuchsaufbauten

2.2.1.1 Stoffemission

Die Untersuchungsschritte 1 und 2 unterscheiden sich u.a. durch die verwendeten Versuchsstoffe (vgl. Anhang B). Für Propan als Gas wurde eine Installation zur kontrollierten Emission aus einem Gasbehälter unter Druck erforderlich, die Flüssigkeit Isopropanol musste von definierten Flächen aus verdunstet werden.

Gasemission: Propan

Anforderung des Sicherheitskonzepts für Versuche mit Propan war u.a., dass lediglich eine geringe Stoffmasse innerhalb des Versuchsraums vorgehalten wird. Die Propanfreisetzung erfolgte daher aus einer sog. Kleinstflasche (max. Inhalt: 425,00 g, Bevorratung unter Druck), die im Freien aus einer handelsüblichen Gasflasche teilgefüllt wurde.

Die kontrollierte Abgabe aus der Kleinstflasche benötigt eine Druckminderung, weiterhin sind Schlauchinstallationen erforderlich. Unmittelbar am Abgangsventil der Kleinstflasche wurde daher ein Druckminderer installiert, der eine Regelung auf einen absoluten Überdruck von 1.000,00 hPa zulässt. Von diesem wurde das Gas durch eine Schlauchleitung, über einen Schwebekörperdurchflussmesser sowie durch eine weitere Schlauchleitung geführt und aus dem offenen Leitungsende abgegeben. Die Schlauchleitungen aus Gummi mit Einlage entsprechend DIN 4815, Teil 1⁴, Innendurchmesser 1/4" (6,30 mm), wiesen eine Länge von ca. 0,50 m auf. Das offene Schlauchende wurde mit einer Klammer an einem Laborstativ befestigt und zur Decken hin ausgerichtet. Der gesamte Aufbau ist in Anhang L, Abb. refAbb-Propanemission dargestellt.

Bei der Versuchsdurchführung zeigte sich, dass trotz Verwendung des Druckminderers der Überdruck der Kleinstflasche nicht ausreichend weit reduziert wurde, um eine konstante Gasfreisetzung mit unkritischen Massenstrom sicherzustellen. Daher wurde die Propanemission manuell über das Absperrventil geregelt und ein unkritischer Massen- bzw. Volumenstrom durch Beobachtung des Schwebekörperdurchflussmessers abgeschätzt. Das Absperrventil musste dabei ständig überwacht und in einer Stellung gehalten werden.

Der beschriebene Aufbau sprach bereits auf geringe Veränderungen der Einstellung des Regelventils mit deutlichen Schwankungen des emittierten Volumen- bzw. Massenstroms an. Aufgrund dessen konnte eine konstante Emission nicht aufrechterhalten werden, vielmehr mussten ständig Regulierungen vorgenommen werden. Die entstehenden Schwankungen konnten nicht dokumentiert werden; die Abschätzung des Massenstroms beruhte auf der zeitlichen Mittelung der gesamten freigesetzten Stoffmasse.

In verschiedenen Versuchsdurchläufen wurden zwei vorgeplante Emissionspunkte realisiert (jeweile Anordnung: siehe Kap. 2.2.2). Dazu wurde das Stativ mit der Freisetzungsöffnung (offenes Schlauchende) entsprechend positioniert, die Kleinstflasche samt Regelventil verblieb im unmittelbaren Einflussbereich der anwesenden Kontrollperson.

Flüssigkeitsverdunstung: Isopropanol

Die Verdunstung von Flüssigkeiten ist eine Phasenumwandlung von flüssig zu gasförmig und erfolgt über den Kontakt der Flüssigkeit mit der umgebenden Atmosphäre an einer Oberfläche. Die gezielte Verdunstung wurde daher - entsprechend den Planungen des Validierungskonzepts - mit definierten Oberflächen an unterschiedlichen Positionen und mit verschiedener Anzahl und dadurch Ausdehnung von Flächen vorgenommen.

Als Emissionsgefäße wurden handelsübliche Kantinentablets (keine chemische Reaktion mit Isopropanol) verwendet, da diese über entsprechend große Abmessungen verfügen. Die Tablets

⁴ DIN 4815-1: Gummi- und Kunststoffschläuche für Flüssiggas - Teil 1: Schläuche mit und ohne Einlagen; Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), Beuth-Verlag, Berlin, 2009

verfügen über eine Fläche von je $0,114 \text{ m}^2$ bei Kantenlängen von $0,38 \text{ m}$ (Positionierung in X-Richtung) und $0,30 \text{ m}$ (Positionierung in Y-Richtung), eine beispielhafte Darstellung erfolgt in Anhang L, Abb. L.2. Die eingesetzte Stoffmasse (eingefülltes Isopropanol) wurde in Vorversuchen im Versuchsraum abgeschätzt, um die Einsatzmenge je Versuchsdurchlauf zu begrenzen. Während der Versuche wurde festgestellt, dass sich aufgrund von geringen Unebenheiten bei abnehmendem Flüssigkeitsspiegel eine ungleichmäßige Verteilung samt ggf. eintretender Oberflächenverkleinerung einstellt. Zur Aufrechterhaltung der vorgesehenen Oberflächen wurden bei Bedarf die Tablettis kurzzeitig gekippt, um eine vollflächige Verteilung des Isopropanols über die gesamte Versuchsdauer sicherzustellen. Darüber hinausgehende Kontrollen oder Eingriffe waren nicht erforderlich.

2.2.1.2 Installation und Betrieb der Messgeräte

Rahmen- und Umgebungsbedingungen

Die Umgebungsbedingungen konnten entsprechend der Vorplanungen des Validierungskonzepts realisiert werden. Die Messgeräte für Umgebungstemperatur und -druck sowie relative Luftfeuchte verfügen teils über externe, teils über innerhalb des Gehäuses befindliche Sensoren. Die Messgeräte wurden allesamt unmittelbar an den vorgesehenen Messstellen positioniert, Verlängerungsmöglichkeiten der externen Sensoren wurden nicht genutzt. Zur Reproduktion bzw. gleichen Anordnung an allen Versuchstagen wurden dementsprechende Positionsmarkierungen vorgenommen.

Zur Messung der Zulufttemperatur (Untersuchungsschritt 2: Messungen bei Verdunstung von Isopropanol) wurde der entsprechende Messfühler unterhalb von Zuluftöffnung 2 aufgehängt, vgl. Anhang L, Abb. L.3. Zuvor wurde in Überprüfungen festgestellt, dass die Zulufttemperatur beider Lüftungsöffnungen gleiche Werte aufwies, da beide Öffnungen auch von einer zentralen Lüftungseinheit angesteuert werden.

Entgegen den ursprünglichen Planungen wurde die Zulufttemperatur erst mit Beginn des zweiten Tages mit Versuchen zur Verdunstung von Isopropanol erfasst. In den Versuchen 2001 bis einschließlich 2005 erfolgte ein Einsatz des externen Messfühlers dagegen fälschlicherweise an gleicher Position wie während der vor vorhergehenden Versuche zur Propan-Emission. Der weitere Umgang mit dieser Datenlücke ist in Abschnitt 2.3, S. 16 beschrieben.

Lüftungsbedingungen

Die versuchsspezifischen Lüftungsbedingungen sind durch die Volumenströme von Zu- und Abluft innerhalb des Versuchsraums sowie die Auswirkung der Abluftführung der beiden angrenzenden Lagerräume über Undichtigkeiten der jeweils geschlossenen Türen (insbesondere Türspalt zum Fussboden) gekennzeichnet. Mit der Strömungsmesshaube „Modulare Volumenstrom-Messhaube Model 8375 Accubalance“, Fa. TSI Inc., bestand die Möglichkeit, den Volumenstrom einer durchströmten Fläche zu ermitteln, indem das Messgerät möglichst dichtschießend vor der Öffnung platziert wird.

Wie im Validierungskonzept dargelegt, war aufgrund des Messprinzips und der gerätespezifischen Konstruktion eine dauerhafte Messung der Lüftungsbedingungen nicht möglich. Die Luftführung der Zu- und Abluft würde massiv beeinträchtigt werden, was die Verfälschung der Modellsituation gegenüber möglichen praxisorientierten Tätigkeiten verfälscht. Da weiterhin in den angrenzenden Lagerräumen kein ausreichender Platz für regelmäßige Messungen (vor Beginn und nach Ende jedes Versuchs) zur Verfügung stand, konnten lediglich Volumenströme der Zu- und Abluftöffnungen des Versuchsraums, jeweils unmittelbar vor Beginn und nach Beendigung der Versuche, ermittelt werden.

Bei den Messungen wurde darauf geachtet, die Strömungsmesshaube dichtschießende auf die

Lüftungsöffnungen aufzusetzen. Es wurde festgestellt, dass die Volumenströme nicht konstant, sondern mit Beträgen von bis zu ca. $30 \text{ m}^3/\text{h}$ um einen Mittelwert schwanken; der Mittelwert war ebenfalls für verschiedene Messungen (z.B. an unterschiedlichen Versuchstagen) nicht konstant. Dementsprechend wurde bei den Messungen der Mittelwert erfasst und für die Berechnungen dokumentiert. Schwankungen während der Versuchsdauer konnten jedoch nicht detailliert festgestellt werden.

Aus der Annahme, dass die Lüftungsverhältnisse dem allgemeinen Erhaltungssatz entsprechen und kein dauerhafter Über- oder Unterdruck entsteht - ein- und ausgehende Volumenströme müssen jeweils in Summe gleich hoch sein - wurde die Wirksamkeit der Abluftöffnungen der Lagerräume abgeschätzt. Es wurde festgestellt, dass in allen Messungen die Summe der Zuluftvolumenströme (teils deutlich) über dem ermittelten Abluftvolumenstrom des Versuchsraums lag, so dass von einem entsprechenden Ausgleich über die Lagerräume auszugehen war. Orientierende Messungen der Abluftführungen in den Lagerräumen bestätigten diese Annahme, so dass bei Berücksichtigung der Volumenstrom-Mittelwerte aller Lüftungsöffnungen der druckneutrale Ausgleich bestand. In den Lagerräumen sind jeweils zwei unterschiedliche Typen an Abluftöffnungen installiert (bei identischer Ausstattung der Räume), deren Auslässe verschieden gestaltet sind. Die Abluft-Volumenströme dieser Öffnungstypen korrelieren mit einem Faktor von 1,29. Aus diesen Zusammenhängen leitet sich für die Abluftöffnungen der Lagerräume die in Gl. 2.2.1.2 dargestellte Abschätzung ab. Aus dem Verhältnis können die Volumenströme je Lagerraum sowie die Relation der Abluftöffnungen zueinander bestimmt werden.

$$0 = \sum \dot{V}_{Zu} - \dot{V}_{Ab,VR} - 2 \cdot \sum \left(\dot{V}_{Ab,LT1} - \frac{\dot{V}_{Ab,LT2}}{1,29} \right) \quad (2.1)$$

Hinweis:

Nach Maßgabe der Sicherheitskonzepte⁵ wurde die Luftgeschwindigkeit oberhalb der Emissionsstellen vor dem Versuchsbeginn ermittelt. Die Geschwindigkeiten wurden nicht detailliert erfasst, lagen i.d.R. jedoch im Bereich von ca. 0,00 bis 0,15 m/s. Bei ausgeschalteter Lüftungsanlage wurden keine Geschwindigkeiten festgestellt, die innerhalb des Messbereichs (beginnend bei 0,01 m/s) lagen.

Massenverluste

Zur Ermittlung der Massenverluste infolge der Stoffemission wurden die genannten Waagen verwendet. Bei der Propanemission wurden vor und nach den Messungen die Gesamtmassen der eingesetzten Kleinstflasche bestimmt. Vor dem ersten Einsatz wurde als Leermasse ein Gewicht von 1.170 g festgestellt. Die Ermittlung des Massenverlustes (und damit der je Versuch freigesetzten Propan-Masse) erfolgte durch Differenzmessungen vorgenommen, ebenso wurden die Nachfüllungen der Kleinstflasche dokumentiert.

Vor Beginn jedes Versuchs zur Isopropanol-Verdunstung wurde für die verwendeten Tablett die Leermasse ermittelt und nach Einfüllen der Flüssigkeit die Gesamtmasse festgestellt, die Flüssigkeitsmasse wurde zurückberechnet. Nach Versuchsende wurde erneut die Gesamtmasse gewogen, eine unmittelbare Messung der Flüssigkeit war nicht möglich. Der Massenverlust wurde ebenfalls aus Differenzbetrachtungen ermittelt.

Luftkonzentrationen

Zur Messung der Luftkonzentrationen von Propan bzw. Isopropanol-Dämpfen wurden Flammen-Ionisations-Detektoren (FID) eingesetzt. Die Funktionsweise der Detektoren basiert auf einem thermischen Messprinzip, so dass die Messgeräte aus Sicht des Explosionsschutzes eine wirksame Zündquelle darstellen. Gemäß den Ausführungen der Sicherheitskonzepte wurden zum

⁵ vgl. Anhang C

Ausschluss einer Explosionsgefahr die FID außerhalb des Versuchsraums in einem Vorraum aufgestellt und betrieben.

Um die ortsabhängigen Luftkonzentrationen an verschiedenen Stellen erfassen zu können, musste eine geeignete Verbindung zwischen den eigentlichen Messpunkten innerhalb des Versuchsraums und den Messgeräten, in denen die Messkammern angeordnet sind, geschaffen werden. Entsprechend der üblichen Praxis sowie der Gerätebeschreibung wurde je FID ein Verlängerungsschlauch installiert. Das Material der Schläuche ist inerter, nicht mit den Versuchsstoffen chemisch reagierender Kunststoff⁶, die Schlauchlänge betrug jeweils 5,00 m. Die offenen Enden der Schlauchleitungen stellen die Messpunkte dar, wobei die Öffnungen in Richtung der zu erwartenden Strömung orientiert wurden⁷. Die Schlauchenden wurden mit handelsüblichen Laborstativen positioniert und ausgerichtet (vgl. Anhang L, diverse Abbildungen).

Um mögliche Verzögerungen durch die Schlauchlängen und ggf. entstehende Abweichungen hierdurch zwischen den gemessenen Werten in die Betrachtungen einzubinden, wurden im Vorfeld der Versuche probeweise Totzeiten und zeitliche Abweichungen zueinander untersucht: Die drei Schläuche wurden dazu gleichzeitig an einer Position installiert und Konzentrationsmessungen im Vergleich der FID gegeneinander vorgenommen (hierdurch erfolgte eine praktische Ergänzung der Kalibrierung der Messgeräte). Dabei wurde festgestellt, dass Verzögerungen nach Beginn der Stofffreisetzung lediglich im Bereich weniger Sekunden liegen, jedoch über verschiedene Tests hinweg nicht einheitlich auftreten. Wesentlichen Einfluss bildete hierbei die Kombination von schwankenden Freisetzung-Massenströmen und Umgebungsbedingungen. Generell wurden daher die über die verschiedenen FID gleich großen Verzögerungen für die einzelnen Versuche idealisiert vernachlässigt.

Im Zuge der Versuche wurden unterschiedliche Messpunkte realisiert. Einerseits wurde in jedem Versuch die Luftkonzentration im Atembereich der anwesenden Person (ständiger bzw. gleichbleibender Aufenthaltsort gemäß Validierungskonzept⁸) erfasst, so dass ein konstanter Messpunkt installiert wurde. Die übrigen Messpunkte wurden nicht im Vorfeld geplant, sondern während der Versuche aufgrund zu erwartender Strömungstendenzen, vor dem Hintergrund von Vorbetrachtungen und aus Abschätzung kritischer Bereiche und der Abgrenzung anderer Raumbereiche festgelegt. Die Positionierung der Messstellen wurde bei unterschiedlichen Variationen der Versuche (bspw. Veränderung der Lüftungsbedingungen, vgl. Kap. 2.2.2) beibehalten. Tabelle 2.1 fasst die verschiedenen Messpunkte für die Versuche mit Propan und Isopropanol zusammen, ohne auf die konkrete Zuordnung zu einzelnen Versuchen einzugehen.

Name	Atem	1	2	3	4	5	6	7	8	
Propan	x^9 [m]	2,80	4,00	4,15	1,20	5,20	2,40	4,60	5,20	1,55
	y^{10} [m]	2,30	1,00	2,35	1,20	3,25	3,30	2,35	2,70	3,05
	z^{11} [m]	1,60	0,20	1,90	0,20	0,30	0,95	0,65	0,30	0,30
Isopropanol	x [m]	2,80	3,90	4,75	5,20	1,20	2,30	4,00	5,20	4,60
	y [m]	2,30	2,20	1,00	2,70	1,20	3,10	1,20	3,35	2,35

⁶ Genaue Angaben zum Konstruktionsmaterial der Schläuche liegen nicht vor, diese werden jedoch für den allgemeinen messtechnischen Einsatz hergestellt und vertrieben sowie in der messtechnischen Praxis der Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege verwendet.

⁷ Bei einer der Strömung abgewandten Anordnung muss davon ausgegangen werden, dass Verfälschungen der Messwerte (Unterschätzung) entstehen können. Dies kann auftreten, falls die Ansaugleistung der FID, die an den Schlauchenden vorliegt, nicht ausreichend hoch ist, um vorhandene Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen zu beeinflussen.

⁸ vgl. Anhang B

⁹ Abstand „vordere“ Wand entsprechend Validierungskonzept, Anhang B

¹⁰ Abstand „linke“ Wand entsprechend Validierungskonzept, Anhang B

¹¹ Höhe über Fussboden entsprechend Validierungskonzept, Anhang B

z [m]	1,60	1,60	0,65	0,70	0,20	1,00	0,20	0,30	0,65
-------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Tabelle 2.1: Zusammenfassung der Positionierung von Messpunkten

2.2.2 Versuchsdurchführung

Über die Vorplanungen des Validierungskonzepts (vgl. Anhang B) hinaus wurden in den Versuchen verschiedene grundlegende Arbeiten (z.B. Kalibrierung) durchgeführt und Rahmenbedingungen geschaffen bzw. dokumentiert, die auf den Einzelfall beschränkt sind. Die nachfolgenden Abschnitte bilden die Auswertung und Zusammenfassung der verschiedenen Versuchsprotokolle.

2.2.2.1 Kalibrierung der Flammen-Ionisations-Detektoren (FID) zur Konzentrationsmessung

Zur Durchführung der Messungen standen 3 FID zur Verfügung, deren regelmäßige Kalibrierung und Kontrolle erforderlich war. Dies erfolgt mit definierten Prüfgasen, um den Messbereich entsprechend zu justieren. Nach der anfänglichen Überprüfung zur Nutzung der Verlängerungsschläuche wurden diese in die täglichen Kalibrierungen nicht einbezogen, sondern die bekannten Prüfkonzentrationen unmittelbar in das Messsystem eingegeben. Hierzu ist an den Geräten ein entsprechender Anschluss vorgesehen.

Die FID wurden jeweils einzeln kalibriert und dabei - durch die Verwendung gleicher Kalibrierkonzentrationen - gegeneinander abgestimmt. Es sollte ein gleichzeitiger Messeinsatz ermöglicht werden, bei dem die jeweils gemessenen Werte einzeln richtig erfasst werden und zueinander in korrekten Verhältnissen stehen.

Für die Versuche zur Emission und Ausbreitung von Propan (Untersuchungsschritt 1) konnte die Kalibrierung mit standardisiertem Prüfgas vorgenommen werden, das über den Fachhandel verfügbar ist. Die genutzte Prüfgasflasche verfügte über eine Propan-Konzentration von 84 ppm, mit der Messbereiche und -werte der FID kalibriert und aufeinander abgestimmt wurden.

Für die Versuche zur Isopropanol-Verdunstung musste das Prüfgas in der unmittelbaren Versuchsvorbereitung hergestellt werden. Dies erfolgte durch Verdampfung einer definierten Isopropanolmasse in Luftsäcke mit einem Volumen von 10l. Über einen bekannten Volumenstrom des Verdampfers sowie entsprechende Zeiteinstellung der Förderung wurde sichergestellt, dass das Volumen nahezu vollständig mit dem Luft-Isopropanol-Gemisch gefüllt wurde. Im Anschluss wurde die Konzentration mittels photoakustischer Infrarot-Spektroskopie kontrolliert¹².

Die Kalibrierungen wurden jeweils mit zwei Luftsäcken unterschiedlicher Isopropanol-Konzentrationen durchgeführt, die am entsprechenden Versuchstag hergestellt wurden. Durch die Verwendung von zwei Kalibrierkonzentrationen sollten ggf. eintretende Ungenauigkeit bei der Herstellung festgestellt und ausgeglichen werden. Die Eingabe erfolgte ebenfalls unter Vernachlässigung der genutzten Verlängerungsschläuche unmittelbar in die Messgeräte. An den unterschiedlichen Versuchstagen wurden die in Tabelle 2.2 aufgeführten Isopropanol-Konzentrationen erstellt und genutzt.

Versuchstag	10.12.2014	12.12.2014	13.12.2014
Kalibrierkonz. 1 [ppm]	48,0	39,9	45,9
Kalibrierkonz. 2 [ppm]	100,0	88,8	92,9

Tabelle 2.2: Isopropanol-Konzentrationen zur FID-Kalibrierung

¹² vgl. Anhang B

2.2.2.2 Gestaltung des Versuchsraums

Im Validierungskonzept sind die allgemeinen geometrischen Bedingungen des Versuchsraums aufgeführt. Darüber hinaus sind folgende Gegenstände im zugehörigen Arbeitssystem aufgeführt, deren Verbleib im Versuchsraum während der Messungen nicht im Vorfeld festgelegt wurde:

- Bücher und Büromaterial auf Arbeitstischen und Regalen,
- Bücher auf Ablage des zentralen Labortisches,
- mobiler Arbeitstisch mit Computer-Ausstattung (PC, Monitor, Tastatur, Maus) und Büromaterial,
- Druckertisch samt Drucker und
- Abfallbehälter.

Mit Ausnahme des Abfallbehälters verblieben die genannten Gegenstände bei allen Versuchen zur Propan- und Isopropanol-Freisetzung an den genannten Positionen im Versuchsraum. Der Abfallbehälter wurde nur bei Versuchen zur Verdunstung von Isopropanol aufgestellt.

2.2.2.3 Personenaufenthalt

Entsprechend der Planungen hielt sich während aller Propan-Versuche eine Person im Versuchsraum an der vordefinierten Position auf, dabei erfolgte die Kontrolle und Steuerung der Gasfreisetzung. Positionswechsel während der Versuche wurden nicht durchgeführt.

Für die Versuche zur Verdunstung von Isopropanol wurde ebenfalls die Vorgabe des Validierungskonzepts umgesetzt, i.A. hielt sich während der Versuche eine Person an der festgelegten Position im Versuchsraum auf. Von dieser Vorgabe wurden 2 Abweichungen getroffen bzw. erforderlich:

1. Es wurde festgestellt, dass sich mit fortschreitender Verdunstung ggf. die wirksame Flüssigkeitsoberfläche verringerte (vgl. Kap. 2.2.1.1, Pkt. „Flüssigkeitsverdunstung: Isopropanol“). Sofern die Emissionsfläche unmittelbar vom Aufenthaltsort der Person erreicht werden konnte, wurden keine Ortswechsel durchgeführt. Konnten die Flächen nicht unmittelbar erreicht werden, wurde zur erneuten Verteilung der Flüssigkeit kurzfristig ein Ortswechsel vorgenommen, im Anschluss wurde die vorgegebene Position wieder eingenommen.
2. Für verschiedene Versuchs- bzw. Messkonstellationen wurde eine Verdunstung ohne Personenaufenthalt durchgeführt, um dessen Effekt in den Betrachtungen ebenfalls abzubilden.

Die entstehenden Bewegungen waren lediglich kurzfristig und nicht genau zu erfassen, eine Abbildung in Ausbreitungsrechnungen ist nicht möglich. Zu diesen nicht abgebildeten Bewegungen zählen auch kurzzeitige Bewegungen zu Beginn jedes Verdunstungsversuchs, da die Tablettts bei schon beginnender Verdunstung z.T. noch ausgewogen werden und das Aufbewahrungsbehältnis (Glasflasche) für Isopropanol verschlossen werden musste. Sofern keine Kontrolltätigkeiten erforderlich waren, wurden die Versuche beobachtet und möglichst keine weiteren Bewegungen (mitsamt von Verwirbelungen) verursacht.

2.2.2.4 Lüftungsbedingungen

Ein wesentlicher Einfluss auf ortsbezogene Stoffkonzentrationen sind u.a. die vorhandenen Lüftungsbedingungen. Neben den nicht gezielten Schwankungen, die für Zu- und Abluft messtechnisch festgestellt wurden (vgl. Kap. 2.2.1.2, Pkt. „Lüftungsbedingungen“), sollte der Luftaustausch bzw. die Luftführung auch gezielt beeinflusst werden.

Bei der abschließenden Vorbesichtigung des Versuchsraums wurde festgestellt, dass die Auslässe der Zuluftöffnungen mit sog. Drallkörpern versehen sind. Ziel dieser Einbauten ist das Hervorrufen einer Eigenrotation der Zuluft, um eine günstigere Verteilung der Zuluft bei gleichzeitig geringerem Geschwindigkeitsempfinden (Vermeidung von Zugluft) für anwesende Personen zu erreichen. Problematisch ist diese Luftführung für die messtechnische Erfassung des Zuluftvolumenstroms mittels Strömungsmesshaube, da durch die Rotation unregelmäßige Verwirbelungen auftreten und ein genaues Messergebnis nicht zu erzielen ist.

Für die Versuchsdurchführung wurden die Drallkörper aus den Zuluftöffnungen ausgebaut, so dass die Zuluft ohne Rotation durch die kreisförmig angeordneten Schlitzauslässe in den Raum geführt wurde (vgl. Abb. L.3). Die Messung der Volumenströme konnte hierdurch mit der Strömungsmesshaube durchgeführt werden.

Entsprechend der Vorplanungen des Validierungskonzepts wurde die Lüftungsanlage im Normalzustand betrieben oder - für Messungen zur Isopropanol-Verdunstung - abgeschaltet. Die vorgeschlagene Einschränkung der Zuluftöffnungen wurde mit luftundurchlässigen Hart-Schaumstoffplatten (aus dem Akkustikbau) realisiert, die mit doppelseitigem Klebeband fixiert wurden (vgl. Anhang L, Abb. L.4). Durch diese Einschränkung der Zuluftöffnung konnte lediglich eine geringe Veränderung der Volumenströme erreicht werden, die im Betrag in Höhe der allgemeinen Schwankungen lag. Aufgrund der geringeren zur Verfügung stehenden Fläche wurde jedoch durch die Einschränkung die Luftgeschwindigkeit und somit die Charakteristik der Luftführung wesentlich verändert.

Hinweis:

Während zwei Versuchen löste sich eine der zur Einschränkung der Zuluft installierten Platten, so dass für den Rest der Versuchsdauer die vollständige Zuluftöffnung freigegeben wurde. Der Versuch wurde dennoch zu Ende geführt und die Veränderung der Lüftung samt Zeitpunkt im Versuchsprotokoll vermerkt. Die entsprechende Änderung der Lüftungsbedingungen wurde anhand der eingangs ermittelten Volumenströme abgeschätzt und war in den zugehörigen Berechnungen zu berücksichtigen.

2.2.2.5 Versuchsgestaltung - Freisetzung von Propan

Entsprechend des Validierungskonzepts sowie der vorhergehenden Beschreibungen wurden die Versuche in einer einheitlichen Modellgeometrie durchgeführt, in der möglichst viele Rahmenbedingungen konstant gehalten oder gezielt beeinflusst wurden. Im Zuge der Versuche zur Propan-Freisetzung erfolgte die gezielte (beabsichtigt) oder nicht-gezielte (durch äußere Umstände ohne Kontrollmöglichkeit vorgegebene) Veränderung der in Tab. 2.3 aufgeführten Bedingungen.

<i>Gezielte Änderungen</i>	<i>Nicht-gezielte Änderungen</i>
Emissionsposition; Position Konzentrationsmessung; Einschränkung Zuluftflächen;	Emissions-Massenstrom; Lufttemperatur und -druck, relative Luftfeuchte; Zulufttemperatur; Zu- und Abluftvolumenströme;

Tabelle 2.3: Änderungen der Versuchsbedingungen für Propan-Messungen

Aus der Kombination gezielter Änderungen ergaben sich Fallunterscheidungen, die den Versuchsrahmen darstellen. Ausnahme bildeten die Wechsel der Messpunkte der Luftkonzentrationen, die nacheinander variiert wurden. Der Versuchsrahmen samt der wechselnden Messpunkte wurde durch die nicht-gezielten Veränderungen in sich unterteilt, die in den Versuchsprotokollen erfasst wurden. Durch die nicht-gezielten Variationen sind die Messwerte unterschiedlicher Durchgänge nicht miteinander vergleichbar, konkret beabsichtigte Wiederholungsmessungen (z.B. mit Temperaturänderungen) waren nicht möglich.

In Anhang D sind die Versuchsprotokolle für die Messungen zu Freisetzung und Ausbreitung von Propan zusammengefasst. Die Übersicht umfasst

- die eindeutige Benennung (Führungsziffer „10“ mit fortlaufender Nummer für Propan-Messreihe);
- die generelle Fallunterscheidung (farbliche Markierung) sowie
- die jeweils ermittelten nichtgezielten Rahmen- bzw. Umgebungsbedingungen der einzelnen Versuche, teils zu Beginn und zum Ende der Versuchsdauer.

2.2.2.6 Versuchsgestaltung - Freisetzung von Isopropanol

Ebenfalls aus den örtlichen Gegebenheiten und der grundlegenden Planung der Untersuchungen im Validierungskonzept unterlagen die Versuche mit Isopropanol verschiedenen gezielten und nicht-gezielten Änderungen, die in die Versuchsaufbauten und -ergebnisse einfließen. Tab. 2.4 stellt die Rahmenbedingungen und Versuchsparameter dar.

<i>Gezielte Änderungen</i>	<i>Nicht-gezielte Änderungen</i>
Emissionsposition; Größe Emissionsfläche; Position Konzentrationsmessung; Betrieb Lüftungsanlage; Personenaufenthalt;	Emissions-Massenstrom; Lufttemperatur und -druck, relative Luftfeuchte; Zulufttemperatur; Zu- und Abluftvolumenströme;

Tabelle 2.4: Änderungen der Versuchsbedingungen für Isopropanol-Messungen

Die sich aus der Verknüpfung der Veränderungen ergebenden Fallunterscheidungen sind in Anhang E dargestellt. Die Zusammenfassung entspricht der Darstellung der Rahmenbedingungen für die Versuche zur Freisetzung von Propan, erweitert um die Angabe des Personenaufenthalts.

2.2.2.7 Besonderheiten und Abweichungen bei der Versuchsdurchführung

Während der Durchführung verschiedener Versuchsläufe sind Besonderheiten aufgetreten, welche die Messungen bzw. die Ergebnisermittlung beeinflusst haben. Entsprechend der Versuchsdokumentationen müssen für die Berechnungen bzw. bei der Aus- und Bewertung der Ergebnisse die nachfolgenden besonderen Bedingungen einbezogen werden:

<i>Versuch</i>	<i>Merkmal</i>	<i>Beschreibung</i>
1006	Ausfall FID	Ausfall eines FID aufgrund verbrauchten Brenngases (für Messprinzip erforderlich), Zeitpunkt des Ausfalls bzw. Richtigkeit der noch erfassten Werte unklar

1007 1008 1010 1011 1012 1013 1014 1015 1016 1017 1018	Beschränkung Konzentrationsmessung auf 2 Messpunkte	Beschränkung auf 2 Messpunkte aufgrund des o.g. FID-Ausfalls, Messwertermittlung in Atembereich sowie einzeln an weiterer Position Folge: erhöhte Anzahl an Versuchen, Beschränkung von Konzentrationsvergleichen innerhalb eines Versuchs
1009	Störung der Propan-Emission	Störung der Propan-Emission mit verstärkter Stofffreisetzung, Versuchsabbruch aus Sicherheitsgründen; keine weitere Berücksichtigung für Berechnungen ¹³ und Wiederholung der Messaufbauten in Versuch 1010
1016	Abfallen der Zuluft-Einschränkung	Lösen bzw. Herunterfallen der zum teilweisen Verschluss der Zuluftöffnung 2 verwendeten Platte nach 452 s des Versuchs, im Anschluss Nutzung der uneingeschränkten Zuluftfläche für Restdauer des Versuchs von 1.348 s
1022	Fehlerhafte Protokollierung Konzentrationsmessung	Keine Dokumentation gemessener Konzentrationen durch Bedienungsfehler, Abbruch und Wiederholung des Versuchs unter gleicher Versuchsnummer ¹⁴
1022	Abfallen der Zuluft-Einschränkung	Lösen bzw. Herunterfallen der zum teilweisen Verschluss der Zuluftöffnung 1 verwendeten Platte nach 1.013 s des Versuchs, im Anschluss Nutzung der uneingeschränkten Zuluftfläche für Restdauer des Versuchs von 787 s

Tabelle 2.5: Besondere Merkmale einzelner Versuche

2.3 Durchführung von Berechnungen

Aufbauend auf den ermittelten Rahmenbedingungen der unterschiedlichen Versuche wurden die Berechnungen zur Expositionsabschätzung unter Anwendung des gesamten bzw. einzelner Module des neu konzipierten Berechnungsverfahrens durchgeführt. Die Module des konzeptionellen Verfahrensaufbaus wurden dazufolgendermaßen untergliedert und umgesetzt:

Modul: Informationsermittlung

Verwendung des im Validierungskonzept¹⁵ aufgeführten Arbeitssystems, ergänzende Berücksichtigung der gezielt und nicht-gezielt veränderten Rahmenbedingungen und Besonderheiten der verschiedenen Versuche (sofern nicht geplant oder den vorgesehenen Parametern widersprechend, vgl. Abschnitte 2.2.1 und 2.2.2)

Modul: Erfassung Stoffemission

- Untersuchungsschritt 1:
Verwendung des in Versuchen ermittelten Emissions-Massenstroms, keine Berechnung erforderlich
- Untersuchungsschritt 2:

¹³ Auf die Darstellung der Rahmenbedingungen in Anhang D wird aus diesem Grund verzichtet.

¹⁴ Die in Anhang D aufgeführten Bedingungen gelten für die Versuchswiederholung.

¹⁵ vgl. Anhang B

- *1. Abschnitt:*
Verwendung des in Versuchen ermittelten Emissions-Massenstroms, keine Berechnung erforderlich
- *2. Abschnitt:*
vorgangsbezogene Auswahl und Verwendung der Verdunstungsmodelle nach Mackay und Matsugu bzw. Weidlich und Gmehling, Vorbetrachtung mit Ausbreitungsmodell ohne Stofffreisetzung

Modul: Erfassung Stoffausbreitung

Parametrisierung Ausbreitungsmodell entsprechend Arbeitssystem und mit ggf. errechneten Emissions-Massenströmen unter Anwendung der im Validierungskonzept dargelegten Diskretisierung der Versuchsraums; Berücksichtigung von Besonderheiten einzelner Versuche

Modul: Bewertung Arbeitsbedingungen

generelle Feststellung der Schnittstellen-Kompatibilität in Bewertungsschritt der Validierungsuntersuchungen, jedoch kein Grenzwertvergleich bzw. keine Vergleiche zur Dimensionierung von Arbeitsbedingungen

Entsprechend der methodischen Untersuchungsschritte sowie der Emissions-Abschätzung in Untersuchungsschritt 2 wurden verschiedene Berechnungsdurchläufe durchgeführt: Für die verschiedenen Versuche wurden Berechnungen zur Stoffausbreitung umgesetzt (Modul: Erfassung Stoffausbreitung). Die Verdunstungsmodelle nach Mackay / Matsugu sowie nach Weidlich / Gmehling, die im 2. Untersuchungsschritt zur Emissions-Abschätzung parallel angewendet wurden, benötigen als Eingangsparameter die Strömungsgeschwindigkeit oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche. Die Geschwindigkeit wurde entsprechend des Gesamtkonzepts mit Hilfe des Ausbreitungsmodells, jedoch ohne Parametrisierung der Stoffemission, rechnerisch ermittelt (Vorbetrachtung) und in die Verdunstungsmodelle übernommen.

Ein wesentlicher (zeitabhängiger) Eingangsparameter für die Verdunstungsmodelle ist die Strömungsgeschwindigkeit über der Flüssigkeitsoberfläche, weiterhin ist die Überströmungslänge relevant. Mit quantitativer Zunahme der Parameter geht eine Erhöhung des berechneten Emissions-Massenstroms einher. Im Sinne einer Worst-Case-Abschätzung wird daher die Längsrichtung der verwendeten Tablett, d.h. die größere Kantenlänge (in Ausbreitung- bzw. Geschwindigkeitsrechnung: X-Richtung), in den Abschätzungen berücksichtigt und mit der richtungsbezogenen Geschwindigkeit der Vorberechnung (X-Komponente) verknüpft. Für die Verdunstungsberechnung ist es unerheblich, in welche Richtung über die Längsachse hinweg die Strömungsgeschwindigkeit wirksam ist (positive oder negative X-Komponente). Aus den Vorbetrachtungen wurden daher je Tablett die Beträge der Geschwindigkeiten in die Emissionsberechnungen übernommen.

Die berechneten Luftgeschwindigkeiten über den Flüssigkeitsoberflächen lagen i.d.R. und mit wenigen Ausnahmen im Bereich von weniger als $0,20 \text{ m/s}$. Trotz Beachtung der experimentellen Anwendungsgrenzen beider Verdunstungsmodelle (Mackay und Matsugu: $0,00 - 6,70 \text{ m/s}$; Weidlich und Gmehling: $0,20 - 0,70 \text{ m/s}$) wurden vergleichende Berechnungen beider Ansätze ausgeführt. In den üblichen Geschwindigkeitsfällen, dass der Anwendungsbereich des Modells nach Weidlich / Gmehling nicht erreicht wurde, erfolgte die Berücksichtigung der Berechnungsergebnisse des Modells nach Mackay / Matsugu (im Berechnungsverfahren: Zwischenergebnisse zur Stofffreisetzung, Übernahme in Modul zur Erfassung der Stoffausbreitung). In den übrigen Fällen wurde ein Vergleich der berechneten Massenströme durchgeführt und im Sinne einer Worst-Case-Abschätzung der größere Wert in die Berechnungen zur Stoffausbreitung übernommen.

Bedingt durch Eingabeparameter des Ausbreitungsmodells ist die Verknüpfung zwischen Abschätzung bzw. Berechnung der Stofffreisetzung und der Berechnung der Stoffausbreitung der flächenbezogene Emissions-Massenstrom in $[kg/(s m^2)]$. Die Parametrisierung des zu berücksichtigenden Emissions-Massenstroms in $[kg/s]$ ergibt sich aus der Festlegung einer entsprechenden Emissionsfläche in $[m^2]$, korrespondierende strömungsmechanische Parameter (z.B. Strömungsgeschwindigkeit und dynamischer Druck) werden aus diesen Größen in Verbindung mit den Umgebungsbedingungen (bspw. Temperatur und lokale Dichte) durch das Modell abgeleitet. Die Spezifizierung der Emissionsfläche kann lediglich rechteckig erfolgen, die Seitenlängen müssen dabei einem Vielfachen der gewählten Diskretisierung (hier: $0,05 m$) entsprechen. Für die Untersuchung ergibt sich somit als kleinstmögliche Emissionsfläche $0,0025 m^2$ (entspricht $25 cm^2$) mit Seitenlängen von jeweils $0,05 m$.

In Untersuchungsschritt 1 erfolgte die Propan-Freisetzung über einen Schlauch mit rundem Querschnitt und einer Fläche von $0,3117 cm^2$. Die Emissionsgeometrie konnte dementsprechend durch das Ausbreitungsmodell nicht abgebildet werden. Daher wurde als Emissionsfläche der kleinstmögliche, rechteckige Querschnitt von $25 cm^2$ gewählt, der somit eine Äquivalenzfläche bildet. Die verwendeten Tablett als Emissionsflächen des Untersuchungsschritts 2 waren dagegen rechteckig (Kantenlängen $0,38 m$ und $0,30 m$) mit einer Fläche von jeweils $0,114 m^2$. Diese wurden in der Parametrisierung der Ausbreitungsrechnungen auf Kantenlängen von $0,40 m$ und $0,30 m$ (entspricht $0,12 m^2$) gerundet und anhand entsprechender Flächenbezüge berücksichtigt.

Aufgrund dieser modellbedingten Systematik bzw. Einschränkung wurden die gemessenen und berechneten Emissions-Massenströme so umgerechnet, dass in Verbindung mit der jeweiligen Emissions- bzw. Äquivalenzfläche die ursprüngliche Gesamtemission über 30 Minuten (Messung, vgl. Formel 2.2) bzw. der Gesamt-Massenstrom (Berechnung, vgl. Formel 2.3 und 2.4 für Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu bzw. Weidlich und Gmehling) erreicht wird:

$$\dot{m}_{FDS}^{||} [kg/(s m^2)] = \frac{\dot{m}_{Mess,30min} [g/30min]}{(1.800 [s/30min] \cdot A_{FDS} [m^2])} \quad (2.2)$$

$$\dot{m}_{FDS}^{||} [kg/(s m^2)] = \frac{(\dot{m}_{Rech,MM} [g/(cm^2 s)] \cdot 10.000 [cm^2/m^2])}{1.000 [g/kg]} \quad (2.3)$$

$$\dot{m}_{FDS}^{||} [kg/(s m^2)] = \frac{\dot{m}_{Rech,WG} [g/h]}{(1.000 [g/kg] \cdot 3.600 [s/h] \cdot A_{FDS} [m^2])} \quad (2.4)$$

Für die Versuche wurden die Emissions-Massenströme als zeitgemittelte Werte über 30 Minuten erfasst. Zum unmittelbaren Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Emissions-Massenströmen in Untersuchungsschritt 2 wurden die Emissions-Berechnungen ebenfalls auf zeitlich-gemittelte Werte abgestellt. Dabei wurde die nachstehende Systematik angewendet, welche die obenstehenden Formulierungen einbeziehen:

- Ermittlung zeitabhängige Luftgeschwindigkeit über Emissionsfläche durch Anwendung Ausbreitungsmodell ohne Parametrisierung einer Emission (Zeitschrittweite Ergebnisausgabe: $1 s$), zusätzlich Erfassung der zeitabhängigen Temperaturentwicklung,
- Bildung Betrag und Übertrag ermittelter Luftgeschwindigkeiten und Temperaturen in Tabellenkalkulation mit Umsetzung der Verdunstungsmodelle (Abstellung Berechnungsgleichung auf zeitabhängige Luftgeschwindigkeit und Temperatur),
- Berechnung zeitabhängiger, Verdunstungsmodell-spezifischer Emissions-Massenströme mit vorgesehener Einheit des Ergebnisses,

- zeitabhängige Umrechnung der Verdunstungsmodell-spezifischen Emissions-Massenströme entsprechend Formel 2.3 bzw. 2.4,
- Ermittlung Mittelwert der Emissions-Massenströme aus umgerechneten, zeitabhängigen und flächenbezogenen Emissions-Massenströmen,
- Umrechnung Mittelwert auf emittierte Gesamtmasse in 30 Minuten durch Umformulierung Formel 2.2 nach $\dot{m}_{Mess,30min}$.

Entsprechend der durchgeführten Messaufbauten und -konzeptionen wurden die thermodynamischen Umgebungsbedingungen (Umgebungs- und Zulufttemperatur, Umgebungsdruck und relative Luftfeuchte) teils kontinuierlich, teils als Einzelwerte zu Beginn und zum Ende der einzelnen Versuche erfasst. Die Messgrößen umfassten jedoch lediglich punktuelle Werte innerhalb des Versuchsraums, das Ausbreitungsmodells erfordert dagegen die Verwendung als globaler Eingangswert für das gesamte Berechnungsfeld.

Für die Berechnungen ist die Vorgabe von Anfangsbedingungen notwendig, der weitere zeitabhängige Verlauf wird durch das Modell unter Berücksichtigung der Zusammenwirkung verschiedenen Rahmenbedingungen berechnet. Aus den Messwerten musste dementsprechend ein globaler Einzelwert zur weiteren Verwendung festgelegt werden.

Wie in Abschnitt 2.2.1.2 beschrieben wurde die Zulufttemperatur in den Versuchen 2001 bis einschließlich 2005 fälschlicherweise nicht erfasst. Da die Messergebnisse nicht verworfen werden sollten und in den im Anschluss durchgeführten Versuchen näherungsweise ähnliche Bedingungen herrschten, erfolgte eine Abschätzung der fehlenden Angaben aus den Erfahrungen zur Relation von Umgebungs- und Zulufttemperatur. Dieses Vorgehen wurde u.a. auch vor dem Hintergrund gewählt, dass in der betrieblichen Praxis bei einem möglichen Einsatz des Berechnungsverfahrens nicht alle Eingangsparameter bekannt und daher abzuschätzen sind. Auf diese Weise wurde die Praktikabilität dieses Vorgehens in die Untersuchungen integriert.

Die Überführung der gemessenen Umgebungsbedingungen bzw. deren Abschätzung folgte der in Tab. 2.6 dargestellten Systematik zur Bestimmung der relevanten Anfangsbedingungen für Berechnungen.

Parameter	Systematik	Begründung
Umgebungs-temperatur ¹⁶	Abschätzung aus ermittelten Anfangs- und Endwerten sowie für Propan-Versuche aus Relation beider Messstellen ¹⁷ ; Berechnung des zeitabhängigen Verlaufs unter Berücksichtigung der Umgebungs- und Einflussbedingungen (z.B. Wärmeemission Personenaufenthalt)	Vorgabe des zeitabhängigen Verlaufs nicht praxismäßig; Verwendung des berechneten Temperaturverlaufs als zusätzliches qualitatives Vergleichskriterium ¹⁸ (insbesondere Beurteilung einbezogener Lüftungsbedingungen und Zulufttemperaturen)
Umgebungsdruck	Übernahme Wert zu Versuchsbeginn als Anfangsbedingung	keine bzw. minimale Veränderungen über Versuchsdauer hinweg gemessen, Unterstellung homogener Bedingungen aufgrund stichprobenartiger Überprüfungen
Relative Luftfeuchte	Übernahme Wert zu Versuchsbeginn als Anfangsbedingung	keine bzw. minimale Veränderung über Versuchsdauer hinweg gemessen

¹⁶ Für die Abschätzung der Isopropanol-Emission mit Verdunstungsmodellen (vgl. Tab. 2.7) wurden die berechneten Umgebungstemperaturen verwendet, die auf Grundlage dieser Vorgabe für die Versuchsdauer ermittelt wurden.

¹⁷ Vorgehensweise entsprechend für Isopropanol-Versuche 2001 bis 2005, im Anschluss Abschätzung alleine aus dafür vorgesehener Messstelle.

¹⁸ Die Verwendung als quantitatives Kriterium (direkter Vergleich von Messwerten und Berechnungsergebnissen) ist nicht möglich, da sich die Ausgangswerte nicht entsprechen. Die Beurteilung beruht daher alleine auf der qualitativen Übereinstimmung der Verlaufskurven.

Zulufttemperatur	Propan: Annahme Zulufttemperatur entspricht abgeschätztem Wert der Umgebungstemperatur zu Versuchsbeginn bei konstanter Verwendung über gesamte Versuchsdauer	Versuchsdurchführung in Sommermonaten, Raumheizung außer Betrieb; Wert zu Versuchsbeginn entspricht somit thermischem Gleichgewicht unter Berücksichtigung konstanter Zulufttemperatur (Abhängigkeit zu Außentemperatur)
	Isopropanol: Übernahme ermittelter Zulufttemperatur zu Versuchsbeginn an dafür vorgesehener Messstelle bei konstanter Verwendung über gesamte Versuchsdauer für Versuche 2001 bis 2005 Vorgehen analog zu Propan-Versuchen	Versuchsdurchführung bei undefiniertem Heizbetrieb, wobei Raumtemperatur durch Zulufttemperatur beeinflusst wird; Beeinflussung der Temperaturmessung während der Versuche durch Umgebungsbedingungen und Personenaufenthalt, so dass keine Erfassung der tatsächlichen Zulufttemperatur;

Tabelle 2.6: Übersicht zur systematischen Überführung thermodynamischer Bedingungen

Wie in Kap. 2.2.1.2 bereits erwähnt, wurden während der Versuchsdurchführung sich verändernde Volumenströme der Zu- und Abluft festgestellt, die über die Messdauer nicht konstant waren und um einen Mittelwert schwankten. Da eine detaillierte Abbildung der Schwankungen innerhalb des Ausbreitungsmodells zwar prinzipiell (mit erheblichem Aufwand) möglich ist, die kontinuierliche Ermittlung vor Ort jedoch nicht möglich war, wurden die in den Übersichten¹⁹ angegebenen gemittelten Werte der verschiedenen Volumenströme für die Berechnungen berücksichtigt. Anstatt am arithmetischen Mittelwert wurden die Eingangsgrößen mit modaler Orientierung, also unter Berücksichtigung des während der Messung tendentiell am häufigsten anzutreffenden Wertebereichs, abgeleitet.

Neben diesen Veränderungen ist weiterhin die Wirksamkeit der Abluftführung aus den Nebenräumen über die Undichtigkeiten der geschlossenen Türen unklar. In der praktischen Verwendung von Berechnungsmodellen ist es nicht zielführend, nicht nachgewiesene Rahmenbedingungen für prognostische Untersuchungen zu verwenden. Vor diesem Hintergrund wurden die Lüftungsbedingungen für wiederholende Berechnungen als Sensitivitätsbetrachtungen angepasst: Die Abluftführung über die Nebenräume blieb ohne Berücksichtigung, gleichzeitig wurden die Volumenströme der Zu- und Abluftführung zur Vermeidung eines Druckgradienten zwischen Versuchsraum und Umgebung aufeinander abgestimmt (gleich hohe Ein- und Abströmung durch Absenkung der eingebrachten Zuluft). Die geringfügigen Öffnungen zum Druckausgleich über die verschiedenen Türen blieben erhalten. Zur Sensitivitätsbetrachtung wurde ergänzend im Berechnungsszenario 1004-4 die Druckausgleichsöffnungen ebenfalls verschlossen. Im Szenario 1004-5 erfolgte eine willkürliche Anpassung der Zu- und Abluft auf Gesamt-Volumenströme von je $300 \text{ m}^3/\text{h}$ bei vernachlässigter Luftführung über die Nebenräume. Die Szenarien 1007-4 und 1007-5 berücksichtigten ebenfalls eine willkürliche Reduzierung der Gesamt-Volumenströme von Zu- und Abluft auf je $360 \text{ m}^3/\text{h}$, wobei die Berechnung des Szenarios 1007-4 ohne Berücksichtigung der Nebenräume (Verschluss der Druckausgleichsöffnungen) durchgeführt wurde.

Die genannten Versuchsbedingungen und Variationen führen in den methodischen Untersuchungsschritten zu jeweils mehreren Validierungsberechnungen in unterschiedlichen Modulen des Verfahrens. Tab. 2.7 fasst die durchgeführten Berechnungen zusammen.

¹⁹ vgl. Anhänge F und G

<i>Untersuchungsschritt 1</i>	<i>Untersuchungsschritt 2</i>
<ol style="list-style-type: none"> 1. Berechnung Stoffausbreitung entsprechend der ermittelten Rahmen- und Emissionsbedingungen 2. Berechnung Stoffausbreitung unter angepassten Lüftungsbedingungen (als Sensitivitätsbetrachtungen) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Berechnung Stoffausbreitung entsprechend der ermittelten Rahmen- und Emissionsbedingungen 2. Berechnung Stoffausbreitung unter angepassten Lüftungsbedingungen (als Sensitivitätsbetrachtungen) 3. Berechnung Strömungsgeschwindigkeiten über Emissionsflächen durch Ausbreitungsmodell (ohne Stofffreisetzung) 4. Berechnung Stofffreisetzung entsprechend der ermittelten Rahmenbedingungen unter Verwendung der abgeschätzten Strömungsgeschwindigkeiten 5. Berechnung Stoffausbreitung entsprechend der ermittelten Rahmenbedingungen und unter Verwendung der berechneten Stofffreisetzung 6. Berechnung Stoffausbreitung unter angepassten Lüftungsbedingungen (als Sensitivitätsbetrachtungen) und unter Verwendung der berechneten Stofffreisetzung

Tabelle 2.7: Übersicht methodischer Berechnungen

2.4 Vergleichsstrategie

Das Validierungskonzept (siehe Anhang B) beinhaltet bereits die Vergleichsstrategie, mit der die verschiedenen Berechnungsergebnisse in Relation zu den Versuchsergebnissen gesetzt wurden. Es wurde zwischen qualitativen Vergleichen anhand graphischer Visualisierungen und einer quantitativen Gegenüberstellung samt mathematischer Bewertung unterschieden.

Die vorgeschlagene Vergleichsstrategie wurde zur Auswertung und als Grundlage der Interpretation der Untersuchungen entsprechend umgesetzt. Über den ursprünglichen Ansatz hinaus wurden folgende Ergänzungen vorgenommen:

1. Qualitativer Vergleich von Temperaturverläufen

Die Raumtemperaturen sind u.a. von Zu- und Abluft abhängig. Die jeweiligen Massen- bzw. Volumenströme bewirken dabei - je nach Verhältnis zueinander und entsprechend der Relation von Raum- und Zulufttemperatur - eine Erhöhung oder Abnahme. Die Änderung dieser Verhältnisse kann zu signifikanten Unterschieden der zeitabhängigen Raumtemperaturen als resultierende Größe führen. Das Kriterium des qualitativen Temperaturverlaufs, insbesondere der tendentiellen Zu- oder Abnahme und des Unterschieds der Werte zu Versuchsbeginn und -ende, wurde daher herangezogen, um die Zulässigkeit der abgeschätzten Lüftungsbedingungen in die Bewertungen einzubeziehen.

2. Sensitivität der abgeschätzten Lüftungsbedingungen

Die Abschätzung der Lüftungsbedingungen bzw. des Einflusses der Luftführung über Nebenräume des betrachteten Versuchsraums stellte eine wesentliche Variable dar, die durch

unterschiedliche Berechnungsszenarien zu Zu- und Abluft umgesetzt wurde. Die jeweiligen Berechnungsergebnisse wurden qualitativ und quantitativ mit Messergebnissen verglichen, nicht jedoch in direkte Relation zueinander gesetzt. Dieses Vorgehen ist dadurch begründet, dass an dieser Stelle kein eindeutiger Referenzwert festgelegt werden kann bzw. soll.

3. Sensitivität der gemessenen und berechneten Emissions-Massenströme

Neben dem direkten Vergleich der gemessenen und berechneten Emissions-Massenströme wurden die Auswirkungen im Rahmen der Berechnungen zur Stoffausbreitung in die Untersuchungen einbezogen. Dazu wurden Berechnungen zur Stoffausbreitung sowohl mit gemessenen als auch mit berechneten Emissionsbedingungen durchgeführt. Insbesondere wurden dabei die unterschiedlichen Abschätzungen der Lüftungsbedingungen berücksichtigt. Der Ergebnisvergleich für Ausbreitungs- bzw. Konzentrationsberechnungen der rechnerisch abgeschätzten Emissions-Massenströme wurde qualitativ und quantitativ in Relation zu den in den Versuchen festgestellten Messergebnissen und gegenüber den zugehörigen Ausbreitungsrechnungen mit Verwendung der gemessenen Emissionsbedingungen durchgeführt (doppelte Vergleichsführung).

Im Rahmen der Gesamtargumentation kann die Bewertung nicht alleine auf den statistischen Kennwerten beruhen. Die ermittelten Werte sind immer in Zusammenhang mit den (einzel-fallabhängigen) Rahmenbedingungen und - insbesondere im Vergleich der verschiedenen Konstellationen der Lüftungsbedingungen - als Hinweise auf Tendenzen zu berücksichtigen. Die Auswertung muss somit im Gesamtkontext der Bedingungen (z.B. unter Beachtung genereller Konzentrationsniveaus) und aus der Kombination der verschiedenen Kennwerte erfolgen. Insbesondere die relativen Abweichungen sind ohne Berücksichtigung der Relationen von Mess- und Berechnungsergebnissen zueinander nur von bedingter Aussagekraft.

3 Darstellung der Untersuchungsergebnisse

3.1 Messergebnisse

Ziel der Versuche war die messtechnische Ermittlung von Luftkonzentrationen für verschiedene Versuchs- und Messkonstellationen unter den jeweiligen, in Kap. 2.2.2 bzw. Anhang D und E aufgeführten Rahmenbedingungen. Es wurden keine zeitlich konstanten Konzentrationen, sondern zeitabhängige Konzentrationsverläufe in der Raumluft an den jeweiligen Messstellen ermittelt.

Die Luftkonzentrationen wurden tabellarisch dokumentiert und für Vergleich und Interpretation mit Rechenergebnissen einheitlich aufbereitet. Darüber hinaus wurden Graphen als Visualisierungen der Konzentrationsverläufe in der Form „Luftkonzentration über Versuchsdauer“ erstellt und für alle Auswertungen gleich skaliert. Beide Darstellungsformen bilden die Grundlage für die durchgeführte quantitative (tabellarische Fassung) und qualitative (graphische Fassung) Auswertung der Untersuchungen. Ein entsprechendes Beispiel ist in Anhang H aufgeführt, der auch die analoge Darstellung der erfassten Raumtemperaturen enthält.

Die Messergebnisse aller Versuche in graphischer Fassung sind in den vergleichenden Darstellungen (siehe Anhang J) enthalten, auf die detaillierte Ausführung der tabellarischen Werte wird an dieser Stelle jedoch verzichtet. Als Graphiken werden je Versuch die gemessenen und berechneten Ergebnisse je Messpunkt gegenübergestellt. Zur Übersicht ist die Position des Messpunkts in der Visualisierung vermerkt¹.

Hinweis:

In Untersuchungsschritt 1 wurden erhebliche Abweichungen zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen sowie in den Szenarien untereinander festgestellt, so dass die Visualisierungen ggf. unterschiedliche Skalierungen aufweisen. Bei einem Vergleich der Darstellungen sind die verschiedenen Skalen unbedingt zu beachten. In Untersuchungsschritt 2 sind die Darstellungen über alle Szenarien, die auf gemessenen Emissions-Massenströmen beruhen, einheitlich skaliert und damit unmittelbar vergleichbar. In Einzelfällen ergänzen Detailabbildungen oder Abbildungen unter Verwendung des gleitenden Mittelwertes (Periode von 60s) die Auswertungen. Die vergleichenden Darstellungen für Szenarien, die berechnete Emissions-Massenströme als Eingangswerte verwenden, verzichten analog zu Untersuchungsschritt 1 auf eine einheitliche Skalierung.

3.2 Berechnungsergebnisse

Sofern in Untersuchungsschritt 2 Berechnungen zur Verdunstung von Isopropanol durchgeführt wurden, erfolgte eine Weiterverwendung der im Worst-Case-Sinne abgeschätzten Emissions-Massenströme. Im Ergebnisvergleich beider Emissionsmodelle (inner- und außerhalb des vorgesehenen Anwendungsbereichs des Modells nach Weidlich und Gmehling) wurde festgestellt, dass in allen Szenarien das Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu die höheren und somit kritischeren Werte erbrachte. Diese wurden gemäß der aufgeführten Systematik als Eingangswerte in die Ausbreitungsberechnungen der jeweiligen Szenarien übernommen. Die verwendeten Werte sind in Anhang G aufgeführt.

¹ Die aufgeführten Werte beziehen sich auf die „linke vordere“ Raumecke, die Höhe ist ab Fussboden gemessen.

Die (gemittelten) Mess- und Berechnungsergebnisse sind im Anhang J.2.1 in Tab. J.101 als flächenbezogene Emissions-Massenströme, in Tab. J.102 als innerhalb von 30 Minuten emittierte Gesamtmasse gegenübergestellt..

Die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen werden modellbasiert in tabellarischer Form gegenüber der Zeit (voreingestellte Laufzeit der Berechnung²) ausgegeben. Für jeden Versuch wurden die korrelierenden Messpunkte und die Raumtemperaturen ausgewertet und - analog zu den Messergebnissen - in tabellarischer Form sowie als Visualisierung dargestellt. Ein Beispiel ist in Anhang I aufgeführt.

Hinweis:

Die tabellarische Ausgabe von Stoffkonzentrationen erfolgt in der Einheit [kg/m³], die Messwerte der FID liegen dagegen in der Einheit [ppm = ml/m³ vor. Die zum Vergleich beider Werte erforderliche Umrechnung über die Stoffdichte wurde unmittelbar in die tabellarische Auswertung der Berechnungsergebnisse implementiert und in die Darstellungen eingebunden.

Die Darstellung aller Berechnungsergebnisse erfolgt ebenfalls in graphischer Form in Anhang J im Vergleich mit den Messergebnissen. Auf eine detaillierte quantitative Darstellung für jeden Versuch wird an dieser Stelle ebenfalls verzichtet. Die statistischen Kennzahlen zum quantitativen Vergleich werden ebenfalls je Versuch und Messpunkt aufgeführt. Die Auswertungen beziehen sich auf die nicht formatierten (tabellarischen) Konzentrationsverläufe. Bei ergänzender Verwendung von Darstellungen mit gleitenden Mittelwerten sind die damit errechneten Kennzahlen ebenfalls angegeben.

Hinweis:

Die Verwendung gleitender Mittelwerte führt zu einer Filterung der ursprünglichen Daten, deren Aussage hierdurch verändert wird. Die Visualisierungen und Kennzeichnungen charakterisieren die Ergebnisse der Betrachtungen und verbessern ggf. die Auswertung und Interpretation, es handelt sich jedoch nicht mehr um die Originaldaten!

Ergänzend sind die statistischen Kennzahlen aller Szenarien in Anhang ?? als Überblick zusammengefasst. Kennzahlen der Darstellungen mit gleitenden Mittelwerten fließen an dieser Stelle nicht ein.

² Es handelt sich um die „reale“ Zeitdauer, die durch die Berechnungen betrachtet wird. Die tatsächliche Rechendauer (Zeitbedarf zur Durchführung) unterscheidet sich von dieser und liegt mit mehreren Tagen deutlich darüber.

4 Bewertung und Validierungsaussagen

Die nachfolgende Auswertung der Untersuchungen beruht auf den qualitativen Visualisierungen in Anhang J sowie der quantitativen Auswertung der hinter den aufgeführten Graphen stehenden Datenreihen. Die statistischen Kennwerte der einzelnen Versuche bzw. Berechnungsszenarien und -gänge sind in Anhang K als Überblick zusammengefasst.

Die getroffenen Aussagen bilden generelle Einschätzungen auf Grundlage der Validierungsuntersuchungen, sofern diese über alle Szenarien und Untersuchungsschritte hinweg verallgemeinert werden können. Besondere Fälle und Relationen, die insbesondere Einfluss auf die Validierungsaussagen und die praktische Anwendbarkeit des untersuchten Verfahrens haben, werden gesondert erläutert und diskutiert.

4.1 Untersuchungsschritt 1: Untersuchungen mit Propan

Zusammenfassung:

Die Vergleiche von Mess- und Berechnungsergebnissen zur Ausbreitung von Propan im Versuchsraum weisen in allen Szenarien - sowohl bei unveränderten als auch bei angepassten Lüftungsbedingungen - erhebliche Abweichungen auf. Dabei werden die gemessenen Stoffkonzentrationen an den verschiedenen Messpunkten (im Atembereich und an ergänzenden Positionen) deutlich unterschätzt, so dass bei einer praktischen Anwendung des Berechnungsmodells zu geringe Expositionen ermittelt würden. Im Allgemeinen wurde durch die Anpassung der Lüftungsbedingungen eine (geringfügige) Verbesserung der Ergebnisse nachgewiesen, die sich in den ermittelten Kennwerten ausdrückt. Eine hinreichende Übereinstimmung konnte jedoch dadurch ebenso wenig erzielt werden.

Alleine auf Grundlage des Untersuchungsschritts 1 konnte eine praktische Anwendung des Modells zur Stoffausbreitung nicht validiert werden.

4.1.1 Szenarien mit Luftführung über Nebenräume

4.1.1.1 Beschreibung der Vergleiche

Wie aus den qualitativen Darstellungen in Abschnitt J.1.1 des Anhangs J bereits unmittelbar ersichtlich ist, werden die gemessenen Stoffkonzentrationen in der Luft des Versuchsraums durch die Berechnungsergebnisse deutlich unterschätzt. Wegen der erheblichen Unterschiede wird an dieser Stelle nicht auf einzelne Szenarien eingegangen, da keine aussagekräftigen Effekte (z.B. im Hinblick auf die Anordnung der Messpunkte) mit Relevanz festgestellt werden können.

Die quantitative Betrachtung anhand der ermittelten relativen Abweichungen bestätigt, dass erhebliche Unterschiede der Mess- und Berechnungsergebnisse zueinander bestehen. Die Differenzen der zeitabhängigen Verläufe liegen zwar i.d.R. im Bereich der Verschiebung um konstante Faktoren (inneres Produkt i.A. mindestens größer 0,85), die nicht näher beziffert werden sollen. Der Projektionskoeffizient für die Messpunkte in den verschiedenen Szenarien weist allerdings auf zufallsbedingte Unterschiede hin.

In diesem Zusammenhang ergibt die Begutachtung der Temperaturverläufe an beiden erfassten

Messstellen im Arbeitsraum, dass die berechneten Lufttemperaturen über die Zeit hinweg abnehmen. Ausnahme bildet der ansteigende Temperaturverlauf des Szenarios 1004-3, wobei die Ausgangstemperatur nur in diesem Szenario bei weniger als 20°C liegt. Die während der Messungen ermittelten Verläufe weisen dagegen eine Temperaturzunahme auf, so dass sich Mess- und Berechnungsergebnisse widersprechen.

4.1.1.2 Bewertung und Interpretation

Unabhängig von der Unterschätzung der gemessenen Stoffkonzentrationen durch die Berechnungsergebnisse fallen bei den Messwerten Schwankungen um ein jeweiliges Konzentrationsniveau auf. Die Berechnungsergebnisse weisen ebenfalls Minima und Maxima auf, die Amplituden der Differenzen um einen Mittelwert sind jedoch geringer ausgeprägt. Die Kennzahlen des inneren Produkts und des Projektionskoeffizienten drücken diesen Unterschied ebenfalls aus.

Die Schwankungen in den Messergebnissen weisen auf zeitlich wechselnde Bedingungen hin, die durch die nicht konstanten Lüftungsbedingungen hervorgerufen werden. Da in den Berechnungen gemittelte Werte der Zu- und Abluft einbezogen wurden, fallen zeitliche Änderungen weniger deutlich aus. Es liegt dementsprechend ein direkter Zusammenhang zwischen Lüftungsbedingungen und orts- und zeitbezogenen Stoffkonzentrationen nahe. Ein erhöhter Luftaustausch führt i.A. zu größeren aus dem Raum abgeführten Luft- und Stoffmassenströmen, so dass Stoffkonzentrationen tendenziell geringer ausfallen. Gleichzeitig ist die manuell regulierte und ggf. schwankende Propanfreisetzung über die verwendete Kleinstflasche ein Einflussfaktor, der in den Berechnungen durch gleichmäßige (Mittel-) Werte umgesetzt wurde.

Die gegenläufigen Temperaturentwicklungen zwischen Messungen und Berechnungen weisen ebenfalls auf die Beeinflussung der Vergleiche durch die Ausprägung der Lüftungsbedingungen hin: Die Versuche zur Propanausbreitung wurden an sonnigen Spätsommer- bzw. Herbsttagen durchgeführt, wobei - als hier festzuhaltender Schwachpunkt der Messaufbauten - die Zulufttemperaturen nicht erfasst wurden. Außentemperatur und Sonneneinstrahlung auf Ansaugöffnungen der Lüftungsanlage an der Gebäudeaußenseite und durch die Fenster in den Versuchsraum können im Nachhinein nicht mehr rekonstruiert werden. Es besteht daher die grundsätzliche Möglichkeit, dass die Zulufttemperatur über der Raumtemperatur lag.

Innerhalb des Versuchsraums stellt die anwesende Person eine Wärmequelle dar, die prinzipiell zu einer Erwärmung der Raumluft beiträgt (wie aus den Messdaten zur Temperatur ersichtlich). Die Temperaturregulierung des Raumes wird dabei auch durch das abgeführte Luftvolumen beeinflusst, wobei ein hoher Volumenstrom auch eine größere Wärmemenge (ab-) transportiert, die nicht zu einer Temperaturerhöhung beitragen kann. Gleichzeitig bewirken die auftretenden höheren Luftgeschwindigkeiten einen größeren konvektiven Wärmeaustausch zwischen Luft und Objekten, die in den Berechnungen allgemein mit Oberflächentemperaturen von 20°C abgeschätzt sind. Sofern die Zuluft- sowie die Raumlufttemperatur im Ausgangsstadium einen höheren Wert aufweisen, tragen die verschiedenen Oberflächen im Berechnungsvorgang zur Abkühlung bei, die durch die Lüftungsbedingungen begünstigt wird. Diese Vermutung wird durch die abweichende (steigende) berechnete Temperaturentwicklung des Szenarios 1004-2 bestärkt, bei dem die Ausgangstemperaturen bei 19,8°C parametrisiert wurden (geringfügiger Wärmeübertrag von Oberflächen auf Luft, Erwärmung).

Zusammenfassend wird der Schluss gezogen, dass in den Szenarien allgemein die Zu- und Abluftvolumenströme überschätzt wurden, die zur Veränderung des Temperaturverhaltens und generell geringeren berechneten Stoffkonzentrationen führen. In Verbindung mit der schwankenden Stofffreisetzung, die zu Konzentrationsspitzen an den unterschiedlichen Messpunkten führen kann, ist die Validität des Berechnungsmodells an dieser Stelle nicht bestätigt.

4.1.2 Szenarien ohne Luftführung über Nebenräume

Aufgrund des ungeklärten Beitrags der Nebenräume auf die Lüftungsbedingungen sowie einer überschlägigen Begutachtung erster Berechnungsergebnisse wurden für weitere Berechnungsszenarien die Lüftungsbedingungen angepasst und Zu- sowie Abluftvolumenströme aufeinander abgestimmt¹. In Anbetracht zuvor erläuterten Ergebnisse liegt ein Fokus der Untersuchungen in der Klärung, ob sich die angestellten Vergleiche durch die Anpassung günstiger verhalten.

4.1.2.1 Beschreibung der Vergleiche

Die qualitativen Abbildungen zu den Untersuchungsergebnissen in Abschnitt J.1.2 des Anhangs J zeigen bei Berücksichtigung von Anpassungen der allgemeinen Lüftungsbedingungen in Berechnungen weiterhin erhebliche Abweichungen auf. Dabei bleibt die generelle Unterschätzung der gemessenen Stoffkonzentrationen durch die Berechnungsergebnisse erhalten, die berechneten Konzentrationsniveaus (Mittelwerte von Schwankungen) sind allerdings in Richtung der Messergebnisse verschoben. Im Vergleich mit den ursprünglichen Berechnungsszenarien (mit Luftführung über Nebenräume) sind bei der Auswertung der statistischen Kennzahlen, abhängig von der räumlichen Anordnungen der Messpunkte sowie den weiteren Rahmenbedingungen (Einschränkungen Zuluft, Emissionspunkt), weitergehenden Tendenzen zu erkennen:

- Messpunkt Atembereich („FID-Atem“, konstanter Messaufbau):
Abnahme relativer Abweichungen in allen Szenarien (Ausnahmen: 1017-2, 1018-2), i.A. Zunahme des inneren Produkts, Abnahme des Projektionskoeffizienten;
- Messpunkte in Bodennähe:
bei örtlicher Nähe zum Emissionspunkt i.A. Abnahme relativer Abweichungen, Verbleib des inneren Produkts auf ähnlichem Niveau, Abnahme des Projektionskoeffizienten (Ausnahmen vorhanden); mit Zunahme der Distanz zum Emissionspunkt Rückgang der „Verbesserungen“ in Kennzahlen;
- Messpunkt oberhalb Tisch (Kopfhöhe) außerhalb des Atembereichs:
Abnahme relativer Abweichungen, Verbleib des inneren Produkts auf ähnlichem Niveau, Abnahme des Projektionskoeffizienten, insbesondere bei relativen Abweichungen szenariospezifische Korrespondenz mit Messpunkt in Atembereich.

Für den auf dem Tisch befindlichen Messpunkt verbleiben die Kennwerte auf vergleichbarem Niveau. In den Szenarien 1010-2 und 1016-2, bei der die Stofffreisetzung in unmittelbarer Nähe des Messpunktes erfolgte, liegen die gemessenen Stoffkonzentrationen mit erheblichen Schwankungen weit über den berechneten Werten.

Die berechneten Temperaturverläufe behalten die bereits zuvor beschriebenen Tendenzen bei, allerdings verändern sich die Beträge der ermittelten Abweichungen. Für Szenarien ohne Einschränkung der Zuluft (Änderung der Lüftungsbedingungen in Versuchsaufbau) verringern sich die jeweiligen Beträge der Abweichungen. In Szenarien mit begrenzter Zuluft nehmen die Beträge dagegen zu, so dass die Abweichungen deutlicher ausfallen.

Für die Szenarien 1004-4, 1004-5, 1007-4 und 1007-5, bei denen als Sensitivitätsuntersuchungen willkürliche Veränderungen vorgenommen wurden², ergeben sich aus dem Verschluss der Druckausgleichöffnungen zu Nebenräumen keine signifikanten Veränderungen. Die Absenkung

¹ vgl. Kap. 2.3

² vgl. Kap. 2.3

der Zu- und Abluftvolumenströme über die Angleichung aneinander hinaus führt zu einer weiteren Abnahme der Abweichungen der berechneten zu den gemessenen Konzentrationsverläufe unter Beibehaltung der Unterschätzung. Im Vergleich sowohl zu den ursprünglichen Bedingungen als auch zu den Szenarien mit bereits angepassten Lüftungsverhältnissen weisen die statistischen Kennzahlen weitere (z.T. deutliche) Verschiebungen in Richtung der idealen Werte auf.

4.1.2.2 Bewertung und Interpretation

Die festgestellten Änderungen der Berechnungsergebnisse infolge der Abstimmung der Zu- und Abluftvolumenströme sowie der weiteren Beeinflussung der Lüftungsbedingungen zeigen trotz der erheblichen Abweichungen der Stoffkonzentrationen die Tendenz auf, dass eine (geringfügige) Annäherung der Berechnungsergebnisse erreicht wurde. Die Lüftungsbedingungen werden daher als maßgeblicher Faktor vermutet, der die Berechnung der Stoffausbreitung bzw. der ortsbezogenen Stoffkonzentrationen beeinflusst. Das teils abweichende Verhalten an einzelnen Messpunkten bei den verschieden gestalteten Rahmenbedingungen wird auf komplexe das Zusammenwirken physikalischer Effekte (z.B. Dichte, Wärmefreisetzung durch Person etc.) zurückgeführt, die bei (zu) hohen Luftgeschwindigkeiten überdeckt werden. Auf diesen Effekt weisen insbesondere die Ergebnisse der Berechnungen mit zusätzlich begrenzter Zu- und Abluft hin. Auch die Auswirkungen der ortsbezogenen Relationen zwischen Emissionspunkt, Messpunkt, anwesender Person und Zu- und Abluftöffnungen lassen diesen Schluss zu. Das ermittelte Temperaturverhalten und die unterschiedlichen Veränderungen der Beträge für Szenarien unterstreichen diese Einschätzung, da die zuvor bereits beschriebenen Effekte der Wärmeübertragung etc. verstärkt in den Berechnungsergebnissen Berücksichtigung finden. Zur Verbesserung der Ergebnistreue, ggf. bis hin zur praktischen Verwendung des Ausbreitungsmodells, muss daher eine detaillierte Erfassung und geeignete Abschätzung der Lüftungsbedingungen sichergestellt werden.

Im Verhalten des Messpunkts auf dem Tisch, für den insbesondere bei Anordnung des Emissionspunkts in unmittelbarer Nähe erhöhte Stoffkonzentrationen gemessen und erwartet wurden, wird der Hinweis auf einen Zusammenhang mit der notwendigen Bildung einer äquivalenten Emissionsfläche vermutet: Durch die Bindung an die räumliche Diskretisierung der Berechnungsfelder wird ggf. der Einfluss der Emissionsgeschwindigkeit überschätzt, die dadurch einen Stofftransport in höhere Raumbereiche und eine Abfuhr durch die Abluft bewirkt. Diese These kann jedoch aufgrund der allgemeinen Unterschätzung der gemessenen Stoffkonzentrationen an dieser Stelle nicht abschließend geklärt werden.

Die ähnlich verbleibenden Ergebnisse der Sensitivitätsuntersuchungen mit Verzicht auf die Druckausgleichsöffnungen lassen den Schluss zu, dass geringe Öffnungsflächen zu Nebenräumen nur relevant sind, wenn über diese eine Luftführung erfolgt.

4.1.3 Gesamtinterpretation Untersuchungsschritt 1

Die Ergebnisse des Untersuchungsschritts 1 lassen aufgrund der erheblichen Unterschiede der Mess- und Berechnungsergebnisse zueinander an dieser Stelle nicht die Aussage eines validen Modells zur Ausbreitungsrechnung zu. Folgende Rahmenbedingungen, Grenzen und ggf. vorliegende Mängel in der Versuchsdurchführung werden als Ursachen vermutet. Deren Kombination ist mutmaßlich für die Abweichungen verantwortlich:

1. falsche Einschätzung der Lüftungsbedingungen bzw. nicht erfasste Veränderungen während der Versuchsdauer,

2. nicht erfasste unregelmäßige Emission, wobei der geschwindigkeitsbedingte Stofftransport in Richtung der Raumdecke durch die Berechnungen überschätzt wird,
3. nicht messtechnisch erfasste (Zuluft-) Temperaturen und Einfluss der Oberflächentemperaturen der Einrichtung (in Verbindung mit Lüftungsbedingungen) sowie
4. nicht nachweisbar aufgetretene Fehler in der Konzentrationsmessung bzw. fehlerhafter FID, siehe auch Ausfall eines Messgeräts.

Die Aus- und Bewertung stellt als Einflussfaktoren auf die Ergebnisse bzw. als Bedingungen, die möglicherweise Voraussetzung genauere Ergebnisse und einer Validität sind, fest:

- genaue Abschätzung von Lüftungsbedingungen, dabei Abstimmung der Zu- und Abluftvolumenströme aufeinander (Prinzip der Massenerhaltung),
- genaue Abschätzung von Zuluft- und Oberflächentemperaturen,
- Beachtung zeitabhängiger Schwankungen von Rahmenbedingungen, sofern abschätzbar sowie
- möglichst entsprechende Abbildung von Emissionsflächen ohne Bildung äquivalenter Verhältnisse, dementsprechende Parametrisierung des verwendeten dreidimensionalen Berechnungsgitters.

Sofern die praktische Verwendung im Weiteren nachgewiesen werden kann, müssen die an dieser Stelle gewonnenen Erkenntnisse in die Berechnungssystematik eingebunden werden. Bei einem Einsatz mit nicht gesicherten Eingangsparametern erscheint die wiederholende Durchführung von Berechnungen mit Parametervariationen erforderlich (z.B. Temperaturkonstellationen als „Sommer-“ bzw. „Winter-“Fall).

4.2 Untersuchungsschritt 2: Untersuchungen mit Isopropanol

Zusammenfassung:

Die Auswertung unterteilt sich in Untersuchungen zur reinen Stoffausbreitung auf Grundlage gemessener Emissions-Massenströme und die Betrachtung des Berechnungsverfahrens mit Berechnung von Emissions-Massenströmen auf Grundlage der erfassten Umgebungsbedingungen: Bei Berücksichtigung gemessener Emissions-Massenströme werden Übereinstimmungen der Mess- und Berechnungsergebnisse bzw. der jeweiligen Konzentrationsniveaus festgestellt, wobei die Berechnungsergebnisse ortsabhängig sowohl zu Unter- als auch Überschätzung neigen. Eine Abstimmung von Zu- und Abluft führt auch in diesem Untersuchungsschritt zu charakteristischen Änderungen im qualitativen und quantitativen Vergleich. Aufgrund dieses Untersuchungsteils wird die praktische Verwendung des Modells zur Ausbreitungsberechnung für möglich gehalten.

Die vergleichende Berechnung der Emissions-Massenströme unterschätzt die gemessenen Werte deutlich. In der Folge werden auch die entsprechenden Stoffkonzentrationen allgemein unterschätzt. In Einzelfällen werden dennoch ähnliche Konzentrationsniveaus erreicht, wobei die Anordnung der jeweiligen Messstelle bzw. die Relation zu (Ab-) Lüftungsöffnungen und ggf. anwesender Person scheinbar den wesentlichen Grund bilden.

Neben der Ergebnisuntersuchung bei Anwendung des Berechnungsverfahrens setzen sich die Untersuchungen mit der Funktionalität von Schnittstellen und Verknüpfungen von Modellen bzw.

Modulen auseinander. Die formalen Verbindungen werden bestätigt, so dass für das konzipierte Berechnungsverfahren die interne Abstimmung der verschiedenen Betrachtungsschritte als formal korrekt beurteilt wird.

Die Ergebnisse des Untersuchungsschritts 2 lassen einerseits auf die generelle Möglichkeit des realitätsnahen Einsatzes des Ausbreitungsmodells sowie die - im Rahmen des Berechnungsverfahrens aufgestellten - intakten Verknüpfungspunkte schließen. Andererseits werden durch die abweichenden Ergebnisse der Verdunstungsrechnungen die Auswirkungen auf die anschließenden Ausbreitungsberechnungen sowie die Notwendigkeit einer detaillierten Abschätzung der Freisetzungsbedingungen aufgezeigt. Die Verdunstungsmodelle können im untersuchten Geschwindigkeitsbereich jedoch nicht mit validen Ergebnisvergleichen bestätigt werden.

4.2.1 Ausbreitungsberechnungen auf Grundlage gemessener Emissions-Massenströme

4.2.1.1 Szenarien mit Luftführung über Nebenräume

Hinweis:

Bei der detaillierten Begutachtung der Berechnungsergebnisse wurde festgestellt, dass bei der Parametrisierung der Ausbreitungsrechnung des Szenarios 2006-1 ab dem Berechnungszeitpunkt $t_{FDS} = 1.588$ s ein falscher Eingabewert Verwendung gefunden hat, der zu einer numerischen Instabilität mit Verfälschung der Ergebnisse führte. Die Falschrechnung wurde aufgrund eines plötzlichen bzw. sprunghaften und physikalisch nicht begründbaren Temperaturanstiegs im Berechnungsraum entdeckt. Bis zu diesem Zeitpunkt erfolgte die Berechnung ordnungsgemäß. Der Vergleich von Mess- und Berechnungsergebnissen für dieses Szenario wurde daher auf den mit ordnungsgemäßen Eingangswerten berechneten Zeitbereich beschränkt. Insbesondere die errechneten statistischen Kennwerte beruhen auf diesem Betrachtungsbereich.

4.2.1.1.1 Beschreibung der Vergleiche

Der qualitative Vergleich von Mess- und Berechnungsergebnissen in Anhang J, Abschnitt J.2.2 weist generell ähnliche Konzentrationsverläufe³ auf. Dabei lassen sich - unterschieden nach räumlicher Anordnung der verschiedenen Messpunkte - Tendenzen zur Relation der qualitativ ähnlichen Verläufe feststellen. Diese werden in der quantitativen Auswertung durch entsprechende Ausprägung der Kennzahlen charakterisiert:

- Messpunkt Atembereich bei eingeschalteter Lüftung:
geringe Unterschätzung der Messwerte durch Berechnungsergebnisse, relative Abweichungen szenarioabhängig im Bereich von ca. 0,44 - 0,80 (ungünstige Werte durch zeitabhängige Schwankungen um Mittelwert, vgl. Darstellung mit gleitenden Mittelwerten), Orientierung inneres Produkt und Projektionskoeffizient mit Aussage, dass zufällige Abweichungen (vgl. Schwankungen) mit konstantem Faktor vorliegen;
- Messpunkt Atembereich bei ausgeschalteter Lüftung:
geringe Überschätzung der Messwerte durch Berechnungsergebnisse, relative Abweichung und Projektionskoeffizient durch Schwankungen bzw. ausgeprägte Überschätzung zu Beginn in „ungünstigem“ Bereich, inneres Produkt tendiert zum Ideal (entspricht zufälligen Abweichungen, vgl. Schwankungen);

³ Die teilweise dargestellten Abbildungen mit Visualisierung der gleitenden Mittelwerte (Periode 60s) dienen der Verdeutlichung der grundlegenden Konzentrationsniveaus im Verhältnis zueinander.

- Messpunkte unterhalb Tischniveau:
(in Relation deutliche) Überschätzung Messwerte durch Berechnungsergebnisse, relative Abweichungen größer 1,1 (Kombination schwankender Werte mit Überschätzung), inneres Produkt im Bereich des Ideals (vgl. Schwankungen als zufällige Abweichungen), Projektionskoeffizient ohne Tendenz, bei Szenarien ohne Lüftung Kennzahlen im Bereich guter Übereinstimmung;
- Messpunkt in Bodennähe:
(geringfügige) Überschätzung Messwerte durch Berechnungsergebnisse, Kennwerte im Bereich guter Übereinstimmung bei einzelnen Ausnahmen;
- Messpunkt auf Tisch:
Unterschätzung Messwerte durch Berechnungswerte (Ausnahme: Szenario ohne Lüftung), Kennwerte im Bereich guter Übereinstimmung, bei Emission in unmittelbarer Nähe erhebliche Unterschätzung und Abweichung analog zu Untersuchungsschritt 1;
- Messpunkt in Kopfhöhe außerhalb des Atembereichs:
Überschätzung Messwerte durch Berechnungsergebnisse, ungünstige Kennwerte basierend auf starken Schwankungen.

Wie bereits angedeutet weisen die Berechnungsergebnisse z.T. erhebliche Schwankungen auf, die sich auf die ermittelten statistischen Kennwerte negativ auswirken. Die i.A. hohen Übereinstimmungen der ermittelten Konzentrationsniveaus werden durch die Kennzahlen daher nur undeutlich bzw. missverständlich wiedergegeben. Die Berücksichtigung der Kennzahlen für gleitende Mittelwerte (Periode 60s) gibt hierzu einen Einblick (vgl. Einzeldarstellungen in Anhang J, Abschnitt J.2.2). Weiterhin fällt die - im Vergleich zu anderen Szenarien bzw. Messpunkten - inkonsistente Berechnung der Stoffkonzentration auf dem Arbeitstisch auf, sofern die Emission in unmittelbarer Nähe erfolgt.

In Szenarien mit abgeschalteter Zu- und Abluft wird im Atembereich eine Überschätzung der Stoffkonzentrationen berechnet. An anderen Messpunkten tritt in Abhängigkeit zur räumlichen Anordnung eine unterschiedliche Wiedergabe der Messergebnisse auf. Zu Beginn der Untersuchungsdauer werden die Messwerte dabei tendentiell unterschätzt, im weiteren Verlauf tritt eine Überschätzung ein.

Die ergänzende Betrachtung der gemessenen und berechneten Temperaturverläufe ergibt, dass die generelle Tendenz sinkender Raumtemperaturen über die Versuchsdauer hinweg (Ausnahme: Temperaturzunahme bei Szenarien mit abgeschalteter Lüftungsanlage) durch die errechneten Temperaturen qualitativ wiedergegeben wird. Der Betrag der berechneten Temperaturabnahme ist jedoch höher als die Messwerte, so dass die Absenkung überschätzt wird. Die Berechnungsergebnisse der Zuluft- und der Raumtemperatur überdecken sich bzw. gleichen sich aneinander an. Für Szenarien ohne Lüftung wird der Raumtemperaturverlauf deutlich präziser wiedergegeben.

4.2.1.1.2 Bewertung und Interpretation

Aus den qualitativen Vergleichen in Verbindung mit den einzelnen Kennzahlen wird eine generell gute Übereinstimmung von Messergebnissen und Berechnungswerten deutlich, wobei jedoch teils erhebliche Schwankungen in den Berechnungsergebnissen zu berücksichtigen sind. In diesen Fällen wird die Übereinstimmung des zugrunde liegenden Konzentrationsniveaus erst mit Verweis auf die Auswertung mittels gleitender Mittelwerte deutlich. Diese Schwankungen beruhen mutmaßlich auf den nicht aufeinander abgestimmten Zu- und Abluftvolumenströmen innerhalb des Versuchsraums (der massenerhaltende Ausgleich erfolgt über die Nebenräume),

der zu Verwirbelungen führt. Die Ortsabhängigkeit der Unter- bzw. Überschätzung untermauert diese These. Die Überschätzung in Bodennähe in Verbindung mit der Unterschätzung in höheren Raumbereichen wird auf den Dichteeinfluss des Isopropanols zurückgeführt. Zusammenfassend erscheint die Darstellung der Lüftungsbedingungen in Verbindung mit einer wesentlich konstanteren Emission durch Flüssigkeitsverdunstung genauer charakterisiert zu sein als in Untersuchungsschritt 1.

Entgegen der zur Parametrisierung der Propan-Freisetzung erforderlichen Bildung einer Äquivalenzfläche besteht für die Isopropanol-Verdunstung die Möglichkeit, die Emissionsflächen ohne weitgehende Flächenanpassungen in der Ausbreitungsberechnung abzubilden. Äquivalente Flächen beeinflussen die weiteren strömungsmechanischen Parameter, wobei sich insbesondere die Charakteristik der Freisetzungsgeschwindigkeit ändert. Dies bewirkt ggf. eine korrespondierende Änderung des berechneten Ausbreitungsverhaltens. In Untersuchungsschritt 2 treten keine Geschwindigkeitsänderungen zur Stofffreisetzung auf, die auf eine Flächenänderung zurückgeführt werden müssen. Die Analyse deutet dementsprechend darauf hin, dass bei Verzicht auf Äquivalenzen die Flächencharakteristik ausreichend gut wiedergegeben wird.

Mit Rückgriff auf die in Untersuchungsschritt 1 gewonnenen Erkenntnisse deutet die erhebliche Unterschätzung von Konzentrationen auf dem Arbeitstisch bei gleichzeitiger Stofffreisetzung in unmittelbarer Nähe zunächst auf eine Überschätzung des Geschwindigkeitseinflusses im Nahbereich der Emissionsquelle hin. Da für andere Messpunkte bzw. in anderen Szenarien eine gute Übereinstimmung besteht, erfolgt eine detaillierte Betrachtung der Bedingungen mittels Visualisierungen zur Stoffkonzentration. Dabei wird festgestellt, dass weniger die Diskretisierung der Emissionsfläche, sondern die räumliche Relation zum Personenaufenthalt im Rahmen der Berechnungen den relevanten Einflussfaktor bildet: Die Wärmefreisetzung der Person führt zur Bildung einer Auftriebsströmung, die unmittelbar von der Abluftöffnung erfasst wird. In den Berechnungen erfasst diese Auftriebsströmung auch den emittierten Stoffe in weiterer Entfernung und vermindert so die durch den Messpunkt erfasste Stoffkonzentration. Dieser Effekt der Berechnungen tritt in den übrigen Szenarien ebenso auf. In den übrigen Szenarien entspricht diese Erfassung jedoch den realen Bedingungen.

Die Ergebnisse der Szenarien ohne Betrieb der Lüftungsanlage unterstreichen den Effekt der personenbedingten Wärmefreisetzung, aus der eine aufwärtsgerichtete Strömung entsteht. Da der Messpunkt des Atembereichs innerhalb des entsprechenden Strömungsfeldes liegt, werden die gemessenen Konzentrationen näherungsweise wiedergegeben und weisen eine gute Übereinstimmung auf. Die zugehörigen Kennwerte weisen jedoch auch hier auf zeitabhängige Schwankungen hin, die in den Messwerten an nicht in unmittelbarer Nähe zur Person liegenden Messpunkten nicht derart auftreten. Eine Erklärungsmöglichkeit besteht in der verwendeten Messtechnik, die Luft aus der unmittelbaren Umgebung aktiv ansaugt. Wird diese nicht durch Lüftungsströmungen beeinflusst bzw. hat ein „ruhiges“ Strömungsniveau (geringer Einfluss wärmebedingter Luftbewegungen), erfolgt ebenfalls eine gleichmäßige und Konzentrationsspitzen abfedernde Erfassung. Dieser Effekt zeigt sich in Untersuchungsschritt 1 und den übrigen Szenarien des Untersuchungsschritts 2 aufgrund der ständig betriebenen Lüftung nicht.

Die Relationen zwischen gemessenen und berechneten Temperaturverläufen weisen wiederholt auf eine nicht vollständig korrekte Abbildung der Lüftungsbedingungen hin. Im Gegensatz zu Untersuchungsschritt 1 wurden die Versuche im Winter (Außentemperaturen deutlich unter Raumtemperatur) durchgeführt. Die Zulufttemperatur ist niedriger als die Raumtemperatur, wobei bei den Szenarien ohne erfolgte Messung der Zulufttemperatur aus der getroffenen Temperaturschätzung keine gegenläufigen Ergebnisse resultieren. Die berechnete Annäherung von Zuluft- und Raumtemperatur in Verbindung mit der zu hoch berechneten Abkühlung weist erneut auf eine Überschätzung des Abluftvolumenstroms hin, bei dem die durch die Person ab-

gegebene Wärme nicht - wie in der Realität - zur Erhaltung der Raumtemperatur beiträgt. Durch die Zulufttemperatur wird eine Abkühlung erreicht. Aus den dreidimensionalen Visualisierung der Berechnungen ist erkennbar, dass infolge der kalten Zuluft bzw. der Abkühlung eine dichtebedingte Luftströmung in Richtung des Fussbodens auftritt, die eine Umwälzung der Raumluft mitsamt Stofftransport bewirkt. Diese wird qualitativ über die Betrachtungsdauer aufrecht erhalten und stabilisiert sich nach Angleichung von Zuluft- und Raumtemperatur auf gleichem Niveau. Die ermittelte Strömung steht dabei nicht den während der Versuche aufgetretenen Luftbewegungs- bzw. Ausbreitungstendenzen entgegen, so dass der (qualitative) Stofftransport rechnerisch korrekt nachempfunden wird.

Die deutlich genauere Wiedergabe der Temperaturentwicklungen in Szenarien mit abgeschalteter Lüftungsanlage identifiziert die Parametrisierung der Lüftungsbedingungen als einen wesentlichen Einfluss- bzw. Störfaktor der Berechnungen. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit einer präzisen Abschätzung und Parametrisierung der Lüftungsbedingungen für den praktischen Einsatz und stützt gleichzeitig die zuvor erläuterten Erkenntnisse.

Die Untersuchungsergebnisse werden dahingehend zusammengefasst, dass die Lüftungsbedingungen augenscheinlich ebenfalls nicht in ihrer Vollständigkeit korrekt erfasst und in den Berechnungen parametrisiert wurden. Die trotzdem erzielten Übereinstimmungen begründen sich in der kontrollierteren Stofffreisetzung in Verbindung mit der lediglich geringen notwendigen Anpassung der Freisetzungsfläche. Die allgemeinen Temperaturbedingungen begünstigen die Übereinstimmung zum Ausbreitungsverhalten. Die generelle Verwendungsmöglichkeit des Modells für stoffbezogene Ausbreitungsrechnungen wird weiterhin durch die Ergebnisse für Szenarien ohne Raumlüftung gestützt. Die Untersuchungen weisen die Anwendungsmöglichkeit des Modells zur stoffbezogenen Ausbreitungsrechnung aus, da innerhalb der einzelnen Szenarien allgemein Übereinstimmungen bzw. Annäherungen bestehen und keine Beschränkung auf einzelne Messpunkte und -konstellationen ermittelt wird. Voraussetzung ist jedoch eine präzise Wiedergabe der Lüftungsverhältnisse samt vorliegender Temperaturverhältnisse. Der Zusammenhang zwischen Aufenthaltsort von Personen, Emissionspunkt und Messpunkten muss näher detailliert werden. Für Betrachtungen des Arbeitsschutzes interessiert jedoch insbesondere die Ermittlung von Stoffkonzentrationen im Atembereich von Beschäftigten.

Neben der eigentlichen Vergleichsbetrachtung weisen die zeitabhängigen Ergebnisse des Berechnungsszenarios 2006-1 auf die Notwendigkeit und Bedeutung der kritischen Auseinandersetzung durch den Anwender hin: Aufgrund des dabei festgestellten untypischen Temperaturverhaltens konnte bei der Ursachensuche eine nicht korrekte (zeitabhängige) Parametrisierung des Modells erkannt werden. Andernfalls wären die Erkenntnisse zumindest verzerrt getroffen worden. Für die praktische Anwendung des Modells muss ein entsprechender Schritt zwingend vorgesehen sein, um falsche Beurteilungen von Arbeitsbedingungen zu vermeiden. Das konzipierte Berechnungsverfahren sieht einen entsprechenden Schritt bereits vor.

4.2.1.2 Szenarien ohne Luftführung über Nebenräume

Analog zum Untersuchungsschritt 1 wurden für kontrollierende Berechnungen die Lüftungsbedingungen durch Abstimmung von Zu- und Abluft unter Vernachlässigung der Abluftführung über Nebenräume angepasst⁴. Es besteht die Hypothese, dass die Ergebnisvergleiche eine weiter gesteigerte Übereinstimmung aufweisen.

4.2.1.2.1 Beschreibung der Vergleiche

Im Vergleich von Mess- und Berechnungsergebnissen, dargestellt in Abschnitt J.2.3 des An-

⁴ vgl. Kap. 2.3

hangs J, werden - analog zu den zuvor aufgeführten Ergebnissen der Szenarien ohne Anpassung der Lüftungsbedingungen - qualitativ gute Übereinstimmungen der generellen Konzentrationsniveaus zueinander festgestellt. Im Fokus steht darüber hinaus der Vergleich mit den Ergebnissen ohne Anpassung der Lüftungsbedingungen. In den qualitativen Konzentrationsverläufen und unter Berücksichtigung der entsprechenden statistischen Kennzahlen zeigen sich die nachfolgende Tendenzen an den verschiedenen Messpunkten, die eine Entwicklung infolge der veränderten Lüftungsbedingungen aufweisen. Diese treten szenariobedingt in unterschiedlicher Stärke auf⁵:

- Messpunkt Atembereich:
geringfügige Überschätzung gemessener Stoffkonzentrationen durch Berechnungsergebnisse (generelle Erhöhung des Konzentrationsniveaus) mit zeitabhängigen Schwankungen, Verschiebung statistischer Kennzahlen zu „ungünstigeren“ Verhältnissen (durch zeitabhängige Schwankungen um Mittelwert, vgl. Darstellung mit gleitenden Mittelwerten);
- Messpunkte unterhalb Tischniveau:
allgemein Annäherung von Berechnungsergebnissen an Messwerte bei tendentieller Überschätzung der Messergebnisse, dadurch positive Entwicklung der Kennzahlen mit z.T. deutlicher Annäherung an Ideale;
- Messpunkte in Bodennähe:
Annäherung von Berechnungsergebnissen an Messwerte bei tendentieller (geringfügiger) Überschätzung der Messergebnisse (einzelne Ausnahmen vorhanden), dadurch positive Entwicklung der Kennzahlen mit z.T. deutlicher Annäherung an Ideale;
- Messpunkt auf Tisch, Emission nicht in unmittelbarer Nähe:
Annäherung von Berechnungsergebnissen an Messwerte bei geringfügiger Unterschätzung der Messergebnisse, dadurch positive Entwicklung der Kennzahlen;
- Messpunkt auf Tisch, Emission in unmittelbarer Nähe:
erhebliche Unterschätzung der Messwerte analog zu Ergebnissen ohne Anpassung der Lüftungsbedingungen bzw. zu Erkenntnissen aus Untersuchungsschritt 1;
- Messpunkt in Kopfhöhe außerhalb des Atembereichs:
geringfügige Überschätzung gemessener Stoffkonzentrationen durch Berechnungsergebnisse (generelle Erhöhung des Konzentrationsniveaus) mit zeitabhängigen Schwankungen, Verschiebung statistischer Kennzahlen zu „ungünstigeren“ Verhältnissen (durch zeitabhängige Schwankungen um Mittelwert).

Allgemein wird - mit wenigen Ausnahmen - somit eine weitere Verbesserung der Berechnungsergebnisse hinsichtlich der Übereinstimmung mit den ermittelten Messwerten erzielt. An im oberen Raumbereich gelegenen Messpunkten werden im Vergleich der Szenarien höhere Konzentrationen berechnet, die gleichzeitig die Referenzwerte unter Beibehaltung von Schwankungen überschreiten. Im Übrigen führt die Anpassung der Lüftungsbedingungen zu einer Angleichung, unabhängig von einer vorherigen Unter- oder Überschätzung.

Die berechneten Temperaturverläufe weisen weiterhin die qualitativ richtige Abschätzung abnehmender Raumtemperaturen über die Versuchsdauer hinweg auf. Die Beträge der Temperaturabnahmen liegen gleichermaßen zu den Berechnungsszenarien ohne Anpassung von Lüftungsbedingungen über den Messergebnissen, fallen im Vergleich der Berechnungen untereinander

⁵ Naturgemäß entfallen Auswertung und Vergleich für Szenarien, in denen kein Betrieb der Lüftungsanlage stattgefunden hat.

jedoch geringer aus. Darüber hinaus differenzieren sich die Temperaturverläufe der Raum- bzw. der Zuluft voneinander, wobei die Raumlufttemperatur unter das Niveau der Zulufttemperatur fällt.

4.2.1.2.2 Bewertung und Interpretation

Trotz der Abstimmung von Zu- und Abluftströmen innerhalb des Versuchsraums sowie der Vernachlässigung der Nebenräume für die Belüftungssituation bleiben in den Berechnungsergebnissen zeitabhängige Schwankungen bestehen. Entgegen der ersten Interpretation werden diese daher - in Verbindung mit dem weiteren Ergebnisverhalten - als Ausdruck der Wechselwirkung der Zu- und Abluft interpretiert. Ein Einfluss des Personenaufenthalts als Wärmequelle kann an dieser Stelle nicht unmittelbar nachgewiesen werden, da die Konzentrationsschwankungen - messpunktsabhängig - auch bei Berechnungsszenarien ohne Person auftreten. Ein Einflussfaktor ist die Charakteristik der FID als Messverfahren mit selbstansaugenden Messpunkten, die derart nicht in den Berechnungen parametrisiert sind. Dabei erscheint weniger die räumliche Relation zu einer potentiell anwesenden Person, sondern vielmehr die Lage zu Zu- und Abluftöffnungen bzw. innerhalb der resultierenden Luftströmungen relevant.

In Untersuchungsschritt 1 deuten die Ergebnisse bereits an, dass die Anpassung bzw. Abstimmung der Lüftungsbedingungen eine Erhöhung der berechneten Stoffkonzentrationen bewirkt. Da - wenn auch über die Nebenräume - eine Verringerung des aus dem Raum abgeführten Luftvolumens vorgenommen wird, ist dieses Modellverhalten erwartungsgemäß. Die Ergebnisse des Untersuchungsschritts 2 unterstreichen den Zusammenhang zwischen der Parametrisierung der Lüftungsbedingungen und den errechneten Stoffkonzentrationen, in dem eine Angleichung der Berechnungsergebnisse an die Messwerte erfolgt.

Die allgemeine Erhöhung berechneter Luftkonzentrationen wird auf prinzipiell verringerte Strömungsbedingungen und Verwirbelungen zurückgeführt. Die resultierende geringe Überschätzung gemessener Luftkonzentrationen an höher gelegenen Messpunkten beruht unmittelbar auf den ruhigeren Bedingungen. Bei Betrachtung der absoluten Werte handelt es sich jedoch um geringfügige Veränderungen. Zusammen mit den Vergleichsergebnissen an den anderen Messpunkten (generelle Angleichung von Über- und Unterschätzungen an Messergebnissen) stellt sich die Verwendbarkeit des Modells zur Berechnung der Stoffausbreitung dar, wobei eine deutliche Abhängigkeit der Ergebnisse von der Parametrisierung der Lüftungsbedingungen besteht. Der detaillierten Abschätzung dieses Einflussfaktors kommt demnach in der praktischen Verwendung besondere Bedeutung zu.

Das berechnete Temperaturverhalten stützt diese Ausführungen durch die Annäherung an die gemessenen Bedingungen. Dies beruht auf der verminderten Zuführung „kalter“ Luft. Verbleibende Differenzen weisen jedoch ebenso darauf hin, dass die getroffene Anpassung noch nicht den realen Lüftungsbedingungen entspricht. An dieser Stelle muss allerdings auf die Problematik verwendeter zeitabhängiger und im Rahmen der durchgeführten Versuche nicht zu erfassender Zuluftschwankungen verwiesen werden. Es bleibt offen, in welchem Rahmen bzw. mit welchen Tendenzen Änderungen der berechneten Stoffkonzentrationen bei weiterer Veränderung der Lüftungsbedingungen eintreten. Die Ergebnisse des Untersuchungsschritts 1 legen jedoch nahe, dass in diesem Fall mit einer Konzentrationserhöhung zu rechnen ist. Die Beträge möglicher Überschätzungen können jedoch ohne Überprüfung nicht bestimmt werden, ggf. bewegen sich diese in geringem Rahmen.

Die Anpassung der Zu- und Abluft wurde durch alleinige Veränderung der Zuluft vorgenommen. In Anbetracht der scheinbaren Ungenauigkeit der bei den Versuchen gemessenen Lüftungsbedingungen muss davon ausgegangen werden, dass auch die Parametrisierung der Abluft nicht vollständig den tatsächlichen Verhältnissen entspricht. Realistischer als die alleinige Anpassung

der Zuluft erscheint daher die gegenseitige Abstimmung und Veränderung von Zu- und Abluft zueinander. Weiterhin wurden in die Berechnungen modale Mittelwerte einbezogen. Für die praktische Anwendung erscheint es auf Grundlage der Untersuchungen jedoch sinnvoller, bei Wertebereichen zu den Lüftungsbedingungen tendentiell geringere Werte (entsprechend ungünstigeren Rahmenbedingungen) zu berücksichtigen. Dies führt in den Berechnungsergebnissen eher zu einer Überschätzung der Bedingungen, so dass im Hinblick auf die anschließende Beurteilung der Exposition von Beschäftigten Sicherheiten bestehen.

Bei den Messungen zu den Szenarien 2001 bis 2005 wurden die Zulufttemperaturen nicht konkret erfasst und mussten für die Berechnungen aus anderen Werten abgeschätzt werden. Vor diesem Hintergrund und anhand der Feststellung, dass sich die erbrachten Vergleiche auf gleichem Niveau der Übereinstimmungen der übrigen Szenarien befinden, wird ein Temperatureinfluss als vorhanden, jedoch den Lüftungsbedingungen untergeordnet eingestuft. Die Begründung dieses Verhaltens basiert auf dem insgesamt ähnlichen Regime der Ausgangstemperaturen, die um wenige K variieren. Die ursprüngliche Verwendung des Modells zur Simulation der Bedingungen im Brandfall, bei dem Temperaturunterschiede von mehreren $100 K$ auftreten, bekräftigt diese Relation.

Zusammenfassend bestätigen die Ergebnisse und Vergleichsauswertungen die zuvor ermittelten Erkenntnisse, so dass eine Anwendbarkeit des Modells als Berechnung zur Stoffausbreitung festgestellt wird. Die gleichzeitigen Übereinstimmungen an verschiedenen Messpunkten innerhalb der Szenarien begründen diese Aussage und unterstellen, dass allgemein bei beliebiger Anordnung von Messpunkten eine entsprechende Wiedergabe tatsächlicher Bedingungen erzielt wird. Auf die Voraussetzung der detaillierten Analyse und Parametrisierung der Lüftungsbedingungen wird erneut hingewiesen.

4.2.2 Berechnungsverfahren einschließlich Berechnungen zur Stoffemission

Ziel dieses Teils innerhalb des Untersuchungsschritts 2 ist die Feststellung der Funktionsfähigkeit der Verknüpfungen innerhalb des Berechnungsverfahrens sowie der Vergleich von Messwerten mit Zwischen- und Endergebnissen der Berechnungen. Weiterhin werden die bislang gewonnenen Erkenntnisse in die Auswertungen eingebunden und überprüft. Zur Übersichtlichkeit und eindeutigen Abgrenzung der verschiedenen Aussagen sind die Auswertungen entsprechend gegliedert.

Hinweis:

Bei Auswertung der konzeptionellen Vorbetrachtungen zur Abschätzung von Strömungsgeschwindigkeiten bzw. bei der Durchführung der Emissionsrechnungen wurde festgestellt, dass für das Berechnungsszenario 2002-3 die Strömungsgeschwindigkeit oberhalb der Emissionsfläche 1 nicht korrekt erfasst und kontinuierlich mit dem Ergebnis „0 m/s“ ausgegeben wurde. Aufgrund der eindeutigen Ergebnisse in den Vergleichen der übrigen Berechnungsszenarien wurde auf eine Wiederholung und damit die Berechnung dieses Szenarios verzichtet.

4.2.2.1 Funktionalitätsuntersuchung intermodularer Schnittstellen

Anhand der vollständigen Durchführung des Berechnungsverfahrens - mit Ausnahme der abschließenden Stoffbewertung - auf Grundlage von Referenzdaten zur Verdunstung einer Flüssigkeit (Reinstoff) werden die nachfolgenden Schnittstellen zwischen den verschiedenen Modulen genutzt und auf ihre Anwendbarkeit hin untersucht. Es resultieren die angeführten Ergebnisse, die sich jedoch ausschließlich auf die formale Funktionalität, d.h. die prinzipielle Umsetzung der

vorgeplanten Verknüpfungen und Vorgehensweisen, und nicht auf die Richtigkeit der Ergebnisse (vgl. übrige Aussagen zur Ergebnisbewertung) beziehen.

1. *Verknüpfung Arbeitssystem als zusammenfassende Bereitstellung der Eingangsparameter mit den Modulen zur Erfassung der Stoffemission sowie der Stoffausbreitung:*
Aus der aufgestellten Konkretisierung des Arbeitssystems können alle erforderlichen Parameter in die Berechnungen zur Stoffemission und -ausbreitung übernommen werden. Allerdings muss in diesem Rahmen besondere Sorgfalt auf die korrekte Verwendung von Einheiten bzw. den entsprechenden Größenkorrelationen gelegt werden, da z.B. in die Verdunstungsmodelle gleiche physikalische Größen mit unterschiedlichen Einheiten eingehen. Die Funktionalität der Schnittstelle besteht.
2. *Einbindung von Ergebnissen zur Luftgeschwindigkeit aus Vorbetrachtungen (Nutzung des Ausbreitungsmodells FDS) in die Emissions-Abschätzung mit den Verdunstungsmodellen nach Mackay und Matsugu sowie Weidlich und Gmehling:*
Die Gleichungen der Verdunstungsmodelle sind zur Einbindung zeitabhängiger Temperaturen und Luftgeschwindigkeiten in einer Tabellenkalkulation umgesetzt. Die Ergebnisse der Vorbetrachtungen können in diese (Emissions-) Berechnungsdateien übernommen werden. Dazu müssen einerseits die ausgegebenen Zeitschritte der Vorbetrachtungsergebnisse als Zeitbezüge übernommen werden. Andererseits erfordert die Verwendung ebenfalls die Berücksichtigung ggf. unterschiedlicher Einheiten, die im Rahmen der Übertragung angepasst bzw. umgerechnet werden müssen. Die Funktionalität der Verknüpfung ist nachgewiesen.
3. *Einbindung von Ergebnissen der Emissions-Abschätzung aus Verdunstungsmodellen nach Mackay und Matsugu sowie Weidlich und Gmehling als Eingangsparameter in Berechnungen zur Stoffausbreitung unter Berücksichtigung von einheitenbezogenen Anpassungsfaktoren:*
Die Ergebnisse der Verdunstungsmodelle weisen unterschiedliche Einheiten auf, deren Berücksichtigung über Faktoren zur Einheitenkonvention bei der Weiterverwendung erfolgt. Bei der Verwendung dieser Faktoren ist die Verknüpfung zwischen den Modulen bzw. Modellen funktionsfähig, auf die Verwendung der richtigen Faktoren muss allerdings geachtet werden. Die zeitabhängigen Ergebnisse der Verdunstungsmodelle schwanken mit geringer Streuung. Die Übernahme dieser Abweichungen in die Ausbreitungsberechnungen ist prinzipiell möglich, allerdings vor dem Hintergrund der auftretenden Abweichungsbeträge und der zu erwartenden Auswirkungen auf die Berechnungsergebnisse zur Stoffausbreitung unverhältnismäßig hoch. Daher bietet sich die Verwendung der aufgezeigten Bildung von Mittelwerten zur flächenbezogenen Emissions-Massenströmen und deren Übernahme in die Berechnungen zur Stoffausbreitung an. Die zeitabhängige Parametrisierung der Emissions-Massenströme ist bei größeren Beträgen von Abweichungen oder sprunghaftem Verhalten möglich und erforderlich.
4. *Bereitstellung von Berechnungsergebnissen zur Stoffausbreitung als Eingangswerte in die abschließende Bewertung der Arbeitssituation (Modul nicht ausgeführt):*
Die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung werden durch das Modell FDS zeitabhängig ausgegeben und können in eine Tabellenkalkulation importiert werden. Dadurch stehen die berechneten Stoffkonzentrationen an den jeweiligen Messpunkten zeitabhängig - beginnend beim Berechnungszeitpunkt $t = 0 \text{ s}$ - mit der Einheit $[\text{kg}/\text{m}^3]$ zur Verfügung. Anhand der aus dem Arbeitssystem bekannten Aufenthaltsdauern, ggf. an verschiedenen -orten, kann eine direkte Datenauswahl und Zusammenstellung zur Bewertung der Tätigkeit er-

folgen. Sofern ein Grenzwertkonzept, insbesondere Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW), zugrunde gelegt wird, muss ggf. eine Umrechnung auf die jeweilige Einheit der Stoffkonzentration (z.B. $[mg/m^3]$, $[ppm]$) erfolgen. Die Funktionalität der Schnittstelle zwischen den Modulen besteht.

5. Bereitstellung von Berechnungsergebnissen als Grundlage der Überprüfung der (z.B. physikalischen) Sinnhaftigkeit (verfahrensinterne Ergebnisvalidierung):

Wie zuvor ausgeführt stehen die Berechnungsergebnisse der Vorbetrachtungen, der Berechnungen mit Verdunstungsmodellen und der Ausbreitungsberechnungen tabellarisch (ggf. nach entsprechendem Import in ein Tabellenkalkulationsprogramm) zur Verfügung. Eine Überprüfung auf Sinnhaftigkeit der Berechnungsergebnisse basiert auf diesen tabellarischen Formen, zur Übersicht und Veranschaulichung zeitabhängiger Verläufe können darauf aufbauend - analog zu den in diesem Bericht genutzten Visualisierungen - die entsprechenden graphischen Darstellungen erstellt und herangezogen werden.

Mit Verweis auf die Identifizierung einer falschen Parametrisierung des Ausbreitungsmodells im Berechnungsszenario 2006-1 besteht grundsätzlich die Möglichkeit bzw. Funktionalität der verfahrensinternen Ergebnisvalidierung. Die Untersuchungen müssen einzelfallabhängig und mit entsprechendem Sachverstand durch den Anwender des Verfahrens vorgenommen werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Einheiten der Ergebnis- bzw. Eingangswerte der Vorbetrachtungen, der Emissions- und Ausbreitungsmodelle sowie der ggf. durch das Arbeitssystem bereitgestellten Eingangsparameter werden die entsprechenden Schnittstellen und Verknüpfungspunkte als potentielle Fehlerquellen identifiziert. Bei der Anwendung des Berechnungsverfahrens ist an diesen Stellen mit besonderer Sorgfalt vorzugehen. Bei Feststellung unverhältnismäßiger Werte von (Zwischen-) Ergebnissen sollten die Verknüpfungen und die in die Modellparametrisierungen übernommenen Größen überprüft werden.

4.2.2.2 Bewertung und Interpretation von Emissionsberechnungen

4.2.2.2.1 Beschreibung der Vergleiche

Der direkte Vergleich von Messwerten und Berechnungsergebnissen zur Verdunstung von Isoopropanol (vgl. Anhang J.2.1) ergibt, dass die berechneten Emissions-Massenströme in keinem Szenario - weder bei direkter Übernahme noch bei Anpassung der Lüftungsbedingungen - die gemessenen Werte erreichen. Die Unterschätzung besteht bei Szenarien mit eingeschalteter Lüftung mit Faktoren von ca. 2,4 bis 5,5, bei Szenarien mit ausgeschalteter Lüftung sogar mit Faktoren zwischen ca. 4,5 und 10.

Sofern in den Versuchen zwei Verdunstungsflächen unmittelbar nebeneinander angeordnet waren, wurden für die Verdunstungs-Massenströme unterschiedlich hohe Werte ermittelt. Je nach Konstellation der Flächen zueinander und zum Standpunkt der ggf. anwesenden Person ergaben sich für die verschiedenen Versuchsgestaltungen typische Verhalten, welche Fläche einen höheren bzw. niedrigeren Massenstrom aufwies.

Der Abgleich der Relationen der gemessenen mit den berechneten Werten zueinander zeigt für die verschiedenen Versuchsanordnungen voneinander abweichende Verhalten der Berechnungsergebnisse. Die gemessenen qualitativen Verhältnisse werden nicht in allen Szenarien korrekt wiedergegeben:

- 2 Verdunstungsflächen, Lüftung ausgeschaltet:
korrekte Wiedergabe der Relation in Szenarien 2001 und 2005; keine korrekte Wiedergabe bei geringer Differenz der Werte in Szenarien 2010 und 2014;

- 2 Verdunstungsflächen, Lüftung eingeschaltet:
korrekte Wiedergabe in den Szenarien 2002-3 bzw. -4, 2011-3 bzw. -4 und 2015-3; keine korrekte Wiedergabe in Szenarien 2006-3 bzw. 2006-4 und 2015-4;
- 1 Verdunstungsfläche, Lüftung eingeschaltet:
keine Relation vorliegend, da nur eine Verdunstungsfläche;
- 2 Verdunstungsflächen, alternative Positionierung, Lüftung eingeschaltet:
korrekte Wiedergabe der Relation in den Szenarien 2004-4, 2008-4, 2013-4 und 2017-4;
keine korrekte Wiedergabe in Szenarien 2004-3, 2008-3, 2013-3 und 2017-5;
- 2 Verdunstungsflächen, Lüftung eingeschaltet, kein Personenaufenthalt:
korrekte Wiedergabe der Relation in den Szenarien 2009-3 bzw. -4 und 2018-3 bzw. -4.

Mit Anpassung der Lüftungsbedingungen ändern sich die Faktoren der Abweichung zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen ebenfalls. Dabei nimmt die rechnerische Unterschätzung der Messwerte mit der Lüftungsanpassung generell zu. Ausnahmen bilden die Szenarien mit alternativer Positionierung der Verdunstungsflächen, in denen sich die Berechnungsergebnisse entweder unterschiedlich entwickeln (Zu- und Abnahme für je eine Verdunstungsfläche in den Szenarien 2004-4, 2013-4 und 2017-4) oder in Szenario 2008-4 generell zunehmen.

4.2.2.2 Bewertung und Interpretation

Aus den rechnerischen Vorbetrachtungen zur Berechnung der Stofffreisetzung durch Verdunstung gehen modellspezifisch die Umgebungstemperatur sowie die unmittelbar über der Verdunstungsfläche festgestellte Luftgeschwindigkeit ein. Dementsprechend bilden diese Faktoren Einflussbedingungen und Einwirkungsfaktoren für Unsicherheiten auf die Berechnungsergebnisse.

Die Verdunstungsmodelle nach Mackay und Matsugu bzw. Weidlich und Gmehling berücksichtigen in den jeweiligen Gleichungen die Verdunstungstemperatur in $[K]$, die die Flüssigkeitstemperatur während des Verdunstungsvorgangs darstellt und die vereinfachend als Umgebungstemperatur angenommen werden kann. Die Verdunstungstemperatur bildet dabei jeweils einen Faktor im Nenner der Gleichungen mit einem Gewichtungsexponenten „= 1“, der dementsprechend mathematisch zur Verringerung des Berechnungsergebnisses führt. Die Raumtemperatur wird darüber hinaus zur Abschätzung weiterer Parameter berücksichtigt, die jeweils in den Zählern mit unterschiedlichen Gewichtungsexponenten Verwendung finden.

Aus den Vorbetrachtungen wurde die Raumtemperatur an den Referenz-Messpunkten ermittelt, die auch in den Ausbreitungsrechnungen Verwendung fanden. Eine Berechnung an den Positionen der verschiedenen Verdunstungsflächen wurde dagegen nicht durchgeführt. Da dieser Messpunkt einen größeren Abstand zum Aufenthaltsort der Person aufweist als die Verdunstungsflächen, ist davon auszugehen, dass unmittelbar an den Flächen eine höhere Temperatur festgestellt würde. Wie in Kap. 4.2.1 dargelegt werden die Raumtemperaturen durch die Berechnungen - auch in den Vorbetrachtungen - tendenziell unterschätzt. Aufgrund der mathematischen Konstellation würde eine Berücksichtigung höherer Raum- bzw. Verdunstungstemperaturen also zu einer zusätzlichen Unterschätzung des Emissions-Massenstroms führen. Da die in die Verdunstungsmodelle eingehenden Unterschiede sich jedoch im Bereich von wenigen K bewegen sollten, wird die Auswirkung dieser örtlichen Ungenauigkeit - auch unter Hinweis auf die zu verwendende Einheit in $[K]$ - bei der Berechnung auf das Gesamtergebnis des Emissions-Massenstroms für gering erachtet.

Für einen tatsächlichen Einsatz des Verfahrens ist festzuhalten, dass bei der Durchführung von

Vorbetrachtungen die Positionen von Emissionsflächen zur Parametrisierung von Temperatur-Messstellen möglichst exakt beachtet werden müssen. Um eine Korrelation abgeschätzter Werte zu erreichen, bietet sich eine einheitliche Position für Temperatur- und Geschwindigkeitsberechnungen bzw. -dokumentation an.

Die Verdunstungsmodelle beziehen die Luftgeschwindigkeiten in Richtung der Überströmungslänge (größere geometrische Ausdehnung) der Verdunstungsfläche ein. Die Vorbetrachtungen berechneten dementsprechend die X-Komponente der Luftgeschwindigkeiten. Die Abschätzungen lassen sich jedoch nicht anhand von Messwerten überprüfen, da während der Versuche die Geschwindigkeiten nicht protokolliert wurden. Lediglich vor Beginn jedes Versuches wurden aus Sicherheitsaspekten Geschwindigkeiten oberhalb der Verdunstungsflächen gemessen, die äußerst gering (typische Schwankungen zwischen bspw. 0,00 und 0,15 m/s) waren. Insofern ist zumindest von einer größenordnungsmäßigen Übereinstimmung der Mess- und Berechnungsergebnisse von zu Luftgeschwindigkeiten auszugehen. Die zuvor ermittelten Ergebnisse zur Übereinstimmung von Konzentrationsverläufen stützt diese Vermutung. Problematisch ist dagegen die teilweise nicht korrekte Wiedergabe der Relation der Flächen untereinander. Zur detaillierten Klärung ist die weitere Überprüfung des Modells, insbesondere bei der Konstellation geringer Geschwindigkeiten in der Nähe wärmeemittierende Personen, notwendig.

Der Einfluss der ermittelten Luftgeschwindigkeiten auf die berechneten Emissions-Massenströme wird aus dem Verhalten der Ergebnisse (dargestellt durch die Faktoren der Unterschätzung) bei der szenariospezifischen Anpassung der Lüftungsbedingungen deutlich: Die Abstimmung von Zu- und Abluftvolumenströmen begrenzt gleichzeitig auch die Zuluftgeschwindigkeit, so dass sich innerhalb des Berechnungsraums geringere Geschwindigkeitsverhältnisse entwickeln. Die zuvor getroffenen Erkenntnisse weisen darauf hin, dass die Anpassung der Lüftungsbedingungen in den Berechnungen der tatsächlichen Situation während der Versuche näher kommt als die ursprüngliche Parametrisierung. Dementsprechend muss dies auch für die Geschwindigkeiten oberhalb der Verdunstungsflächen unterstellt werden. Aus der allgemeinen Geschwindigkeitsbegrenzung folgt die gleichzeitige Abnahme der berechneten Verdunstungs-Massenströme, die damit jedoch weiter von den tatsächlichen Bedingungen abrücken. Das abweichende Verhalten an der alternativen Position der Verdunstungsflächen wird dagegen auf die - in diesen Szenarien nicht so relevante - komplexe Zusammenwirkung von Zu- und Abluft, ggf. in Verbindung mit der wärmebedingten Beeinflussung durch eine anwesende Person zurückgeführt, deren Signifikanz im Hinblick auf die allgemeine Strömungscharakteristik innerhalb des Raumes steigt: Durch die Anpassung treten allgemein ruhigere Strömungsbedingungen ein, die insbesondere an dieser Position eine gerichtete Strömungsführung bewirken. Ein Erklärungsansatz für das unterschiedliche Verhalten hinsichtlich der flächenspezifischen Zu- und Abnahme in Szenario 2008-4 ist, dass im Vergleich mit den Szenarien 2004, 2013 und 2017 hier die höchsten Zu- und Abluftvolumenströme vorliegen. Dies weist gleichermaßen auf die vorherigen Vermutungen hin.

Wie beschrieben beruhen die Emissionsberechnungen auf der ausschließlichen Berücksichtigung der X-Komponenten der Geschwindigkeiten. Eine Überlegung ist, ob bei der Ableitung der Verdunstungsmodelle entgegen der in den Berechnungsgleichungen geltenden Definitionen die Gesamtgeschwindigkeit einbezogen wurde. Zur Überprüfung wurden aus den Vorbetrachtungen die Gesamtgeschwindigkeiten aus den X- und Y-Geschwindigkeitskomponenten ermittelt und beispielhaft in die Emissionsberechnungen übertragen. Es zeigte sich jedoch, dass die Gesamtgeschwindigkeiten über den Verdunstungsflächen niedriger als die reinen X-Komponenten waren und somit die Unterschätzung der tatsächlichen Emission zunahm.

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die (in Vorbetrachtungen berechneten) Luftgeschwindigkeiten den maßgeblichen Einflussfaktor auf die Ergebnisse der Verdunstungsmodelle darstellen. Dieser wird größer als der Einfluss der Verdunstungs- bzw. Umgebungstemperatur bewertet,

da gleichzeitig u.a. die Wärmefreisetzung anwesender Personen bzw. von Betriebsmitteln o.ä. zusätzlichen Einfluss erhält.

Die rechnerisch abgeschätzten Luftgeschwindigkeiten über den Verdunstungsflächen liegen am unteren Ende (Modell nach Mackay und Matsugu) bzw. außerhalb (Modell nach Weidlich und Gmehling) der Anwendungsbereiche der Abschätzungen. Aufgrund der übrigen Beobachtungen und Erkenntnisse muss davon ausgegangen werden, dass die Geschwindigkeiten zumindest größenordnungsmäßig korrekt abgeschätzt werden. Für die Verdunstungsmodelle wird daher gefolgert, dass diese zumindest für äußerst geringe Geschwindigkeiten nicht valide sind. Für das Berechnungsverfahren ist dies insbesondere deshalb relevant, da an Arbeitsplätze die Anforderung besteht, Zugluft zu vermeiden (gem. ASR A3.6⁶ für Lufttemperaturen von 20° C, Turbulenzgrad 40% und geringe Arbeitsschwere mittlere Luftgeschwindigkeit kleiner 0,15 m/s). Dieser Bereich ist also insbesondere in praktischen Anwendung anzutreffen. Die Berücksichtigung dieser beispielhaft ausgewählten Verdunstungsmodelle innerhalb des konzipierten Berechnungsverfahrens bildet somit einen Schwachpunkt und muss daher überprüft werden.

Hinweis:

Für die anschließenden Berechnungen zur Stoffausbreitung, die auf der rechnerischen Abschätzung der Emissions-Massenströme beruhen, muss aufgrund der erheblichen Unterschätzung der tatsächlichen Stofffreisetzung davon ausgegangen werden, dass auch die berechneten Stoffkonzentrationen z.T. deutlich unterschätzt werden. Die im Anschluss angestellten Ergebnisvergleiche und -untersuchungen weisen auf die Relevanz der genauen Abschätzung der Emissionsbedingungen als Eingangsparemeter der Ausbreitungsrechnungen hin.

4.2.2.3 Vergleich von Ausbreitungsrechnungen mit gemessener und berechneter Stoffemission

Vor dem Hintergrund der deutlichen Unterschätzung der gemessenen Verdunstung durch die zugehörigen Berechnungsergebnisse werden folgende Thesen an die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen aus den bisherigen Erkenntnissen formuliert:

- Die gemessenen Stoffkonzentrationen werden durch die Berechnungsergebnisse unterschätzt, es werden keine ähnlich hohen Konzentrationsniveaus erreicht.
- Die Angleichung von Mess- und Berechnungsergebnissen bzw. die Erhöhung berechneter Stoffkonzentrationen bei Anpassung der Lüftungsbedingungen, die zuvor festgestellt wurde, ist aufgrund der allgemeinen Verringerung der Stofffreisetzung fraglich. Ausnahme bilden die Szenarien mit einer Verdunstung an Positionen mit erhöhter Distanz zur Person („alternative Anordnung bzw. Position“). Ob sich die verschiedenen Effekte ausgleichen, ist zu überprüfen.
- Die Stoffkonzentration auf dem Tisch wird bei unmittelbar benachbarter Anordnung der Stofffreisetzung weiterhin erheblich unterschätzt, die Anpassung der Lüftungsbedingungen übt keinen wesentlichen Effekt aus.

Hinweis:

Die Berechnungen beruhen auf bereits erörterten Lüftungsbedingungen und Personenaufenthalten, die sich erneut in einem entsprechen Ergebnisverhalten der ermittelten Temperaturen äußern. Auf die Erläuterung und Auseinandersetzung mit den gemessenen bzw. berechneten Temperaturverläufen wird daher an dieser Stelle verzichtet und auf die vorhergehenden Erläuterungen verwiesen.

⁶ Technische Regeln für Arbeitsstätten - ASR A3.6: Lüftung. Ausschuss für Arbeitsstätten: Berlin, Ausgabe Januar 2013, geändert in GMBI 2013, S. 359

4.2.2.3.1 Beschreibung der Vergleiche

Die errechneten Stoffkonzentrationen weichen in Abhängigkeit zur Anordnung der verschiedenen Messpunkte sowie unter Berücksichtigung der Konstellationen der Rahmenbedingungen teils erheblich voneinander ab, so dass eine vollständige Verallgemeinerung nicht möglich ist. Die Unterschiede bestehen einerseits in der Relation der berechneten Konzentrationsniveaus im Vergleich zu den Messergebnissen, andererseits in der allgemeinen Veränderung durch Anpassung der Lüftungsbedingungen. Die Berechnungsergebnisse weisen z.T. - wie im Übrigen bereits festgestellt - erhebliche Schwankungen um ein Konzentrationsniveau auf. Folgende Tendenzen sind jedoch, teils in Relation zueinander, erkennbar.

- **Messpunkt Atembereich:**
Die gemessenen Stoffkonzentrationen werden i.A. erheblich unterschätzt. Bei Anpassung der Lüftungsbedingungen kommt es zu einer Erhöhung der berechneten Stoffkonzentrationen, die eine deutliche Annäherung an die Messwerte bewirkt. In Szenarien, in denen die alternative Anordnung der Stofffreisetzung besteht, ist die feststellbare Konzentrationserhöhung für eine Annäherung nicht ausreichend. Das in den vorherigen Untersuchungen festgestellte charakteristische Verhalten bleibt generell bestehen.
Ausnahme dieses einheitlichen Verhaltens bilden die Szenarien, in denen lediglich ein Tablett als Verdunstungsfläche Verwendung findet: Hier besteht keine Einheitlichkeit, mit Anpassung der Lüftungsbedingungen treten sowohl Zu- als auch Abnahme des grundlegenden Konzentrationsniveaus auf. Einen Extremfall bildet das Szenario 2003-4, in dem der berechnete Konzentrationsverlauf näherungsweise den Messwerte entspricht und diese teilweise überschätzt. Die statistischen Kennwerte sind aufgrund der auftretenden Schwankungen nicht aussagekräftig, eine Verdeutlichung erfolgt durch die Verwendung des gleitenden Mittelwertes.
- **Messpunkt in Kopfhöhe außerhalb des Atembereichs:**
Die berechneten Stoffkonzentrationen sind in der ursprünglichen Lüftungskonfiguration tendentiell auf ähnlichem Niveau wie die Messwerte. Nach Abstimmung der Zuluft tritt ein nicht einheitliches Verhalten ein, indem sowohl ein Verbleib auf ähnlichem Konzentrationsniveau oder eine geringfügige Abnahme als auch in Szenarien mit nur einer Verdunstungsfläche eine Zunahme samt eintretender Überschätzung beobachtet wird. Die statistischen Kennwerte weisen unter Berücksichtigung der vorhandenen Konzentrationsschwankungen darauf hin, dass im Vergleich zu anderen Messpunkten an dieser Position die besten Erreichungsgrade der Messwerte festzustellen sind.
- **Messpunkt unterhalb Tischniveau:**
Die berechneten Stoffkonzentrationen weisen in Abhängigkeit zur Konstellation der Rahmenbedingungen unterschiedliche Niveaus bei allgemeiner Unterschätzung der Messwerte auf, wobei in Szenarien mit nur einer Verdunstungsfläche erneut Übereinstimmungen erzielt werden. Mit Änderung der Lüftungsbedingungen erfolgt allgemein ein Verbleib oder eine Abnahme der Berechnungsergebnisse, in Szenario 2003-4 wird dagegen eine Zunahme festgestellt.
- **Messpunkt in Bodennähe:**
Die Berechnungsergebnisse unterschätzen die Messwerte, die in Abhängigkeit zur Position des Messpunkts ggf. lediglich gering ausfällt. Mit Anpassung der Zuluft tritt eine Abnahme der berechneten Konzentrationsniveaus ein, die z.T. erheblich ist.
- **Messpunkt auf Tisch:**
Die gemessenen Stoffkonzentrationen werden deutlich unterschätzt, wobei die jeweilige

Anpassung der Lüftungsbedingungen über alle Konstellationen der Rahmenbedingungen hinweg einen Verbleib auf ähnlichem Niveau bzw. eine geringfügige Abnahme bewirkt. Das in den anderen Teilen der Untersuchungen festgestellte Verhalten bei unmittelbar benachbarter Anordnung der Stofffreisetzung ohne wesentlichen Effekt veränderter Lüftungsbedingungen bleibt bestehen.

Über die Betrachtungen an den verschiedenen Messpunkten hinaus wird für die Szenarien mit abgeschalteter Lüftung eine generelle und erwartungsgemäß erhebliche Unterschätzung der Messwerte festgestellt.

4.2.2.3.2 Bewertung und Interpretation

Allgemein entsprechen die Berechnungsergebnisse bei Verwendung rechnerisch abgeschätzter Emissionsbedingungen der erwarteten Messwertunterschätzung. Allerdings tritt diese z.T. nicht in der Höhe auf, von der aufgrund der Abweichungen der Eingangswerte in die Ausbreitungsrechnungen ausgegangen wurde. Die o.g. Beobachtungen weisen spezifische Verhalten an bestimmten Messpunkten und Rahmenbedingungen auf. Durch Abwägung der Gesamtheit der Bedingungen und errechneten Konzentrationsverläufe - insbesondere bei Anpassung der Lüftungsbedingungen - werden die folgenden Ergebnisse des Untersuchungsteils in Bezug auf die formulierten Thesen zusammengefasst:

1. Grundsätzlich wird der Erwartung an die Berechnungsergebnisse entsprochen, dass die gemessenen Stoffkonzentrationen nicht erreicht und somit unterschätzt werden.
2. Die deutliche Unterschätzung der rechnerischen Emissions-Massenströme, die durch die in Frage zu stellende Anwendbarkeit der Verdunstungsmodelle auf Grundlage geringer Luftgeschwindigkeiten hervorgerufen werden, wird bei der Ausbreitungsrechnung durch die Lüftungsbedingungen und die örtlichen Relationen teilweise abgemindert. Nachstehende Effekte und Zusammenhänge begründen dies:
 - Durch Aufenthaltsort der Person und die spezifische Luftführung wird ein Stofftransport in den oberen Raumbereich begünstigt. Von dort erfolgt eine Stoffabfuhr. Die festgestellten Bedingungen am Messpunkt in Kopfhöhe beruhen auf der „günstigen“ Lage im bestehenden Strömungsverlauf, so dass im Gegensatz zum sonstigen Raum hier höhere Konzentration feststellbar sind.
 - Die tendentiell geringen Stoffkonzentrationen im Bodenbereich bestätigen die Vermutung, dass ein vermehrter Stofftransport in die oberen Raumbereiche berechnet wird.
 - Isopropanol strebt aufgrund der Stoffdichte im Vergleich mit der Umgebungsluft ein Absinken in Richtung des Bodens an. Messpunkte, die unter günstigen Rahmenbedingungen (insbesondere Emission in relativ großem Abstand zur Person und mit Ausrichtung zum Messpunkt) ähnliche Konzentrationsniveaus wie die Messwerte erreichen, liegen außerhalb des unmittelbaren Wirkungsbereichs der Luftführung und innerhalb von abwärtsgerichteten Stoffströmungen. Im Anschluss entstehen jedoch Wiederaufwirbelung und Abtransport aus dem Versuchsraum. Die Gesamtheit der Berechnungsergebnisse lässt darauf schließen, dass sich keine einheitlichen Übereinstimmungen von Mess- und Berechnungsergebnissen innerhalb der Szenarien einstellen, die für eine Validität erforderlich sind.
3. In Tendenzen wird das Verhalten der Berechnungsergebnisse bei Anpassung der Lüftungsbedingungen beibehalten. Änderungen beruhen mutmaßlich auf der gleichzeitigen Differenz der Emissions-Massenströme, die i.A. geringere Konzentrationsverläufe zulassen.

4. Die Charakteristik des Messpunkts auf dem Tisch bei gleichzeitiger Emission in direkter Nähe wird beibehalten.

Für die geschlossene Anwendung des Berechnungsverfahrens muss aufgrund der Feststellungen die Aussage getroffen werden, dass die Kombination aus rechnerischer Abschätzung der Stofffreisetzung mit den einbezogenen Verdunstungsmodellen keine validen Ergebnisse erbringt. Auch wenn in Einzelfällen Annäherungen zwischen Berechnungsergebnissen und Messwerten bestehen, werden innerhalb der berechneten Szenarien keine einheitlichen Übereinstimmungen erzielt. Eine praktische Anwendbarkeit in der erarbeiteten Form des Berechnungsverfahrens besteht scheinbar nicht.

Da die durchgeführten Ausbreitungsberechnungen auf unterschätzten Emissions-Massenströmen beruhen, dürfen die Feststellungen nicht unmittelbar zu Validierungsaussagen hinsichtlich der Ausbreitungsberechnung herangezogen werden. Der Schwachpunkt der Berechnungen liegt augenscheinlich in der Abschätzung bzw. Berechnung der Emissionsparameter. Die Auseinandersetzung mit den berechneten Konzentrationsverläufen weist allerdings auch auf die Sensitivität des Berechnungsmodells hin, dass die genaue bzw. realitätsgetreue Parametrisierung der Stofffreisetzung die Voraussetzung für die möglichst exakte Konzentrationsberechnung ist.

4.2.3 Gesamtinterpretation Untersuchungsschritt 2

Aufbauend auf den Ergebnissen des Untersuchungsschritts 1 weist Untersuchungsschritt 2 nach, dass bei einer genauen und detaillierten Abschätzung der Stofffreisetzung bzw. bei bekanntem Emissions-Massenstrom das Modell FDS zur validen Ausbreitungsrechnung resp. rechnerischen Abschätzung orts- und zeitabhängiger Stoffkonzentrationen herangezogen werden kann. Als Einflussfaktoren bzw. Voraussetzungen für eine praktische Anwendung des Modells werden folgende Erkenntnisse festgestellt bzw. Vermutungen aus den Ergebnissen des Untersuchungsschritts 1 bestätigt:

1. genaue Abschätzung von Lüftungsbedingungen, dabei Abstimmung der Zu- und Abluftvolumenströme aufeinander (Prinzip der Massenerhaltung) und Ansatz tendentiell geringer Werte aus Wertebereichen,
2. genaue Abschätzung von Zuluft- und Oberflächentemperaturen,
3. genaue Abschätzung der Emissions-Massenströme und -bedingungen als ergebnisrelevanter Sensitivitätsfaktor sowie
4. Beachtung zeitabhängiger Schwankungen von Rahmenbedingungen, sofern sinnvoll und abschätzbar.

Die Untersuchungen beruhen auf Versuchen, die eine flächige Stofffreisetzung beinhalten. Die entsprechende Freisetzungsfläche konnte ohne Bildung weitreichender Äquivalenzverhältnisse definiert werden, so dass die Forderung auf einen Verzicht ebenfalls bestätigt wird.

Bei alleinigen Untersuchungen zur Berechnung der Stoffausbreitung werden innerhalb der verschiedenen Szenarien korrespondierende Übereinstimmungen erreicht, die den Schluss zulassen, dass Konzentrationsbedingungen an willkürlichen Positionen im Versuchs- bzw. Berechnungsraum auf verlässlichem Niveau wiedergegeben werden. Die Validität des Modells FDS zur Stoffausbreitungs- bzw. Konzentrationsberechnung wird somit unterstellt.

Die verschiedenen Module des konzipierten Berechnungsverfahrens sind geeignet miteinander verknüpft. Dabei werden einerseits alle erforderlichen Eingangswerte für die verschiedenen Module durch das konkretisierte Arbeitssystem bereitgestellt. Andererseits verfügen die Module zur

Ermittlung der Emission, zur Berechnung der Stoffausbreitung sowie zur Bewertung der Tätigkeit bzw. der Arbeitsbedingungen über miteinander kompatible Schnittstellen. Die Verknüpfungen werden durch definierte Anpassungsfaktoren zur Einheitenkonvention bzw. -umrechnung gebildet. Werden bei der Auswertung von Berechnungen mutmaßliche Fehler identifiziert, bilden die auf Verknüpfungen basierenden Eingangswerte einen ersten Ansatzpunkt zur Überprüfung der korrekten Modellparametrisierung.

Innerhalb des Modells zur Erfassung der Stoffausbreitung ist die Berücksichtigung zeitabhängiger Eingangsparameter, insbesondere zu Emissions-Massenströmen und den Lüftungsbedingungen, grundsätzlich möglich. Allerdings ist die Abbildung nur mit ggf. großem Aufwand realisierbar, so dass bei relativ kleinen bzw. zeitlich unbekanntem Schwankungen die Verwendung von Mittelwerten sinnvoll ist. Die erforderliche Genauigkeit ist durch den Anwender abzuschätzen, da sowohl Lüftungs- als auch Emissionsbedingungen ergebnisrelevante Parameter mit Sensitivitäten darstellen.

Das Ausbreitungsmodell kann prinzipiell für rechnerische Vorbetrachtungen, die ggf. zur Abschätzung der Emissionsbedingungen erforderlich sind, herangezogen werden. Die Ermittlung realitätsnaher Ergebnisse konnte aufgrund der Versuchskonzeption und messtechnischen Ausstattung lediglich näherungsweise abgeschätzt bzw. aus dem allgemeinen Modellverhalten interpretiert werden. Den Berechnungsergebnissen wird jedoch eine tendenzielle bzw. größenordnungsmäßige Wiedergabe der tatsächlichen Rahmenbedingungen unterstellt.

Die in den Untersuchungen aus rechnerischen Vorbetrachtungen ermittelten Luftgeschwindigkeiten, die für die Anwendung der Verdunstungsmodelle erforderlich werden, liegen außerhalb bzw. am unteren Ende der jeweiligen Anwendungsbereiche. Gleichzeitig sind die Komponenten der Luftgeschwindigkeiten an Arbeitsplätzen als durchaus typisch anzusehen, da bspw. aus dem Arbeitsstättenrecht eine Forderung nach möglichst zugluftfreier Gestaltung von Arbeitsplätzen besteht.

Im Vergleich mit der gemessenen Isopropanol-Verdunstung unterschätzen die Verdunstungsmodelle die Emissions-Massenströme deutlich. Diese beeinflussen die anschließenden Berechnungen zur Stoffausbreitung derart, dass diese entgegen der vorherigen Feststellungen keine geschlossenen Übereinstimmungen zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen erreichten. Die berücksichtigten Verdunstungsmodelle nach Mackay und Matsugu sowie Weidlich und Gmehling sind für die angetroffenen Rahmenbedingungen daher nicht valide. In der Folge ist auch das konzipierte Berechnungsverfahren - im Unterschied zum Modul zur Erfassung der Stoffausbreitung - nicht valide und erbringt keine ausreichend genauen Gesamtergebnisse.

Hinweis:

Der Anwendungsbereich des Verdunstungsmodells nach Weidlich und Gmehling beginnt bei Luftgeschwindigkeiten von 0,20 m/s in Längsrichtung der Verdunstungsfläche, die durch die rechnerisch abgeschätzten Geschwindigkeitskomponenten nicht erreicht werden. Der konzeptionelle Ausschluss des vorgefundenen Geschwindigkeitsbereichs durch die Ersteller des Modells kann daher an dieser Stelle bestätigt werden.

Bei Anwendung der Modelle bzw. des Berechnungsverfahrens obliegt dem Anwender die Überprüfung, ob Berechnungsergebnisse prinzipiell (physikalisch) möglich sind. Dazu können nachweislich Ergebnisparameter aus Emissions- und Ausbreitungsmodellen herangezogen werden. Innerhalb der vorliegenden Untersuchungen konnte z.B. eine falsche Parametrisierung des Ausbreitungsmodells anhand sprunghafter Temperaturentwicklungen identifiziert werden. Sofern derartige Betrachtungen durch den Anwender vorbereitet, d.h. entsprechende Berechnungsergebnisse zur Dokumentation vorgesehen, und auch durchgeführt werden, ist dieser Teil des Berechnungsverfahrens funktionsfähig.

5 Fazit, Anwendbarkeit und Ausblick

5.1 Gesamtergebnis der Untersuchungen

Es wurden umfangreiche Referenzversuche und Berechnungen zur stoffspezifischen Emission und Ausbreitung in Räumen angestellt. Hinsichtlich des Ziels des Forschungsprojekts, ein neu konzipiertes Berechnungsverfahren zu validieren, werden abschließend aus den durchgeführten Untersuchungsschritten folgende Gesamtergebnisse abgeleitet:

1. Die Module des Berechnungsverfahrens sind methodisch als auch fachlich-inhaltlich aufeinander abgestimmt. Die Schnittstellen zwischen den Modulen sind kompatibel, alle erforderlichen Eingangsparameter der berücksichtigten Modelle werden geschlossen erfasst und zur weiteren Verwendung bereitgestellt.
2. Die in den vorliegenden Untersuchungen einbezogenen Verdunstungsmodelle nach Mackay und Matsugu bzw. Weidlich und Gmehling sind unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht valide (vgl. Untersuchungsschritt 2). Infolge dessen kann die Validität des Berechnungsverfahrens als geschlossene Anwendung nicht festgestellt werden.
3. Das für die Berechnung der Stoffausbreitung berücksichtigte Modell FDS ist für die Konzentrationsermittlung unter der Voraussetzung bekannter Emissions-Massenströme und für die in Untersuchungsschritt 2 aufgestellten Fallbetrachtungen valide. Für die Untersuchungen zur unmittelbaren Gaseinleitung in den Versuchsraum wird dagegen die Validität nicht nachgewiesen (vgl. Untersuchungsschritt 1). Als Hintergrund wird eine unvollständige Ermittlung von Rahmenbedingungen sowie die nicht vollumfänglich kontrollierte Stofffreisetzung vermutet.
Wesentliche ergebnisbeeinflussende Faktoren sind die Emissionsbedingungen (insbesondere Darstellung der Freisetzungsfläche und Abschätzung des Emissions-Massenstroms) und die Lüftungsverhältnisse, die als Voraussetzung möglichst detailliert bestimmt werden müssen. Ist eine genaue Festlegung dieser Parameter für die Berechnungen nicht möglich, empfiehlt es sich, ggf. mehrere Berechnungen mit unterschiedlicher Parametrisierung (z.B. im Sinne von Worst-Case-Betrachtungen) durchzuführen. Bei der Darstellung der Emissionsfläche ist zur Beibehaltung der Charakteristik der Freisetzungsgeschwindigkeit auf die Bildung von Äquivalenzverhältnissen, die über geringe Anpassungen hinausgehen, zu verzichten. In derartigen Fällen entsprechen Ergebnisse der Ausbreitungsberechnung mit einer großen Wahrscheinlichkeit nicht tatsächlichen Konzentrationsbedingungen, da sich auch das Ausbreitungsverhalten verändert.
4. Im Hinblick auf die unterschiedlichen Teilergebnisse der methodischen Untersuchungsschritte kann keine allgemeine Validität des Modells zur Ausbreitungsberechnung bestätigt werden. Der Einsatz des Modells ist daher bislang auf Anwendungsfälle begrenzt, die mit den Rahmenbedingungen im Untersuchungsschritt 2 vergleichbar sind. Der resultierende Anwendungsbereich des Modells sowie Einsatzmöglichkeiten werden in Kap. 5.2 ausgeführt.

5. Die innerhalb der Konzeption des Berechnungsverfahrens berücksichtigten Verdunstungsmodelle müssen auf ihre Anwendbarkeit weiter untersucht werden. Zum vollumfänglichen praktischen Einsatz des Berechnungsverfahrens ist es auf diesen zusätzlichen Untersuchungen aufbauend ggf. erforderlich, weitere bzw. andere Modelle und Abschätzungsmöglichkeiten zur Ermittlung der Emissionsbedingungen zu integrieren. In diesem Fall sind die vorhandenen Schnittstellen zwischen einzelnen Modellen (insbesondere Anpassungsfaktoren zur Einheitenkonvention) ebenfalls zu überprüfen und ggf. anzupassen.

Die im Vorfeld des geförderten Forschungsvorhabens geplanten Arbeiten wurden vollumfänglich durchgeführt. Einzelne Vorarbeiten des Forschungsvorhabens, die einzelnen Arbeitspaketen zuzurechnen sind, wurden bereits vor Beginn, d.h. außerhalb der Projektlaufzeit, auf Eigenkosten des Fachgebiets Sicherheitstechnik / Arbeitssicherheit der Bergischen Universität Wuppertal durchgeführt. Außerdem liefen verschiedene Arbeiten (insbesondere Versuchsdurchführungen, Parametrisierung von Vergleichsrechnungen und deren Durchführung) parallel zueinander. Die reale Bearbeitungsdauer der verschiedenen Arbeitspakete belief sich (ohne zusätzliche Kosten für die DGUV) auf:

1. Erarbeitung eines strukturierten Validierungskonzepts sowie Erarbeitung der Sicherheitskonzepte (ca. 3 Monate, maßgeblich erstellt als Vorarbeit),
2. Durchführung der experimentellen Versuche zur Referenzwertermittlung (ca. 1,5 Monate, Durchführung von Vorversuchen als Vorarbeit),
3. Durchführung von Vergleichsrechnungen zu den experimentellen Untersuchungen (Dauer ca. 2,5 Monate),
4. Durchführung von Sensitivitätsuntersuchungen (Dauer ca. 0,5 Monate),
5. Ergebnisvergleich und statistische Auswertung (Dauer ca. 2 Monate),
6. Bewertung der praxisorientierten Einsatzmöglichkeiten des neuen Berechnungsverfahrens (zugehörig zu Ergebnisvergleich und Auswertung, Dauer ca. 1 Monat).

Das in Kapitel 1.2 aufgestellte Ziel der Konzeption und Durchführung von Validierungsuntersuchungen des Berechnungsverfahrens wurde somit erreicht. Das Ergebnis ist die Falsifizierung der unterstellten allgemeinen Anwendbarkeit des Berechnungsverfahrens. Bezogen auf das Modul zur Erfassung der Stoffausbreitung sowie mit Einschränkungen zu den Rahmenbedingungen wurde die Aussage verifiziert.

5.2 Ableitung von Einsatzbedingungen und Verwendungsmöglichkeiten

Das konzipierte Berechnungsverfahren als geschlossene Anwendung kann in der vorliegenden Form nicht praktisch eingesetzt werden. Da in Teilen der Untersuchungen jedoch eine Übereinstimmung bzw. Annäherung von Mess- und Berechnungsergebnissen festgestellt wurde, ist die Verwendung ggf. möglich, wenn im Rahmen des Moduls zur Erfassung der Stoffemission keine rechnerischen Ermittlungen (insbesondere zur Verdunstungen) erfolgen.

Der Anwendungsbereich des neuen Berechnungsverfahrens für Betrachtungen im Arbeitsschutz wird durch nachstehende Begrenzungen und Bedingungen definiert:

1. Der betrachtete Stoff ist bei der Ausbreitung (d.h. Stofftransport an die Luft des Arbeitsraums) mitsamt seiner Eigenschaften bekannt¹.
2. Die Emissionsbedingungen sind bekannt, insbesondere kann der Emissions-Massenstrom definiert bzw. detailliert bestimmt werden. Weiterhin ist die Freisetzungsfläche bekannt.
3. Das Modul zur Erfassung der Stoffemission verzichtet auf die Anwendung von Berechnungsmodellen. Die Abschätzung und Umrechnung des flächenbezogenen Emissions-Massenstroms (Schnittstelle zum Modul zur Erfassung der Stoffausbreitung) basiert entweder auf - z.B. aus Messungen - bekannten Werten oder wird aus Analogiebetrachtungen ermittelt.
4. Die Lüftungsbedingungen des zu untersuchenden Arbeitsraumes sind bekannt und über Zu- und Abluftvolumenströme sowie -flächen dargestellt. Zeitabhängige Änderungen sind quantifizierbar und werden in die Parametrisierung des Ausbreitungsmodells einbezogen. Andernfalls werden tendentiell niedrige Werte innerhalb des Schwankungsbereichs angenommen, die Volumenströme aufeinander abgestimmt und Ausbreitungsberechnungen mit verschiedenen Konstellationen (als Sensitivitätsuntersuchungen) durchgeführt.
5. In der Parametrisierung des Ausbreitungsmodells kann die Emissionsfläche mit geringen Abweichungen zu den tatsächlichen Abmessungen dargestellt werden. Die Bildung von Äquivalenzverhältnissen, die über die Auf- oder Abrundung auf die Gitterweite der verwendeten Berechnungsfelder hinausgeht (z.B. in 5 cm-Schritten), ist nicht erforderlich. Die Absolutwerte der tatsächlichen Flächenausdehnungen werden näherungsweise beibehalten. Die Charakteristik der Emissionsgeschwindigkeit bleibt auf diese Weise in den Ausbreitungsberechnungen bestehen.
6. Die zeitabhängigen Schwankungen des Emissions-Massenstroms werden entweder in den Berechnungen zur Stoffausbreitung unmittelbar berücksichtigt oder durch geeignete Mittelwerte approximiert.
7. Die Zuluft- und Umgebungstemperaturen bewegen sich im allgemein üblichen klimatischen Bereich² und können näherungsweise bestimmt werden. Sind die Temperaturen nicht genau bekannt, müssen Berechnungen mit verschiedenen Konstellationen (insbesondere Relation der Temperaturen als „Sommer-“ bzw. „Winterfall“) durchgeführt werden.
8. Die Berechnungen sind auf Messpunkte im Atembereich von Beschäftigten (Gesichtspunkt des Arbeitsschutzes), die über wärmeemittierende Objekte innerhalb des Ausbreitungsmodells dargestellt werden, ausgerichtet. Für diese Messpunkte ist der Abstand zur Freisetzungsfläche von untergeordneter Bedeutung. Andernfalls kann für Messpunkte in unmittelbarer Nähe zur Freisetzungsfläche nicht von einer korrekten Ausbreitungsberechnung ausgegangen werden, da die Konzentrationsverläufe ggf. erheblich unterschätzt werden.
9. Sofern Berechnungen zu Geschwindigkeiten oder Temperaturen, z.B. als Vorbetrachtung zur Parametrisierung eines Emissionsmodells, erforderlich sind, müssen die entsprechenden Messpunkte an den tatsächlich relevanten Positionen angeordnet werden. Weiterhin

¹ Die Bedingung besteht aus der allgemeinen Konzeption des Berechnungsverfahrens und basiert nicht auf den durchgeführten Validierungsuntersuchungen.

² Die Bedingung besteht aus der allgemeinen Konzeption des Berechnungsverfahrens und vor dem Hintergrund üblicher Arbeitsbedingungen. Berechnungen mit erhöhten Temperaturen sind über die Validierungsarbeiten im Rahmen brandschutztechnischer Fragestellungen prinzipiell abgedeckt, allerdings wäre dann ein Personenaufenthalt vor dem Hintergrund des Arbeitsschutzes fraglich.

empfiehlt sich bei Berechnungen zur Stoffausbreitung die Erfassung der Raumtemperatur zur Abschätzung, ob die Ergebnisse physikalisch sinnvoll sind.

10. Zur Bewertung von berechneten Stoffkonzentrationen werden geeignete Sicherheitsfaktoren berücksichtigt. Diese werden entweder bei der Parametrisierung von Emission und Lüftung bereits einbezogen oder - hier empfohlen und wenn möglich - bei der bewertenden Gegenüberstellung von zusammengefassten Expositionen zu (Arbeitsplatz-) Grenzwerten verwendet.
11. Bei der Bewertung anhand von (Arbeitsplatz-) Grenzwerten werden geringe Grenzwertunterschreitungen durch die berechneten Stoffkonzentrationen als kritisch betrachtet. Zur Interpretation des Grenzwertvergleichs werden auch die verwendeten Sicherheitsfaktoren herangezogen.

Die Messergebnisse zeigen, dass in einem Arbeitsraum keine homogenen Stoffkonzentrationen vorliegen und diese ortsabhängig voneinander erheblich abweichen können. Im Rahmen des Anwendungsbereichs und unter Berücksichtigung der aufgeführten Voraussetzungen bzw. Anforderungen an die Anwendung des Berechnungsverfahrens ist das einbezogene Ausbreitungsmodell in der Lage, die Ortsabhängigkeit, die Konzentrationshöhe sowie zeitabhängige Verläufe rechnerisch nachzubilden. Dies ist eine besondere Stärke des Modells.

Auf Grundlage dieses Anwendungsvorteils sind im Rahmen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes verschiedene Einsatzmöglichkeiten möglich. Diese umfassen im Fokus des Präventionsgedankens verschiedene Einsatzfälle, die der DGUV u.a. im Rahmen der Entwicklung von Regeln und Informationen für ihre Branchen und Mitgliedsunternehmen Unterstützung leisten können. Folgende thematische Felder können ggf. anhand des validierten Teils des Berechnungsverfahrens praktische Anwendung im stofflichen Kontext finden, sofern die genannten Anwendungsbedingungen gegeben sind:

1. Einzelfallbezogener Einsatz:

- Spezifische Gefährdungsbeurteilungen bzw. Untersuchungen von Tätigkeiten und Arbeitsplätzen, sofern der verfahrensbedingte Aufwand gerechtfertigt ist, insbesondere
 - Konzentrationsberechnungen und grenzwertbezogene Bewertungen oder
 - vergleichende Untersuchungen zur Wirksamkeit verschiedener Gestaltungsmaßnahmen der Tätigkeiten, u.a. zur Dimensionierung von Lüftungsbedingungen;
- Überprüfung historischer Arbeitsbedingungen (u.a. im Rahmen von Berufskrankheiten-Verfahren) und forensische Untersuchungen zur Ableitung von Präventionsstrategien unter der Voraussetzung der Vorlage erforderlicher Eingangswerte.

2. Erarbeitung von Gestaltungslösungen bei typischen Tätigkeiten und Rahmenbedingungen (z.B. Branchenlösungen), insbesondere

- vergleichende Untersuchungen verschiedener Gestaltungsmaßnahmen der Tätigkeiten und deren Auswirkungen auf resultierende Stoffkonzentrationen oder
- Ermittlung von Mindestlösungen zur Sicherstellung sicherer Arbeitsbedingungen für Beschäftigte, speziell zur Bestimmung von Mindest-Lüftungsbedingungen bei typischen Tätigkeiten und ungünstigen Arbeitsbedingungen zur Veröffentlichung von Empfehlungen.

Aufgrund der Komplexität des konzipierten Berechnungsverfahrens und des integrierten Modells zur Ausbreitungsberechnung, der erforderlichen Einschätzung der Verwendungsmöglichkeit und der erforderlichen Rahmenbedingungen sowie des Aufwands der Untersuchungen ist

das Verfahren dagegen nicht für die allgemeine und alltägliche Verwendung geeignet. Da diese Erkenntnisse für den verantwortungsvollen Umgang, die Analyse und die Bewertung von Berechnungsergebnissen erforderlich sind, ist der Einsatz als Experten-Tool möglich. Gleichzeitig ist herauszustellen, dass das Verfahren nicht als ein leicht anwendbares Hilfsmittel zur Gefährdungsbeurteilung in klein- und mittelständischen Unternehmen konzipiert ist.

5.3 Weiterverwendung der Ergebnisse und ergänzende Arbeiten

Die Konzeption des Berechnungsverfahrens beruht auf den Überlegungen im Rahmen eines Promotionsverfahrens, das mit Validierungsüberlegungen und -diskussionen abgeschlossen werden soll. Die erzielten und im vorliegenden Bericht dargestellten Ergebnisse der Untersuchungen bilden einen Aspekt der Validierung des Ausbreitungsmodells und des Berechnungsverfahrens in dieser wissenschaftlichen Arbeit. Dabei werden die Ergebnisse voraussichtlich mit Erkenntnissen aus anderen Anwendungen (z.B. auf Grundlage extern zur Verfügung gestellter Datensätze) sowie mit Detailbetrachtungen zu hier aufgezeigten Erkenntnissen ergänzt werden. Denkbar ist bspw. die Überprüfung des temperaturbedingten Verhaltens („Sommer-“ bzw. „Winterfall“ der Relation von Zuluft- zu Raumtemperatur) oder der Sensitivität des Ausbreitungsmodells bei weiteren Anpassungen der Lüftungsbedingungen (Abstimmung und ganzheitliche Veränderung von Zu- und Abluft).

Neben der Weiterverfolgung der Modellvalidierung des Modells FDS als Ausbreitungsrechnung ist z.B. die Erweiterung der Emissionsabschätzung um weitere Modelle ein Arbeitsfeld. Wie gezeigt, stellt die Abschätzung der Emissionsverhältnisse einen ergebnisrelevanten Einflussfaktor dar, so dass konzeptionelle Arbeiten zu deren Verbesserung sinnvoll sind. Dies kann durch die Prüfung und Einbindung bestehender, aber auch durch die Ableitung und Aufstellung neuer Modelle zur Stofffreisetzung erfolgen. Diese weiterführenden Arbeiten werden jedoch nicht mehr im Arbeitsfeld der o.g. Forschungsarbeiten beinhaltet sein, so dass die tatsächliche Weiterverfolgung der Thematik nicht abschätzbar ist.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden bislang in keiner Veröffentlichung dargestellt. Nach der Verwendung und Ergänzung mit anderen Untersuchungen³ im Rahmen des Promotionsvorhabens ist eine Veröffentlichung des Gesamtergebnisses angedacht. Darüber hinaus ist die Publikation von (Teil-) Ergebnissen, insbesondere zur Übertragbarkeit des Ausbreitungsmodells auf Betrachtungen des Arbeits- bzw. Gefahrstoffschutzes in der näheren Zukunft, z.B. durch Vorträge oder Zeitschriftenbeiträge, vorgesehen.

³ Hierzu liegen dem Verfasser zum Abgabezeitpunkt des vorliegenden Forschungsberichts erste Ergebnisse und Erkenntnisse vor, die jedoch ebenfalls noch nicht publiziert wurden.

A Liste verwendeter Größen

A_{FDS}	Emissionsfläche, Parametrisierung in FDS [m^2]
\dot{m}^l_{FDS}	flächenspezifischer Emissions-Massenstrom, Parametrisierung in FDS [$kg/(s m^2)$]
$\dot{m}_{Mess,30min}$	Emissions-Massenstrom, gemessen über Emissionsdauer von 30 min. [$g/30min$]
$\dot{m}^l_{Rech,MM}$	Emissions-Massenstrom gem. Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu [$g/(cm^2 s)$]
$\dot{m}_{Rech,WG}$	Emissions-Massenstrom gem. Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling [g/h]
\dot{V}_{Zu}	Volumenstrom Zuluft [m^3/h]
$\dot{V}_{Ab,VR}$	Volumenstrom Abluft in Versuchsraum [m^3/h]
$\dot{V}_{Ab,L_{T1}}$	Volumenstrom Abluft in Lagerraum, Lüftungsöffnung Typ 1 [m^3/h]
$\dot{V}_{Ab,L_{T2}}$	Volumenstrom Abluft in Lagerraum, Lüftungsöffnung Typ 2 [m^3/h]

B Planungsgrundlage: Validierungskonzept



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

Validierungskonzept zur Untersuchung eines
Berechnungsverfahrens zur Gefähr-
dungsbeurteilung bei Tätigkeiten mit
Gefahrstoffen

M.Sc. Florian Pillar

Stand: 27.09.2013

Inhaltsverzeichnis

1. Erfordernis und Untersuchungsansätze	4
2. Kurzvorstellung des Gesamtverfahrens	6
3. Methodischer Ansatz der Untersuchungen	9
3.1. Konzeptionelle Untersuchungsschritte	9
3.2. Rahmenbedingungen des Modellraums	10
3.3. Verwendete Stoffe und Grundparameter der Emission	14
3.4. Organisatorische und zeitliche Rahmenbedingungen	16
4. Verwendete Parameter der Berechnungen	19
5. Konzeptionelle Messdatengewinnung - Messtechnische Ausstattung	21
6. Konzeptionelle Untersuchungen des rechnerischen Gesamtverfahrens - Auswertung und Vergleich	24
A. Arbeitssystem "Validierungsuntersuchungen"	28
B. Fotodokumentation	39
C. Versuchsprotokoll	42

Vorbemerkung

Im Rahmen eines Promotionsvorhabens im Fachgebiet Sicherheitstechnik / Arbeitssicherheit des Fachbereichs D, Abt. Sicherheitstechnik der Bergischen Universität Wuppertal (BUW) wurde ein Gesamtkonzept entwickelt, das eine Beurteilung arbeitsbedingter inhalativer Gefährdungen von Tätigkeiten im Umgang mit Gefahrstoffen mit Hilfe rechnerischer Verfahren ermöglicht. Dabei wurden Konzepte und Modelle aus den Disziplinen des Arbeits- und Brandschutzes einbezogen sowie geeignet miteinander verknüpft, so dass eine vollständige Analyse und Bewertung von Arbeitssituationen durchführbar ist.

Damit rechnerische Verfahren zum praktischen Einsatz kommen können ist es erforderlich, zu ermitteln, in welchem Maße und in welcher Größenordnung die gewonnenen Ergebnisse die realen Verhältnisse wiedergeben. Anhand dieser Erkenntnisse, die im Rahmen sog. Validierungsuntersuchungen erbracht werden müssen, wird die Möglichkeit zu Aussagen geschaffen, unter welchen Bedingungen ein Einsatz des Verfahrens sinnvoll ist und ggf. von welcher Ergebnis-Genauigkeit ausgegangen werden kann. Darüber hinaus können Einsatzfelder des Verfahrens bestimmt werden. Das Erfordernis von Validierungsuntersuchungen ergibt sich weiterhin aus der (gesetzlichen) Anforderung, Plausibilitätsbetrachtungen durchzuführen, um zu überprüfen, ob gewonnene Berechnungsergebnisse sinnvoll sind bzw. methodisch und physikalisch rekonstruiert werden können.

Im Rahmen einer Zusammenarbeit zwischen dem Fachgebiet Sicherheitstechnik / Arbeitssicherheit und der Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW) sollen die erforderlichen Validierungsuntersuchungen für das entwickelte Gesamtverfahren durchgeführt werden. Die Untersuchungen werden durch den Forschungsfond der Deutschen Gewerlichen Unfallversicherung (DGUV) in Form eines Forschungsprojekts gefördert.

Das vorliegende Konzeptpapier definiert die methodische Vorgehensweise sowie die erforderlichen Arbeitspakete, nach denen die Untersuchungen stattfinden. Ziel ist es, einerseits alle Schritte zu beschreiben, andererseits den erforderlichen Rahmen und die zu ermittelnden Größen der messtechnischen bzw. rechnerischen Untersuchungen darzulegen.

Die Festlegungen basieren auf Absprachen, die den grundlegenden Untersuchungsgegenstand, einen gestuften Untersuchungsaufbau (Ermittlung der erforderlichen Größen für die unmittelbare Emission eines Gases und für die Verdunstung aus einer Oberfläche heraus) sowie die Räumlichkeiten der BGW als Untersuchungsort thematisiert haben. Weiterhin werden insbesondere notwendige Parameter, die geplante methodische Durchführung der Referenzmessungen samt Messstrategien und -geräten und angeschlossene Kontrollberechnungen des vorgeschlagenen Gesamtverfahrens definiert.

1. Erfordernis und Untersuchungsansätze

Damit ingenieurwissenschaftliche Berechnungsverfahren in der Praxis angewendet werden können, ist ein Nachweis zur Genauigkeit bzw. über mögliche Abweichungen der Ergebnisse erforderlich. Anhand dieser Untersuchungsergebnisse kann ein zielorientierter Einsatz erfolgen, so dass Unsicherheiten und Fehler nicht zu schwerwiegenden, negativen Folgen führen bzw. entsprechende Sicherheitsfaktoren bei der Bewertung der Ergebnisse Berücksichtigung finden.

An die Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen werden durch die entsprechenden gesetzlichen Regelwerke verschiedene Anforderungen gestellt, denen die zum Einsatz gebrachten Verfahren entsprechen müssen. Dabei sind durch die Gefahrstoffverordnung [?] (GefStoffV) sowie die angeschlossenen Technischen Regelwerke Gefahrstoffe (TRGS) 400 [2] und 402 [3] rechnerische Verfahren zugelassen, die dem sog. "Stand der Technik" entsprechen müssen. Dies umschließt eine kritische Auseinandersetzung und Quantifizierung möglicher Fehlerquellen der Berechnungsansätze, die in die praktischen Betrachtungen zur Vermeidung von Gefährdungen für die Gesundheit Beschäftigter einbezogen werden müssen.

Beim Vergleich zwischen realen (Mess-) Werten und Berechnungsergebnissen können Abweichungen einerseits durch die Genauigkeit verwendeter Berechnungsformeln, andererseits durch die verfahrensinterne Umsetzung und "richtige" Programmierung - vor allem komplexer Algorithmen - entstehen. Dabei stellen beide Faktoren ggf. erhebliche Einflüsse auf die Genauigkeit und Sinnhaftigkeit der Ergebnisse dar, so dass entsprechende Untersuchungen im Rahmen einer Plausibilitätsprüfung rechnerischer Verfahren vor dem praktischen Einsatz erforderlich werden.

Die Überprüfung der verschiedenen Aspekte erfolgt allgemein durch Untersuchungen zur sog.

- Verifikation und
- Validierung.

Dabei kann die Verifikation allgemein als

Ermittlung von Rechenfehlern innerhalb von Algorithmen eines Berechnungsmodells

zusammengefasst werden¹. Vor dem Hintergrund der Untersuchung des erarbeiteten Gesamtverfahrens, das sich auf etablierte bzw. durch Dritte abgeleitete rechnerische Ansätze und Modelle bezieht, wird davon ausgegangen, dass diese bereits auf die korrekte mathematische Verknüpfung der unterschiedlichen Algorithmen - sofern erforderlich - untersucht wurden. Insbesondere für das einbezogene CFD-basierte Brandschutzingenieurmodell "Fire Dynamics Simulator" (FDS) ist dies in entsprechenden Studien erfolgt und dokumentiert². Für die Emissionsmodelle, die konzeptionell zur Darstellung von Zeitabhängigkeiten ergänzt und in einer Tabellenkalkulation umgesetzt wurden, ist die Verifikation dieser Programmierungen erforderlich. Darüber hinaus ist zu überprüfen, ob die Zusammenführung von berechneten Stoffkonzentrationen sowie von Daten zu Personenaufenthalt und -dauer sowie und stoffspezifischen Grenzwerten aus der Informationsermittlung praktikabel ist.

Unter Validierung eines Verfahrens wird dagegen allgemein die

Ermittlung der Abweichung von Berechnungsergebnissen von der Realität (z.B. anhand von Messdaten)

¹ Je nach Disziplin und fachlicher Ausrichtung existieren unterschiedliche, in Details voneinander abweichende Definitionen (vgl. [4]), deren Kernpunkte sich - wie beschrieben - überdecken.

² Vgl. [5, 6]

verstanden³. Das vorliegende Konzept zur Überprüfung rechnerisch ermittelter Ergebnisse anhand empirischer Versuchsdaten dient daher der Validierung des entwickelten Gesamtverfahrens bzw. der Zusammenwirkung der verschiedenen Teilmodelle, aus denen sich die Anwendbarkeit und Einsatzfelder ableiten.

2. Kurzvorstellung des Gesamtverfahrens

Das auf Berechnungsmodellen basierende Gesamtverfahren ermöglicht die vollständige Beurteilung von Arbeitsbedingungen bzw. Tätigkeiten, bei denen ggf. inhalative Gefährdungen für Beschäftigte aus dem Umgang mit Gefahrstoffen entstehen. Aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Vorgänge der Stoffemission und -ausbreitung sowie der prinzipiellen Anforderungen, die an Verfahren gestellt werden, ist eine grundlegende Schrittfolge bzw. Vorgehensweise zu berücksichtigen. Prinzipiell sind in Anlehnung an die TRGS 400 [2] folgende Schritte erforderlich (vgl. Abb. 2.1):

- Ermittlung der erforderlichen Informationen, hier insbesondere Parameter der betrachteten Tätigkeit sowie die auftretenden Stofftransportmechanismen, die für die Berechnungen erforderlich sind;
- Analyse der Tätigkeit durch Berechnungen zur Stoffemission und -ausbreitung, die auf die vorhandenen physikalischen Mechanismen ausgerichtet sind;
- Bewertung ermittelter ortsabhängiger Stoffkonzentrationen in der Luft anhand geeigneter Beurteilungsmaßstäbe, insbesondere unter Berücksichtigung des (rechtsverbindlichen) dt. Grenzwertkonzepts des Arbeitsplatzgrenzwertes¹ (AGW);
- Ermittlung und Festlegung von Gestaltungsmaßnahmen sowie
- fortlaufende Überprüfung der verwendeten Parameter, der Zwischenergebnisse sowie des Endergebnisses auf Sinnhaftigkeit.

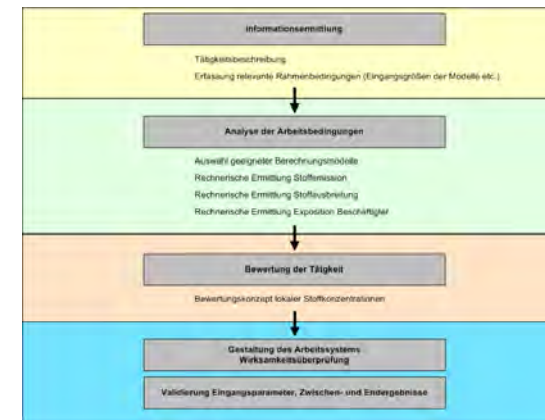


Abbildung 2.1.: Gesamtablauf einer stoffspezifischen, auf rechnerischen Verfahren beruhenden Gefährdungsbeurteilung

Die Verbindung der generellen Anforderungen an Arbeitsschritte sowie der verschiedenen Modellansätze in einem Gesamtverfahren erfordert eine angepasste, methodische Schrittfolge. Für die verschiedenen Teilbetrachtungen ist einerseits die vollständige Ermittlung und Bereitstellung der erforderlichen Eingangsdaten, andererseits die angepasste Verknüpfung der Modelle (und damit der Arbeitsschritte)

³ Entsprechend der fachlichen Ausrichtung ergeben sich - entsprechend zur Verifikation - ebenfalls unterschiedliche Definitionen (vgl. [4]).

¹ vgl. TRGS 900 "Arbeitsplatzgrenzwerte" [7]

untereinander erforderlich. Das konzipierte Gesamtverfahren setzt durch Einbindung und Anwendung verschiedener Konzepte und Modelle des Arbeitsschutzes sowie Integration des Brandschutzingenieurmodells FDS als Ausbreitungsrechnung die erforderlichen Schritte modular um (vgl. Abb. 2.2):

- Informationsermittlung mit Hilfe des Arbeitssystem-Modells (abschließende Erfassung aller erforderlichen Eingangsparameter der anschließenden Module) und Identifizierung auftretender Emissionsmechanismen²;
- Ermittlung der Stoffemission durch Feststellung des Emissionsmassenstroms (sofern bekannt) bzw. Berechnung anhand eines geeigneten Emissionsmodells, das über eine Auswahlmatrix anhand der vorliegenden Rahmenbedingungen identifiziert wird (Verwendung der Eingangsparameter aus dem Arbeitssystem);
- Ermittlung der Stoffausbreitung durch Verwendung des Brandschutzingenieurmodells FDS zur Ausbreitungsberechnung (Ansatz des bekannten bzw. ermittelten Emissionsmassenstroms sowie der im Arbeitssystem erfassten Parameter und Rahmenbedingungen), Berechnung der zeitabhängigen Stoffausbreitung und Feststellung der Ausbildung orts- und zeitabhängiger Stoffkonzentrationen in der Luft an relevanten Positionen;
- Bewertung der Arbeitsbedingungen unter Einbeziehung der Informationen zum zeitbezogenen Aufenthalt von Personen (Parameter der Arbeitsorganisation) sowie der Ausbildung entsprechender stoff- und tätigkeitsspezifischer Expositionen (Rückgriff auf Informationen aus Arbeitssystem);
- abschließende Plausibilitätsprüfung der Berechnungsergebnisse sowie der angeschlossenen Bewertung der Tätigkeit.

Das neu konzipierte Gesamtverfahren stellt einen Ansatz zur vollständigen und detaillierten Untersuchung von Tätigkeiten bzw. üblichen Arbeitsbedingungen an Arbeitsplätzen (z.B. innerhalb einer Branche) durch die Verbindung verschiedener Modellansätze dar. Mögliches Ergebnis ist entweder die berechnete zeit- und ortsabhängige Stoffkonzentration oder - bei vorhandenen Beurteilungsmaßstäben (z.B. staatliches Grenzwertkonzept des AGW) - die Aussage zu Zulässigkeit und Maßnahmenbedarf. Die Übereinstimmung von Berechnungsergebnissen mit der Realität ist durch die Vielzahl der Parameter von deren Genauigkeit sowie von der rechnerischen Detaillierung, getroffenen Annahmen und Vereinfachungen etc. abhängig. Vor dem Hintergrund des Arbeits- und Gesundheitsschutzes Beschäftigter muss daher ein ausreichendes Sicherheitsniveau sowohl in der Zusammenstellung und Erfassung der Parameter als auch der Berechnungsergebnisse insgesamt erreicht werden. Weiterhin muss die Einhaltung bestehender Anwendungsgrenzen der Verfahren bei der Verwendung sichergestellt werden.

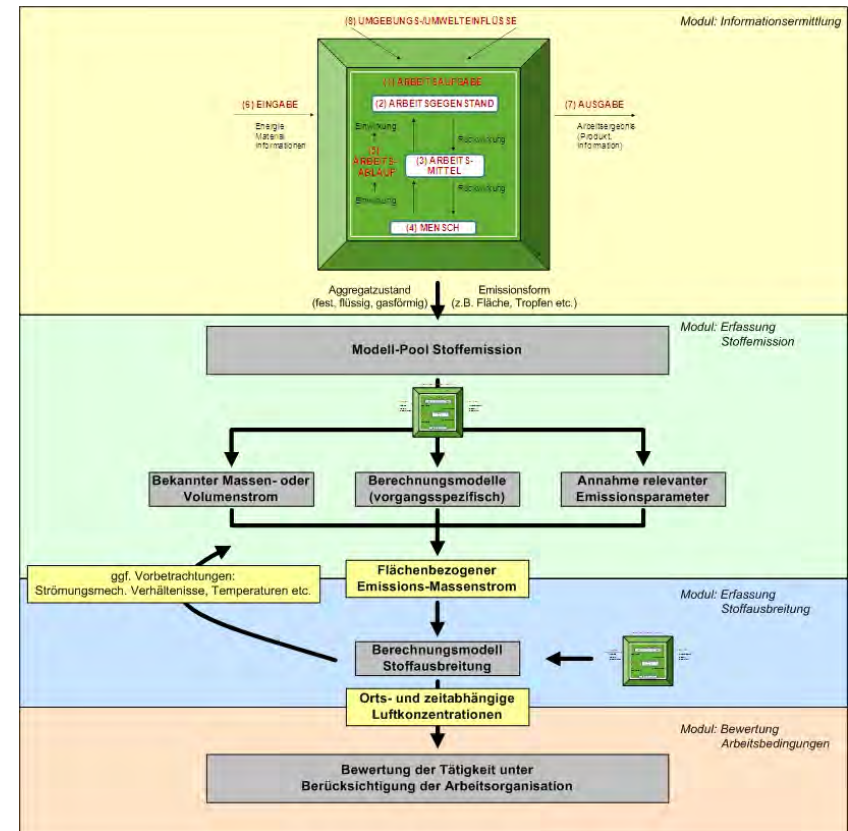


Abbildung 2.2.: Konzeptioneller Ablauf des Gesamtverfahrens

² Durch die Identifizierung der Freisetzungsvorgänge werden die möglichen Emissionsmodelle bereits eingeschränkt, so dass ggf. unterschiedliche Parameter nicht erfasst werden müssen.

3. Methodischer Ansatz der Untersuchungen

Die Validierungsuntersuchungen des konzipierten Gesamtverfahrens erfolgen, um

- die Möglichkeit zur Einbindung zeitabhängiger Stofffreisetzungen zu kontrollieren,
- den Umfang der Übertragbarkeit des Brandschutzingenieurmodells FDS auf Betrachtungen des Arbeitsschutzes festzustellen,
- die Praxistauglichkeit der Verknüpfungen zwischen den verschiedenen Modulen als Gesamtkonzept zu überprüfen,
- die Genauigkeit berechneter Zwischen- und Endergebnisse und der Sensitivität¹ auf unsichere Eingangsparameter zu beurteilen sowie
- praktische Anwendungsbereiche zu definieren.

Die Betrachtungen basieren auf Vergleichen von Messdaten und Berechnungsergebnissen. Die durch Messungen gewonnenen Werte werden als Referenzen aufgefasst², welche die realen Parameter (hier: Arbeitsbedingungen) charakterisieren. Anhand der Messergebnisse, die im Zuge der dargelegten Versuche unter kontrollierten Rahmenbedingungen mit definierten Parametern ermittelt werden sollen, können durch Vergleich mit Berechnungsergebnissen des Gesamtverfahrens Übereinstimmungen bzw. Unterschiede ermittelt und statistische Untersuchungen durchgeführt werden. Dazu sollen die Berechnungen mit gleichen Rahmenbedingungen wie die Messungen erfolgen.

3.1. Konzeptionelle Untersuchungsschritte

Zur Validierung des Gesamtverfahrens bietet es sich aufgrund des modularen Aufbaus³ an, zunächst einzelne (Teil-) Modelle zu untersuchen und den Betrachtungsrahmen sukzessive zu erweitern. Dementsprechend werden Untersuchungen auf den zwei Betrachtungsebenen einzelner Modelle sowie des Gesamtverfahrens geführt, um die jeweilige Ergebnisplausibilität zu ermitteln und zu bewerten.

Der methodische Validierungsansatz beinhaltet unterschiedliche Untersuchungsstufen, die aus den Betrachtungsebenen resultieren. Als beispielhafte Tätigkeit wird die Durchführung einer Wischdesinfektion unter verschiedenen Arbeitsbedingungen angenommen, wie sie im Rahmen des Gesundheitsdienstes anzutreffen ist. Zusammenfassend wird dabei ein Desinfektionsmittel durch Wischen mit einem Lappen auf eine flächige Oberfläche gebracht, um dort zur Einwirkung zu verweilen und ggf. nach einer gewissen Zeit beseitigt zu werden. Die Stoffemission erfolgt durch Verdunstung. Für eine erste Analyse des Ausbreitungsmodells wird diese Tätigkeit jedoch zunächst außen vor gelassen. Es werden folgende methodischen Untersuchungsschritte, die auf einzelne Teilmodelle sowie schlussendlich auf das Gesamtverfahren ausgerichtet sind, durchgeführt:

1. Definierte Gasemission an die Umgebungsluft des Modellraums:

Überprüfung des Ausbreitungsmodells vor dem Hintergrund arbeitsschutzspezifischer Betrachtungen sowie - damit verbunden - der vorgesehenen Schnittstellen zu vorgelagerten Emissions- und nachgeschalteten Bewertungsbetrachtungen. Die Untersuchungen werden unter kontrollierten Bedingungen am Stoffbeispiel Propan durchgeführt werden und dienen der Ermittlung der Ergebnissenauigkeit der Ausbreitungsrechnungen.

¹ Untersuchung zum Einfluss einzelner Parameter auf die Berechnungsergebnisse durch gezielte Variation (vgl. [8]).
² Messergebnisse unterliegen in Abhängigkeit zu den verwendeten Messgeräten und -aufbauten ihrerseits Fehlern und Unsicherheiten. Im Rahmen des vorliegenden Konzepts bzw. der darauf aufbauenden Validierungsuntersuchungen wird von einer hinreichend genauen messtechnischen Ermittlung ausgegangen, wie sie auch in der betrieblichen Praxis anzutreffen ist.
³ vgl. Kap. 2

2. Definierte Stoffemission über flächenbezogene Verdunstung einer Desinfektionsflüssigkeit im Modellraum:

Erweiterung der zuvor angestellten Betrachtungen um die Kontrolle der Emissionsmodelle, so dass eine Validierung des Gesamtverfahrens unter den kontrollierten Bedingungen eines Modellraums durchgeführt wird (vollständige Betrachtung aller Untersuchungsziele). Dabei erfolgt unmittelbar ein Bezug auf den praxisrelevanten Fall der Flächendesinfektion. Der Untersuchungsschritt umfasst dazu einerseits die alleinige Ausbreitungsrechnung anhand der ermittelten Emissions-Massenströme. Andererseits soll der Emissions-Massenstrom mit verschiedenen Verdunstungsmodellen berechnet und in weiteren Ausbreitungsberechnungen verwendet werden. Die Versuche erfolgen mit Isopropanol als üblicher (Wirkungs-) Bestandteil gängiger Desinfektionsmittel.

Hinweis:

Ergänzend zum Stufenkonzept sollen im Anschluss der Untersuchungen im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit Berechnungen zu (ggf. lokalen oder globalen) Stoffkonzentrationen unter Verwendung bereits verfügbarer, "einfacher" Berechnungsverfahren (bspw. Ein- und Mehrzonenmodelle) durchgeführt, um deren Glaubwürdigkeit sowie den möglicherweise auftretenden Gewinn der Realitätstreue von Berechnungsergebnissen des Gesamtverfahrens abzuwägen. Die entsprechenden Berechnungen dienen jedoch nicht der Validierung des Gesamtverfahrens, so dass an dieser Stelle keine weitere Betrachtung erfolgt. Sofern mit den verschiedenen Verfahren möglich, werden bei diesen die im Weiteren beschriebenen Rahmenbedingungen und Parameter berücksichtigt, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen.

3.2. Rahmenbedingungen des Modellraums

Die Untersuchungsschritte erfolgen unter möglichst einheitlichen und kontrollierten Bedingungen eines Versuchsraumes, um Verfälschungen von Werten durch nicht bekannte Parameter (und somit ggf. erforderliche Annahmen) auszuschließen. Durch die kontrollierten Bedingungen sollen eindeutige Referenzwerte, möglichst ohne unbekanntes Beeinträchtigungen, geschaffen werden.

Als Modellraum wird ein Laborraum des Messtechnischen Dienstes der BGW, Dienststelle Köln genutzt. Dieser liegt im Kellergeschoss des Gebäudes Bonner Straße 337, 50968 Köln. Die geometrischen Bedingungen sind in Abb. 3.1 zusammenfassend dargestellt.

In die Betrachtungen werden vereinfacht zwei Lagerräume (mit jeweils geschlossener Tür, Berücksichtigung von Undichtigkeiten) einbezogen. Außerdem wird der Vorraum dargestellt, ohne die Rahmenbedingungen detailliert zu erfassen.

Für die Ausbreitungsrechnung ist die Definition von Materialeigenschaften von Bauteilen und Einrichtung notwendig und ggf. bei der Darstellung des Wärmetransports von untergeordneter Bedeutung. Diese werden aufgrund der vorgefundenen Konstruktion vornehmlich aus [9] abgeschätzt. Als jeweilige Oberflächentemperaturen werden die im Rahmen der jeweiligen Versuche ermittelten Lufttemperaturen als hinreichende Näherung verwendet:

Parameter	Stein	Beton	Gipskarton	Fensterglas	Holz	Papier	PVC	V2A ⁴
Zuordnung Oberfläche	Außenwand	Decke	Raumwände	Fenster, Verschluss Laborabzug	Laboreinbauten, Mobiliar	Bücher auf Ablagen	Einrichtung	Einrichtung
Oberflächentemperatur [K]	293,25							
Emissionsfaktor Wärmestrahlung [-]	Annahme: 0,9							
Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	0,69	1,37	0,84	0,78	0,166	0,18	0,15	16,30

⁴ stellvertretende Verwendung für Metalloberflächen

Wärme-speicher-kapazität [kJ/(kg K)]	0,84	0,88	0,48	0,84	2,40	1,20	1,50	0,46
Material-dichte [kg/m ³]	1.600,00	2.100,00	1.440,00	2.700,00	540,00	930,00	1.400,00	7.817,00
Annahme Material-dicke ⁵ [m]	0,20	0,30	0,20-0,30	0,05	0,10	0,35	0,05	0,05

Tabelle 3.1.: Thermodynamische Materialeigenschaften der Bauteile, Angaben aus [9]

Die Tür des Versuchsraums zum Vorraum wird nicht als Lüftungsöffnung genutzt werden, allerdings wird eine geringfügige pauschale Undichtigkeit unterstellt und in den Berechnungen berücksichtigt. Die beiden Zuluftöffnungen sowie die Abluftöffnung der technischen Lüftungsanlage charakterisieren die Lüftungsbedingungen. Die Kennwerte der Lüftungsöffnungen der Lagerräume werden aus dem Vergleich von Messwerten der Zu- und Abluftführung abgeschätzt, für die geschlossenen Türen werden analog zur Zugangstür pauschale Undichtigkeiten abgebildet. Der vorhandene Laborabzug sowie die Fenster⁶ bleiben ebenfalls ohne Berücksichtigung, um gezielte Veränderungen der Bedingungen einleiten zu können. Die Lüftungsanlage wird im Zuge der Untersuchungen zur Variation der Lüftungstechnischen Verhältnisse verwendet. Die Beschränkung erfolgt im Einzelfall durch vollständige Abschaltung oder partielles Verschließen von Lüftungsöffnungen, da eine steuerungstechnische Regelung der Anlage nicht möglich ist. Generell werden die im Anschluss aufgeführten Lüftungstechnischen Bedingungen für Berechnungen berücksichtigt und während der Versuchsdurchführung messtechnisch erfasst, sofern nicht anders angegeben.

Öffnung	Fläche [m ²]	Position ⁷	Verschluss	Typ	Strömungsgeschwindigkeit in Fläche [m/s]
Zugangstür	1,60	vordere Wand, Abstand linke Ecke: 3,75 m	Holztür (während Versuchen geschlossen), pauschale Berücksichtigung Undichtigkeiten	–	–
Tür Lager 1 (vorne)	1,295	rechte Wand, Abstand vordere Wand: 1,80 m	Holztür (während Versuchen geschlossen), pauschale Berücksichtigung Undichtigkeiten	–	–
Tür Lager 2 (hinten)	1,295	rechte Wand, Abstand vordere Wand: 3,85 m	Holztür (während Versuchen geschlossen), pauschale Berücksichtigung Undichtigkeiten	–	–
Zuluftöffnung 1	0,0768	Decke, Abstand vordere Wand ⁸ : 2,60 m, Abstand linke Wand: 1,35 m	–	Zuluft	Ermittlung je Versuch
Zuluftöffnung 2	0,0768	Decke, Abstand vordere Wand ⁹ : 2,60 m, Abstand linke Wand: 4,25 m	–	Zuluft	Ermittlung je Versuch

⁵ Thermische Dicke, die zur Berechnung des Wärmeaustauschs berücksichtigt wird; die Dicke angeordneter Objekte (Strömungsberechnung) kann sich davon unterscheiden (vgl. [5, 6, 10]).

⁶ Laborabzug und Fenster werden dennoch zur Darstellung korrekter geometrischer Bedingungen abgebildet.

⁷ Die Benennung bezieht sich auf einen Standort in der Zugangstür des Laborraums mit Blickrichtung auf die Außenwand.

⁸ Angabe für Gesamtauslass, Abweichung für Lüftungsschlitze

⁹ Angabe für Gesamtauslass, Abweichung für Lüftungsschlitze

Abluftöffnung	0,09	Decke, Abstand vordere Wand: 1,00 m, Abstand linke Wand: 2,70 m	–	Abluft	Ermittlung je Versuch
Abluftöffnungen Lager 1	je 0,005	Öffnung 1: Trennwand Versuchsraum: 0,40 m vordere Wand Lager 1: 0,10 m Öffnung 2: Trennwand Versuchsraum: 0,20 m vordere Wand Lager 1: 1,50 m	–	Abluft	Ermittlung je Versuch
Abluftöffnungen Lager 2	je 0,005	Öffnung 1: Trennwand Versuchsraum: 0,40 m Trennwand zu Lager 1: 0,05 m Öffnung 2: Trennwand Versuchsraum: 0,20 m Trennwand zu Lager 1: 1,70 m	–	Abluft	Ermittlung je Versuch
Fenster 1 (links)	0,18	Außenwand, Abstand linke Wand: 3,00 m, Höhe über Fußboden: 2,50 m	Fensterglas	–	–
Fenster 2 (Mitte)	0,58	Außenwand, Abstand linke Wand: 3,50 m, Höhe über Fußboden: 2,50 m	Fensterglas	–	–
Fenster 3 (rechts)	0,18	Außenwand, Abstand linke Wand: 5,00 m, Höhe über Fußboden: 2,50 m	Fensterglas	–	–

Tabelle 3.2.: Öffnungen in Bauteilen und Lüftungsbedingungen des Versuchsraumes

Der Modellraum verfügt über unterschiedliche Einbauten, die für die Versuche weitgehend freigeräumt werden, jedoch Strömungshindernisse darstellen. Zur Abbildung des praktischen Bezugs werden unterschiedliche Gegenstände nicht entfernt, die ebenfalls die Strömungen beeinflussen. Die Anordnung sowie die Maße der Einbauten sind ebenfalls in Abb. 3.1 dargestellt, die thermodynamischen Materialeigenschaften in Tab. 3.2 aufgeführt. Sämtliche Einbauten (Labortische, zentraler Tisch samt Aufbau, Regale, Laborabzug, Schränke, mobiler Labortisch) bestehen aus laminierten Holzkonstruktionen, die Oberflächentemperaturen entsprechen idealisiert den einzelfallbezogenen Umgebungstemperaturen bei Durchführung der Messungen¹⁰.

Die weiteren Strömungshindernisse, die u.a. einen PC-Arbeitsplatz auf dem mobilen Arbeitstisch, einen Drucker sowie Büro-Zubehör (Ablagefächer mit Inhalt etc.) umfassen, werden an dieser Stelle nicht de-

¹⁰ Da die Untersuchungen nicht auf den Wärmeaustausch von Luft und Materialien ausgerichtet sind und während der Durchführung nur geringe Temperaturunterschiede und -änderungen zu erwarten sind, ist eine detaillierte Analyse bzw. messtechnische Erfassung nicht erforderlich.

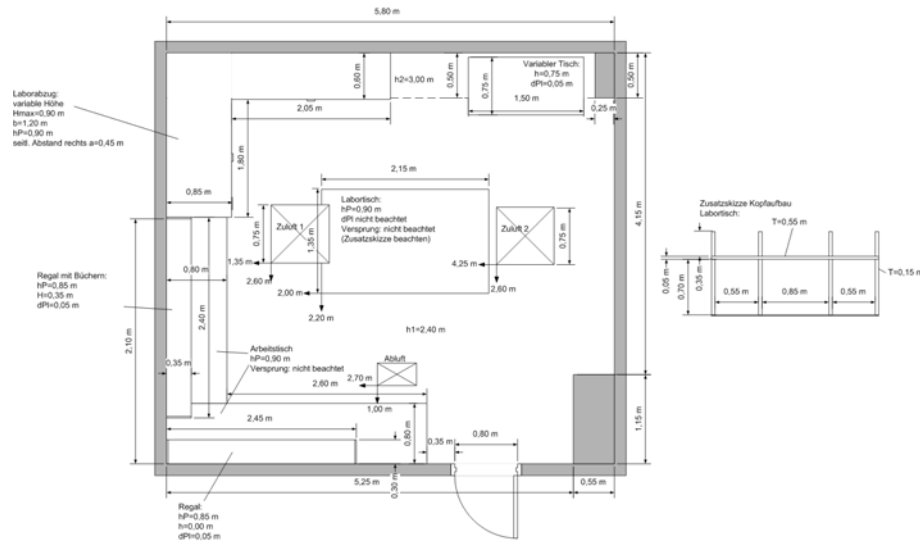


Abbildung 3.1.: Skizzierte Abmessungen des Modellraums

tailliert aufgeführt, sondern in den Versuchsprotokollen dargelegt. Die vollständige Gestaltung des Modellraums wird durch die in Anhang B aufgeführten Fotografien verdeutlicht.

Neben den geometrischen Rahmenbedingungen und Einbauten haben die thermodynamischen Bedingungen sowie die Stoffeigenschaften der Umgebungsatmosphäre (Luft) teils erheblichen Einfluss auf die Stoffemission und -ausbreitung. Da verschiedene Größen natürlichen Schwankungen, auch über den Raum hinweg, unterliegen, werden diese für jeden Versuch separat festgestellt, um die aktuellen Werte in die entsprechenden Berechnungen einzubinden. Generell wird von Luft in standardisierter Zusammensetzung¹¹ ohne Anfangskonzentrationen emittierter Stoffe ausgegangen, Abweichungen bei einzelnen Versuchen (z.B. aus vorherigen Messungen) werden entsprechend dokumentiert. Die Positionen zur Ermittlung von Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft sind wie folgt im Versuchsraum geplant:

Messgröße	Anordnung Messstelle
Umgebungstemperatur	
$T_{\infty,1}$	Abstand linke Wand: 0,05 m Abstand vordere Wand: 1,95 m Höhe: 0,85 m (Arbeitsstisch)
$T_{\infty,2}^{12}$	Abstand linke Wand: 3,15 m Abstand vordere Wand: 2,95 m Höhe: 1,65 m (Ablage zentraler Labortisch)
T_{Zu}^{13}	Abstand linke Wand: 4,65 m Abstand vordere Wand: 2,90 m Höhe: 2,25 m (unterhalb Zuluföffnung)
Umgebungsdruck	
P_{∞}	Abstand linke Wand: 3,25 m Abstand vordere Wand: 2,75 m Höhe: 1,65 m (Ablage zentraler Labortisch)

¹¹ Massenbezogene Zusammensetzung: 78% Stickstoff N_2 , 21% Sauerstoff O_2 , 0,04% Kohlenstoffdioxid CO_2 , 0,96% Edelgase und sonstige Komponenten

¹² Verwendung für Versuche mit Propan

¹³ Verwendung für Versuche mit Isopropanol

Relative Luftfeuchte der Umgebungsluft	
$H_{rel,\infty}$	Abstand linke Wand: 0,05 m Abstand vordere Wand: 1,95 m Höhe: 0,85 m (Arbeitsstisch)

Tabelle 3.3.: Messpositionen thermodynamischer Umgebungsbedingungen

Gleichermaßen hat der Personenaufenthalt Einfluss auf die eintretenden Ausbreitungsbedingungen, z.B. über thermische Einflüsse und Bewegungen. Aufgrund der verwendeten Stoffe und der maximal freigesetzten Stoffmasse bzw. des Volumens sind kritische Bedingungen, die zu einer akuten Gefährdung von Personen führen würden, nicht zu erwarten¹⁴. Zur Darstellung des Personenaufenthalts wird sich daher während der Versuche eine Person innerhalb des Versuchsraums befinden, die gleichzeitig die Emission überwachen wird. Bewegungen sollen weitestgehend vermieden werden, um die Beeinflussung der Strömungsbedingungen durch nicht erfasste Verwirbelungen zu minimieren.

Innerhalb der Ausbreitungsrechnungen wird der Personenaufenthalt durch die Anordnung von Objekten abgebildet. Die Abmessungen sowie die zu berücksichtigenden Oberflächentemperaturen sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst:

Parameter	Kopf	Torso	Beine
Abmessungen	x=0,15 m, y=0,10 m, z=0,20 m	x=0,40 m, y=0,15 m, z=0,60 m	x=0,35 m, y=0,15 m, z=0,95 m
Annahme Oberflächentemperatur	310,15 K	308,15 K	303,15 K
Emissionsfaktor Wärmestrahlung	Annahme: 0,9		

Tabelle 3.4.: Darstellung Körper in Berechnungen

3.3. Verwendete Stoffe und Grundparameter der Emission

Die gestuften Validierungsuntersuchungen sollen mit verschiedenen Stoffen erfolgen, um einerseits die geplanten Untersuchungsschritte zu realisieren. Andererseits soll - auch durch die verschiedenen Emissionsarten - die mögliche Bandbreite des vorgeschlagenen Gesamtverfahrens dargestellt werden. Die Versuche werden daher exemplarisch für Propan als Gasemission sowie Isopropanol¹⁵ als verdunstende Flüssigkeit angestellt. Die jeweiligen Stoffeigenschaften sind in Tab. 3.3 aufgeführt.

Stoffeigenschaft	Propan	Isopropanol
Aggregatzustand	gasförmig	flüssig
Zusammensetzung	Reinstoff	Reinstoff
Molenbruch der Komponenten	1	1
Molare Masse (Molekulargewicht)	44 g/mol	60 g/mol
Stoffdichte bei Emission (bei T=293,15K)	1,873 kg/m ³	relative Dampfdichte zu Luft: 2,07 (absolute Dampfdichte: 2,49 kg/m ³)
Gastemperatur bei Emission (Temperatur nach Phasenübergang)	Annahme: unmittelbarer Temperatureausgleich zu Umgebung	-
Flüssigkeitstemperatur (Temperatur vor Phasenübergang)	-	Annahme: entsprechend Umgebungstemperatur
Dampfdruck bei T=293,15 K	830.000,00 Pa	4.300,00 Pa

¹⁴ Für die Versuchsdurchführung werden eigenständige, nach den verwendeten Stoffen unterteilte Sicherheitskonzepte erstellt. Durch Einhaltung der beschriebenen Maßnahmen sollen Gefährdungen für Personen sowie den Versuchsraum (Personen und Sachwertschutz) ausgeschlossen werden.

¹⁵ Isopropanol ist wesentlicher Bestandteil gängiger Stoffgemische zur Wischdesinfektion. Dieser Untersuchungsschritt stellt somit auch stofflich einen Praxisbezug her.

Verdunstungstemperatur Flüssigkeit	-	Annahme: entsprechend Um- gebungstemperatur
Spezifischer Siedepunkt	231,15 K	353,65 K
Spezifische Verdampfungsenthalpie	352,50 kJ/kg (bei 288,15 K)	64,17 kJ/kg (bei 353,65 K)
Spezifischer Diffusionskoeffizient in Umgebungsluft	-	Abschätzung nach Arnold und Engel
Aktivitätskoeffizient in flüssiger Pha- se	-	1 (da Reinstoff)
Stoffspezifischer Isentropenexpo- nent	1,10	-
Kinematische Viskosität	8,3 · 10 ⁻⁶ m ² /s (bei 298,15 K)	3,63 · 10 ⁻³ m ² /s (bei 293,25 K)
Spezifische Wärmeleitfähigkeit	180 · 10 ⁻³ W/(m K)	-
Spezifische Wärmespeicherkapazität	1,696 kJ/(kg K) 298,15 K	als Dampf: 1,489 kJ/(kg K) 298,15 K
Allgemeine Gaskonstante	8,3145 J/(mol K)	
Grenzwertkonzept	AGW	AGW
Spezifischer Grenzwert	1,80 g/m ³	0,5 g/m ³
Spitzenbegrenzung Grenzwert	4 (II)	4 (II)
Zeitbezug Grenzwert	8 h	8 h

Tabelle 3.5.: Eigenschaften eingesetzter Versuchsstoffe

Die Stoffeigenschaften fließen an verschiedenen Stellen des Gesamtverfahrens in die Betrachtungen ein. Darüber hinaus erfolgt die Charakterisierung der jeweiligen Emission durch deren thermodynamische Bedingungen, die geometrische Anordnung sowie die jeweilige Zeitdauer der Freisetzung in Verbindung mit den jeweiligen Umgebungsbedingungen¹⁶. Die wesentlichen Emissionsparameter, die im Vorfeld der Untersuchungen festgelegt bzw. abgeschätzt werden können, sind in Tab. 3.3 zusammengefasst. Als Szenarien werden eine Gasausströmung aus einem Schlauch bzw. einer runden Öffnung (Propan) sowie eine flächige Verdunstung (Isopropanol) angenommen.

Emissionsparameter	Propan	Isopropanol
Emissionsart	Unmittelbare Gas- freisetzung	Verdunstung aus Flüssigkeitslache
Emissionsgefäß bzw. Bevorratung	Gasflasche (Kleinge- binde) unter Druck	Schale
Emissions- bzw. Öffnungsfläche	0,3117 c ²	jew. 0,12 m ²
Länge Emissionsfläche in Strömungs- richtung	nicht relevant	jew. 0,36 m
Versuchs- bzw. Emissionsdauer	30 min	

Tabelle 3.6.: Emissionsparameter der Untersuchungen

Zur Begrenzung der Gasfreisetzung wird ein Regelventil verwendet, das aufgrund der nur bedingt möglichen Druckbegrenzung (kein entsprechendes technisches Material zur Feinregulierung verfügbar) von Hand eingestellt und ständig kontrolliert werden muss. Aufgrund dessen ist eine Vorplanung der freigesetzten Stoffmasse nicht möglich, der Emissions-Massenstrom wird daher durch Auswiegen des Massenverlustes als zeitlicher Mittelwert abgeschätzt. Zur visuellen Kontrolle wird der Massenstrom über einen Schwebekörperdurchflussmesser geleitet (siehe entsprechende Fotodokumentation). Dieser lässt jedoch aufgrund der fehlenden Kalibrierung auf Propan keine Aussage zum tatsächlichen Volumen- bzw. Massenstrom zu und dient lediglich dem Ausschluss unzulässig hoher Freisetzungsraten. Die Isopropanol-Verdunstung wird ohne unmittelbare Kontrolle bzw. Einflussnahme erfolgen. Die Bestimmung des Massenstroms wird ebenfalls durch Auswiegen der umgesetzten Stoffmasse und über eine zeitliche Mittelung vorgenommen.

¹⁶ vgl. Kap. 3.2

3.4. Organisatorische und zeitliche Rahmenbedingungen

Die Lüftungsbedingungen in einem Arbeitsraum, insbesondere Luftwechselraten, Luftgeschwindigkeiten und Größen von Zu- und Abluftöffnungen, haben u.a. wesentlichen Einfluss auf das stoffliche Ausbreitungsverhalten. Bei Vorbetrachtungen¹⁷ zur allgemeinen Abschätzung des Stoffverhaltens im Versuchsraum wurde weiterhin ersichtlich, dass die räumliche Interaktion von Emissionsquelle, Aufenthaltsort einer Person sowie den Zu- und Abluftflächen die Berechnungsergebnisse beeinflussen. Diese Parameter der Arbeitsorganisation müssen daher Beachtung finden bzw. gezielt festgelegt werden.

Aus Sicht der Arbeitssicherheit muss i.A. davon ausgegangen werden, dass sich Beschäftigte in betroffenen Räumen aufhalten. Dementsprechend wird sich während der Versuche eine Person an festgelegter Position innerhalb des Versuchsraums aufhalten (vgl. Kap. 3.2). Bei Versuchen mit Propan ist dies zur Kontrolle der Emission bei allen Messungen vorgesehen, bei der Isopropanol-Verdunstung werden zur Gegenprüfung dieses Einflussparameters einzelne Versuche ohne Personenaufenthalt durchgeführt. Als Szenario wird angenommen, dass die Person einer Tätigkeit am zentralen Labortisch nachgeht. Der Aufenthaltsort ist daher wie folgt festgelegt (Angaben für projizierten Körpermittelpunkt) und wird für die Versuche zur Reproduktion gekennzeichnet werden:

Abstand [m]	linke Wand (x)	vordere Wand (y)	Standort
3,00		1,90	0,00 (Boden)

Tabelle 3.7.: Aufenthaltsort Person

Die Lüftungsbedingungen können nur eingeschränkt gezielt beeinflusst werden, eine Anlagensteuerung ist nicht möglich. Für die beiden Untersuchungsschritte werden - u.a. im Hinblick auf das Gefährdungspotential einer möglichen Entzündung - folgende Lüftungsvariationen in verschiedenen Versuchen dargestellt. Die Zu- und Abluftvolumenströme werden unmittelbar vor Versuchsbeginn erfasst.

Lüftungsvariation	Darstellung	Untersuchungsschritt
Normalzustand Lüftung	Nutzung vollständiger Belüftungsflächen: Zuluft Labor: jeweils 0,0768 m ² Abluft Labor: 0,0900 m ² Abluft Nebenräume ¹⁸ : jeweils 0,0050 m ²	1 (Propan) 2 (Isopropanol)
Einschränkung Lüftung	Begrenzung Belüftungsflächen durch partiellen Verschluss mit strömungsdichten Platten: :Zuluft Labor: jeweils 0,0240 m ² Abluft Labor: 0,0900 m ² Abluft Nebenräume ¹⁹ : jeweils 0,0050 m ²	1 (Propan)
Abschaltung Lüftung	vollständige Abschaltung der raumluft-technischen Anlage	2 (Isopropanol)

Tabelle 3.8.: Geplante Variation der Lüftungsbedingungen

Neben den Lüftungsbedingungen sollen die räumlichen Interaktionen variiert werden. Dazu wird der jeweilige Versuchsstoff an verschiedenen Positionen freigesetzt, um eine ggf. auftretende Koppelung der Ausbreitung an Luftströme und durch den Personenaufenthalt bedingte Thermikströme zu untersuchen. Als Szenario wird entweder die unmittelbare Tätigkeit des Beschäftigten mit den Stoffen auf dem Laborarbeitsstisch oder eine Freisetzung, die nicht unmittelbar durch die Tätigkeit, aber ebenfalls auf dem Tisch (im hinteren Bereich) erfolgt, angenommen. Die geometrischen Bedingungen sind nachfolgend zusammengefasst, die Positionsangaben beziehen sich jeweils auf die der linken, vorderen Raumecke nächste Stelle des Emissionspunktes bzw. der Emissionsfläche. Im Untersuchungsschritt 2 (Verdunstung Isopropanol) wird gleichzeitig durch die Anzahl der verwendeten Schalen (eine oder zwei Stück) eine Variation des Emissionsmassenstroms und in der Folge der auftretenden Konzentrationsbedingungen beabsichtigt.

¹⁷ Es wurden im Vorfeld Ausbreitungsberechnungen am Beispiel des Stoffs Butan durchgeführt, die keinen Bezug auf erhobene Vergleichsdaten hatten. Dabei wurde das Zusammenwirken der Lüftungsmaßnahmen in der Geometrie des Versuchsraums untersucht, wobei die Ausgangswerte willkürlich festgelegt wurden.

¹⁸ Abschätzende Annahme aufgrund komplexer Einstrom-Geometrie

¹⁹ Abschätzende Annahme aufgrund komplexer Einstrom-Geometrie

Position	Untersuchungsschritt 1 (Propan)	Untersuchungsschritt 2 (Isopropanol)
I	linke Wand: 3,65 m vordere Wand: 2,30 m Höhe (absolut über Fussboden): 1,10 m Ausrichtung: aufwärts gerichtete Emission	linke Wand: 2,85 m vordere Wand: 2,45 m Höhe (absolut über Fussboden): 1,00 m Anzahl Schalen: 2
II	linke Wand: 3,00 m vordere Wand: 3,20 m Höhe (absolut über Fussboden): 1,05 m Ausrichtung: aufwärts gerichtete Emission	linke Wand: 2,70 m vordere Wand: 3,10 m Höhe (absolut über Fussboden): 1,00 m Anzahl Schalen: 2
III	–	linke Wand: 3,30 m vordere Wand: 2,45 m Höhe (absolut über Fussboden): 1,00 m Anzahl Schalen: 1

Tabelle 3.9.: Geplante Variationen der Emissions-Positionen

Neben der Zeitabhängigkeit verschiedener Rahmenbedingungen und Parameter ist in der praktischen Analyse und Bewertung von Arbeitsbedingungen die Dauer der Untersuchungen relevant. Sowohl messtechnische Aufzeichnungen, z.B. aufgrund von Kosten, der verfügbaren Messtechnik oder der Dauer von Tätigkeiten, als auch rechnerische Verfahren, bspw. vor dem Hintergrund eingeschränkter Computerressourcen oder Aufwändigkeit der Berechnungen, können i.d.R. nicht kontinuierlich bzw. über eine gesamte Schichtdauer durchgeführt werden. Es wird eine Auswahl und Untersuchung charakteristischer Situationen und Zeiträume erforderlich. Dies können z.B. Messungen zu dauerhaft vorhandenen Hintergrundkonzentrationen, zu verschiedenen Zeitpunkten der Emission oder zu potentiell problematischen Zeitpunkten (z.B. während des maximalen Emissionsmassenstroms eines Gefahrstoffs) sein. Ebenso kann keine Messung flächig über einen gesamten Raum hinweg erfolgen, vielmehr sind geeignete Messpunkte im Vorfeld auszuwählen und messtechnisch auszustatten.

Bei rechnerischen Untersuchungen zur Stoffausbreitung ist gleichermaßen die Festlegung von relevanten "virtuellen Messpunkten"²⁰ vor der Durchführung erforderlich, welche die Sicherheit des erzielten Ergebnisses ebenso im Hinblick auf die Aufrechterhaltung des Gesundheitsschutzes Beschäftigter beeinflussen. Für die Schritte der Validierungsuntersuchungen sollen die erforderlichen Messpunkte nicht im Vorfeld festgelegt werden, sondern durch Probemessungen potentiell kritische bzw. besonders interessierende Bereiche ermittelt und ausgewählt werden. Außerdem soll durch die Messung an verschiedenen Punkten in geringem Umfang ein Spektrum lokaler Luftkonzentrationen aufgezeigt werden, so dass über verschiedene Versuche hinweg allgemeine Tendenzen ersichtlich werden. Im Gegensatz zu der betrieblichen Praxis erfolgt zwar keine Abschätzung der notwendigen Messpunkte, die Untersuchungen sind jedoch auf die Gegenüberstellung mit Berechnungsergebnissen ausgelegt. Für einen Wertvergleich ist dieselbe räumliche Anordnung bei Versuch und Berechnung relevant. Als konstanter Messpunkt wird je Versuch immer ein Messwert im Atembereich der anwesenden Person (Expositionsabschätzung) ermittelt, die übrigen Messpunkte werden wechselnd an anderen Stellen (z.B. auf Labortisch, in Fussbodenhöhe an wechselnden Raumecken etc.) positioniert.

Typisch für zeitliche Verläufe von Stoffkonzentrationen in der Raumluft ist ein Übergang von instationären (sich zeitlich verändernden) zu stationären (auf gleichem Niveau verbleibenden) Bedingungen, sofern Freisetzung und Lüftungverhältnisse konstant verbleiben. Da die Emissions-Massenströme im Vorfeld der Untersuchungen nicht genau abschätzbar sind (Propan-Ausströmung) bzw. bewusst erst im Anschluss an die Versuche berechnet werden sollen (Isopropanol-Verdunstung) und der Luftaustausch des Versuchsraums ebenfalls nicht explizit vorliegt, ist eine Abschätzung des Übergangzeitpunkts nach [11] nicht möglich. Dementsprechend kann die Versuchsdauer nicht an diesem Übergang orientiert werden. Die Versuchsdauern werden für beide Untersuchungsschritte auf 30 Minuten (1.800 s) je Messung nach

²⁰ Punkte im Berechnungsvolumen, für die auszuwertende Parameter als Ausgabewerte bzw. Berechnungsergebnisse ermittelt und fortlaufend dokumentiert werden.

Beginn der Stoffemission festgelegt. In diesem Zeitraum, der die i.d.R. bei betrieblichen Messungen verwendeten Intervalle überschreitet, werden die Konzentrationen in Zeitschritten von einer Sekunde erfasst. Sollte festgestellt werden, dass die Messdauern nicht als ausreichend eingeschätzt werden, können diese bei der Versuchsdurchführung unmittelbar verlängert werden.

4. Verwendete Parameter der Berechnungen

Für die Berechnungen werden durch die verschiedenen Modelle des Gesamtkonzepts unterschiedliche Eingangsparameter zu Rahmen- und Emissionsbedingungen erforderlich. Gleichzeitig muss anhand der betrachteten Arbeitssituation eine Auswahl zu verwendender Emissionsmodelle (Untersuchungsschritt 2) erfolgen, deren Anwendungsgrenzen für die jeweiligen Untersuchungsbedingungen eingehalten werden. Zur Erfassung der erforderlichen Parameter sowie der anforderungsgerechten Modellauswahl erfolgt im Rahmen des Gesamtkonzepts eine Zusammenfassung der Arbeitssituation mit Hilfe des Arbeitssystem-Modells. Dieses ist im Hinblick auf die erforderlichen Berechnungen in seinen Systemelementen weiter mit Parametern untergliedert. Durch die Zusammenfassung sowie gezielte Betrachtung relevanter Kenngrößen (z.B. Aggregatzustand, Charakterisierung als Reinstoff oder Gemisch etc.) erfolgt die Modellauswahl. Der konzeptionelle Ansatz muss im Rahmen der Validierungsuntersuchungen ebenso überprüft werden.

Das Gesamtverfahren beruht auf der Verknüpfung unterschiedlicher Modellansätze, die über Schnittstellen kombiniert werden. Damit eine Verbindung - insbesondere zwischen Betrachtungen der Stoffemission und -ausbreitung - geschaffen werden kann, sind daher ggf. Nebenrechnungen zur Ermittlung von sich gegenseitig beeinflussenden Parametern erforderlich. Zu diesen Verknüpfungen bzw. Verbindungspunkten zählt einerseits die Weiterverwendung von Zwischenergebnissen der Emission (flächenbezogener Emissions-Massenstrom, Emissions-Geschwindigkeit etc.) bzw. zeit- und ortsabhängiger Konzentrationen, aber bspw. auch die Geschwindigkeitsentwicklung über einer verdunstenden Flüssigkeit.

Alle in Kap. 3 aufgeführten Rahmenbedingungen der Untersuchungen sind im Arbeitssystem (vgl. Anhang A) als Teil des Gesamtverfahrens zusammengefasst, das somit den Ausgangspunkt der Untersuchungen darstellt.

Neben den physikalischen Eingangsparametern sind für die Ausbreitungsrechnung mit dem Brandschutzingenieurmodell FDS Parameter zur Darstellung des Berechnungsraums erforderlich. Es werden folgende Werte für die Berechnungen verwendet:

Modellparameter	Verwendeter Wert
Größe Berechnungsraum	
x-Richtung	8,00 m
y-Richtung	7,50 m
z-Richtung	4,00 m
Gitterweite	0,05 m
Anzahl Berechnungsfelder (Gitterzellen)	
x-Richtung	160
y-Richtung	150
z-Richtung	80
Gesamt	1.920.000
Verhalten Grenzen des Berechnungsraums	Offene Begrenzung, passiver Einbezug "nicht berechneter Umgebungsraum" in Strömungsentwicklung
Zeitspanne Zwischenspeicherungen	60 s
Thermisches Verhalten	Berücksichtigung thermische Einflüsse der Rahmenbedingungen (keine isotherme Berechnung)

Tabelle 4.1.: Steuerparameter für Ausbreitungsberechnungen mit FDS

Die Anzahl der Berechnungsfelder ergibt in Verbindung mit der Ausdehnung des Berechnungsraums eine jeweilige Kantenlänge von 0,05 m in jeder Raumrichtung. Es wird bewusst eine geringe Zellgröße verwendet, um eine detaillierte Auflösung zu erreichen. Weiterhin ist davon auszugehen, dass mit kleinen Größen der Kontrollvolumen präzisere Ergebnisse im Vergleich mit Messdaten ermittelt werden¹; eine kleinere geometrische Auflösung ist allerdings aufgrund der zur Verfügung stehenden Computerressourcen problematisch und darüber hinaus für eine spätere betriebliche Anwendung nicht praxistauglich. Der erfasste Berechnungsraum wurde bewusst größer als die Abmessungen des darzustellenden Versuchsraums gewählt, so dass auf allen Raumseiten Überstände des Berechnungsgebiets über die Raumgeometrie auftreten. Zusätzlich wurden die Grenzflächen des Berechnungsraums als offene Geometrie ausgebildet, so dass Strömungen aus dem Berechnungsraum hinaus erfasst werden.

In den Abbildungen 4.1 bis 4.4 wird die Umsetzung der geometrischen Bedingungen in das Modell FDS dargestellt, anhand der die Rechnungen der Validierungsuntersuchungen durchgeführt werden sollen. Diese umfassen ebenfalls die Nebenräume sowie einen Teil des Vorrums.

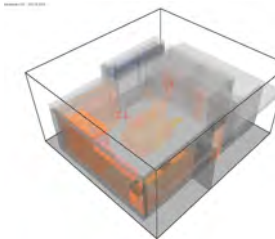


Abbildung 4.1.: Überblick Berechnungsgeometrie (halbtransparente Darstellung)



Abbildung 4.2.: Aufsicht Berechnungsgeometrie



Abbildung 4.3.: Vorderansicht Berechnungsgeometrie (Schnitt vordere Wand)

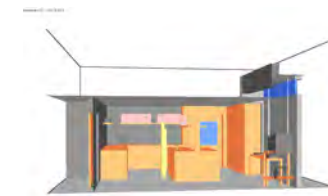


Abbildung 4.4.: Seitansicht Berechnungsgeometrie (Schnitt rechte Wand)

¹ vgl. [12, 13]

5. Konzeptionelle Messdatengewinnung - Messtechnische Ausstattung

Ein Vergleich von Messdaten und Berechnungsergebnissen kann nur erfolgen, sofern die Ermittlung an gleichen räumlichen Positionen durchgeführt wird. Die Positionen werden für die Berechnungen aus der Versuchsdokumentation übernommen werden. Der Vergleich von Mess- und Berechnungsergebnissen wird darüberhinaus von der Genauigkeit und Kalibrierung der verwendeten Messgeräte beeinflusst. Die zu erfassenden Werte umfassen die zeitabhängig gemessenen Konzentrationen, aber auch die Rahmenbedingungen des Versuchsraumes. Insbesondere sind die atmosphärischen Umgebungsbedingungen sowie die Lüftungsverhältnisse zur versuchsbezogenen Parametrisierung der Berechnungen erforderlich.

Zur Dokumentation der Größen, die einzelfallabhängig (je Versuchsdurchlauf) zu ermitteln sind, ist die nachstehende Strategie vorgesehen. Es wird ein einheitlicher Erfassungsbogen verwendet werden, der die vollständige Feststellung sicherstellt. Tab. 5 gibt einen Überblick über die Größen und ihre Erfassungszeitpunkte:

Messgröße	Vor Versuch	Während Versuch	Nach Versuch	Kommentar
Lufttemperatur	Einzelwert	kontinuierliche Messung (Zeitschritte 1,00 s)	Einzelwert	Messung an ein bzw. zwei Positionen, vgl. Tab. 3.2
Luftdruck	Einzelwert	Messung ohne zeitliche Erfassung	Einzelwert	keine Aufzeichnung während Versuchsdurchführung, Möglichkeit zur Beobachtung
Relative Luftfeuchte	Einzelwert	kontinuierliche Messung (Zeitschritte 1,00 s)	Einzelwert	-
Volumenstrom Zuluft	Einzelwert	keine Messung	Einzelwert	keine Möglichkeit zur kontinuierlichen bzw. zeitpunktweisen Messung während Versuchen (Konstruktion / Handhabung Messgerät), Erfassung und Kontrolle vor und nach Versuch
Volumenstrom Abluft	Einzelwert	keine Messung	Einzelwert	keine Möglichkeit zur kontinuierlichen bzw. zeitpunktweisen Messung während Versuchen (Konstruktion / Handhabung Messgerät), Erfassung und Kontrolle vor und nach Versuch
Zulufttemperatur	Einzelwert	kontinuierliche Messung (Zeitschritte 1,00 s)	Einzelwert	Messung nur für Versuche zur Isopropanol-Verdunstung, vgl. Tab. 3.2
Emissions-Massenstrom	Wägung Masse zu Versuchsbeginn	Propan: Visuelle Kontrolle Massenstrom anhand Schwebkörperdurchflussmesser	Wägung Masse nach Versuchsende	Bestimmung Emissions-Massenstrom über zeitliche Mittelung des Massenverlustes
Luftkonzentration Versuchsstoff	Einzelwert	kontinuierliche Messung (Zeitschritte 1,00 s)	Einzelwert	-

Table 5.1.: Messgrößen und konzeptionelle Erfassungszeitpunkte

Die kontinuierlich ermittelbaren Parameter werden über Datenlogger erfasst, die eine unmittelbare PC-Übertragung zur Weiterverwendung ermöglichen. Einzelwerte werden händisch protokolliert und den Versuchsdurchläufen eindeutig zugeordnet. Das Nummerierungssystem wird ebenfalls für die Kennzeichnung der entsprechenden Berechnungen verwendet:

Nummernvergabe: X0YYZ (Beispiel: 2013-3)		
X: Angabe Untersuchungsschritt 1 bzw. 2	YY: fortlaufende Nummer zur Versuchsidentifikation	Z: nur für Berechnungen: Nummer des Berechnungslaufs, z.B. zur gezielten Parametervariation

Table 5.2.: Nummerierungssystem Versuche und Berechnungen

Für die Versuche kommen folgende Messgeräte zur Erfassung der unterschiedlichen Größen zum Einsatz:

Messgröße	Messgerät
Lufttemperatur	TFA Klimalogg Pro (mit Erweiterungseinheit für 2. Messstelle)
Relative Luftfeuchte	TFA Klimalogg Pro
Luftdruck	Gleisinger electronic GDH 12 AN Digital-Baro- / Vacuum-Meter
Volumenstrom Zuluft	TSI Inc., Modulare Volumenstrom-Messhaube Model 8375 Accubalance
Volumenstrom Abluft	TSI Inc., Modulare Volumenstrom-Messhaube Model 8375 Accubalance
Zulufttemperatur	Erweiterungseinheit TFA Klimalogg Pro
Luftkonzentration Versuchsstoff	Flammenionisationsdetektoren (FID), Fa. Bernath Atomic GmbH & Co. KG, Gesamtkohlenwasserstoffanalysator Modell 3006 gleichzeitige Verwendung von bis zu drei Geräten an verschiedenen Raumpositionen
Massenverlust Emission	Hängewaage Kern HDB 10K10N Standwaage Maul logic s Standwaage Maul tronic s

Table 5.3.: Verwendete Messgeräte

Hinweis:

Gemäß des Sicherheitskonzepts werden vor Beginn jeder Messung Strömungsrichtung und -geschwindigkeit oberhalb des Emissionspunkts bzw. der Emissionsfläche kontrolliert, um kritische Bereiche für Stoffkonzentrationen zu identifizieren. Da diese Messung weder standardisiert noch über den gesamten Zeitraum durchgeführt werden, ist keine weitere Verwendung vorgesehen. Dementsprechend wird auf die genutzten Messgeräte nicht weiter eingegangen.

Die verwendeten Geräte zur Lufttemperatur-, Luftfeuchtigkeits-, Luftdruck- und Volumenstrommessung beruhen auf üblichen Messprinzipien und sind unmittelbar auf die jeweiligen Größen kalibriert. Die FID verwenden das Messprinzip der Gaschromatographie für organische Verbindungen, in dem die zu analysierenden Stoffe thermisch isoliert und unter eine definierte Prüfspannung gesetzt werden. Stoffspezifisch entstehen Spannungsschwankungen, deren Ausprägung den Stoff und dessen Konzentration explizit nachweist. Dazu müssen die FID auf die Versuchsstoffe kalibriert werden. Die Kalibrierung erfolgt anhand des elektronischen Signals, das mittels Datenlogger auf ein Notebook übertragen wird. Die an den FID vorhandenen Skalen zur Direktablesung werden nicht berücksichtigt.

Zur Kalibrierung auf Propan sind entsprechende Prüfgasflaschen verfügbar, in denen definierte Propankonzentrationen vorliegen. Die Einstellung der FID erfolgt durch direkte Messung dieser Prüfkonzentrationen. Für Isopropanol stehen keine Prüfgase zur Verfügung, so dass dieses eigenständig erstellt werden muss. Dazu wird eine definierte Stoffmasse in einen Luftsack konstanten Volumens mit einem Verdampfer (Fa. Ansyco, Sycos KM - System zur Bereitung von Kalibriergasen flüssiger oder gasförmiger Phase mit Gassackmethode) eingebracht, wobei im Vorfeld die beabsichtigte Prüfkonzentration berechnet wird¹.

¹ vgl. [14]

Die innerhalb des Luftsacks vorliegende Isopropanol-Dampf-Konzentration wird mittels photoakustischer Infrarot-Spektroskopie (Fa. Brüel & Kjaer, Modell Multi-Gas Monitor Type 1302) überprüft, das aufgrund des Messprinzips eine interne Kalibrierung auf Isopropanol aufweist. Es werden jeweils zwei Konzentrationen hergestellt, in deren Bereich die späteren Versuchskonzentrationen vermutet werden und gegeneinander auf Stimmigkeit eingemessen.

Die Kalibrierungen werden an jedem Versuchstag zu Beginn der Arbeiten durchgeführt und so die FID entsprechend eingestellt. Zur Überprüfung werden über den Tag hinweg Kontrollmessungen bzw. -kalibrierungen durchgeführt.

Hinweis:

Die einzelnen Versuche sollen unmittelbar aufeinanderfolgend durchgeführt werden. Darüber hinaus werden die FID zwischen den Versuchen zur Erfassung von Nullkonzentrationen bzw. zur Kontrolle des Abklings verwendet. Dementsprechend werden die Messgeräte i.d.R. nicht abgeschaltet und kontinuierlich betrieben werden, so dass eine Neukalibrierung vor jedem Versuch für nicht erforderlich gehalten wird.

Aus Sicherheitsgründen werden die FID außerhalb des Modellraums aufgestellt und mit Verlängerungsschläuchen versehen. Die drei Geräte werden im Vorfeld der Messungen aufeinander abgestimmt und ggf. vorhandene Totzeiten, die aus Ansaugleistung und Verlängerung resultieren, ermittelt.

6. Konzeptionelle Untersuchungen des rechnerischen Gesamtverfahrens - Auswertung und Vergleich

Die bei den Messungen ermittelten Parameter und Ergebnisse dienen als Vergleichsgrundlage. Die Eingangswerte der Berechnungen, die für alle Versuche konstant sind, sind im zugehörigen Arbeitssystem (vgl. Anhang A) zusammengefasst. Die einzelnen Versuchsdokumentationen mit den weiteren Eingangsparametern ergänzen das Arbeitssystem in offenen (im Vorfeld nicht festgelegten) Punkten bzw. bei Abweichungen von den geplanten Bedingungen.

Innerhalb der methodischen Schritte werden die (Zwischen-) Ergebnisse von Messungen und Berechnungen unmittelbar miteinander verglichen werden. Für den Untersuchungsschritt 1 sind dies die Ergebnisse gemessener und berechneter Luftkonzentrationen. In Untersuchungsschritt 2 ergänzen Vergleiche von Verdunstungsrechnungen (in Verbindung mit Geschwindigkeitsabschätzungen) und empirisch ermittelten Emissionen die Aussagen. Weiterhin sollen additiv Ausbreitungsrechnungen, die sich ausschließlich auf rechnerische Emissionsabschätzungen beziehen, durchgeführt werden (vgl. Kap. 3.1).

Aufgrund der geringen Anzahl an Versuchen (verglichen mit möglichen Parameterkonstellationen), keinen vorgesehenen Wiederholungen und eingeschränkten Variationsmöglichkeiten wesentlicher Parameter (insbesondere der Lüftungsbedingungen und Umgebungstemperaturen) ist eine statistische Auswertung der Versuche im Sinne von Verteilungen etc. nicht möglich. Die Berechnungen könnten dagegen - auch unter Berücksichtigung von Sensitivitätsbetrachtungen - mehrfach durchgeführt werden. Die Bewertung des Gesamtverfahrens erfolgt daher unmittelbar auf der Datenbasis von Übereinstimmungen oder Abweichungen bei gleichen Rahmenbedingungen.

Als Mess- und Rechenergebnisse zu Luftkonzentrationen werden zeitabhängige Verläufe erwartet. Weiterhin ist davon auszugehen, dass sich generelle Konzentrationsverläufe auf einzelfallabhängigen Niveaus einstellen werden, wobei ggf. Einzel- bzw. Peakwerte in einem Zeitschritt deutliche Abweichungen an einzelnen Zeitpunkten ergeben können. Es muss daher eine Auswertung stattfinden, die einerseits die Einzelwerte, andererseits aber auch allgemeiner die Konzentrationsverläufe sowie die generellen (maximalen) Konzentrationsniveaus einbezieht. Abweichungen und Peakwerte bedürfen detaillierter Analysen und Begründung. Folgende Vergleichs- und Bewertungssystematik ist vorgesehen:

1. *Qualitativer Vergleich der Konzentrationsverläufe:*

Visualisierung der Verläufe als Zeit-Konzentrations-Diagramme mit dem Ziel, das Verhältnis der gemessenen und berechneten Konzentrationsniveaus (insbesondere: zeitabhängige Zunahmen und stationäre Zustand) gegeneinander darzustellen.

Dabei können Peak- und Extremwerte identifiziert werden.

Aufgrund der geringen Zeitschritte zwischen den Messpunkten werden insbesondere bei den Messungen ggf. stark schwankende Konzentrationsverläufe erwartet, die der Darstellung geschuldet sind und ggf. kein "mittleres Konzentrationsniveau" erkennen lassen. Ein Vergleich anhand eines (arithmetischen) Mittelwerts als Einzelwert ist nicht möglich bzw. sinnvoll, da keine Information über den tatsächlichen Verlauf transportiert wird. Um die Visualisierung zu verbessern, soll für diese Fälle der sog. einfache gleitende Mittelwert¹ herangezogen werden:

$$c_{MW,gl}(t) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} c(t-i) \tag{6.1}$$

¹ Parameter der Darstellung: $c_{MW,gl}(t)$ = zeitabhängige Luftkonzentration, gleitender Mittelwert, n = Anzahl Einzelwerte, die in Mittelwertberechnung einbezogen werden ("Dämpfungsfaktor"), $c(t-i)$ = zeitabhängiger Einzelwert der Luftkonzentration

Über den "Dämpfungsfaktor" n wird festgelegt, über wieviele zurückliegende Einzelwerte der Mittelwert gebildet wird. Auf diese Weise wird der Einfluss einzelner Peak- bzw. stark schwankender Werte abgeschwächt. Für n werden 30 und 60 (Sekunden) gewählt, so dass Zeitschritt-bedingte Einflüsse gemindert werden. Diese Werte bieten sich aus der messtechnischen Praxis an, in der z.B. Konzentrationsmessungen mit verschiedenen Messgeräten als Zeitintegrale über (teilweise deutlich größere) Zeiträume gebildet oder ohne Einzelwerte in vergleichbaren Zeitschrittweiten erfasst werden.

2. Quantitativer Vergleich der Konzentrationsverläufe:

Berechnung von Kennwerten, die Aussagen zu Genauigkeit und Abweichungen der Berechnungen gegenüber den Messergebnissen erbringen.

Die Berechnung von Mittelwerten, die keinen Zeitbezug vorweisen, ist aufgrund der Zeitabhängigkeit der Ergebnisse nicht zielführend. Da darüber hinaus die Versuche nicht wiederholt werden sollen, ist eine herkömmliche statistische Auswertung ebenfalls nicht möglich.

Als Kennzahlen werden die in den Gleichungen 6.2 bis 6.4 aufgeführten Maßzahlen² verwendet, die in [15] explizit für die Auswertung zeitabhängiger Berechnungen mit dem Modell FDS vorgeschlagen werden. Dazu werden die zeitabhängigen Konzentrationen jeweils als sog. multidimensionale Vektoren angesehen, die entsprechend ausgewertet werden können.

- Relative Abweichung - L_2 -Norm

$$\frac{\|\vec{E} - \vec{m}\|}{\|\vec{E}\|} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n E_i^2}} \quad (6.2)$$

Die L_2 -Norm charakterisiert die relative Differenz der Konzentrationsverläufe untereinander, die Überdeckung als optimaler Zustand ist durch das Ergebnis "0" gekennzeichnet.

- Abweichung Kurvenverlauf - inneres Produkt (Kosinus)

$$\cos\left(\angle\left(\vec{E}, \vec{m}\right)\right) = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot m_i}{\|\vec{E}\| \cdot \|\vec{m}\|} \quad (6.3)$$

Der Unterschied der qualitativen Konzentrationsverläufe zueinander wird durch das innere Produkt dargestellt. Wenn die Verläufe voneinander abweichen (vgl. relative Abweichung) bildet ein inneres Produkt von "1" den optimalen Zustand, bei dem ein konstanter Faktor für die Abweichung bzw. die Verschiebung der Verläufe zueinander verantwortlich ist.

- Beste Übereinstimmung - Projektionskoeffizient

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot m_i}{\|\vec{m}\|} \quad (6.4)$$

Der Projektionskoeffizient dient der Einschätzung der Zufälligkeit festgestellter Abweichungen in den Konzentrationsverläufen. Sind Unterschiede vorhanden (siehe auch vorherige Kennzahlen), erbringt der ideale Wert von "1" die Aussage, dass diese lediglich aus zufälligen Störungen resultieren.

Die Berechnung der Kennwerte wird sowohl für die unmittelbar gemessenen und berechneten Daten als auch für die Zeitverläufe, die aus der Glättung der Datensätze mit Hilfe des gleitenden Mittelwert (siehe Gleichung 1) ermittelt werden, dargestellt. Diese Betrachtung beurteilt den Einfluss der Glättung auf die Daten bzw. zielt auf die Notwendigkeit der Wiedergabe zeitlich stark fluktuierender Werte ab.

Da im Zuge der Versuche die Emissions-Massenströme nicht als zeitabhängige Verläufe, sondern lediglich als zeitbezogene Mittelwerte (über den gesamten Massenverlust) bestimmbar sind, ist ein detaillierter Vergleich gemessener und berechneter zeitabhängiger Freisetzung nicht möglich. Zur singulären Bewertung der Verdunstungsmodelle werden die berechneten Emissions-Massenströme über die Verduns-

tungszeit summiert und als gesamte freigesetzte Stoffmasse mit den Messwerten verglichen. Die Bewertung des Einflusses auf das Gesamtverfahren erfolgt durch eigenständige Berechnungsläufe, in denen die berechneten Emissionswerte Verwendung finden und die mit der zuvor beschriebenen Systematik ausgewertet werden.

Erfolgen Sensitivitätsstudien mit gezielten Parametervariationen, wird zunächst eine Auswertung der Berechnungsergebnisse gegenüber den Messwerten entsprechend der zuvor dargestellten Systematik vorgenommen. Die Kennwerte können im Anschluss zwischen den verschiedenen Berechnungsläufen verglichen werden. Wird eine weitere Detaillierung erforderlich, kann die Bewertungssystematik gleichermaßen zwischen den Ergebnissen der einzelnen Berechnungsläufe verwendet werden.

² Parameter der Darstellung: Kennbuchstabe E = Messwert, Kennbuchstabe m = Berechnungsergebnis, jeweils zum gleichen Zeitpunkt der ermittelten Konzentrationsverläufe

Literaturverzeichnis

- [1] Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung - GefStoffV), Fassung 2010 (zuletzt geändert Juli 2011); in Bundesgesetzblatt I, 2011
- [2] TRGS 400 - Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen, Ausgabe: Januar 2008
- [3] TRGS 402 - Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition, Ausgabe: Juni 2008
- [4] Oberkampf, W.L., Trucano, T.G.: Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics. Albuquerque, USA: Sandia National Laboratories, 2002
- [5] McGrattan, K. et. al.: Fire Dynamics Simulator (Version 5) - Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model. Washington, USA: National Institute of Standards and Technologie (NIST), U.S. Department of Commerce, 2010
- [6] McGrattan, K. et. al.: Fire Dynamics Simulator (Version 5) - Technical Reference Guide, Volume 2: Verification. Washington, USA: National Institute of Standards and Technologie (NIST), U.S. Department of Commerce, 2010
- [7] TRGS 900 - Arbeitsplatzgrenzwerte, Ausgabe: Januar 2006 (zuletzt geändert 2012)
- [8] Siebertz, K. et. al.: Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE). Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, 2010
- [9] DiNenno, P.J. et. al.: SFPE Handbook of Fire Protection. 3rd. Edition, National Fire Protection Association, 2002
- [10] McGrattan, K. et. al.: Fire Dynamics Simulator (Version 5) - User's Guide. Washington, USA: National Institute of Standards and Technologie (NIST), U.S. Department of Commerce, 2010
- [11] Eickmann, U.: Methoden der Ermittlung und Bewertung chemischer Expositionen an Arbeitsplätzen. Landsberg/Lech: Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH, 2008
- [12] McGrattan, K. et. al.: Fire Dynamics Simulator (Version 5) - Technical Reference Guide, Volume 3: Validation. Washington, USA: National Institute of Standards and Technologie (NIST), U.S. Department of Commerce, 2010
- [13] Witte, N.: Sensitivitätsanalyse von Diskretisierungs- und Turbulenzparametern bei CFD-Berechnungen mit FDS - Einflüsse der Zellgröße und der Turbulenzmodellierung auf die numerische Berechnung von brandinduzierten Strömungen. Wuppertal: Master-Thesis Bergische Universität Wuppertal, 2007
- [14] Sycos KM - System zur Bereitung von Kalibriergasen aus Reinkomponenten flüssiger oder gasförmiger Phase mit Gassackmethode, Benutzerhandbuch
- [15] Münch, M.: Konzept zur Absicherung von CFD-Simulationen im Brandschutz und in der Gefahrenabwehr. Magdeburg: Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (veröffentlicht: Verlag INURI GmbH, Berlin), 2013

A. Arbeitssystem “Validierungsuntersuchungen”

Hinweis:

Die im Arbeitssystem aufgeführten geometrischen Abmessungen stellen bereits die idealisierten Angaben zur Übernahme in die Berechnungen dar. Aufgrund des gewählten Berechnungsfeldes mit Kantenlängen der Kontrollvolumen von 0,05 m sind die Angaben entsprechend gerundet. Ausnahme bilden die Angaben zur Stoffemission, die zur bei der Verwendung in den Berechnungen anzupassen bzw. zu idealisieren sind.

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
(1) Arbeitsaufgabe:			
(1.1) Beschreibung der Aufgabenstellungen	Benennung / Beschreibung	Überwachung Freisetzung von Propan bzw. Isopropanol	–
	Position der Verrichtung	stehend, vor zentralem Lab-ortisch x ¹ : ca. 3,20 y ² : ca. 2,20 z ³ : ca. 0,95	m
(2) Arbeitsgegenstand:			
(2.1) Beschreibung der Stoffemission - verfahrensbedingte Eigenschaften	Emissionsart (sofern bekannt)	Propan: direkte Gaseinströmung Isopropanol: Verdunstung	–
	Position Emissionsfläche im Arbeitsraum	Propan: Position I: x: 3,65 y: 2,30 z: 1,10 Position II: x: 3,00 y: 3,20 z: 1,05	m
		Isopropanol: Position I (2 Schalen): x: 2,85 y: 2,45 z: 1,00 Position II (2 Schalen): x: 2,70 y: 2,45 z: 1,00 Position III (1 Schale): x: 3,30 y: 2,45 z: 1,00	m

¹ Angabe für Abstand “linke Wand” Versuchsraum
² Angabe für Abstand “vordere Wand” Versuchsraum
³ Angabe für absolute Höhe über Fussboden

	Geometrische Anordnung Emissions- bzw. Öffnungsfläche	Propan: Orientierung aufwärts Isopropanol: Orientierung aufwärts	–
	Emissions- bzw. Öffnungsfläche (von Behältern oder Rohrleitungen bzw. Grenzfläche des Phasenübergangs)	Propan: 0,3117 cm ² Isopropanol: 0,12 und 0,24 m ²	–
	Länge Emissionsfläche in Strömungsrichtung (für Emission durch flächenbezogene Verdunstung oder Verdampfung)	0,36 und 0,72	m
	Kontraktionskoeffizient Emissions- bzw. Öffnungsfläche (von Behältern oder Rohrleitungen)	nicht erforderlich	–
	Flächenbezogener Gesamt-Volumen- bzw. Massenstrom der Emission gasförmiger Stoffe (als unmittelbare Annahme bzw. Ergebnis Emissions-Betrachtungen)	einzelfallabhängige Ermittlung	$g/(s m^2)$ $m^3/(s m^2)$
	Flächen- und komponentenbezogener Volumen- bzw. Massenstrom der Emission gasförmiger Stoffe (als unmittelbare Annahme bzw. Ergebnis Emissions-Betrachtungen)		$g/(s m^2)$ $m^3/(s m^2)$
	Emissions-Strömungsgeschwindigkeit von Gasen in Normalrichtung (als unmittelbare Annahme bzw. Ergebnis Emissions-Betrachtungen)	nicht erforderlich	m/s
	Stationärer Druck innerhalb Behälter bzw. Rohrleitung		Pa
	Strömungsgeschwindigkeit innerhalb Rohrleitung		m/s
	Höhe Betrachtungsebene in Rohrleitung		m
	Zeitlicher Emissionsverlauf	Annahme: zeitliche Gleichmäßigkeit je Einzelfall (zeitbezogene Mittelung) Emissionsdauer ⁴ : 1.800	s
(3) Arbeitsmittel:			
(3.1)	Geometrie verwendeter Arbeitsmittel	Abmessungen Arbeitsmittel	keine Verwendung Arbeitsmittel m
		Position in Arbeitsraum	– m
(3.2)	Zu- und Abluft Arbeitsmittel	Abmessungen und Fläche Zu- / Abluftöffnungen	keine Verwendung Arbeitsmittel m m ²
		Position und Ausrichtung Zu- / Abluftöffnungen	m
		Kontraktionskoeffizient Zu- / Abluftöffnungen	–
		Strömungsgeschwindigkeit in Zu- / Abluftöffnungen	m/s
(3.3)	Thermische Bedingungen Arbeitsmittel	Materialien der Oberflächen	keine Verwendung Arbeitsmittel –
		Oberflächentemperaturen Arbeitsmittel (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	K
		Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Arbeitsmittel-Oberflächen	–
		Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	W/(m K)
		Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	kJ/(kg K)
(3.4)	Ausgangszustand Fluid-Behälter	Gesamt-Stoffmasse in Behälter	einzelfallabhängige Ermittlung kg

⁴ entspricht Versuchsdauer

	Behälter-Innendruck zu Betrachtungsbeginn	nicht erforderlich	Pa
	Grundfläche Behälter		m ²
	Überdruck Behälter gegenüber Umgebung zu Betrachtungsbeginn		Pa
(3.5)	Bewegungen von Betriebsmitteln	Ausgeführte Bewegungen	keine Verwendung beweglicher Betriebsmittel –
		Bewegungsrichtungen	–
		Bewegungsgeschwindigkeit	m/s
		Beschleunigungen von Bewegungen	m/s ²
(3.6)	Zeitlicher Verlauf der Eigenschaften vorhandener Betriebsmittel		keine Verwendung Betriebsmittel s
(4) Mensch:			
(4.1)	Körperabmessungen (vereinheitlichte Annahmen)	Kopf	x: 0,15 y: 0,10 z: 0,20 m
		Torso	x: 0,40 y: 0,15 z: 0,60 m
		Beine	x: 0,35 y: 0,11 z: 0,95 m
(4.2)	Thermische Bedingungen des menschlichen Körpers (vereinheitlichte Annahmen)	Oberflächentemperatur	Kopf: 310,15 Torso: 308,15 Beine: 303,15 K
(5) Arbeitsablauf:			
(5.1)	Zeitabhängige Aufenthaltsorte von Beschäftigten	Position im Arbeitsraum (projizierter Körpermittelpunkt)	stationäre Position: x: 3,00 y: 1,90 z: 0,00 (Boden) m
		Orientierung im Arbeitsraum	x-Richtung –
		Atembereich Beschäftigter (Haltung)	x-Richtung, zu Emission gewandt –
(5.2)	Arbeitsorganisation	Zeitauern des Aufenthalts von Beschäftigten	1.800 (gesamte Versuchsdauer) Ausnahmefälle Isopropanol: 0 ⁵ s
		Zeitpunkte Arbeitsaufnahme / -ende	0-1.800 s
		Zeitbezogene Positionswechsel	keine Wechsel s
(6) Eingabe:			
(6.1)	Inhärente Stoffeigenschaften	Aggregatzustand	Propan: gasförmig Isopropanol: flüchtig –
		Charakterisierung als Reinstoff oder Gemisch	Propan: Reinstoff Isopropanol: Reinstoff –
		Molenbruch der Komponenten (Charakterisierung der Zusammensetzung von Flüssigkeits-Gemischen)	Isopropanol: 1 –
		Molare Masse (Molekulargewicht) emittierter Stoff oder Komponente	Propan: 44 Isopropanol: 60 g/mol
		Dichte des Stoffes bei Emission bzw. Freisetzung in Betrachtungsraum (ggf. nach erfolgtem Phasenübergang)	Propan: 1,873 Isopropanol (Dampf): 2,490 kg/m ³ bei T=293,15K

⁵ entsprechend einzelfallabhängige Dokumentation

Temperatur von Gasen bei Emission (Temperatur nach Phasenübergang, ggf. als unmittelbare Annahme)	Annahme: unmittelbarer Temperaturausgleich Propan zu Umgebung	K
Temperatur der Flüssigkeit (Temperatur vor Phasenübergang, ggf. mit Zeitabhängigkeit als unmittelbare Annahme oder rechnerische Ableitung)	Annahme: Isopropanol entsprechend Umgebungstemperatur	K
Sättigungsdampfdruck des Stoffes	Propan: 830.000,00 Isopropanol: 4.300,00	Pa
Dampfdruck Stoff oder Komponente in Umgebungsatmosphäre (ggf. unter Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit)	nicht erforderlich	Pa
Verdunstungstemperatur Flüssigkeiten	Annahme: Isopropanol entsprechend Umgebungstemperatur	K
Stoffspezifischer Siedepunkt bei Umgebungsdruck	Propan: 231,15 Isopropanol: 353,65	K
Stoffspezifische Sublimationstemperatur	nicht relevant	K
Stoffspezifische Verdampfungsenthalpie (ggf. unter Berücksichtigung Zeitabhängigkeit)	Propan: 352,50 (bei 288,15 K) Isopropanol: 64,17 (bei 353,65 K)	kJ/kg
Stoffspezifische Sublimationsenthalpie	nicht relevant	kJ/kg
Stoffspezifischer Diffusionskoeffizient Stoff oder Komponente in Umgebungsatmosphäre	Propan: nicht relevant Isopropanol: Abschätzung nach Arnold und Engel	m^2/s
Empirischer, stoffspezifischer Aktivitätskoeffizient in flüssiger Phase	Isopropanol: 1	—
Stoffspezifischer Isentropenexponent	Propan: 1,10	—
Kinematische Viskosität Stoff oder Komponente (emittierte Stoffe sowie Komponenten der Umgebungsatmosphäre, sofern von standardisierter Umgebungsluft abweichende Zusammensetzung)	Propan: $8,3 \cdot 10^{-6}$ (bei 298,15 K) Isopropanol: $3,63 \cdot 10^{-2}$ bei 293,15 K Umgebung: Annahme als standardisierte Zusammensetzung	m^2/s
Spezifische Wärmeleitfähigkeit Stoff oder Komponente (emittierte Stoffe sowie Komponenten der Umgebungsatmosphäre, sofern von standardisierter Umgebungsluft abweichende Zusammensetzung)	Propan: $180,00 \cdot 10^{-4}$ Umgebung: Annahme als standardisierte Zusammensetzung	$W/(m K)$
Stoffspezifische Wärmespeicherkapazität samt Referenztemperatur der Angabe	Propan: 1,696 (bei 298,15 K) Isopropanol (Dampf): 1,489 (bei 298,15 K)	$kJ/(kg K)$ K

(6.2) Stoffspezifische Grenzwerte	Allgemeine Gaskonstante	8,3145	$J/(mol K)$
	Grenzwertkonzept	Propan und Isopropanol: AGW gem. TRGS 900	—
	Stoffspezifischer Grenzwert	Propan: 1,80 Isopropanol: 0,50	g/m^3
	Spitzenbegrenzung Grenzwert	Propan und Isopropanol: 4 (II)	g/m^3
	Zeitbezug Grenzwert	Propan und Isopropanol: 8 h	h
(7) Ausgabe: keine Eingangsgrößen erforderlich			
(8) Umgebungs- und Umwelteinflüsse:			
(8.1) Geometrie des Arbeitsraumes (Innenmaße ⁶)	Länge (x)	5,80	m
	Breite (y)	5,30	m
	Höhe (z)	bis $y=4,80$: 2,40 ab $x=2,90$ und $y=4,80$: 3,00	m
(8.2) Strömungshindernisse in Arbeitsraum			
Wandversprünge	I	zwischen: $x=5,25-5,80$, $y=0,00-1,15$ volle Raumhöhe	m
	II	zwischen: $x=5,55-5,80$ $y=4,80-5,30$ volle Raumhöhe	m
Arbeits Tisch I	Länge (x)	3,40	m
	Breite (y)	0,80	m
	Höhe (z)	0,90	m
	Position	$x,y,z=0,00$	m
	Position Büroeinrichtung (PVC)	$x=0,00-0,35$ $y=0,25-0,75$ $z=0,90-1,30$	m
Regal I	Länge (x)	2,45	m
	Breite (y)	0,30	m
	Höhe (z)	0,05	m
	Position (Oberkante)	$x,y=0,00$ $z=1,75$	m
	Position Unterlagen (Papier)	$x=0,00-0,30$ $y=0,45-1,70$ und $1,95-2,90$ $z=1,75-2,10$	m
Arbeits Tisch II	Länge (x)	0,80	m
	Breite (y)	2,90	m
	Höhe (z)	0,90	m
	Position	$x,y,z=0,00$	m
Regal II	Länge (x)	0,35	m
	Breite (y)	2,40	m
	Höhe (z)	1,75	m
	Position (Oberkante)	$x=0,00$ $y=0,50$ $z=1,75$	m
	Position Büroeinrichtung (PVC)	$x=1,10-1,55$ $y=0,00-0,20$ $z=1,75-1,90$	m
Wandschrank Laborabzug	Länge (x)	0,85	m
	Breite (y)	2,40	m

⁶ vgl. Abb. 3.1

	Höhe (z)	2,40	m
	Position	x,z=0,00 y=2,90	m
Wandschrank	Länge (x)	2,90	m
	Breite (y)	0,60	m
	Höhe (z)	2,40	m
	Position	x,z=0,00 y=4,70	m
Labortisch (zentral)	Länge (x)	2,15	m
	Breite (y)	1,35	m
	Höhe (z)	0,90	m
	Position	x=2,00 y=2,20 z=0,00	m
Aufbau zentraler Labortisch	Länge (x)	2,15	m
	Breite Ablagefläche (y)	0,55	m
	Dicke Ablagefläche (z)	0,05	m
	Höhe Ablagefläche über Tischplatte (Oberkante)	0,75	m
	Anzahl Stützen	4	–
	Dicke Stützen (x)	0,05	m
	Breite Stützen (y)	0,15 (je Seite 0,20 Überstand Ab- lagefläche)	m
	Höhe Stützen über Tischplatte (z)	1,10	m
	Abstand Stützen (x)	außen: je 0,55 Mitte: 0,85	m
	Position	x=2,00 y=2,80 z=0,90	m
Variabler Arbeitstisch	Länge (x)	1,50	m
	Breite (y)	0,75	m
	Höhe Tischplatte (z, Oberkante)	0,75	m
	Dicke Tischplatte (z)	0,05	m
	Abmessungen Tischbeine (x,y)	je 0,05	m
	Anordnung Tischbeine	jew. unmittelbar an Außenkante	–
	Position	x=3,60 y=4,65 z=0,00	m
PC-Ausstattung	Abmessungen Tastatur	x= 0,45 y=0,25 z=0,05	m
	Position Tastatur	x=4,00 y=4,90 z=0,75	m
	Abmessungen PC-Maus	x=0,05 y=0,10 z=0,05	m
	Position PC-Maus (Annahme)	x=4,55 y=4,90 z=0,75	m
	Abmessungen PC	x=0,30 y=0,30 z=0,10	m
	Position PC	x=4,70 y=4,75 z=0,75	m
	Abmessungen Monitorfuss	x=0,10 y=0,05 z=0,10	m
	Position Monitorfuss	x=4,80 y=4,85 z=0,85	m
	Abmessungen Monitorbildschirm	x=0,40 y=0,05 z=0,40	m

	Position Monitorbildschirm	x=4,65 y=4,85 z=0,95	m
Druckertisch	Länge (x)	0,60	m
	Breite (y)	0,75	m
	Höhe Tischplatte (z, Oberkante)	0,95	m
	Höhe Zwischenplatte (z, Oberkante)	0,25	m
	Dicke Tischplatten (z)	0,05	m
	Abmessungen Tischbeine (x,y)	je 0,05	m
	Anordnung Tischbeine	jew. unmittelbar an Außenkante	–
	Position	x=5,10 y=5,30 z=0,00	m
	Abmessungen Drucker	x= 0,40 y= 0,45 z= 0,50	m
	Position Drucker	x= 5,10 y=4,75 z= 0,95	m
Abmessungen Büroeinrichtung (PVC)	Abmessungen Büroeinrichtung (PVC)	x= 0,25 y= 0,35 z= 0,30	m
	Position Büroeinrichtung (PVC)	x= 5,40 y=4,75 z= 0,25	m
Abfalltonne (nur für Isopropanol-Versuche)	Abmessungen	x= 0,30 y=0,30 z=0,40	m
	Position	x=2,00 y=0,80 z=0,00	m
(8.3) (Oberflächen-) Materialien Bauteile und Strömungshindernisse	Material	Stein	–
	Zuordnung Oberfläche	Außenwand	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	K
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	0,69	W/(m K)
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	0,84	kJ/(kg K)
	Materialdichte	1.600,00	kg/m ³
	Annahme thermische Dicke	0,20	m
	Material	Beton	–
	Zuordnung Oberfläche	Decke	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	K
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	1,37	W/(m K)
Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	0,88	kJ/(kg K)	
Materialdichte	2.100,00	kg/m ³	
Annahme thermische Dicke	0,30	m	
Material	Gipskarton	–	
Zuordnung Oberfläche	Raumwände	–	
Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	K	
Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–	
Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	0,84	W/(m K)	
Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	0,48	kJ/(kg K)	
Materialdichte	1.440,00	kg/m ³	

	Annahme thermische Dicke	0,20-0,30	<i>m</i>
	Material	Fensterglas	–
	Zuordnung Oberfläche	Fenster, Ver- schluss Labor- abzug	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	<i>K</i>
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	0,78	<i>W/(m K)</i>
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	0,84	<i>kJ/(kg K)</i>
	Materialdichte	2.700,00	<i>kg/m³</i>
	Annahme thermische Dicke	0,05	<i>m</i>
	Material	Holz	–
	Zuordnung Oberfläche	Laboreinbauten, Möbiliar	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	<i>K</i>
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	0,166	<i>W/(m K)</i>
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	2,40	<i>kJ/(kg K)</i>
	Materialdichte	540,00	<i>kg/m³</i>
	Annahme thermische Dicke	0,10	<i>m</i>
	Material	Papier	–
	Zuordnung Oberfläche	Bücher auf Ablagen	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	<i>K</i>
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	0,18	<i>W/(m K)</i>
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	1,20	<i>kJ/(kg K)</i>
	Materialdichte	930,00	<i>kg/m³</i>
	Annahme thermische Dicke	0,35	<i>m</i>
	Material	PVC	–
	Zuordnung Oberfläche	Einrichtung	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	<i>K</i>
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	0,15	<i>W/(m K)</i>
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	1,50	<i>kJ/(kg K)</i>
	Materialdichte	1.440	<i>kg/m³</i>
	Annahme thermische Dicke	0,05	<i>m</i>
	Material	V2A	–
	Zuordnung Oberfläche	Einrichtung	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	<i>K</i>
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	16,30	<i>W/(m K)</i>
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	0,46	<i>kJ/(kg K)</i>
	Materialdichte	7.817,00	<i>kg/m³</i>
	Annahme thermische Dicke	0,05	<i>m</i>
(8.4)	Öffnungen des Arbeitsraumes		
Zugangstür	Öffnungsfläche	1,60	<i>m²</i>

	Position in Umfassungsbauteilen	x=00 y=3,75 z=0,00	<i>m</i>
	Zeitliches Auftreten	ständig geschlossen (Holz), pauschale Annahme Undichtigkeit	<i>s</i>
Tür Lager 1	Öffnungsfläche	1,295	<i>m²</i>
	Position in Umfassungsbauteilen	x=5,80 y=1,80 z=0,00	<i>m</i>
	Zeitliches Auftreten	ständig geschlossen (Holz), pauschale Annahme Undichtigkeit	<i>s</i>
Tür Lager 2	Öffnungsfläche	1,295	<i>m²</i>
	Position in Umfassungsbauteilen	x=5,80 y=1,80 z=0,00	<i>m</i>
	Zeitliches Auftreten	ständig geschlossen (Holz), pauschale Annahme Undichtigkeit	<i>s</i>
Fenster I	Öffnungsfläche	0,18	<i>m²</i>
	Position in Umfassungsbauteilen	x=3,00 y=5,30 (Außenwand) z=2,50	<i>m</i>
	Zeitliches Auftreten	ständig geschlossen (Fensterglas)	<i>s</i>
Fenster II	Öffnungsfläche	0,58	<i>m²</i>
	Position in Umfassungsbauteilen	x=3,50 y=5,30 (Außenwand) z=2,50	<i>m</i>
	Zeitliches Auftreten	ständig geschlossen (Fensterglas)	<i>s</i>
Fenster III	Öffnungsfläche	0,18	<i>m²</i>
	Position in Umfassungsbauteilen	x=5,00 y=5,30 (Außenwand) z=2,50	<i>m</i>
	Zeitliches Auftreten	ständig geschlossen (Fensterglas)	<i>s</i>
(8.5) Raumlufttechnische Maßnahmen:			
Zuluftöffnung 1	Fläche	0,0768 (für Berechnungen: 0,08) bzw. 0,0240	<i>m²</i>
	Position im Arbeitsraum	x=1,45 y=2,65 z: Decke	<i>m</i>
	Typ der Maßnahme (Zu- oder Abluft)	Zuluft	–

	Zeitabhängige Luftführung bzw. Steuerung	konstanter Betrieb Ausnahme Iso- propanol: Einzelfall- abhängige Abschaltung	s
Zuluftöffnung 2	Fläche	0,0768 (für Berechnungen: 0,08) bzw. 0,0240	m ²
	Position im Arbeitsraum	x=4,35 y=2,65 z: Decke	m
	Typ der Maßnahme (Zu- oder Abluft)	Zuluft	–
	Zeitabhängige Luftführung bzw. Steuerung	konstanter Betrieb Ausnahme Iso- propanol: Einzelfall- abhängige Abschaltung	s
Abluftöffnung	Fläche	0,09	m ²
	Position im Arbeitsraum	x=2,70 y=1,00 z: Decke	m
	Typ der Maßnahme (Zu- oder Abluft)	Abluft	–
	Zeitabhängige Luftführung bzw. Steuerung	konstanter Betrieb Ausnahme Iso- propanol: Einzelfall- abhängige Abschaltung	s
Abluftöffnungen Lager 1	Fläche	je 0,005	m ²
	Positionen im Arbeitsraum	x=6,50 und 6,65 y=1,50 und 2,90 z: Decke	m
	Typ der Maßnahme (Zu- oder Abluft)	Abluft	–
	Zeitabhängige Luftführung bzw. Steuerung	konstanter Betrieb Ausnahme Iso- propanol: Einzelfall- abhängige Abschaltung	s
Abluftöffnungen Lager 2	Fläche	je 0,005	m ²
	Positionen im Arbeitsraum	x=6,50 und 6,65 y=3,35 und 5,00 z: Decke	m
	Typ der Maßnahme (Zu- oder Abluft)	Abluft	–
	Zeitabhängige Luftführung bzw. Steuerung	konstanter Betrieb Ausnahme Iso- propanol: Einzelfall- abhängige Abschaltung	s
(8.6) Stoffeigenschaften Umgebungsat- mosphäre	Zusammensetzung Umgebungsatmosphäre (Massenanteile zu Betrachtungsbeginn)	Annahme als standardisierte Zusammenset- zung	–
	Dichte Umgebungsatmosphäre (ggf. als Aus- gangswert zu Beginn der Betrachtung)	28,97	kg/m ³

	Temperatur Umgebungsatmosphäre (ggf. zu Be- trachtungsbeginn als Grundgröße)	einzelfall- abhängige Ermittlung	K
	Umgebungsdruck innerhalb Berechnungsraum (ggf. zu Betrachtungsbeginn als Grundgröße)	einzelfall- abhängige Ermittlung	Pa
	Luftfeuchtigkeit Umgebungsatmosphäre	einzelfall- abhängige Ermittlung	%
	Kinematische Viskosität der Umgebungsluft	einzelfall- abhängige Abschätzung nach Arnold und Engel	m ² /s
	Stoffkonzentration in Umgebungsluft (als unmit- telbare Annahme)	einzelfall- abhängiger Nachweis: Null- konzentration	g/m ³
(8.7) Thermodynamische Umgebungsbe- dingungen	Strömungsgeschwindigkeit Umgebungsatmosphäre oberhalb Flüssigkeitsoberfläche (ggf. als unmittel- bare Annahme)	Abschätzung über einzel- fallabhängige Vorberechnung	m/s
	Wärmestromdichte auf Flüssigkeitsoberfläche aus Betrachtungsraum (ggf. als unmittelbare Annahme)	nicht erforder- lich	W/m ²

Tabelle A.1.: Abschließende Konkretisierung des Arbeitssystems als Methodik zur Erfassung benötigter Eingangsgrößen

B. Fotodokumentation

Hinweis:

Die nachfolgenden Aufnahmen wurden u.a. im Zuge von Probemessungen und Versuchen aufgenommen. Da diese die Bedingungen des Versuchsraums am deutlichsten darstellen, wurden die Abbildungen nachträglich in den Anhang aufgenommen. Dargestellte Versuchsaufbauten, wie bspw. Gasemissionen oder Messpunkte, sind an dieser Stelle nicht relevant.



Abbildung B.1.: Überblick Versuchsraum, Blickwinkel: Eingangstür Richtung Außenwand



Abbildung B.2.: Überblick Versuchsraum, Blickwinkel: Ecke Außenwand / rechte Wand Richtung vordere Wand



Abbildung B.3.: Überblick Versuchsraum, Blickwinkel: Ecke vordere Wand / linke Wand Richtung Trennwand Versuchsraum / Lagerräume



Abbildung B.4.: Überblick Versuchsraum, Blickwinkel: Laborabzug Richtung Eingangstür



Abbildung B.5.: Detailsicht: Aufbau zentraler Labortisch



Abbildung B.6.: Detailsicht: Verbliebene Ausstattung und Unterlagen, Arbeitstische

C. Versuchsprotokoll

Hinweis:

Im Anschluss werden Beispiele für zwei Versionen der Versuchsprotokolle dargestellt: Während der Versuche wird das erstehende Protokolle von Hand ausgefüllt. In einem weiteren Arbeitsgang werden die Angaben durch Eingabe in einen PC auf das zweite Protokoll übertragen, um die Daten unmittelbar für die Versuchsauswertung und Aufbereitung der Daten zur Verfügung zu haben.



Abbildung B.7.: Detailansicht: mobiler Arbeitstisch / Druckertisch mit Büroeinrichtung

Versuchsnummer:
Stufe:

Datum:	[hh:mm:ss]
Versuchsbeginn:	[hh:mm:ss]
Versuchsdauer:	[min]
Zeitabstand zum Vorversuch:	[min]
Lüftungsdauer vor dem Versuch:	[min]
Schlauchlänge FID 1:	[m]
Schlauchlänge FID 2:	[m]
Schlauchlänge FID 3:	[m]
Torzeit FID1:	[sec]
Torzeit FID2:	[sec]
Torzeit FID 3:	[sec]
Potenz:	[sec]

Zuluftvolumenstrom 1	[m ³ /h]
(Zuluftvolumenstrom FDS 1	[m ³ /h]
Zuluftvolumenstrom 2	[m ³ /h]
(Zuluftvolumenstrom FDS 2	[m ³ /h]
Abluftvolumenstrom	[m ³ /h]
(Abluftvolumenstrom FDS)	[m ³ /h]
Fläche Zuluft 1	[cm ²]
Fläche Zuluft 2	[cm ²]
Fläche Abluft	[cm ²]
Begrenzung Zu-/Abluft durch	[cm ²]

Bezugspunkt für Abstände:	Ecke v.l.
Position der Emissionsfläche:	
Position FID-Schlauch 1:	
Position FID-Schlauch 2:	
Position FID-Schlauch 3:	
Position Person:	
Messpunkt Raumtemperatur-T1:	
Messpunkt Raumtemperatur-T2:	
Messpunkt Zulufttemperatur:	
Messpunkt Luftdruck:	
Messpunkt Luftfeuchtigkeit:	
Messpunkt Strömungsrichtung:	
Messpunkt Strömungsgeschwindigkeit:	
Messpunkt 1 "0-Konzentration"	
Messpunkt 2 "0-Konzentration"	
Messpunkt 3 "0-Konzentration"	

Stoffname	[g/mol *K]
molare Masse	[g/mol *K]
Wärmespeicherkapazität flüssig	[J/(mol *K)]
Wärmespeicherkapazität gasförmig	[J/(mol *K)]
Verdampfungsenthalpie	[kJ/mol]
Aggregatzustand	[g/mol]
Emissionsorgan	[g/mol]
Emissionsmassenstrom (Kolumeter)	[g/mol]
Emissionsfläche	[m ²]
Startzeit Emission	[hh:mm:ss]
Emissionsdauer	[s]
Massenverlust	[g/s]
Gemittelte Stofffreisetzung über die Zeit	[g/s]

Anmerkung:

Temperatur T1 Versuchsbeginn	[°C]
Temperatur T1 Versuchsende	[°C]
Temperatur T1 Versuchsbeginn	[°C]
Temperatur T1 Versuchsende	[°C]
Zulufttemperatur Versuchsbeginn	[°C]
Zulufttemperatur Versuchsende	[°C]
Zulufttemperatur Versuchsbeginn	[bar]
Luftdruck Versuchsbeginn	[bar]
Luftdruck Versuchsende	[bar]
Luftfeuchtigkeit Versuchsbeginn	[%RH]
Luftfeuchtigkeit Versuchsende	[%RH]
Luftfeuchtigkeit Versuchsbeginn	[m/s]
Strömungsgeschwindigkeit x	[m/s]
Strömungsgeschwindigkeit y	[m/s]
Strömungsgeschwindigkeit z	[m/s]
Strömungsrichtung	[ppm]
0-Konzentration HD 1	[ppm]
0-Konzentration HD 2	[ppm]
0-Konzentration HD 3	[ppm]
0-Konzentration Messpunkt 1	[ppm]
0-Konzentration Messpunkt 2	[ppm]
0-Konzentration Messpunkt 3	[ppm]

Versuchsnummer:

Stufe:

Rahmendaten

Personenaufenthalt (Position)	Potenz (FID-Einstellung)

Messpunkte/Positionen

Position FID 1 (Schlauch)	Position FID 2 (Schlauch)	Position FID 3 (Schlauch)	Position der Emissionsfläche
Messpunkt Strömungsrichtung	Messpunkt Strömungsgeschw.	Messpunkt 0-Konzentration 1	Messpunkt 0-Konzentration 2
Messpunkt 0-Konzentration 3			

Umgebungsbedingungen

Luftdruck Versuchsbeginn	Luftdruck Versuchsende	Strömungsrichtung	Strömungsgeschwindigkeit
		x: y: z:	
0-Konzentration an den FID	0-Konzentration		
FID 1: FID 2: FID 3:	1. 2. 3.		

Lüftungsanlage

Zuluftvolumenstrom 1	Abluftvolumenstrom	Fläche Zuluft	Fläche Abluft
		Zuluft 1: Zuluft 2:	
Zuluftvolumenstrom 2			

Stofffreisetzung

Emissions-Massenstrom	Emissionsdauer	Startzeit der Emission	Massenverlust

Auffälligkeiten/Besonderheiten/Bemerkungen

C Sicherheitskonzepte



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

Sicherheitskonzept zur Durchführung von Messungen mit Propan

M.Sc. Florian Pillar

Fassung 2, Stand: 18.09.2013

1 Problemstellung

Ein Teil der Validierungsuntersuchungen wird durch die Durchführung von Messungen in einem Laborraum (im Weiteren: Versuchsraum) der Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW), Bonner Straße 337, 50968 Köln, gebildet. Der Versuchsraum liegt im Kellergeschoss des Gebäudes und wird durch einen Treppenraum sowie einen Flur erschlossen. Bei den Versuchen soll unter kontrollierten Bedingungen Propan freigesetzt werden, woran sich die Ausbreitung im Versuchsraum und die Abführung durch eine maschinelle Lüftungseinrichtung anschließen. Die Versuche zielen auf die Ermittlung von lokalen, zeitabhängigen Propan-Konzentrationen an definierten Messpunkten ab.

Propan ist ein brennbares Gas, das explosionsfähige Gemische mit Luft ausbilden kann. Darüber hinaus ist Propan in hohen Konzentrationen leicht reizend, sauerstoffverdrängend und kann im Vorfeld zur Schwächung des zentralen Nervensystems sowie zu Schwindel, Benommenheit, Kopfschmerz oder Übelkeit führen. Tab. 1 charakterisiert die Stoffeigenschaften, die für die begrenzten Versuchsdauern gefährdungsrelevant sind:

Eigenschaft	Ausprägung
Molare Masse	44,1 g/mol
Stoffdichte	2,01 kg/m ³ (bei 0°C)
Siedepunkt	-42,0°C
Zündtemperatur	470,0°C
Untere Explosionsgrenze (UEG)	2,12 Vol - % (entspricht 42,6 g/m ³ bei 20°C)
Arbeitsplatzgrenzwert (AGW)	1.800,00 mg/m ³ , ÜF 4 (Kat. II)

Tabelle 1: Gefährdungsrelevante Stoffeigenschaften Propan

Die auftretenden Luftkonzentrationen sollen während der Versuche mit Flammen-Ionisations-Detektoren (FID) ermittelt und protokolliert werden, deren Messprinzip eine thermische Gasbehandlung vorsieht. Die FID bilden somit wirksame Zündquellen für ein explosionsfähiges Propan-Luft-Gemisch. Weiterhin soll sich teilweise während der Versuche eine Person im Versuchsraum aufhalten. Dementsprechend sind Maßnahmen zum Personen- und Sachwertschutz vorzusehen, die im Anschluss festgelegt werden und während der Versuchsdurchführung zu beachten sind.

Hinweis:

Im Zuge erster orientierender Messungen wurde festgestellt, dass unmittelbar an der Emissionsquelle eine explosionsfähige Atmosphäre vorherrscht. Dies erfordert weitere Maßnahmen, die in der vorliegenden Überarbeitung des Sicherheitskonzepts vom 31.07.2013 berücksichtigt sind. Entsprechende Ergänzungen sind zum Erhalt der Übersichtlichkeit in kursivem Schriftsatz dargestellt.

2 Gefährdungsszenarien

Propan neigt aufgrund der höheren Dichte als Umgebungsluft bei Temperaturen um die 20°C zur Ansammlung in Bodennähe bzw. in Senken, sofern keine Aufwirbelung stattfindet. In Anbetracht, dass der Versuchsraum unterhalb des Erdniveaus der Umgebung (Kellergeschoss) liegt und somit eine Senke bildet, kann Propan nur aktiv durch Lüftungstechnische Maßnahmen aus dem Raum transportiert werden. Unter Berücksichtigung der Zündfähigkeit des Gases sowie der vorhandenen Zündquellen werden die nachfolgenden Gefährdungsszenarien identifiziert, die aus menschlichen oder anlagentechnischen Fehlern resultieren können:

1. zu hohe Stofffreisetzungsraten bzw. Gesamtfreisetzung mit (lokaler) Propan-Anreicherung oberhalb der UEG;
2. Defekt des Emissionsbehältnisses oder des Verschlussventils mit folgender unkontrollierter Propanfreisetzung, die zu einer (lokalen) Anreicherung oberhalb der UEG führt;

3. Ausfall der raumlufttechnischen Anlagen während der Versuchsdurchführung, so dass kein Abtransport der Raumluft vorhanden ist und (lokale) Propan-Anreicherungen oberhalb der UEG auftreten;
4. unzureichende Belüftung des Versuchsraums zwischen verschiedenen Versuchen, so dass eine Kumulation der Propan-Konzentrationen oberhalb der UEG über mehrere Versuche hinweg auftreten kann.

Darüber hinaus können Propananreicherungen zu kritischen Konzentrationen für während der Versuche anwesende Personen (hier: Gefährdungsszenario 5) führen.

Ergänzung:

Propan wird als reines Gas emittiert, so dass unmittelbar an der Freisetzungsquelle eine vollständige Propanatmosphäre vorherrscht. Diese Atmosphäre wird in der Folge mit Umgebungsluft verdünnt, wobei der gesamte Explosionsbereich, dessen räumliche Ausdehnung zunächst unklar ist, durchlaufen wird. Bei Kontakt mit einer wirksamen Zündquelle besteht akute Explosionsgefahr (Gefährdungsszenario 6).

3 Beurteilungsgrundlage

Die erforderlichen Schutzmaßnahmen müssen einerseits den Personenschutz i.S. von toxikologischen Gefährdungen durch die Verwendung des Gefahrstoffs Propan, andererseits den Sachwertschutz als gesicherte Vermeidung einer Explosion sicherstellen. Es sind die entsprechenden stoffspezifischen Grenzwerte heranzuziehen.

Wie in Tab. 1 aufgeführt, ist in TRGS 900 "Arbeitsplatzgrenzwerte" für Propan ein AGW rechtsverbindlich auf $1.800,00 \text{ mg/m}^3$ festgelegt worden. Propan ist Kategorie II mit einem Überschreitungsfaktor von 4 zugeordnet, so dass für eine 15-minütige Exposition der vierfache Wert des AGW oder auch höhere Expositionsdauern mit einem Produkt aus Überschreitungsdauer und -faktor von max. 60 min zulässig sind (bei gleichzeitiger Einhaltung der gesamten Exposition über die vollständige Schichtdauer).

Die UEG von Propan wird bei einer Stoffkonzentration von ca. 2,12 Vol-% in standardisierter Umgebungsluft¹ erreicht. Bei der zu erwartenden Raumtemperatur entspricht dies einer Massenkonzentration von $42,6 \text{ g/m}^3$ bzw. $42.600,00 \text{ mg/m}^3$, bei der eine lokale explosionsfähige Atmosphäre besteht.

Aus dem Vergleich der Grenzwerte ergibt sich, dass durch Einhaltung des 4-fachen AGWs (Berücksichtigung des Überschreitungsfaktors) gleichermaßen die UEG eingehalten wird; es wird ein Anteil von 16,9 % der UEG erreicht. Der AGW ist somit die entscheidende Beurteilungsgrundlage, bei dessen Einhaltung die Anforderungen sowohl an den Personen- als auch an den Sachwertschutz erreicht werden. Zu berücksichtigen bleibt die Einschränkung, dass auch durch lokale Maxima keine explosionsfähigen Konzentrationen erreicht werden dürfen.

Ergänzung:

Unmittelbar an der Freisetzungsquelle kann eine explosionsfähige Atmosphäre als lokal maximale Stoffkonzentration nicht vermieden werden. An dieser Stelle sind weitergehende Schutzmaßnahmen erforderlich, die über die allgemeinen Maßnahmen zur Versuchsdurchführung hinausgehen.

4 Maßnahmen zum Personen- und Sachwertschutz

Die zu definierenden Schutzmaßnahmen werden auf die Einhaltung des AGWs (unter Berücksichtigung der Anforderung an kurzzeitige Überschreitungen) sowie auf die Vermeidung lokaler Konzentrationsmaxima (max. 50 % der UEG - entspricht für ca. 20°C einer Massenkonzentration von $21,60 \text{ g/m}^3$ bzw. 21.600 mg/m^3) ausgelegt.

Ergänzung:

Da um die Freisetzungsquelle herum in jedem Fall mit einer explosionsfähigen Atmosphäre zu rechnen ist, muss eine mögliche Zündung ausgeschlossen werden.

¹ Zusammensetzung: ca. 21,00 Vol-% Sauerstoff (O₂, ca. 0,04 Vol-% Kohlenstoffdioxid (CO₂, ca. 0,96 Vol-% Spuren- und Edelgase

4.1 Mögliche Schutzmaßnahmen

Potentielle Schutzmaßnahmen sind an der allgemeinen Gestaltungssystematik der Arbeitssicherheit bzw. des Explosionsschutzes, die sich an dieser Stelle entsprechen, zu orientieren. Nachfolgend werden die Möglichkeiten zum Einsatz primärer, sekundärer und tertiärer additiver Maßnahmen unter Berücksichtigung der Ausrichtung der Arbeitsaufgabe "Durchführung von Messungen zur Validierungsuntersuchung" diskutiert.

- *Primäre additive Schutzmaßnahmen*

Maßnahme	Anwendungsmöglichkeit / Begründung
Substitution des Stoffes bzw. Beseitigung des brennbaren Stoffes	keine Anwendung möglich: Untersuchung auf Propan als mit FID messbare Kohlenwasserstoffverbindung ausgerichtet; mögliche Substituenten ebenfalls brennbar bzw. explosionsfähig
Substitution des (Mess-) Verfahrens bzw. Beseitigung der Zündquelle	keine Anwendung möglich: FID als detailliertes und konzentrationssensibles Messverfahren erforderlich; Vorgabe als vorhandenes Messverfahren mit ausreichender Genauigkeit
Unterbrechung Propan-Freisetzung (Verschluss Behältnis)	Anwendung möglich Begrenzung Propan-Anreicherung durch Unterbinden der weiteren Freisetzung bei kritischen Situationen; Anwendung nicht möglich bei Defekt des Behältnisses oder Kontrollorgans
Entfernen der Freisetzungsquelle	begrenzte Anwendung möglich Untersuchung auf Propan ausgerichtet, Entfernen aus Gebäude bei unkontrollierter Freisetzung (Defekt Behältnis bzw. Kontrollorgan) möglich

- *Sekundäre additive Schutzmaßnahmen*

Maßnahme	Anwendungsmöglichkeit / Begründung
Quellennahe Absaugung	Anwendung nicht möglich Stoffausbreitung nach Freisetzung ist Untersuchungsgegenstand und damit erforderlich
Raumlufttechnische Anlage	begrenzte Anwendung möglich Verwendung der vorhandenen Raumlüftung als Versuchsparameter, keine Aussage zur gesicherten Konzentrationsbegrenzung möglich, keine vollständige Außerbetriebnahme geplant keine Verwendung Fensteröffnungen als Versuchsparameter, somit ergänzende Lüftungsmaßnahme als Reaktion auf konkrete Gefährdungen

- *Tertiäre additive Schutzmaßnahmen*

Maßnahme	Anwendungsmöglichkeit / Begründung
Organisatorische Begrenzung Stofffreisetzung	Anwendung möglich Begrenzung maximaler Stoffkonzentrationen durch Überwachung und Begrenzung gesamter freigesetzter Propan-Masse; Kontrolle der Stofffreisetzung durch anwesende Person während Versuchen

Konzentrationsüberwachung	begrenzte Anwendung möglich Nutzung der Versuchsmessungen über die Raumhöhe zur Ermittlung lokaler Konzentrationsmaxima in Bodennähe bzw. in Richtung Decke, Feststellung Propan-Anreicherung zur Einleitung von Reaktionen; Problem: Messung mit Zündquelle, statische Installation
Bereitstellung Persönlicher Schutzausrüstung (PSA)	keine Anwendung möglich Ziel ist Einhaltung des AGW, keine Verwendung notwendig keine Wirkung zur Sicherstellung des Explosionsschutzes
Unterweisung	Anwendung zwingend erforderlich Unterweisung beteiligter Personen über die festgelegten Schutzmaßnahmen
Expositionszeitbegrenzung	keine Anwendung Ziel ist Einhaltung des AGW, keine Verwendung notwendig keine Wirkung zur Sicherstellung des Explosionsschutzes

4.2 Festlegung und Bemessung von Schutzmaßnahmen

Durch die Festlegung von Schutzmaßnahmen zur Begrenzung auftretender Stoffkonzentrationen auf die Einhaltung des AGWs wird gleichzeitig i.A. der Explosionsschutz sichergestellt. Die Auslegung muss die unter Abschnitt 2 aufgeführten Gefährdungsszenarien berücksichtigen, um verschiedene Zustände zu erfassen.

Unterbrechung der Propan-Freisetzung

Bei Erreichen von zu hohen Propan-Konzentrationen bzw. Feststellung von Anreicherungen kann die weitere Freisetzung unterbrochen und somit der Versuch abgebrochen werden. Dazu wird das vorhandene Kontrollorgan des Behältnisses, aus dem Propan emittiert wird, geschlossen, um so eine weitere Anreicherung zu vermeiden. Die Kombination mit weiteren (Lüftungsmaßnahmen) ist jedoch erforderlich. Bei Ausfall der Lüftungsanlage ist die Unterbrechung der Propan-Freisetzung erforderlich, um die Konzentrationen unmittelbar zu begrenzen.

Die manuelle Regelung der Stofffreisetzung ist nur während der Versuchsdurchführung sinnvoll und anwendbar, sofern das genutzte Kontrollorgan funktionstüchtig ist und der Propanbehälter keinen Defekt aufweist (Gefährdungsszenarien 1 und 3).

Entfernen der Freisetzungquelle

Die unkontrollierte Propan-Freisetzung kann nicht nur durch Absperrn des Kontrollorgans, sondern auch durch Entfernen des gesamten Behälters aus dem Versuchsraum unterbunden werden. Auf diese Weise erfolgt ebenfalls keine weitere Propan-Anreicherung.

Das Entfernen des Behälters ist aufwendiger als ein einfaches Verschließen des Kontrollorgans. Die Umsetzung sollte daher nur erfolgen, wenn das Kontrollorgan bzw. unmittelbar der Behälter einen Defekt aufweist und ein Absperrn nicht mehr möglich ist. Um den Versuch abzubrechen, wird der Behälter in diesem Fall (vgl. Gefährdungsszenario 2) aus dem Versuchsraum durch den vorgelagerten Flur des Kellergeschosses, den Treppenraum und von dort unmittelbar ins Freie verbracht. Der Weg ist möglichst rasch (ohne Laufen) zu bewältigen. Die Kombination mit (Lüftungs-) Maßnahmen im Versuchsraum ist erforderlich.

Da zum Entfernen des Behälters ins Freie weitere Räume durchquert werden müssen, sind diese im Anschluss ebenfalls zu lüften. Aufgrund der geringen Gesamtmasse ist in diesen Räumen ebenfalls nicht mit einer kritischen Propan-Konzentration zu rechnen, dennoch werden im Anschluss mit Hilfe der vorhandenen Messtechnik orientierende Überwachungsmessungen durchgeführt.

Bemessung der raumluftechnischen Anlage

Die raumluftechnische Anlage kann prinzipiell dazu genutzt werden, die Höhe von Stoffkonzentrationen zu kontrollieren bzw. über einen ausreichend hohen Luftaustausch die Vermeidung von kritischen Situationen sicherzustellen. Allerdings soll die vorhandene Lüftungsanlage im Rahmen der vorgesehenen Versuche als Variable verwendet und z.T. in Ihrer Funktion eingeschränkt werden. Dennoch wird bei Ausfall der Lüftungsanlage (Gefährdungsszenario 3) der Versuch unmittelbar abgebrochen. Zur Beherrschung der Gefährdungsszenarien 1, 2, 4 und 5, die sich auf die unmittelbare Versuchsdurchführung beziehen, kann die Anlage nicht verwendet werden.

Zwischen den einzelnen Versuchen kann die Lüftungsanlage mit maximaler Leistung betrieben werden, um das zuvor emittierte Propan möglichst vollständig aus dem Versuchsraum zu entfernen. Eine Absenkung der Konzentration sollte daher mittels der lüftungstechnischen Anlage erfolgen, ggf. kann diese durch die Aufwirbelung bodennaher Luftschichten (ggf. mit einem Ventilator) unterstützt werden. Die Kombination mit Messungen zur Sicherstellung der Auflösung bestehender Propan-Konzentrationen ist erforderlich.

Die vorhandenen Fenster des Versuchsraums werden bei der Durchführung nicht als Lüftungsmaßnahme angesetzt. Bei Feststellung von Propan-Anreicherungen während der Versuchsdurchführung können die Fenster als zusätzliche Lüftung geöffnet werden, eine Effektivität ist jedoch aufgrund der Stoffdichte sowie der durch die wechselnden Umgebungsbedingungen variierende Thermik nicht quantifizierbar. Die Fensteröffnung bildet daher nur eine Behelfsmaßnahme. Bei Ausfall der Lüftungsanlage während der Versuchsdurchführung stehen die Fenster als ausschließliche Lüftungsmaßnahmen zur Verfügung. Zwischen einzelnen Versuchen können die Fenster ebenfalls zur Unterstützung der Lüftungsanlage geöffnet werden, um die Belüftungssituation zu verbessern.

Organisatorische Begrenzung der Stofffreisetzung

Die Gefährdungsszenarien 1,2,3 und 5 gehen von Gefährdungen durch unzulässig hohe Konzentrationen aus, die aus einer zu hohen (ggf. zeitbezogenen) Stofffreisetzung bei gleichzeitiger zu geringer Stoffabfuhr über das Lüftungssystem während der Versuchsdurchführung ausgehen. Kritische Situationen treten auf, wenn eine zu hohe Propan-Gesamtmasse innerhalb des Versuchsraums oder als lokale Anreicherung (z.B. in Bodennähe) vorliegt.

Die kritischen Situationen werden präventiv vermieden, wenn die gesamte freigesetzte Masse so begrenzt wird, dass

1. einerseits während der normalen Versuchsdurchführung keine unzulässige Anreicherung stattfinden kann und
2. andererseits eine unkontrollierte Ausströmung ohne Auswirkungen bleibt.

Zur Vermeidung kritischer Konzentrationen soll das Gesamtvolumen bzw. die gesamte freigesetzte Masse an Propan je Versuch so festgelegt werden, dass selbst bei vollständiger Freisetzung keine Gefährdungen entstehen bzw. diese durch einfache Maßnahmen vor Eintritt von Auswirkungen beherrscht werden können. Entsprechend der dargelegten Bewertungsmaßstäbe unter Berücksichtigung eines Sicherheitsbeiwertes von 2 soll die Stoffmasse so begrenzt werden, dass nach einer vollständigen Ausströmung maximal der doppelte AGW (Überschreitungsfaktor 2) erreicht wird. Dies entspricht einer Massenkonzentration von $3.600,00 \text{ mg/m}^3$.

Unter Vereinfachung einer gleichmäßigen Verteilung auf den gesamten Versuchsraum (Raumvolumen unter Berücksichtigung von Einbauten: ca. $66,57 \text{ m}^3$) beläuft sich die maximale Propanmasse auf

$$m = V_{\text{Raum}} \cdot c_{\text{max}} = 66,57 \text{ m}^3 \cdot 3.600,00 \text{ mg/m}^3 = 239.652,00 \text{ mg} = 239,652 \text{ g} \quad (1)$$

Je Versuchsdurchlauf wird daher eine Propan-Behälter verwendet, dessen Nenn-Füllmasse unterhalb von $240,00 \text{ g}$ liegt. Es eignen sich handelsübliche Propan-Gaskartuschen mit Kontrollorgan. Während des Versuchs wird das Gas kontrolliert, gedrosselt und über einen längeren Zeitraum hinweg freigesetzt. Aufgrund der verzögerten Freisetzung ist nicht mit lokalen Anreicherungen im Bereich der UEG zu rechnen.

Konzentrationsüberwachung

Die Versuche dienen der Konzentrationsermittlung im Atembereich der anwesenden Person sowie in Boden- und in Deckennähe (Erfassung eines höhenabhängigen Konzentrationsprofils). Die installierte Messtechnik kann zur Überwachung von Anreicherungen, insbesondere in Bodennähe, genutzt werden. Sofern die Messgeräte unmittelbar im Versuchsraum aufgebaut werden, kann die Kontrolle während der Versuchsdurchläufe durch die anwesende Person erfolgen. Bei Aufstellung außerhalb des Raums können die weiteren Beteiligten eine mögliche Anreicherung feststellen.

Die Stofffreisetzung soll über einen längeren Zeitraum erfolgen, so dass das Anwachsen von Konzentrationen kontinuierlich beobachtet werden kann. Bei einer Überschreitung der angeführten Grenze von $3.600,00 \text{ mg/m}^3$ sollen die Maßnahmen zur Konzentrationsbegrenzung (Stopp der Freisetzung, zusätzliche Lüftung) ergriffen und der Versuchsdurchlauf abgebrochen werden.

Neben der unmittelbaren Versuchskontrolle kann die Konzentrationsüberwachung auch zur Vermeidung von sich kumulierenden Propan-Anreicherungen über mehrere Versuchsdurchläufe hinweg eingesetzt werden. Ggf. kritische Bereiche werden aufgrund des Dichteverhältnisses von Propan zu Umgebungsluft vor allem in Bodennähe vorzufinden sein.

Während der Lüftungsmaßnahmen soll die Messtechnik mobil, an mehreren Stellen hintereinander eingesetzt werden, um die Absenkung der Propan-Konzentration innerhalb des Raumes zu kontrollieren. Ziel ist die Feststellung von ausgeglichenen Bedingungen, so dass mit dem nächsten Versuchsdurchlauf begonnen werden kann. Dabei werden im gleichen Zuge mögliche Ansammlungen festgestellt und die Lüftungsmaßnahmen solange fortgeführt, bis eine Absenkung auf ein ubiquitäres Niveau erfolgt ist. Zur Kontrolle des gesamten Raumes werden daher folgende Bereiche², jeweils in den Höhen von ca. 0,20 m, 0,60 m, 1,00 m, 1,40 m, 1,80 m und 2,20 m, für Messungen vorgesehen:

- ca. 1,00 m links und 1,00 m vor zentralem Labortisch;
- mittig und ca. 1,00 m vor zentralem Labortisch;
- ca. 1,00 m rechts und 1,00 m vor zentralem Labortisch;
- ca. 1,00 m links und mittig neben zentralem Labortisch;
- ca. 1,00 m rechts und mittig neben zentralem Labortisch;
- ca. 1,00 m links und 1,00 m hinter zentralem Labortisch;
- mittig und ca. 1,00 m hinter zentralem Labortisch;
- ca. 1,00 m rechts und 1,00 m hinter zentralem Labortisch.

Zusätzlich erfolgen Kontrollmessungen auf dem vorderen, dem seitlichen und dem zentralen Labortischen in Höhen von ca. 0,20 m und 0,60 m oberhalb der Tischoberkante. Erst wenn an allen Messpunkten eine ausreichende Konzentrationsabsenkung festgestellt wird, darf der nächste Versuchsdurchlauf begonnen werden. Auch bei abgebrochenen Versuchen wird die Konzentrationsentwicklung an den genannten Messpunkten durchgeführt.

Muss aufgrund eines defekten Kontrollorgans oder Behälters ein Abbruch eines Versuchs und das Entfernen des Behälters ins Freie erfolgen, so sind Propan-Konzentrationen außerhalb des Versuchsraums im Flur des Kellergeschosses sowie innerhalb des Treppenraums möglich. Im Anschluss werden in diesen Bereichen - sofern möglich - mit der vorhandenen Messtechnik orientierende Messungen vorgenommen. Genaue Messpunkte werden dazu nicht festgelegt.

Unterweisung

Voraussetzung für die Beachtung der dargestellten Maßnahmen ist deren Kenntnis durch die Versuchsteilnehmer, um Gefährdungen zu vermeiden bzw. in kritischen Situationen angemessen zu reagieren. Anwesende Personen sind daher in die Messtechnik einzuweisen (Erkennen kritischer Messwerte) sowie über die generellen Sicherheitsmaßnahmen zu unterweisen.

² Beschreibung vom Standort der in den Raum führenden Tür aus gesehen

Ergänzung: Sicherstellung Explosionsschutz an Freisetzungsquelle

Über die allgemeinen Schutzmaßnahmen hinaus wird der Explosionsgefahr unmittelbar an der Emissionsquelle folgendermaßen begegnet:

- Es werden nur geringe Mengen eingesetzt, die durch die vorhandene Messtechnik überwacht werden. Die explosionsfähige Atmosphäre bleibt somit auf einen kleinen Bereich beschränkt. Die Freisetzung erfolgt nicht in ein kleines, direkt umschlossenes Volumen, so dass durch die Einleitung kein Aufbau eines Überdrucks stattfindet. Dennoch kann es zu einer Verpuffung des freigesetzten Propan kommen.
- Ort und Massenstrom werden im Vorfeld der Versuche festgelegt. Mithilfe von Prüfrauch wird die Hauptausbreitungsrichtung ermittelt sowie einmalig der jeweilige explosionsgefährdete Bereich messtechnisch abgeschätzt. Alle wirksamen Zündquellen werden abgeschaltet, vom elektrischen Verbrauchsnetz getrennt und aus diesem Bereich sowie möglichst weiträumig entfernt.
- Eine wirksame Zündquelle wird durch die eingesetzten FID (thermisches Messverfahren) gebildet. Die Messgeräte werden daher außerhalb des Versuchsraums, hinter einer verschlossenen Tür (im Vorraum) aufgestellt und mit entsprechenden Verlängerungsschläuchen zur Konzentrationsmessung betrieben.
- Vor den Versuchen erfolgt eine Geschwindigkeitsmessung der Raumluftführung in Bodennähe sowie innerhalb des kritischen Bereichs, um die Wirksamkeit der Lüftungsanlage festzustellen. Erfolgt keine Belüftung in diesen Bereichen, wird der Versuch nicht begonnen bzw. abgebrochen.
- Die Personen, die zur Vorbereitung und Durchführung der Versuche den Versuchsraum betreten, werden mit antistatischem Schuhwerk als PSA ausgestattet, um eine Funkenbildung durch elektrostatische Entladungen zu vermeiden;
- In unmittelbarer Nähe der Freisetzungsquelle wird ebenfalls der AGW samt Kurzzeitwert überschritten. Während der Versuche wird eine Konzentrationsmessung mittels FID im unmittelbaren Atembereich einer ggf. anwesenden Person vorgenommen. Bei Überschreitung des Grenzwertes wird der Versuch unmittelbar unterbrochen, die Annäherung an die Emissionsquelle mit einem geringeren Abstand als zum Messpunkt im Atembereich darf nicht erfolgen (Hinweis in Unterweisung).

5 Zusammenfassung

Aus den genannten Schutzmaßnahmen können folgende Handlungsanweisungen zur Versuchsdurchführung zusammengefasst werden:

1. maximale Füllmasse der Gaskartusche je Versuch: 240 g;
2. Konzentrationsüberwachung während der Versuchsdurchführung mit vorgesehener Messtechnik, Abbruch des Versuchs und Einleitung von Maßnahmen ab einer lokalen Konzentration von $3.600,00 \text{ mg/m}^3$;
3. Versuchsabbruch bei Ausfall der Lüftungsanlage;
4. bei Versuchsabbruch Unterbrechung der Propan-Freisetzung durch Absperren des Kontrollorgans, bei Defekt an Kontrollorgan oder Behälter Entfernung des Behälters aus Versuchsraum ins Freie;
5. bei Versuchsabbruch Betrieb der Lüftungsanlage mit maximaler Leistung (sofern betriebsfähig) und Öffnung der Fenster des Versuchsraums;
6. bei Versuchsabbruch durch Entfernen des Behälters ins Freie Belüftung der durchquerten Räume (Flur Kellergeschoss und Treppenraum);
7. bei Versuchsabbruch durch Entfernen des Behälters ins Freie Kontrollmessungen innerhalb Flur des Kellergeschosses und des Treppenraums;
8. zwischen Versuchsdurchläufen Betrieb der Lüftungsanlage mit maximaler Leistung und Unterstützung durch Öffnen der Fenster;

-
9. zwischen Versuchsdurchläufen bzw. nach Versuchsabbruch Kontrollmessungen (siehe aufgeführte Messpunkte) zur Feststellung von Konzentrationsbedingungen für neuen Versuchsdurchlauf;
 10. Unterweisung der an den Versuchen beteiligten Personen;
 11. *Ermittlung Hauptausbreitungsrichtung und Abschätzung explosionsgefährdeter Bereich bei festgelegtem Emissions-Ort und -Massenstrom;*
 12. *Abschaltung, Trennung vom elektrischen Verbrauchsnetz sowie möglichst weiträumige Entfernung möglicher wirksamer Zündquellen;*
 13. *Betrieb FID außerhalb Versuchsraum und Nutzung von Schlauchverlängerungen;*
 14. *Kontrolle der Wirksamkeit der Raumlüftung je Versuch mithilfe von Geschwindigkeitsmessungen vor Beginn, Versuchsabbruch bei keiner Feststellung von Geschwindigkeiten;*
 15. *Verwendung antistatisches Schuhwerk;*
 16. *Versuchsabbruch bei Überschreitung des Grenzwertes an Messpunkt im Atembereich einer Person;*
 17. *keine Annäherung anwesender Personen mit geringerem Abstand als Messpunkt Atembereich zur Emissionsquelle.*



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

Sicherheitskonzept zur Durchführung von Messungen mit Isopropanol

M.Sc. Florian Pillar

1. Fassung, Stand: 20.11.2013

1 Problemstellung

Ein Teil der Validierungsuntersuchungen wird durch die Durchführung von Messungen in einem Laborraum (im Weiteren: Versuchsraum) der Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW), Bonner Straße 337, 50968 Köln, gebildet. Der Versuchsraum liegt im Kellergeschoss des Gebäudes und wird durch einen Treppenraum sowie einen Flur (Vorraum) erschlossen. Bei den hier beschriebenen Versuchen soll unter kontrollierten Bedingungen Isopropanol unter den gegebenen Umgebungsbedingungen verdunstet werden, woran sich die Ausbreitung im Versuchsraum und die Abführung durch eine maschinelle Lüftungseinrichtung anschließen. Die Versuche zielen auf die Ermittlung der zeitabhängigen Stofffreisetzung und von lokalen, zeitabhängigen Isopropanol-Konzentrationen an definierten Messpunkten in der Raumluft ab.

Isopropanol zählt zur Stoffgruppe der Alkohole und liegt unter normalen Umgebungsbedingungen als Flüssigkeit vor. Diese ist leicht entzündlich, verdunstet und die Dämpfe können mit Luft explosionsfähige Gemische ausbilden. Darüber hinaus wirkt Isopropanol reizend auf Augen und Haut sowie in entsprechenden Konzentrationen in der Luft "betäubend". Tab. 1 charakterisiert die Stoffeigenschaften, die für die begrenzten Versuchsdauern gefährdungsrelevant sind:

Eigenschaft	Ausprägung
Molare Masse	60 g/mol
Stoffdichte (fl.)	786,0 kg/m ³ (bei 20 °C)
Relative Dampfdichte	2,01
Siedepunkt	82,0 °C
Untere Explosionsgrenze (UEG)	2,2 Vol - % (entspricht 54 g/m ³ bei 20 °C)
Arbeitsplatzgrenzwert (AGW)	500,00 mg/m ³ , ÜF 2 (Kat. II)

Tabelle 1: Gefährdungsrelevante Stoffeigenschaften Isopropanol

Die auftretenden Luftkonzentrationen sollen während der Versuche mit Flammen-Ionisations-Detektoren (FID) ermittelt und protokolliert werden, deren Messprinzip eine thermische Gasbehandlung vorsieht. Die FID bilden somit wirksame Zündquellen für ein explosionsfähiges Isopropanol-Dampf-Luft-Gemisch. Weiterhin soll sich teilweise während der Versuche eine Person im Versuchsraum aufhalten. Dementsprechend sind Maßnahmen zum Personen- und Sachwertschutz vorzusehen, die im Anschluss festgelegt werden und während der Versuchsdurchführung zu beachten sind.

2 Gefährdungsszenarien

Die Untersuchungen sind auf die Emission von Isopropanol durch Verdunstung sowie die anschließende Ausbreitung als Dampf ausgerichtet. Die Flüssigkeit wird in offenen Gefäßen vorgehalten bzw. während der Versuche aus diesen eingebracht.

Isopropanol neigt in Dampfform aufgrund der höheren Dichte als Umgebungsluft bei Temperaturen um die 20 °C zur Ansammlung in Bodennähe bzw. in Senken, sofern keine Aufwirbelung stattfindet. In Anbetracht, dass der Versuchsraum unterhalb des Erdniveaus der Umgebung (Kellergeschoss) liegt und somit allein durch die horizontale Lage eine Senke gebildet wird, kann Isopropanoldampf nur aktiv durch Lüftungstechnische Maßnahmen aus dem Raum abtransportiert werden. Unter Berücksichtigung der Zündfähigkeit sowohl der Flüssigkeit als auch des Dampf-Luft-Gemisches sowie der vorhandenen Zündquellen werden die nachfolgenden Gefährdungsszenarien identifiziert, die aus menschlichen oder anlagentechnischen Fehlern resultieren können. Darüber hinaus beruhen (inhalative) Gefährdungen auf den toxikologischen Stoffeigenschaften:

1. Entzündung der Flüssigkeit;
2. Entzündung eines Dampf-Luft-Gemisches in unmittelbarer Nähe der Flüssigkeitsoberfläche¹;

¹ Unmittelbar über der Flüssigkeit muss davon ausgegangen werden, dass Isopropanol-Dämpfe als reine Atmosphäre vorliegen

3. zu hohe Stofffreisetzungsraten bzw. Gesamtfreisetzung mit (lokaler) Isopropanoldampf-Anreicherung oberhalb der UEG;
4. Defekt des Emissionsbehältnisses mit folgendem Isopropanol-Ausstrom, der zu einer Verteilung im Raum (Entzündung der Flüssigkeit) sowie Vergrößerung der Emissionsfläche (Erhöhung der Freisetzung an Raumluft) führt;
5. Ausfall der raumlufttechnischen Anlagen während der Versuchsdurchführung, so dass kein Abtransport der Raumluft vorhanden ist und (lokale) Isopropanoldampf-Anreicherungen oberhalb der UEG auftreten;
6. unzureichende Belüftung des Versuchsraums zwischen verschiedenen Versuchen, so dass eine Kumulation der Isopropanoldampf-Konzentrationen oberhalb der UEG über mehrere Versuche hinweg auftreten kann;
7. Isopropanoldampf-Konzentrationen (lokal) in für anwesende Personen kritischer Höhe,
8. Kontamination von Haut oder Augen anwesender Personen mit flüssigem Isopropanol, z.B. durch Spritzer oder Austritt aus Emissionsbehältnis.

3 Beurteilungsgrundlage

Die erforderlichen Schutzmaßnahmen müssen einerseits den Personenschutz i.S. von toxikologischen Gefährdungen durch die Verwendung des Gefahrstoffs Isopropanol, andererseits den Personen- und Sachwertschutz als gesicherte Vermeidung einer Entzündung der Flüssigkeit sowie einer Explosion des entstehenden Dampf-Luft-Gemisches sicherstellen. Es sind die entsprechenden stoffspezifischen Grenzwerte heranzuziehen.

Wie in Tab. 1 aufgeführt, ist in TRGS 900 "Arbeitsplatzgrenzwerte" für Isopropanol ein AGW rechtsverbindlich auf $500,00 \text{ mg/m}^3$ festgelegt worden. Isopropanol ist Kategorie II mit einem Überschreitungsfaktor von 2 zugeordnet, so dass für eine 15-minütige Exposition der zweifache Wert des AGW oder auch höhere Expositionsauern mit einem Produkt aus Überschreitungsdauer und -faktor von max. 30 min zulässig sind (bei gleichzeitiger Einhaltung der gesamten Exposition über die vollständige Schichtdauer). Die UEG von Isopropanol wird bei einer Dampfkonzentration von ca. 2,2 Vol-% in standardisierter Umgebungsluft² erreicht. Bei der zu erwartenden Raumtemperatur entspricht dies einer Massenkonzentration von ca. $54,00 \text{ g/m}^3$ bzw. $54.000,00 \text{ mg/m}^3$, bei der eine lokale explosionsfähige Atmosphäre besteht.

Aus dem Vergleich der Grenzwerte ergibt sich, dass durch Einhaltung des AGWs (hier ohne Berücksichtigung des Überschreitungsfaktors) gleichermaßen die UEG eingehalten wird. Der AGW ist somit die entscheidende Beurteilungsgrundlage, bei dessen Einhaltung die Anforderungen sowohl an den Personenschutz als auch an den Sachwertschutz erreicht werden. Zu berücksichtigen bleibt die Einschränkung, dass auch durch lokale Maxima keine explosionsfähigen Konzentrationen erreicht werden dürfen.

Für die Entzündung der Flüssigkeit bestehen keine Grenzwerte. Daher sind wirksame Zündquellen, die an der Emissionsquelle bzw. bei Austritt mit der Flüssigkeit in Berührung kommen können, auszuschließen. Ebenso besteht kein Grenzwert zur dermalen Gefährdung von Personen durch den Kontakt von flüssigem Isopropanol mit Haut oder Augen.

4 Maßnahmen zum Personen- und Sachwertschutz

Die zu definierenden Schutzmaßnahmen werden auf die Einhaltung des AGWs (keine Heranziehung der Überschreitungsfaktoren) sowie auf die Vermeidung lokaler Konzentrationsmaxima (max. 50 % der UEG

¹ und erst im weiteren Verlauf in der Luft verdünnt werden. Dadurch wird der vollständige Explosionsbereich durchlaufen, die räumliche Ausdehnung der zündfähigen Atmosphäre ist dabei unklar.

² Zusammensetzung: ca. 21,00 Vol-% Sauerstoff (O_2), ca. 0,04 Vol-% Kohlenstoffdioxid (CO_2), ca. 0,96 Vol-% Spuren- und Edelgase

- entspricht für ca. 20°C einer Massenkonzentration von $27,00 \text{ g/m}^3$ bzw. 27.000 mg/m^3 ausgelegt. Außerdem ist die Entzündung der Flüssigkeit an der Emissionsstelle sowie bei einem Austritt (bspw. auf dem Fußboden) auszuschließen. Auch dermale Gefährdungen bei der Handhabung der Flüssigkeit müssen berücksichtigt werden.

4.1 Mögliche Schutzmaßnahmen

Potentielle Schutzmaßnahmen sind an der allgemeinen Gestaltungssystematik der Arbeitssicherheit bzw. des Explosionsschutzes, die sich an dieser Stelle entsprechen, zu orientieren. Nachfolgend werden die Möglichkeiten zum Einsatz primärer, sekundärer und tertiärer additiver Maßnahmen unter Berücksichtigung der Ausrichtung der Arbeitsaufgabe "Durchführung von Messungen zur Validierungsuntersuchung" diskutiert.

- Primäre additive Schutzmaßnahmen

Maßnahme	Anwendungsmöglichkeit / Begründung
Substitution des Stoffes bzw. Beseitigung des brennbaren Stoffes	keine Anwendung möglich: Untersuchung auf Isopropanol als mit FID messbare Kohlenwasserstoffverbindung ausgerichtet; mögliche Substituenten ebenfalls brennbar bzw. explosionsfähig
Substitution des (Mess-) Verfahrens bzw. Beseitigung der Zündquelle	keine Anwendung möglich: FID als detailliertes und konzentrationssensibles Messverfahren erforderlich; Vorgabe als vorhandenes Messverfahren mit entsprechender Genauigkeit
Unterbrechung Isopropanol-Freisetzung (Verschluss Behältnis)	Anwendung (Deckel o.ä.) Begrenzung Isopropanol-Verdunstung und -Anreicherung durch Unterbinden der weiteren Freisetzung bei kritischen Situationen; Anwendung nicht möglich bei Defekt des Behältnisses
Entfernen der Freisetzungquelle	begrenzte Anwendung möglich Untersuchung auf Isopropanol ausgerichtet, Entfernen aus Versuchsraum bei unkontrollierter Freisetzung (Defekt Behältnis) möglich, wenn Verschütten bzw. weiterer Austritt ausgeschlossen ist (ggf. Ersatz Behältnis erforderlich)
Ausschluss wirksamer Zündquellen	Anwendung möglich Ausschluss von Zündquellen im Nahbereich der Verdunstungsstelle (Dampf-Luft-Gemisch) sowie in Bereichen, in die Flüssigkeit bei Defekt gelangen kann

- Sekundäre additive Schutzmaßnahmen

Maßnahme	Anwendungsmöglichkeit / Begründung
Quellennahe Absaugung	Anwendung nicht möglich Stoffausbreitung nach Verdunstung ist Untersuchungsgegenstand und damit erforderlich

Raumlufttechnische Anlage	begrenzte Anwendung möglich Verwendung der vorhandenen Raumlüftung als Versuchssparameter, keine Aussage zur gesicherten Konzentrationsbegrenzung möglich; sofern Versuchsdurchführung ohne Einsatz der Raumlüftung, zusätzliche Verwendung zur Konzentrationsbegrenzung als Reaktion auf konkrete Gefährdungen möglich keine Verwendung Fensteröffnungen als Versuchsparameter, somit ergänzende Lüftungsmaßnahme als Reaktion auf konkrete Gefährdungen
Verdunstungsbegrenzung bei Flüssigkeitsfreisetzung durch Aufnahme	Anwendung möglich unmittelbare Aufnahme ausgetretener Flüssigkeit zur Vermeidung der weiteren Ausbreitung sowie der zusätzlichen Verdunstung (Oberflächenvergrößerung)
Unterbrechung des Flüssigkeitsaustritts bei Defekt an Behältnis	Anwendung möglich unmittelbares Umfüllen verbliebenes Flüssigkeitsvolumen bei Defekt an Behältnis in ausreichend großes Ersatzgefäß (Bereitstellung erforderlich)

• *Tertiäre additive Schutzmaßnahmen*

Maßnahme	Anwendungsmöglichkeit / Begründung
Organisatorische Begrenzung Stofffreisetzung	Anwendung möglich Begrenzung maximaler Stoffkonzentrationen durch Überwachung und Begrenzung der vorgehaltenen und somit gesamten freigesetzten Isopropanol-Masse; Kontrolle der Stofffreisetzung durch anwesende Person während Versuchen
Organisatorische Bereitstellung von Aufnahmemitteln und ggf. Ersatzbehältnis	Anwendung zum Ergreifen der Maßnahmen bei Flüssigkeitsaustritt erforderlich
Organisatorische Festlegung zur Behandlung von Flüssigkeitsresten und -abfällen	Anwendung möglich Festlegung zur Verhinderung der unkontrollierten Verdunstung nach Versuchsende
Konzentrationsüberwachung	begrenzte Anwendung möglich Nutzung der Versuchsmessungen über die Raumhöhe zur Ermittlung lokaler Konzentrationsmaxima in Bodennähe bzw. in Richtung Decke, Feststellung Isopropanol-Anreicherung zur Einleitung von Reaktionen; Problem: Messprinzip erfordert Zündquelle, statische Installation
Bereitstellung Persönlicher Schutzausrüstung (PSA) - Atemschutz wg. inhalativer Gefährdungen	keine Anwendung erforderlich Ziel ist Einhaltung des AGW keine Wirkung zur Sicherstellung des Explosionsschutzes
Bereitstellung Persönlicher Schutzausrüstung (PSA) - antistatisches Schuhwerk zur Vermeidung von Zündfunken	Anwendung möglich Vermeidung von Zündfunken bei Fortbewegung in Bodennähe durch Antistatik
Bereitstellung Persönlicher Schutzausrüstung (PSA) - Schutzbrille und -kleidung wg. dermalen Gefährdungen	Anwendung möglich Begrenzung dermalen Gefährdungen beim Umgang mit Isopropanol (z.B. bei Umfüllen) bzw. Aufnahme ausgetretener Mengen
Unterweisung	Anwendung zwingend erforderlich Unterweisung beteiligter Personen über die festgelegten Schutzmaßnahmen

Expositionszeitbegrenzung	keine Anwendung Ziel aller Maßnahmen ist Einhaltung des AGW, keine Verwendung notwendig keine Wirkung zur Sicherstellung des Explosionsschutzes
---------------------------	---

4.2 Festlegung und Bemessung von Schutzmaßnahmen

Durch die Festlegung von Schutzmaßnahmen zur Begrenzung auftretender Stoffkonzentrationen auf die Einhaltung des AGWs wird gleichzeitig i.A. der Explosionsschutz für lokale Dampf-Luft-Gemische sichergestellt. Die Auslegung muss die unter Abschnitt 2 aufgeführten Gefährdungsszenarien berücksichtigen, um verschiedene Zustände zu erfassen. Die Maßnahmen finden während der gesamten Versuchsdurchführung und ggf. zwischen den verschiedenen Versuchen Anwendung. Weitere Maßnahmen sind beim Umgang mit der Flüssigkeit zur Vermeidung dermalen Gefährdungen erforderlich. Ergänzend ist die Planung und Bereitstellung von Maßnahmen erforderlich, die erst bei Austritt der Flüssigkeit aus dem Emissionsbehältnis angewendet werden.

Unterbrechung der Isopropanol-Verdunstung aus Behältnis

Bei Erreichen von zu hohen Isopropanoldampf-Konzentrationen bzw. Feststellung von Anreicherungen muss die weitere Verdunstung unterbrochen und somit der Versuch abgebrochen werden. Da es sich bei einer Verdunstung nicht um einen aktiven Freisetzungsvorgang handelt, der bspw. über ein Absperrorgan unterbrochen werden könnte, muss der Massenübergang aus der flüssigen Phase an die Umgebungsluft unterbrochen werden.

Die Verdunstung kann effektiv durch Abdecken bzw. Verschluss des Behältnisses erfolgen. Die Verdunstung soll aus offenen Schalen o.ä. erfolgen, die keinen unmittelbaren Verschluss ermöglichen. Es werden daher Deckel bzw. Platten mit geeigneter Fläche und Geometrie vorgehalten, die bei Bedarf auf die Schalen gelegt werden. Der einhergehende Versuchsabbruch wird erforderlich, wenn

- unzulässig hohe Dampfkonzentrationen festgestellt werden,
- Flüssigkeit aus dem Behältnis austritt,
- die raumlufttechnische Anlage (bei geplantem Einsatz) ausfällt oder
- der Versuch wegen anderer Gründe abgebrochen werden soll.

Bei einem Defekt des Behältnisses stellt das Abdecken der Flüssigkeitsoberfläche lediglich eine Erstmaßnahme dar, die z.B. zum Umfüllen von Flüssigkeitsresten wieder aufgehoben werden muss.

Entfernen der Freisetzungquelle

Die Verdunstung der Flüssigkeit kann nicht nur durch die Unterbrechung des Luftkontakts (Abdecken des Behältnisses), sondern auch durch vollständige Entfernung der Flüssigkeit aus dem Versuchsraum erfolgen. Dies kann jedoch nur dann erforderlich werden, wenn eine gezielte Unterbindung der Verdunstung durch Abdecken nicht erfolgen kann. Eine Konsequenz ist der gleichzeitige Versuchsabbruch.

Generell kann die Freisetzung durch Entfernen des gesamten Behältnisses aus dem Versuchsraum, durch Umfüllen des Isopropanols in ein Ersatzbehältnis oder durch dessen unmittelbare Entsorgung erfolgen. Unter Berücksichtigung der geplanten Versuchsanordnung (hier: flache Behältnisse), der erforderlichen Wege innerhalb des Gebäudes sowie der möglichst einfachen Handhabung, sind die Alternativen wie folgt zur Umsetzung geeignet:

Wenn ein Abdecken des Behälters nicht (mehr) möglich ist, muss davon ausgegangen werden, dass dieser defekt ist und darüber hinaus Flüssigkeit austreten kann. Zur Versuchsdurchführung sind weiterhin flache Behälter mit geringen Wandhöhen vorgesehen. Beim Tragen über längere Strecken ist ein Verschütten wahrscheinlich. Da der Weg ins Freie aus dem Versuchsraum im Kellergeschoss des Gebäudes durch einen

Vorraum sowie den Treppenraum führen würde, ist ein Herausragen nicht praktikabel. Dadurch würde eine weitere Verteilung der Flüssigkeit außerhalb des Versuchsraums möglich.

Für das Umfüllen der Flüssigkeit in ein Ersatzgefäß, das unmittelbar bereitstehen müsste, ist aufgrund der flachen Bauweise des Freisetzungsbehälters ebenfalls ein Verschütten wahrscheinlich. Die erforderliche Zeit zur Sorgfalt - bspw. unter Benutzung eines Trichters - steht ggf. bei einem defekten Behälter nicht zur Verfügung.

Isopropanol ist als Alkohol wasserlöslich und in der verwendeten Menge für die Umwelt nicht gefährlich. Innerhalb des Versuchsraums ist in kurzer Entfernung zum geplanten Emissionspunkt ein Labor-Waschbecken samt Anschluss mit fließendem Wasser vorhanden. Eine direkte Entsorgung ist möglich.

Wenn erforderlich, wird die verbliebene Flüssigkeitsmenge unmittelbar in den Ablauf entsorgt und dieser mit viel Wasser nachgespült. Auf die Vorhaltung eines Ersatzbehälters wird verzichtet.

Ausschluss wirksamer Zündquellen

Einerseits muss die Entzündung von explosionsfähigen Dampf-Luft-Gemischen verhindert werden, die mutmaßlich in unmittelbarer Nähe der Freisetzungsquelle vorgefunden werden können. Andererseits darf die Flüssigkeit weder innerhalb des Freisetzungsbehältnisses noch bei einem unkontrollierten Austritt entzündet werden.

Das entstehende zündfähige Dampf-Luft-Gemisch ist auf den Nahbereich zur Verdunstungsquelle begrenzt. Auf dem Labortisch werden daher keine Zündquellen, insbesondere elektrische Verbraucher und thermische sowie sich ggf. erwärmende Messgeräte, betrieben. Zum Ausschluss der FID (thermisches Messverfahren mit gezielter Zündung) als Zündquelle werden diese im benachbarten Vorraum aufgestellt und betrieben.

Reines Isopropanol verfügt über einen Flammpunkt von ca. 12 °C. In der vorgesehenen Verwendung muss daher davon ausgegangen werden, dass eine Entzündung der Flüssigkeit erfolgen kann. Es werden daher alle unmittelbaren Zündquellen aus den Bereichen entfernt, in denen das Freisetzungsbehältnis aufgestellt werden soll. Außerdem werden keine direkten Zündquellen auf dem Boden während der Versuchsdurchführung vorhanden sein. Dies bedeutet, dass innerhalb des Versuchsraums kein offenes Feuer oder Licht vorhanden sein wird. Außerdem werden alle elektrischen Verbraucher, die über die Beleuchtung, die nicht-thermischen Messgeräte sowie die unveränderliche Raumausstattung (z.B. Laborabzug) hinausgehen, während der Versuche entfernt oder nicht betrieben und von der Stromversorgung getrennt.

Bemessung der raumlufttechnischen Anlage

Die raumlufttechnische Anlage kann prinzipiell dazu genutzt werden, die Höhe von Stoffkonzentrationen zu kontrollieren bzw. über einen ausreichend hohen Luftaustausch die Vermeidung von kritischen Situationen sicherzustellen. Allerdings soll die vorhandene Lüftungsanlage im Rahmen der vorgesehenen Versuche als Variable verwendet und z.T. in Ihrer Funktion eingeschränkt bzw. abgeschaltet werden.

Ist für einen Versuch die Nutzung der Lüftungsanlage vorgesehen, wird der Versuch bei deren Ausfall unmittelbar abgebrochen. Darüber hinaus wird die Lüftungsanlage nicht zur Kontrolle auftretender Dampfkonzentrationen eingesetzt. Sollte jedoch ein Abbruch aufgrund zu hoher Dampfkonzentrationen erfolgen, wird die Lüftungsanlage auf maximaler Leistung weiterbetrieben oder - bei zuvoriger Einschränkung oder Abschaltung - in diesen Betriebszustand gesetzt.

Zwischen den einzelnen Versuchen kann die Lüftungsanlage mit maximaler Leistung betrieben werden, um den zuvor emittierten Isopropanoldampf möglichst vollständig aus dem Versuchsraum zu entfernen. Eine Absenkung der Konzentration sollte daher mittels der Lüftungstechnischen Anlage erfolgen, ggf. kann diese durch die Aufwirbelung bodennaher Luftschichten (ggf. mit einem Ventilator) unterstützt werden. Die Kombination mit Messungen zur Sicherstellung der Auflösung bestehender Isopropanoldampfkonzentrationen ist erforderlich.

Die vorhandenen Fenster des Versuchsraums werden bei der Durchführung nicht als Lüftungsmaßnahme angesetzt. Bei Feststellung von Isopropanol-Anreicherungen während der Versuchsdurchführung können die Fenster als zusätzliche Lüftung geöffnet werden, eine Effektivität ist jedoch aufgrund der Stoffdichte sowie der durch die wechselnden Umgebungsbedingungen variierende Thermik nicht quantifizierbar.

Die Fensteröffnung bildet daher nur eine Behelfsmaßnahme. Bei Ausfall der Lüftungsanlage während der Versuchsdurchführung stehen die Fenster als ausschließliche Lüftungsmaßnahmen zur Verfügung. Zwischen einzelnen Versuchen können die Fenster ebenfalls zur Unterstützung der Lüftungsanlage geöffnet werden, um die Belüftungssituation zu verbessern.

Aufnahme freigesetztes bzw. ausgetretenes flüssiges Isopropanol

Die gezielte Verdunstung erfolgt über eine definierte Flüssigkeitsoberfläche. Jede Oberflächenzunahme, entweder durch Austritt aus dem Freisetzungsbehältnis oder durch Verschütten (z.B. bei Umfüllvorgängen) wird die Oberfläche und somit die Verdunstung samt resultierenden Dampfkonzentrationen vergrößert. Ebenso erhöht sich die Wahrscheinlichkeit einer Entzündung der Flüssigkeit oder einer explosionsfähigen Atmosphäre. Ein Austritt ist entweder durch Verschütten (z.B. beim Befüllen) oder durch Defekt des Behältnisses möglich.

Zur Aufnahme von Isopropanol sind handelsübliche Papiertücher geeignet, die im Anschluss entsorgt werden. Weitergehende Anforderungen an die Bereitstellung und Entsorgung werden in den entsprechenden, später dargestellten Maßnahmen dargestellt bzw. festgelegt.

Unterbrechung Flüssigkeitsaustritt aus defektem Behältnis

Weist das Freisetzungsbehältnis einen Defekt auf und tritt flüssiges Isopropanol aus, muss der Ausstrom möglichst schnell unterbrochen werden. Aufgrund der verschiedenen Möglichkeiten, wie ein Defekt aussehen kann (einfache Risse bis hin zum Bersten), ist eine Vorhaltung von Abdichtmitteln nicht möglich bzw. wegen der geringen Mengen nicht erforderlich. Kommt es zu einem Defekt, wird die ausgetretene Flüssigkeitsmenge direkt aufgenommen. Der verbliebene Rest wird aus dem Behältnis unmittelbar in den Abfluss entsorgt. Dieser wird mit viel Wasser nachgespült.

Organisatorische Begrenzung der Stofffreisetzung

Verschiedene Gefährdungsszenarien gehen von Gefährdungen durch unzulässig hohe Konzentrationen aus, die aus einer zu hohen (ggf. zeitbezogenen) Stofffreisetzung bei gleichzeitiger zu geringer Stoffabfuhr über das Lüftungssystem während der Versuchsdurchführung ausgehen. Kritische Situationen treten auf, wenn eine zu hohe Isopropanoldampf-Gesamtmasse innerhalb des Versuchsraums oder als lokale Anreicherung (z.B. in Bodennähe) vorliegt.

Die kritischen Situationen werden präventiv vermieden, wenn die gesamte freigesetzte Masse so begrenzt wird, dass

1. einerseits während der normalen Versuchsdurchführung keine unzulässige Anreicherung stattfinden kann und
2. andererseits eine unkontrollierte Emission ohne Auswirkungen bleibt.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei einer Verdunstung kein schlagartiger Massentransport in die Raumluft erfolgen kann. Der Massenübergang ist maßgeblich von der Größe der Flüssigkeitsoberfläche abhängig, wobei auch bei deren Vergrößerung nicht die Transportgeschwindigkeit erhöht wird. Dementsprechend steht eine Reaktionszeit zur Verfügung.

Es wird daher nicht die eingesetzte Flüssigkeitsmenge, sondern die vorgesehene Freisetzungsoberfläche konstant gehalten. Auf diese Weise wird einer unkontrollierten Verdunstung über sich vergrößernde Flächen entgegengewirkt. Mit anderen Maßnahmen wird weiterhin ein Flüssigkeitsaustritt beherrscht.

Organisatorische Bereitstellung von Aufnahmemitteln und ggf. Ersatzbehältnis

Voraussetzung für die Versuchsdurchführung ist die Vorhaltung von handelsüblichen Papiertüchern (Aufnahmemittel). Diese werden täglich vor Beginn der Vorbereitungsmaßnahmen der Versuche (insbesondere Umfüllen von Isopropanol in Schalen) bereitgelegt.

Die Vorhaltung eines Ersatzgefäßes ist nicht erforderlich.

Organisatorische Festlegungen zur Behandlung von Flüssigkeitsresten und -abfällen

Mit Ende der jeweiligen Versuche kann der Verdunstungsvorgang des flüssigen Isopropanols nicht unmittelbar - z.B. mit einer Absperrvorrichtung - unterbrochen bzw. beendet werden. Eine weitere Verdunstung wäre zwischen den Versuchen nicht messtechnisch überwacht, könnte zu Dampfanreicherungen führen und darüber hinaus auch nachfolgende Versuchsergebnisse verfälschen. Es sind Regelungen zum Umgang mit diesen Resten erforderlich.

Analog kann für mit Papiertüchern aufgenommenen Flüssigkeitsmengen nicht von einem Ende einer Verdunstung ausgegangen werden. Auch aus den Tüchern ist ein Massentransport in die Umgebungsluft weiterhin möglich. Eine Sicherung dieser Abfälle ist notwendig.

Zwischen einzelnen Versuchen muss die Verdunstung bzw. der Austausch mit der Umgebungsluft lediglich unterbrochen werden. Die noch vorhandenen Flüssigkeitsmengen werden ggf. aufgefüllt und weitergenutzt. Am Ende eines Versuchstages muss dagegen dauerhaft ein Massenaustausch zwischen Flüssigkeit und Luft unterbunden werden.

Nach Ende eines Versuchs werden zur Unterbrechung des Massenaustauschs in die Umgebungsluft die Schalen ebenfalls abgedeckt. Aufgrund des deutlich geringeren Luftvolumens (zwischen Flüssigkeitsspiegel und Deckel) wird in Kürze eine Sättigung mit Isopropanoldampf erreicht. Darüber hinaus erfolgt keine Verdunstung, sofern der Deckel nicht entfernt wird. Zur Vermeidung bzw. Minimierung nicht beabsichtigter Freisetzung zwischen den Versuchen erfolgt das Nachfüllen der Schalen unter dem Laborabzug; der Transport wird mit geschlossener Abdeckung bzw. mit Deckel durchgeführt.

Restmengen am Ende des Versuchstages werden nicht in den Vorratsbehälter für Isopropanol zurückgefüllt, damit keine eventl. aufgetretenen Verunreinigungen eingetragen werden. Da Isopropanol wasserlöslich ist und in den vorhandenen Mengen nicht die Umwelt schädigt, werden Restmengen durch Wegschütten entsorgt. Der Abfluss wird mit viel Wasser nachgespült. Die Schalen werden innerhalb des Laborabzugs gelagert.

Mit Isopropanol verunreinigte Papiertücher werden in einem verschließbaren Metallbehälter gelagert, um die Gefahr einer Entzündung zu vermindern. Der Behälterinhalt wird regelmäßig fachgerecht, z.B. über das Chemikalienmanagement der Bergischen Universität Wuppertal, entsorgt.

Konzentrationsüberwachung

Die Versuche dienen der Konzentrationsermittlung im Atembereich der anwesenden Person sowie in Boden- und in Deckennähe (Erfassung eines höhenabhängigen Konzentrationsprofils). Die installierte Messtechnik kann zur Überwachung von Anreicherungen, insbesondere in Bodennähe, genutzt werden. Die Messgeräte werden im Vorraum aufgestellt und während der Versuchsdurchführung von einem Mitarbeiter kontrolliert.

Die Stofffreisetzung soll über einen längeren Zeitraum erfolgen, so dass das Anwachsen von Konzentrationen kontinuierlich beobachtet werden kann. Bei einer Überschreitung der angeführten Grenze von $500,00 \text{ mg/m}^3$ sollen die Maßnahmen zur Konzentrationsbegrenzung (Stopp der Freisetzung, zusätzliche Lüftung) ergriffen und der Versuchsdurchlauf abgebrochen werden.

Neben der unmittelbaren Versuchskontrolle kann die Konzentrationsüberwachung auch zur Vermeidung von sich kumulierenden Isopropanoldampf-Anreicherungen über mehrere Versuchsdurchläufe hinweg eingesetzt werden. Ggf. kritische Bereiche werden aufgrund des Dichteverhältnisses der Dämpfe zur Umgebungsluft vor Allem in Bodennähe vorzufinden sein.

Während der Lüftungsmaßnahmen soll die Messtechnik mobil, an mehreren Stellen hintereinander eingesetzt werden, um die Absenkung der Isopropanoldampf-Konzentration innerhalb des Raumes zu kontrollieren. Ziel ist die Feststellung von ausgeglichener Bedingungen, so dass mit dem nächsten Versuchsdurchlauf begonnen werden kann. Dabei werden im gleichen Zuge mögliche Ansammlungen festgestellt und die Lüftungsmaßnahmen solange fortgeführt, bis eine Absenkung auf ein ubiquitäres Niveau erfolgt ist. Zur Kontrolle des gesamten Raumes werden daher folgende Bereiche³, jeweils in den Höhen von ca. $0,20 \text{ m}$, $0,60 \text{ m}$, $1,00 \text{ m}$, $1,40 \text{ m}$, $1,80 \text{ m}$ und $2,20 \text{ m}$, für Messungen vorgesehen:

- ca. $1,00 \text{ m}$ links und $1,00 \text{ m}$ vor zentralem Labortisch;
- mittig und ca. $1,00 \text{ m}$ vor zentralem Labortisch;
- ca. $1,00 \text{ m}$ rechts und $1,00 \text{ m}$ vor zentralem Labortisch;
- ca. $1,00 \text{ m}$ links und mittig neben zentralem Labortisch;
- ca. $1,00 \text{ m}$ rechts und mittig neben zentralem Labortisch;
- ca. $1,00 \text{ m}$ links und $1,00 \text{ m}$ hinter zentralem Labortisch;
- mittig und ca. $1,00 \text{ m}$ hinter zentralem Labortisch;
- ca. $1,00 \text{ m}$ rechts und $1,00 \text{ m}$ hinter zentralem Labortisch.

Zusätzlich erfolgen Kontrollmessungen auf dem vorderen, dem seitlichen und dem zentralen Labortischen in Höhen von ca. $0,20 \text{ m}$ und $0,60 \text{ m}$ oberhalb der Tischoberkante. Erst wenn an allen Messpunkten eine ausreichende Konzentrationsabsenkung festgestellt wird, darf der nächste Versuchsdurchlauf begonnen werden. Auch bei abgebrochenen Versuchen wird die Konzentrationsentwicklung an den genannten Messpunkten durchgeführt.

Bereitstellung persönlicher Schutzausrüstungen

Im Hinblick auf inhalative Gefährdungen sind persönliche Schutzausrüstungen nicht erforderlich. Zur Vermeidung von Zündfunken am Fussboden durch elektrostatische Entladungen von Personen wird während der Versuche antistatisches Schuhwerk getragen. Beim Umgang mit flüssigem Isopropanol wird eine Schutzbrille, anforderungsgerechte Handschuhe sowie ein Laborkittel getragen.

Unterweisung

Voraussetzung für die Beachtung der dargestellten Maßnahmen ist deren Kenntnis durch die Versuchsteilnehmer, um Gefährdungen zu vermeiden bzw. in kritischen Situationen angemessen zu reagieren. Anwesende Personen sind daher in die Messtechnik einzuweisen (Erkennen kritischer Messwerte) sowie über die generellen Sicherheitsmaßnahmen zu unterweisen.

5 Zusammenfassung

Aus den genannten Schutzmaßnahmen können folgende Handlungsanweisungen zur Versuchsdurchführung zusammengefasst werden:

1. Konzentrationsüberwachung während der Versuchsdurchführung mit vorgesehener Messtechnik, Abbruch des Versuchs und Einleitung von Maßnahmen ab einer lokalen Konzentration von $500,00 \text{ mg/m}^3$;
2. Versuchsabbruch bei Ausfall der Lüftungsanlage, sofern Betrieb für Versuch geplant;
3. Versuchsabbruch bei Defekt an Emissionsbehältnis;
4. bei Versuchsabbruch Unterbrechung der Isopropanol-Verdunstung durch Abdecken der Schalen;
5. bei Versuchsabbruch Betrieb der Lüftungsanlage mit maximaler Leistung (sofern betriebsfähig) und Öffnung der Fenster des Versuchsraums;
6. bei Defekt des Emissionsbehältnisses Umfüllen der Flüssigkeit in bereitstehendes Ersatzgefäß (gekennzeichnete Flasche, Unterstützung mit Trichter); nachrangig: Entfernung des Behältnisses ins Freie;
7. direkte Aufnahme ausgetretener Flüssigkeitsmengen mit Papierhandtüchern, Entsorgung in verschließbaren Metallbehälter;

³ Beschreibung vom Standort der in den Raum führenden Tür aus gesehen

-
8. regelmäßige fachgerechte Entsorgung gesammelter Papiertücher (z.B. über Chemikalienmanagement der Bergischen Universität Wuppertal);
 9. Bereitstellung von Ersatzgefäß und Papierhandtüchern zu Beginn eines Versuchstages (vor Umgang mit Isopropanol);
 10. bei Transport des Behältnisses ins Freie umfangreiche Lüftungsmaßnahmen der durchquerten Räume;
 11. zwischen Versuchsdurchläufen Betrieb der Lüftungsanlage mit maximaler Leistung und Unterstützung durch Öffnen der Fenster;
 12. zwischen Versuchsdurchläufen bzw. nach Versuchsabbruch Kontrollmessungen (siehe aufgeführte Messpunkte) zur Feststellung von Konzentrationsbedingungen für neuen Versuchsdurchlauf;
 13. Umfüllen zur Versuchsvorbereitung innerhalb des Laborabzugs;
 14. Lagerung Behälter zwischen Versuchstagen innerhalb des Laborabzugs;
 15. Abschaltung, Trennung vom elektrischen Verbrauchsnetz sowie möglichst weiträumige Entfernung möglicher wirksamer Zündquellen;
 16. Betrieb FID außerhalb Versuchsraum und Nutzung von Schlauchverlängerungen;
 17. Verwendung antistatisches Schuhwerk;
 18. Verwendung von Schutzbrille, -handschuhen und Laborkittel beim Umgang mit flüssigem Isopropanol;
 19. Unterweisung der an den Versuchen beteiligten Personen.

D Rahmenbedingungen der Propan-Versuche (Zusammenfassung)

rot	Emissionspunkt 1, Lüftung in Normalbetrieb
blau	Emissionspunkt 2, Lüftung in Normalbetrieb
grün	Emissionspunkt 1, Einschränkung Zuluftflächen
lila	Emissionspunkt 2, Einschränkung Zuluftflächen

Tabelle D.1: Übersicht der farblichen Kennzeichnung zur Fallunterscheidung

<i>Name</i>	<i>X-Position¹ [m]</i>	<i>Y-Position [m]</i>	<i>Z-Position [m]</i>
Atembereich	2,80	2,30	1,60
1	4,00	1,00	0,20
2	4,15	2,35	1,90
3	1,20	1,20	0,20
4	5,20	3,25	0,30
5	2,40	3,30	0,95
6	4,60	2,35	0,65
7	5,20	2,70	0,30
8	1,55	3,05	0,30

Tabelle D.2: Übersicht Messpunkte für Propan-Versuche

¹ Orientierung der Abstände an linker, vorderer Raumecke

Versuchsnummer	$T_{\infty 1, \text{Beginn}}$ [°C]	$T_{\infty 1, \text{Ende}}$ [°C]	$T_{\infty 2, \text{Beginn}}$ [°C]	$T_{\infty 2, \text{Ende}}$ [°C]	$p_{\infty, \text{Beginn}}$ [Pa]	$p_{\infty, \text{Ende}}$ [Pa]	$H_{\text{rel}, \infty}$ [%]	Volstr _{Zu1} [m³/h]	Volstr _{Zu2} [m³/h]	Volstr _{Ab-Labor} [m³/h]	m_{Em} [g]	aktive FID	
1004	20,0	20,2	19,5	20,0	101500	101500	40	440-460	430-450	450-460	40,00	Atembereich	1 2
1005	20,4	20,6	20,3	20,7	101500	101500	39	435-460	420-440	490-500	41,00	Atembereich	3 4
1006	20,8	21,0	21,0	21,3	101500	101500	39	450-480	430-455	480	40,00	Atembereich	5 -
1007	20,2	20,4	19,8	20,0	101300	101400	50	370-395	370-400	455-470	40,00	Atembereich	3 -
1008	20,6	20,7	20,2	20,4	101400	101400	50	440-470	430-460	490-500	40,00	Atembereich	7 -
1010	20,7	20,8	21,0	21,1	101200	101200	62	380-420	390-420	530-55	36,00	Atembereich	5 -
1011	20,8	20,8	21,3	21,5	101100	101100	62	380-420	390-410	530-540	30,00	Atembereich	3 -
1012	21,0	21,0	21,8	21,9	101100	101100	60	375-400	380-410	530-550	30,00	Atembereich	7 -
1013	21,1	21,2	22,0	22,1	101100	101100	59	375-400	380-410	530-550	36,00	Atembereich	8 -
1014	20,8	21,0	21,0	21,3	100600	100600	64	375-400	380-400	540-550	36,00	Atembereich	1 -
1015	21,0	21,2	21,6	21,9	100600	100600	65	385-405	400-420	460-470	32,00	Atembereich	2 -
1016	21,6	21,7	22,3	22,5	100500	100400	65	410-440	420-440	535-545	36,00	Atembereich	5 -
1017	21,9	22,1	22,8	22,9	100300	100300	65	330-360	370-400	510-540	34,00	Atembereich	3 -
1018	22,4	22,4	23,1	23,2	100300	100300	62	255-280	310-340	520-530	34,00	Atembereich	7 -
1019	20,4	20,7	20,6	21,0	101500	101500	60	360-390	390-420	515-525	34,00	Atembereich	1 2
1020	20,7	20,5	21,2	21,3	101500	101600	59	345-380	390-410	530-550	34,00	Atembereich	1 2
1021	20,7	20,6	21,5	21,5	101600	101600	57	280-300	360-375	545-555	40,00	Atembereich	3 5
1022	21,0	21,0	21,6	21,7	101500	101400	55	330-360	390-420	530-535	36,00	Atembereich	7 8
1023	21,1	21,2	21,8	21,8	101400	101400	54	365-380	390-400	555-570	36,00	Atembereich	7 8

E Rahmenbedingungen der Isopropanol-Versuche (Zusammenfassung)

rot	Verdunstung von 2 Tablett an Emissionsposition 1, Lüftung abgeschaltet
blau	Verdunstung von 2 Tablett an Emissionsposition 1, Lüftung in Normalbetrieb
grün	Verdunstung von 1 Tablett an Emissionsposition 1, Lüftung in Normalbetrieb
lila	Verdunstung von 2 Tablett an Emissionsposition 2, Lüftung in Normalbetrieb

Tabelle E.1: Übersicht der farblichen Kennzeichnung zur Fallunterscheidung

Name	X-Position ¹ [m]	Y-Position [m]	Z-Position [m]
Atembereich	2,80	2,30	1,60
1	3,90	2,20	1,60
2	4,75	1,00	0,65
3	5,20	2,70	0,70
4	1,20	1,20	0,20
5	2,30	3,10	1,00
6	4,00	1,20	0,20
7	5,20	3,35	0,30
8	4,60	2,35	0,65

Tabelle E.2: Übersicht Messpunkte für Isopropanol-Versuche

¹ Orientierung der Abstände an linker, vorderer Raumecke

Versuchsnummer	$T_{\infty 1, \text{Beginn}}$ [°C]	$T_{\infty 1, \text{Ende}}$ [°C]	$T_{Zu, \text{Beginn}}$ [°C]	$T_{Zu, \text{Ende}}$ [°C]	$p_{\infty, \text{Beginn}}$ [Pa]	$p_{\infty, \text{Ende}}$ [Pa]	$H_{rel, \infty}$ [%]	$Volstr_{Zu1}$ [m³/h]	$Volstr_{Zu2}$ [m³/h]	$Volstr_{Ab-Labor}$ [m³/h]	m_{Em1} [g]	m_{Em2} [g]	Person?	aktive FID	
2001	20,4	20,8	20,3	20,7	103200	103100	41	-	-	-	6,00	10,00	ja	Atembereich	1 2
2002	20,5	19,6	20,4	19,4	103200	103200	41	400-415	380-410	565-575	24,00	28,00	ja	Atembereich	1 2
2003	19,4	19,2	18,8	18,7	103200	103100	43	390-410	380-410	580	0,00	24,00	ja	Atembereich	1 2
2004	19,4	19,2	18,7	18,6	103100	103100	44	395-405	380-420	585	34,00	26,00	ja	Atembereich	1 2
2005	19,4	20,0	18,7	19,4	103100	103100	44	-	-	-	2,00	10,00	ja	Atembereich	3 4
2006	18,7	18,2	15,8	15,4	102400	102400	40	395-410	395-415	575-580	36,00	30,00	ja	Atembereich	3 4
2007	18,2	18,0	15,9	15,4	102700	102700	40	385-420	395-405	590	0,00	34,00	ja	Atembereich	3 4
2008	18,1	17,8	16,9	15,6	102400	102400	41	395-420	395-425	585-595	36,00	28,00	ja	Atembereich	3 4
2009	18,1	17,8	17,3	16,0	102600	102500	41	400-420	395-415	575-585	24,00	34,00	nein	Atembereich	3 4
2010	18,1	18,6	18,3	18,9	102600	102500	41	-	-	-	8,00	6,00	ja	Atembereich	5 6
2011	18,7	18,0	17,0	15,7	102500	102500	40	395-410	395-415	585-590	22,00	30,00	ja	Atembereich	5 6
2012	18,0	17,8	17,1	15,3	102500	102500	41	380-405	410-420	575-590	0,00	30,00	ja	Atembereich	5 6
2013	17,8	17,6	16,1	15,2	102500	102500	41	380-415	390-420	570-585	34,00	28,00	ja	Atembereich	5 6
2014	19,6	19,6	20,2	19,7	102300	102300	37	-	-	-	10,00	8,00	ja	Atembereich	7 8
2015	19,2	18,1	17,3	15,1	102300	102300	37	380-410	395-420	585	24,00	26,00	ja	Atembereich	7 8
2016	18,1	17,8	15,5	15,2	102300	102300	37	390-410	400-420	590	0,00	30,00	ja	Atembereich	7 8
2017	17,9	17,6	15,1	15,0	102300	102300	37	405-425	400	585	36,00	28,00	ja	Atembereich	7 8
2018	18,3	17,5	15,3	15,4	1022	102200	37	410	390-415	575	22,00	28,00	nein	Atembereich	7 8

F Zusammenfassung

Berechnungs-Eingangswerte zu Propan-Versuchen

rot	Emissionspunkt 1, Lüftung in Normalbetrieb
blau	Emissionspunkt 2, Lüftung in Normalbetrieb
grün	Emissionspunkt 1, Einschränkung Zuluftflächen
lila	Emissionspunkt 2, Einschränkung Zuluftflächen

Tabelle F.1: Übersicht der farblichen Kennzeichnung zur Fallunterscheidung

Name	X-Position ¹ [m]	Y-Position [m]	Z-Position [m]
Atembereich	2,80	2,30	1,60
1	4,00	1,00	0,20
2	4,15	2,35	1,90
3	1,20	1,20	0,20
4	5,20	3,25	0,30
5	2,40	3,30	0,95
6	4,60	2,35	0,65
7	5,20	2,70	0,30
8	1,55	3,05	0,30

Tabelle F.2: Übersicht Messpunkte für Propan-Berechnungen

¹ Orientierung der Abstände an linker, vorderer Raumecke

Versuchsnummer	T _{Raum} [°C]	T _{Zuluft} [°C]	P _{Raum} [Pa]	H _{rel} [%]	Volstr _{zu1} [m³/h]	Volstr _{zu2} [m³/h]	Volstr _{zu,ges} [m³/h]	Volstr _{Ab-Labor} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,ges} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,je Raum} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,Typ1} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,Typ2} [m³/h]	m _{Em} [g]	aktive FID	Bemerkung
1004-2 (-1 ohne NR)	19,8	19,8	101500	40,00	440	440	880	455	425	213	120	93	40,00	Atembereich	1 2
1004-3	19,8	19,8	101500	40,00	228	228	455	455	0	0	0	0	40,00	Atembereich	1 2 Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1004-4	19,8	19,8	101500	40,00	228	228	455	455	0	0	0	0	40,00	Atembereich	1 2 Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb; Variation Raum: alle Türen geschlossen (ohne NR)
1004-5	19,8	19,8	101500	40,00	150	150	300	300	0	0	0	0	40,00	Atembereich	1 2 Variation Lüftung: geringere Zu- /Abluftströme;
1005-2 (-1 ohne NR)	20,5	20,5	101500	39,00	440	425	865	495	370	185	104	81	41,00	Atembereich	3 4
1005-3	20,5	20,5	101500	39,00	250	245	495	495	0	0	0	0	41,00	Atembereich	3 4 Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1006-2 (-1 ohne NR)	21,0	21,0	101500	39,00	460	440	900	480	420	210	118	92	40,00	Atembereich	5 -
1006-3	21,0	21,0	101500	39,00	245	235	480	480	0	0	0	0	40,00	Atembereich	5 - Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1007-2 (-1 ohne NR)	20,1	20,1	101300	50,00	385	385	770	460	310	155	87	68	40,00	Atembereich	3 -
1007-3	20,1	20,1	101300	50,00	230	230	460	460	0	0	0	0	40,00	Atembereich	3 - Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1007-4	20,1	20,1	101300	50,00	180	180	360	360	0	0	0	0	40,00	Atembereich	3 - Variation Lüftung: geringere Zu- /Abluftströme; Variation Raum: alle Türen geschlossen (ohne NR)
1007-5	20,1	20,1	101300	50,00	180	180	360	360	0	0	0	0	40,00	Atembereich	3 - Variation Lüftung: geringere Zu- /Abluftströme;
1008-2 (-1 ohne NR)	20,3	20,3	101400	50,00	460	445	905	495	410	205	116	89	40,00	Atembereich	7 -
1008-3	20,3	20,3	101400	50,00	250	245	495	495	0	0	0	89	40,00	Atembereich	7 - Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1010-1	20,9	20,9	101200	62,00	400	405	805	540	265	133	75	58	36 (Achtung, Abschätzung!!!)	Atembereich	5 -
1010-2	20,9	20,9	101200	62,00	270	270	540	540	0	0	0	0	36 (Achtung, Abschätzung!!!)	Atembereich	5 - Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1011-1	21,1	21,1	101100	62,00	400	400	800	540	260	130	73	57	30 (Achtung, Abschätzung!!!)	Atembereich	3 -
1011-2	21,1	21,1	101100	62,00	270	270	540	540	0	0	0	0	30 (Achtung, Abschätzung!!!)	Atembereich	3 - Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1012-1	21,5	21,5	101100	60,00	390	400	790	545	245	123	69	54	30,00	Atembereich	7 -
1012-2	21,5	21,5	101100	60,00	275	270	545	545	0	0	0	0	30,00	Atembereich	7 - Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1013-1	21,6	21,6	101100	59,00	390	400	790	545	245	123	69	54	36,00	Atembereich	8 -
1013-2	21,6	21,6	101100	59,00	275	270	545	545	0	0	0	0	36,00	Atembereich	8 - Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1014-1	21,0	21,0	100600	64,00	385	385	770	545	225	113	63	50	36,00	Atembereich	1 -

Versuchsnummer	T _{Raum} [°C]	T _{Zuluft} [°C]	P _{Raum} [Pa]	H _{rel} [%]	Volstr _{zu1} [m³/h]	Volstr _{zu2} [m³/h]	Volstr _{zu,ges} [m³/h]	Volstr _{Ab-Labor} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,ges} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,je-Raum} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,Typ1} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,Typ2} [m³/h]	m _{Ein} [g]	aktive FID	Bemerkung	
1014-2	21,0	21,0	100600	64,00	275	270	545	545	0	0	0	0	36,00	Atembereich	1 -	Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1015-1	21,4	21,4	100600	65,00	395	410	805	460	345	173	97	76	32,00	Atembereich	2 -	
1015-2	21,4	21,4	100600	65,00	235	225	460	460	0	0	0	0	32,00	Atembereich	2 -	Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1016-1	22,1	22,1	100500	65,00	425	435	860	535	325	163	92	71	36,00	Atembereich	5 -	
1016-2	22,1	22,1	100500	65,00	265	270	535	535	0	0	0	0	36,00	Atembereich	5 -	Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1017-1	22,5	22,5	100300	65,00	335	380	715	530	185	93	52	41	34,00	Atembereich	3 -	
1017-2	22,5	22,5	100300	65,00	250	280	530	530	0	0	0	0	34,00	Atembereich	3 -	Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1018-1	22,9	22,9	100300	62,00	265	320	585	525	60	30	17	13	34,00	Atembereich	7 -	
1018-2	22,9	22,9	100300	62,00	235	290	525	525	0	0	0	0	34,00	Atembereich	7 -	Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1019-1	20,5	20,5	101500	60,00	375	410	785	525	260	130	73	57	34,00	Atembereich	1 2	
1019-2	20,5	20,5	101500	60,00	255	270	525	525	0	0	0	0	34,00	Atembereich	1 2	Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1020-1	21,0	21,0	101500	59,00	360	395	755	545	210	105	59	46	34,00	Atembereich	1 2	
1020-2	21,0	21,0	101500	59,00	265	280	545	545	0	0	0	0	34,00	Atembereich	1 2	Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1021-1	21,2	21,2	101600	57,00	390	370	760	550	210	105	59	46	40,00	Atembereich	3 5	
1021-2	21,2	21,2	101600	57,00	280	270	550	550	0	0	0	0	40,00	Atembereich	3 5	Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1022-1	21,4	21,4	101500	55,00	340	405	745	540	205	103	58	45	36,00	Atembereich	7 8	
1022-2	21,4	21,4	101500	55,00	260	280	540	540	0	0	0	0	36,00	Atembereich	7 8	Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1023-1	21,5	21,5	101400	54,00	375	390	765	560	205	103	58	45	36,00	Atembereich	7 8	
1023-2	21,5	21,5	101400	54,00	270	290	560	560	0	0	0	0	36,00	Atembereich	7 8	Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb

G Zusammenfassung

Berechnungs-Eingangswerte zu Isopropanol-Versuchen

rot	Verdunstung von 2 Tablett an Emissionsposition 1, Lüftung abgeschaltet
blau	Verdunstung von 2 Tablett an Emissionsposition 1, Lüftung in Normalbetrieb
grün	Verdunstung von 1 Tablett an Emissionsposition 1, Lüftung in Normalbetrieb
lila	Verdunstung von 2 Tablett an Emissionsposition 2, Lüftung in Normalbetrieb

Tabelle G.1: Übersicht der farblichen Kennzeichnung zur Fallunterscheidung

<i>Name</i>	<i>X-Position¹ [m]</i>	<i>Y-Position [m]</i>	<i>Z-Position [m]</i>
Atembereich	2,80	2,30	1,60
1	3,90	2,20	1,60
2	4,75	1,00	0,65
3	5,20	2,70	0,70
4	1,20	1,20	0,20
5	2,30	3,10	1,00
6	4,00	1,20	0,20
7	5,20	3,35	0,30
8	4,60	2,35	0,65

Tabelle G.2: Übersicht Messpunkte für Isopropanol-Berechnungen

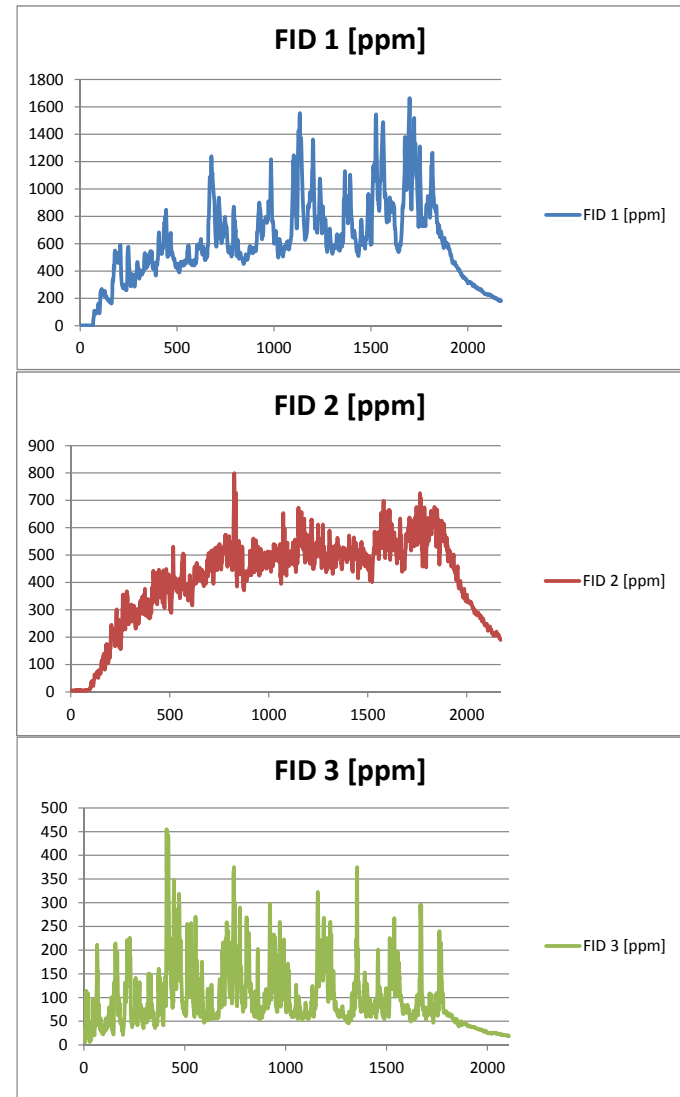
¹ Orientierung der Abstände an linker, vorderer Raumecke

Versuchsnummer	T _{raum} [°C]	T _{Zuluft} [°C]	P _{raum} [Pa]	H _{rel} [%]	Volstr _{zul} [m³/h]	Volstr _{zab} [m³/h]	Volstr _{zuges} [m³/h]	Volstr _{ab-labor} [m³/h]	Volstr _{ab-NR,ges} [m³/h]	Volstr _{ab-NR,IR-Raum} [m³/h]	Volstr _{ab-NR,Tp1} [m³/h]	Volstr _{ab-NR,Tp2} [m³/h]	m _{em1} [g]	m _{em2} [g]	m _{em1} [g/(s·m²)]	m _{em2} [g/(s·m²)]	Person?	aktive FID	Bemerkung
2001-1	20,4	-	103200	41,00	-	-	-	-	-	-	-	-	6,00	10,00	0,027777778	0,046296296	ja	Atembereich	1 2
2001-2	20,4	-	103200	41,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00414934359	0,0060870771	ja	Atembereich	1 2 mit Emissionsrechnung
2002-1	20,5	15,5	103200	41,00	410	405	815	570	245	123	69	54	24,00	28,00	0,111111111	0,1296296296	ja	Atembereich	1 2
2002-2	20,5	15,5	103200	41,00	282	288	570	570	0	0	0	0	24,00	28,00	0,111111111	0,1296296296	ja	Atembereich	1 2 Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2002-3	20,5	15,5	103200	41,00	410	405	815	570	245	123	69	54	-	-	0,00	0,03682192234	ja	Atembereich	1 2 mit Emissionsrechnung
2002-4	20,5	15,5	103200	41,00	282	288	570	570	0	0	0	0	-	-	0,02893904923	0,03258090122	ja	Atembereich	1 2 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2003-1	19,4	15,5	103200	43,00	400	400	800	580	220	110	62	48	0,00	24,00	0,00	0,111111111	ja	Atembereich	1 2
2003-2	19,4	15,5	103200	43,00	290	290	580	580	0	0	0	0	0,00	24,00	0,00	0,111111111	ja	Atembereich	1 2 Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2003-3	19,4	15,5	103200	43,00	400	400	800	580	220	110	62	48	-	-	-	0,04373980569	ja	Atembereich	1 2 mit Emissionsrechnung
2003-4	19,4	15,5	103200	43,00	290	290	580	580	0	0	0	0	-	-	-	0,03144523463	ja	Atembereich	1 2 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2004-1	19,4	15,5	103100	44,00	400	405	805	585	220	110	62	48	34,00	26,00	0,1574074074	0,1203703704	ja	Atembereich	1 2
2004-2	19,4	15,5	103100	44,00	291	294	585	585	0	0	0	0	34,00	26,00	0,1574074074	0,1203703704	ja	Atembereich	1 2 Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2004-3	19,4	15,5	103100	44,00	400	405	805	585	220	110	62	48	-	-	0,03582480400	0,03622029928	ja	Atembereich	1 2 mit Emissionsrechnung
2004-4	19,4	15,5	103100	44,00	291	294	585	585	0	0	0	0	-	-	0,03660625852	0,03192849896	ja	Atembereich	1 2 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2005-1	19,4	-	103100	44,00	-	-	-	-	-	-	-	-	2,00	10,00	0,0092592593	0,0462962963	ja	Atembereich	3 4
2005-2	19,4	-	103100	44,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00097667304	0,00623993175	ja	Atembereich	3 4 mit Emissionsrechnung
2006-1	18,7	15,6	102400	40,00	405	410	815	575	240	120	67	53	36,00	30,00	0,1666666667	0,1388888889	ja	Atembereich	3 4
2006-2	18,7	15,6	102400	40,00	285	290	575	575	0	0	0	0	36,00	30,00	0,1666666667	0,1388888889	ja	Atembereich	3 4 Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2006-3	18,7	15,6	102400	40,00	405	410	815	575	240	120	67	53	-	-	0,03218230646	0,04191572099	ja	Atembereich	3 4 mit Emissionsrechnung
2006-4	18,7	15,6	102400	40,00	285	290	575	575	0	0	0	0	-	-	0,03123932525	0,03431323387	ja	Atembereich	3 4 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2007-1	18,2	15,6	102700	40,00	400	400	800	590	210	105	59	46	0,00	34,00	0,00	0,1574074074	ja	Atembereich	3 4
2007-2	18,2	15,6	102700	40,00	295	295	590	590	0	0	0	0	0,00	34,00	0,00	0,1574074074	ja	Atembereich	3 4 Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2007-3	18,2	15,6	102700	40,00	400	400	800	590	210	105	59	46	-	-	-	0,04569124686	ja	Atembereich	3 4 mit Emissionsrechnung
2007-4	18,2	15,6	102700	40,00	295	295	590	590	0	0	0	0	-	-	-	0,03217376562	ja	Atembereich	3 4 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2008-1	18,1	15,8	102400	41,00	410	410	820	590	230	115	65	50	36,00	28,00	0,1666666667	0,1296296296	ja	Atembereich	3 4
2008-2	18,1	15,8	102400	41,00	295	295	590	590	0	0	0	0	36,00	28,00	0,1666666667	0,1296296296	ja	Atembereich	3 4 Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2008-3	18,1	15,8	102400	41,00	410	410	820	590	230	115	65	50	-	-	0,03029497529	0,03360275409	ja	Atembereich	3 4 mit Emissionsrechnung
2008-4	18,1	15,8	102400	41,00	295	295	590	590	0	0	0	0	-	-	0,03775515910	0,03445810349	ja	Atembereich	3 4 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2009-1	18,1	16,0	102600	41,00	405	405	810	580	230	115	65	50	24,00	34,00	0,111111111	0,1574074074	nein	Atembereich	3 4
2009-2	18,1	16,0	102600	41,00	290	290	580	580	0	0	0	0	24,00	34,00	0,111111111	0,1574074074	nein	Atembereich	3 4 Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2009-3	18,1	16,0	102600	41,00	405	405	810	580	230	115	65	50	-	-	0,04204011881	0,05322474372	nein	Atembereich	3 4 mit Emissionsrechnung
2009-4	18,1	16,0	102600	41,00	290	290	580	580	0	0	0	0	-	-	0,02967956298	0,03641329839	nein	Atembereich	3 4 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2010-1	18,2	-	102600	41,00	-	-	-	-	-	-	-	-	8,00	6,00	0,0370370370	0,027777778	ja	Atembereich	5 6
2010-2	18,2	-	102600	41,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00596548104	0,00613195579	ja	Atembereich	5 6 mit Emissionsrechnung
2011-1	18,7	15,7	102500	40,00	405	400	805	590	215	108	61	47	22,00	30,00	0,1018518519	0,1388888889	ja	Atembereich	5 6
2011-2	18,7	15,7	102500	40,00	297	293	590	590	0	0	0	0	22,00	30,00	0,1018518519	0,1388888889	ja	Atembereich	5 6 Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2011-3	18,7	15,7	102500	40,00	405	400	805	590	215	108	61	47	-	-	0,02998476224	0,04613356746	ja	Atembereich	5 6 mit Emissionsrechnung
2011-4	18,7	15,7	102500	40,00	297	293	590	590	0	0	0	0	-	-	0,02863291566	0,03119462626	ja	Atembereich	5 6 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2012-1	18,0	15,4	102500	41,00	395	410	805	585	220	110	62	48	0,00	30,00	0,00	0,1388888889	ja	Atembereich	5 6
2012-2	18,0	15,4	102500	41,00	285	300	585	585	0	0	0	0	0,00	30,00	0,00	0,1388888889	ja	Atembereich	5 6 Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft

Versuchsnummer	T _{raum} [°C]	T _{Zuluft} [°C]	P _{raum} [Pa]	H _{rel} [%]	Volstr _{Zuluft} [m³/h]	Volstr _{Zuluft} [m³/h]	Volstr _{Zuluft} [m³/h]	Volstr _{Ab-Luft} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,ges} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,SRaum} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,Tp01} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,Tp02} [m³/h]	m _{em1} [g]	m _{em2} [g]	m _{em1} [g/(s·m²)]	m _{em2} [g/(s·m²)]	Person?	aktive FID	Bemerkung	
2012-3	18,0	15,4	102500	41,00	395	410	805	585	220	110	62	48	-	-	-	0,05614499962	ja	Atembereich	5	6 mit Emissionsrechnung
2012-4	18,0	15,4	102500	41,00	285	300	585	585	0	0	0	0	-	-	-	0,03739354533	ja	Atembereich	5	6 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2013-1	17,8	15,2	102500	41,00	400	400	800	580	220	110	62	48	34,00	28,00	0,1574074074	0,1296296296	ja	Atembereich	5	6
2013-2	17,8	15,2	102500	41,00	290	290	580	580	0	0	0	0	34,00	28,00	0,1574074074	0,1296296296	ja	Atembereich	5	6 Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2013-3	17,8	15,2	102500	41,00	400	400	800	580	220	110	62	48	-	-	0,03101620040	0,03288931544	ja	Atembereich	5	6 mit Emissionsrechnung
2013-4	17,8	15,2	102500	41,00	290	290	580	580	0	0	0	0	-	-	0,03639254744	0,03032851870	ja	Atembereich	5	6 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2014-1	19,6	-	102300	37,00	-	-	-	-	-	-	-	-	10,00	8,00	0,0462962963	0,0370370370	ja	Atembereich	7	8
2014-2	19,6	-	102300	37,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00464074255	0,00634690810	ja	Atembereich	7	8 mit Emissionsrechnung
2015-1	19,2	15,1	102300	37,00	400	415	815	585	230	115	65	50	24,00	26,00	0,1111111111	0,1203703704	ja	Atembereich	7	8
2015-2	19,2	15,1	102300	37,00	285	300	585	585	0	0	0	0	24,00	26,00	0,1111111111	0,1203703704	ja	Atembereich	7	8 Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2015-3	19,2	15,1	102300	37,00	400	415	815	585	230	115	65	50	-	-	0,03436800054	0,03589515720	ja	Atembereich	7	8 mit Emissionsrechnung
2015-4	19,2	15,1	102300	37,00	285	300	585	585	0	0	0	0	-	-	0,02966283201	0,02892764870	ja	Atembereich	7	8 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2016-1	18,1	15,0	102300	37,00	400	415	815	590	225	113	64	49	0,00	30,00	0,00	0,1388888889	ja	Atembereich	7	8
2016-2	18,1	15,0	102300	37,00	287	303	590	590	0	0	0	0	0,00	30,00	0,00	0,1388888889	ja	Atembereich	7	8 Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2016-3	18,1	15,0	102300	37,00	400	415	815	590	225	113	64	49	-	-	-	0,03557714801	ja	Atembereich	7	8 mit Emissionsrechnung
2016-4	18,1	15,0	102300	37,00	287	303	590	590	0	0	0	0	-	-	-	0,0350989655	ja	Atembereich	7	8 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2017-1	17,9	15,0	102300	37,00	415	400	815	585	230	115	65	50	36,00	28,00	0,1666666667	0,1296296296	ja	Atembereich	7	8
2017-2	17,9	15,0	102300	37,00	300	285	585	585	0	0	0	0	36,00	28,00	0,1666666667	0,1296296296	ja	Atembereich	7	8 Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2017-3	17,9	15,0	102300	37,00	415	400	815	585	230	115	65	50	-	-	0,03127950237	0,03354911803	ja	Atembereich	7	8 mit Emissionsrechnung
2017-4	17,9	15,0	102300	37,00	300	285	585	585	0	0	0	0	-	-	0,03651800133	0,03261306824	ja	Atembereich	7	8 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2018-1	18,3	15,0	102200	37,00	410	405	815	575	240	120	67	53	22,00	28,00	0,1018518519	0,1296296296	nein	Atembereich	7	8
2018-2	18,3	15,0	102200	37,00	290	285	575	575	0	0	0	0	22,00	28,00	0,1018518519	0,1296296296	nein	Atembereich	7	8 Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2018-3	18,3	15,0	102200	37,00	410	405	815	575	240	120	67	53	-	-	0,03881186207	0,04579487684	nein	Atembereich	7	8 mit Emissionsrechnung
2018-4	18,3	15,0	102200	37,00	290	285	575	575	0	0	0	0	-	-	0,02922113303	0,03297152241	nein	Atembereich	7	8 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft

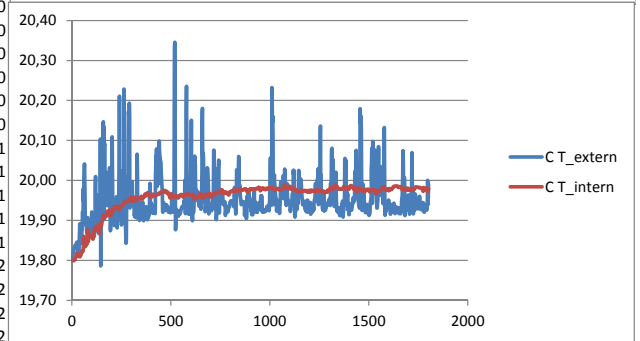
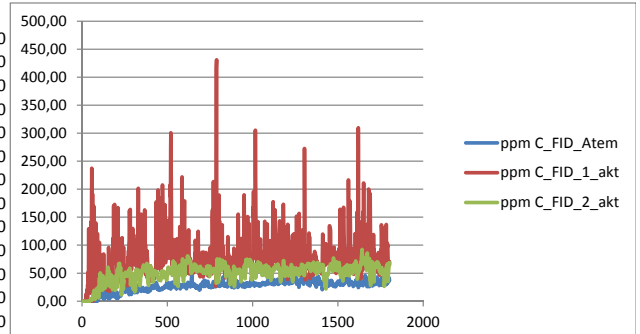
H Beispiel: Quantitative und qualitative Darstellung Messergebnisse

Datum/Uhrzeit:	Zeit [s]	FID 1 [ppm]	FID 2 [ppm]	FID 3 [ppm]	Timestamp	T Intern [°C]	T extern [°C]
02.10.2013 10:35	65	2	5	33,5	02.10.2013 10:34	20,00	19,50
02.10.2013 10:35	66	5	5	20,5	02.10.2013 10:35	20,00	19,50
02.10.2013 10:35	67	14	4	14,3	02.10.2013 10:36	20,00	19,50
02.10.2013 10:35	68	40	5	14,4	02.10.2013 10:37	20,00	19,50
02.10.2013 10:35	69	58	5	8,6	02.10.2013 10:38	20,00	19,50
02.10.2013 10:35	70	70	5	6	02.10.2013 10:39	20,00	19,50
02.10.2013 10:35	71	79	5	8,4	02.10.2013 10:40	20,00	19,60
02.10.2013 10:35	72	96	5	10,6	02.10.2013 10:41	20,00	19,60
02.10.2013 10:35	73	109	4	21,9	02.10.2013 10:42	20,10	19,60
02.10.2013 10:35	74	106	5	72,4	02.10.2013 10:43	20,10	19,60
02.10.2013 10:35	75	97	5	106,8	02.10.2013 10:44	20,00	19,60
02.10.2013 10:35	76	91	5	114,1	02.10.2013 10:45	20,10	19,60
02.10.2013 10:35	77	90	6	87,5	02.10.2013 10:46	20,00	19,60
02.10.2013 10:35	78	97	6	63,9	02.10.2013 10:47	20,10	19,70
02.10.2013 10:35	79	101	5	90	02.10.2013 10:48	20,10	19,70
02.10.2013 10:35	80	90	5	105,6	02.10.2013 10:49	20,10	19,70
02.10.2013 10:35	81	88	7	99,6	02.10.2013 10:50	20,00	19,70
02.10.2013 10:35	82	102	6	77,1	02.10.2013 10:51	20,10	19,70
02.10.2013 10:35	83	108	6	70,1	02.10.2013 10:52	20,10	19,70
02.10.2013 10:35	84	102	7	109,1	02.10.2013 10:53	20,10	19,70
02.10.2013 10:35	85	101	7	107	02.10.2013 10:54	20,10	19,70
02.10.2013 10:35	86	102	7	84,6	02.10.2013 10:55	20,10	19,80
02.10.2013 10:35	87	103	7	46,6	02.10.2013 10:56	20,10	19,80
02.10.2013 10:35	88	108	7	29,3	02.10.2013 10:57	20,10	19,80
02.10.2013 10:35	89	114	7	16,3	02.10.2013 10:58	20,10	19,80
02.10.2013 10:35	90	128	7	16,7	02.10.2013 10:59	20,20	19,80
02.10.2013 10:35	91	140	7	11,4	02.10.2013 11:00	20,20	19,80
02.10.2013 10:35	92	150	7	7,1	02.10.2013 11:01	20,20	19,80
02.10.2013 10:35	93	162	7	6,5	02.10.2013 11:02	20,20	19,90
02.10.2013 10:35	94	159	8	6,4	02.10.2013 11:03	20,10	19,90
02.10.2013 10:35	95	140	9	7	02.10.2013 11:04	20,20	19,90
02.10.2013 10:35	96	121	11	8,6	02.10.2013 11:05	20,20	19,90
02.10.2013 10:35	97	103	15	10,9	02.10.2013 11:06	20,20	19,90
02.10.2013 10:35	98	94	17	10,7	02.10.2013 11:07	20,20	19,90
02.10.2013 10:35	99	91	15	10,5	02.10.2013 11:08	20,20	19,90
02.10.2013 10:35	100	98	15	11,3	02.10.2013 11:09	20,20	19,90
02.10.2013 10:35	101	112	19	11,3	02.10.2013 11:10	20,20	20,00
02.10.2013 10:35	102	134	34	19,9			
02.10.2013 10:35	103	174	36	26,2			
02.10.2013 10:35	104	219	30	32,5			
02.10.2013 10:35	105	245	25	49,9			
02.10.2013 10:35	106	255	25	35,7			



I Beispiel: Quantitative und qualitative Darstellung Berechnungsergebnisse

s	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	C	C
FDS Time	C_FID_Atem	C_FID_1_akt	C_FID_2_akt	C_FID_3_inak	C_FID_4_inak	C_FID_5_inak	C_FID_6_inak	C_FID_7_inak	C_FID_8_inak	T_extern	T_intern
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,80	19,80
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,80	19,80
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,80	19,80
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,81	19,80
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,81	19,80
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,81	19,80
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,82	19,80
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,82	19,80
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,82	19,80
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,82	19,80
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,83	19,80
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,83	19,80
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,83	19,80
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	19,83	19,80
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	19,83	19,80
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,84	19,80
16	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	19,84	19,80
17	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,91	0,00	19,84	19,80
18	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,88	0,00	19,84	19,80
19	0,00	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,86	0,00	19,84	19,81
20	0,00	0,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,83	0,00	19,84	19,81
21	0,00	2,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,82	0,00	19,84	19,81
22	0,00	4,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,58	0,00	19,84	19,81
23	0,00	4,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	19,84	19,81
24	0,00	12,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37	0,00	19,84	19,82
25	0,00	12,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,88	0,00	19,84	19,82
26	0,00	9,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	110,66	0,00	19,85	19,82
27	0,00	5,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	154,85	0,00	19,84	19,82
28	0,00	14,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	122,36	0,00	19,84	19,82
29	0,00	20,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	64,18	0,00	19,83	19,82
30	0,00	12,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	117,16	0,00	19,83	19,82
31	0,00	15,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	146,53	0,00	19,83	19,82
32	0,00	5,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	140,35	0,00	19,83	19,82
33	0,00	29,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	92,92	0,00	19,83	19,81
34	0,00	17,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	104,29	0,00	19,82	19,81
35	0,00	13,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	109,30	0,00	19,82	19,81
36	0,00	51,64	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	30,73	0,00	19,82	19,81
37	0,00	34,35	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	5,38	0,00	19,83	19,81
38	0,00	74,19	0,04	0,00	0,01	0,00	0,00	22,13	0,19	19,85	19,81
39	0,00	129,33	0,25	0,00	0,01	0,00	0,00	32,64	2,20	19,86	19,81
40	0,00	50,75	0,17	0,00	0,01	0,00	0,00	38,18	2,16	19,89	19,81
41	0,00	97,65	0,07	0,00	0,06	0,00	0,00	39,52	0,76	19,88	19,81

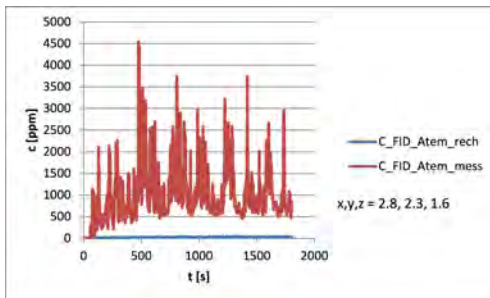


J Vergleiche der Mess- und Berechnungsergebnisse

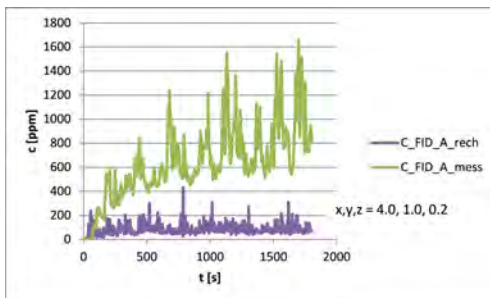
J.1 Vergleiche zu Propan-Versuchen (Untersuchungsschritt 1)

J.1.1 Szenarien mit Luftführung über Nebenräume

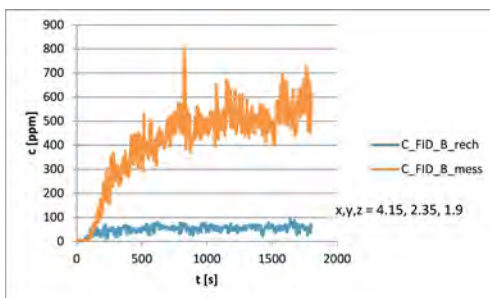
Versuch 1004-2



Relative Abweichung $L_2 = 0,97930$
 Inneres Produkt $\cos = 0,84293$
 Projektionskoeffizient $a = 34,17906$

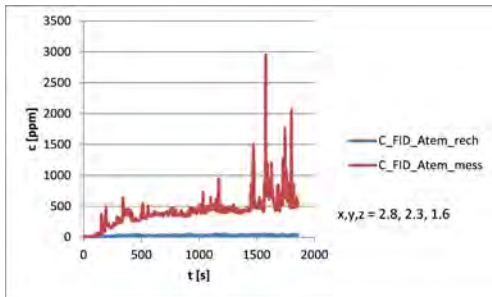


Relative Abweichung $L_2 = 0,89063$
 Inneres Produkt $\cos = 0,86602$
 Projektionskoeffizient $a = 6,71405$

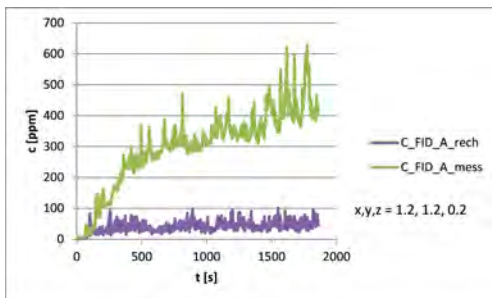


Relative Abweichung $L_2 = 0,88538$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96117$
 Projektionskoeffizient $a = 8,01661$

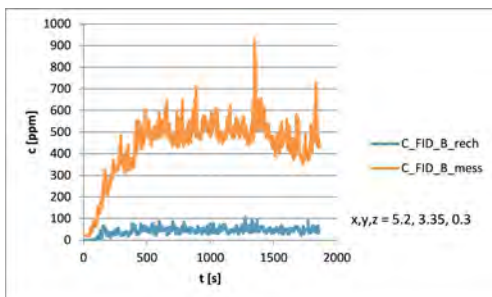
Versuch 1005-2



Relative Abweichung $L_2 = 0,94037$
 Inneres Produkt $\cos = 0,92073$
 Projektionskoeffizient $a = 14,13586$

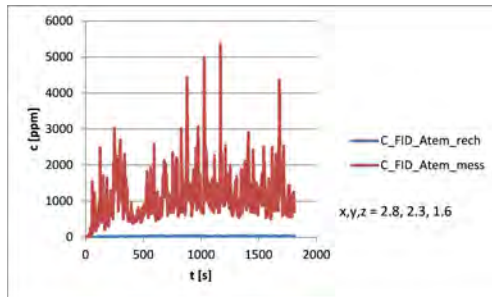


Relative Abweichung $L_2 = 0,87287$
 Inneres Produkt $\cos = 0,92854$
 Projektionskoeffizient $a = 6,70208$

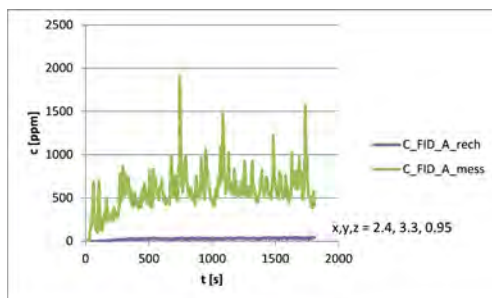


Relative Abweichung $L_2 = 0,90285$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96639$
 Projektionskoeffizient $a = 9,57605$

Versuch 1006-2

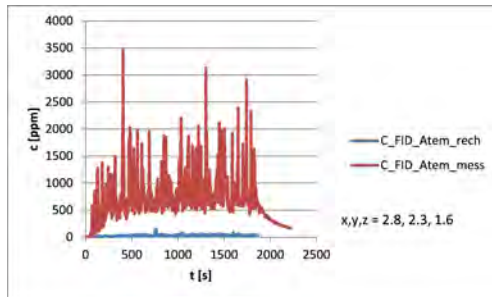


Relative Abweichung $L_2 = 0,97953$
 Inneres Produkt $\cos = 0,86130$
 Projektionskoeffizient $a = 3611319$

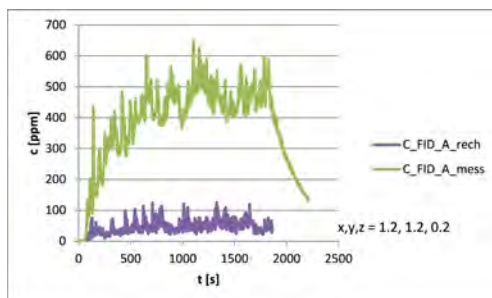


Relative Abweichung $L_2 = 0,95482$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93699$
 Projektionskoeffizient $a = 19,36820$

Versuch 1007-2

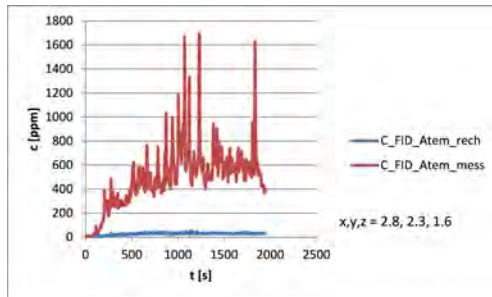


Relative Abweichung $L_2 = 0,96509$
 Inneres Produkt $\cos = 0,86373$
 Projektionskoeffizient $a = 21,23994$

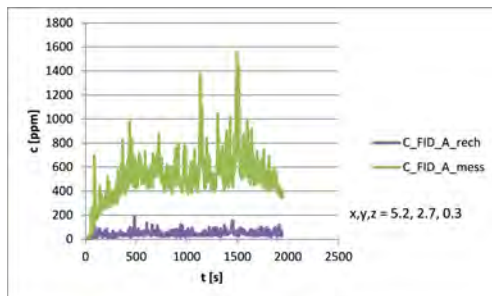


Relative Abweichung $L_2 = 0,88706$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93158$
 Projektionskoeffizient $a = 7,60862$

Versuch 1008-2

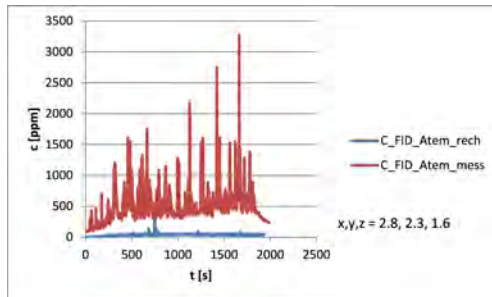


Relative Abweichung $L_2 = 0,94997$
 Inneres Produkt $\cos = 0,94140$
 Projektionskoeffizient $a = 17,67196$

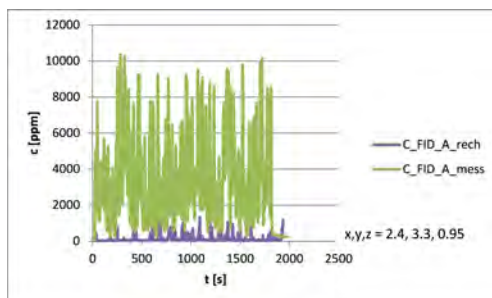


Relative Abweichung $L_2 = 0,91846$
 Inneres Produkt $\cos = 0,90122$
 Projektionskoeffizient $a = 9,85780$

Versuch 1010-1

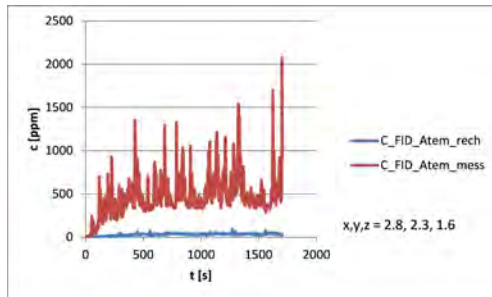


Relative Abweichung $L_2 = 0,93595$
 Inneres Produkt $\cos = 0,81957$
 Projektionskoeffizient $a = 10,94072$

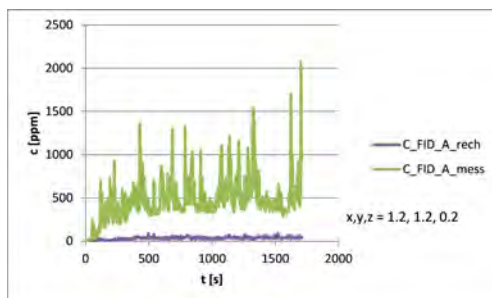


Relative Abweichung $L_2 = 0,97285$
 Inneres Produkt $\cos = 0,47425$
 Projektionskoeffizient $a = 7,86362$

Versuch 1011-1

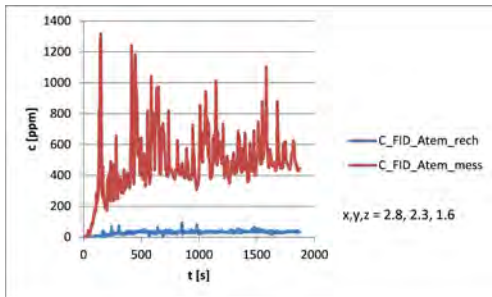


Relative Abweichung $L_2 = 0,94175$
 Inneres Produkt $\cos = 0,90721$
 Projektionskoeffizient $a = 14,03501$

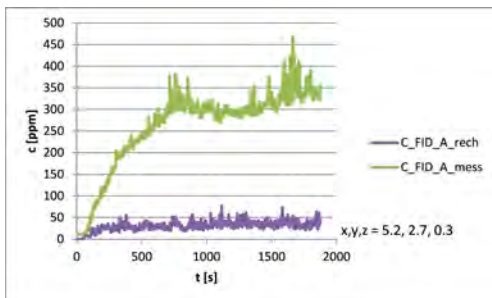


Relative Abweichung $L_2 = 0,91742$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96385$
 Projektionskoeffizient $a = 11,21081$

Versuch 1012-1

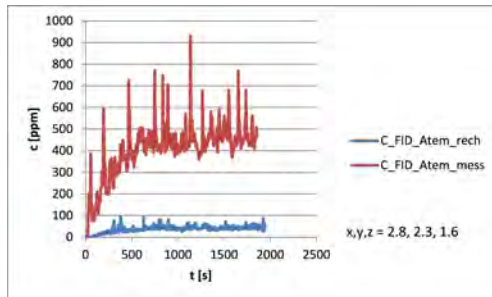


Relative Abweichung $L_2 = 0,94228$
 Inneres Produkt $\cos = 0,92071$
 Projektionskoeffizient $a = 14,60473$

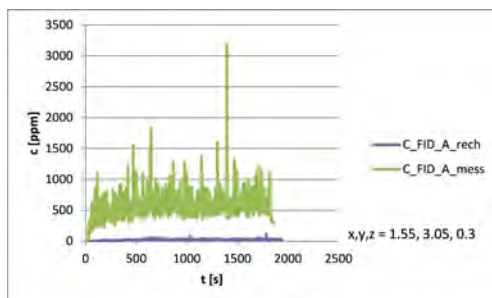


Relative Abweichung $L_2 = 0,88644xxx$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96527$
 Projektionskoeffizient $a = 8,16611$

Versuch 1013-1

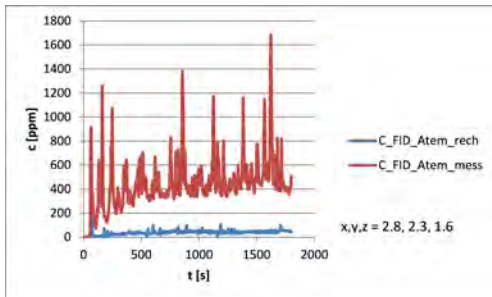


Relative Abweichung $L_2 = 0,90882$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96292$
 Projektionskoeffizient $a = 10,12904$

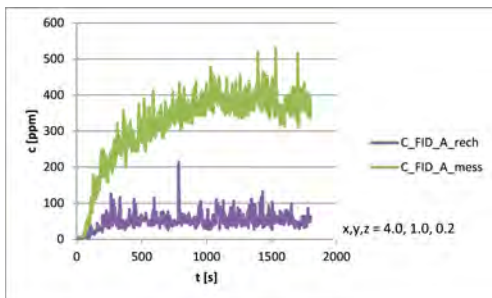


Relative Abweichung $L_2 = 0,96475$
 Inneres Produkt $\cos = 0,87430$
 Projektionskoeffizient $a = 21,56391$

Versuch 1014-1

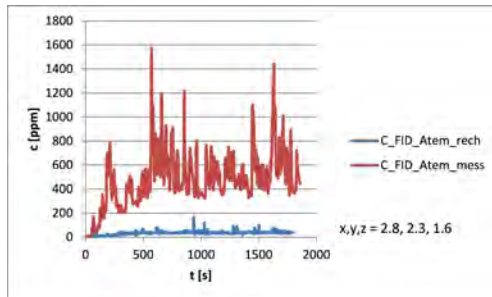


Relative Abweichung $L_2 = 0,92735$
 Inneres Produkt $\cos = 0,88157$
 Projektionskoeffizient $a = 10,57568$

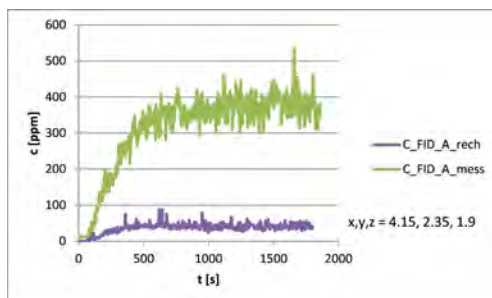


Relative Abweichung $L_2 = 0,84633$
 Inneres Produkt $\cos = 0,94899$
 Projektionskoeffizient $a = 5,80120$

Versuch 1015-1

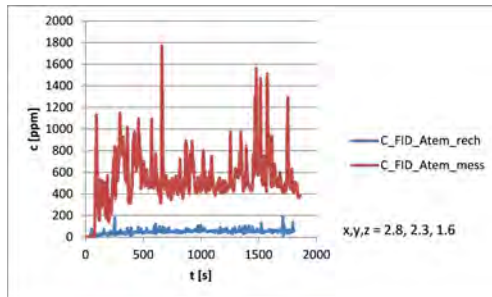


Relative Abweichung $L_2 = 0,93524$
 Inneres Produkt $\cos = 0,90239$
 Projektionskoeffizient $a = 12,47261$

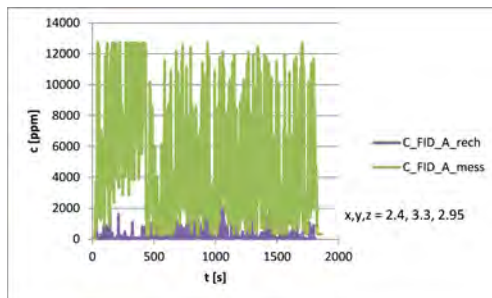


Relative Abweichung $L_2 = 0,88499$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97738$
 Projektionskoeffizient $a = 8,28040$

Versuch 1016-1

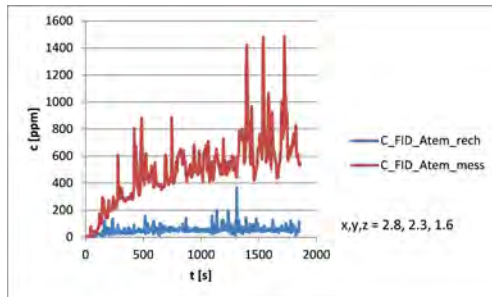


Relative Abweichung $L_2 = 0,91977$
 Inneres Produkt $cos = 0,89848$
 Projektionskoeffizient $a = 9,95644$

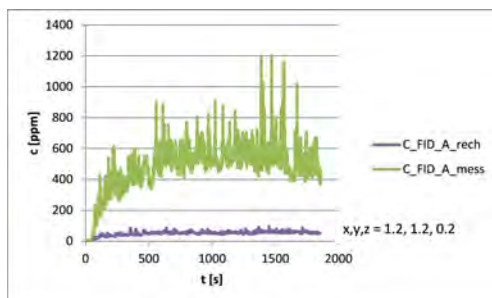


Relative Abweichung $L_2 = 0,97466$
 Inneres Produkt $cos = 0,4459$
 Projektionskoeffizient $a = 7,29106$

Versuch 1017-1

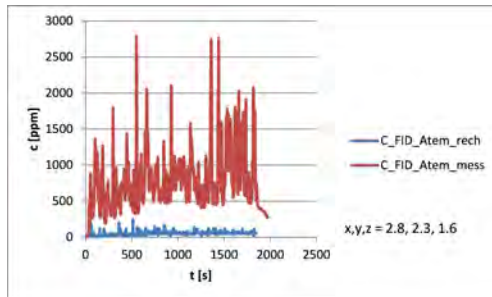


Relative Abweichung $L_2 = 0,90801$
 Inneres Produkt $cos = 0,88751$
 Projektionskoeffizient $a = 8,44427$

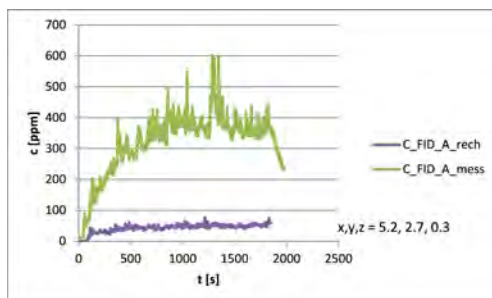


Relative Abweichung $L_2 = 0,89923$
 Inneres Produkt $cos = 0,97457$
 Projektionskoeffizient $a = 9,39752$

Versuch 1018-1

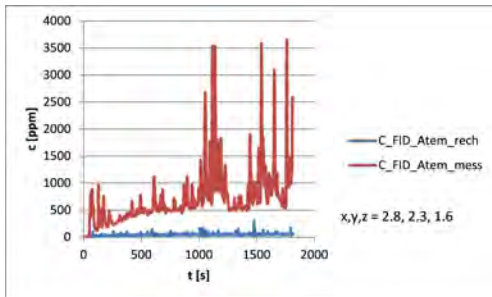


Relative Abweichung $L_2 = 0,94663$
 Inneres Produkt $\cos = 0,82634$
 Projektionskoeffizient $a = 12,62456$

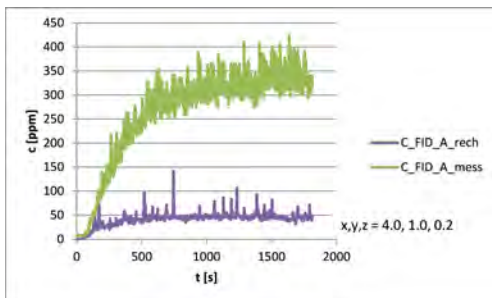


Relative Abweichung $L_2 = 0,86652$
 Inneres Produkt $\cos = 0,98829$
 Projektionskoeffizient $a = 7,30402$

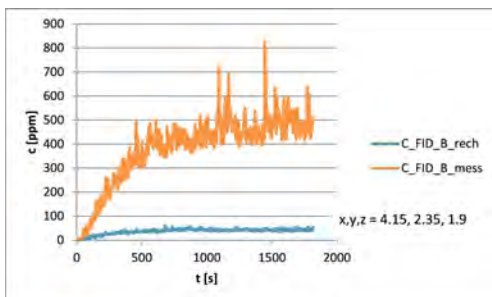
Versuch 1019-1



Relative Abweichung $L_2 = 0,95115$
 Inneres Produkt $\cos = 0,82648$
 Projektionskoeffizient $a = 13,81291$

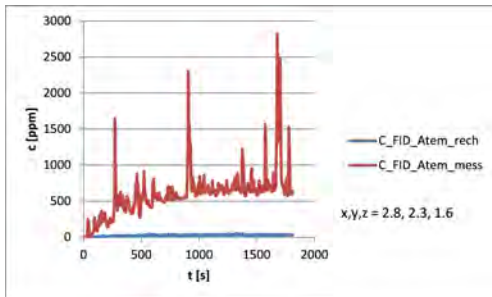


Relative Abweichung $L_2 = 0,84856$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97499$
 Projektionskoeffizient $a = 6,24096$

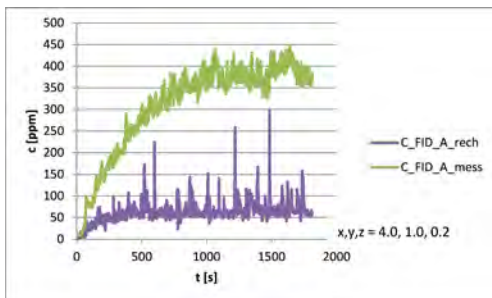


Relative Abweichung $L_2 = 0,90610$
 Inneres Produkt $\cos = 0,98639$
 Projektionskoeffizient $a = 10,34637$

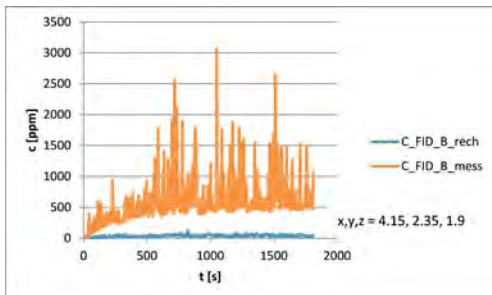
Versuch 1020-1



Relative Abweichung $L_2 = 0,96204$
 Inneres Produkt $\cos = 0,92882$
 Projektionskoeffizient $a = 22,65414$

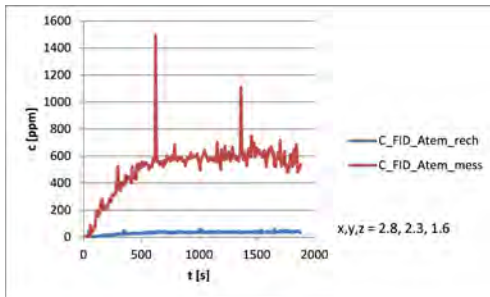


Relative Abweichung $L_2 = 0,81193$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95103$
 Projektionskoeffizient $a = 4,74953$

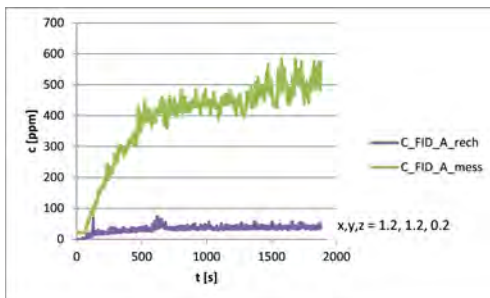


Relative Abweichung $L_2 = 0,94404$
 Inneres Produkt $\cos = 0,87009$
 Projektionskoeffizient $a = 13,39729$

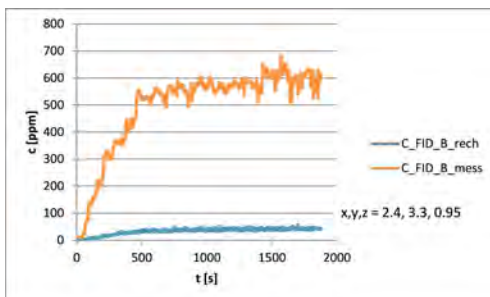
Versuch 1021-1



Relative Abweichung $L_2 = 0,93858$
 Inneres Produkt $\cos = 0,98427$
 Projektionskoeffizient $a = 15,75637$

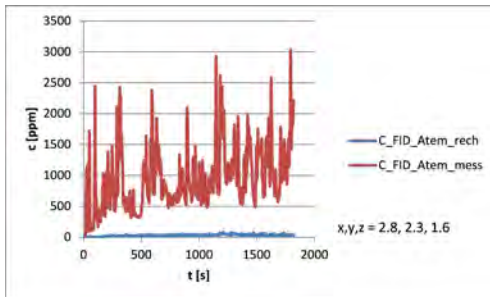


Relative Abweichung $L_2 = 0,91658$
 Inneres Produkt $\cos = 0,98310$
 Projektionskoeffizient $a = 11,56707$

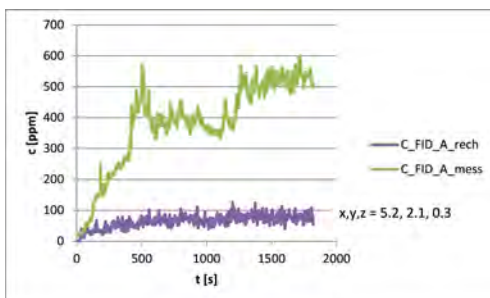


Relative Abweichung $L_2 = 0,93174$
 Inneres Produkt $\cos = 0,99260$
 Projektionskoeffizient $a = 14,42574$

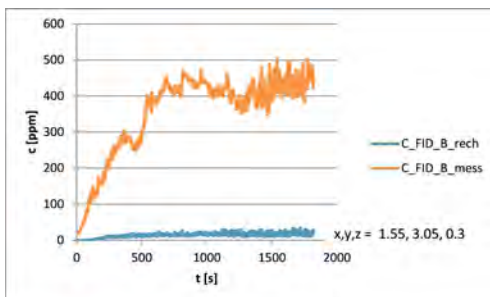
Versuch 1022-1



Relative Abweichung $L_2 = 0,97145$
 Inneres Produkt $\cos = 0,88221$
 Projektionskoeffizient $a = 27,14934$

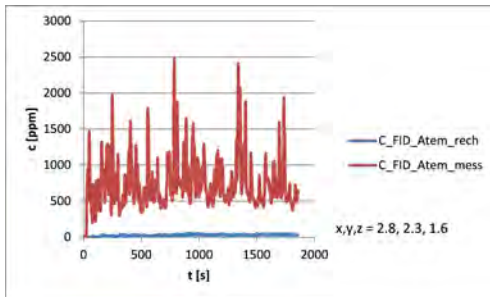


Relative Abweichung $L_2 = 0,83760$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97347$
 Projektionskoeffizient $a = 5,80364$

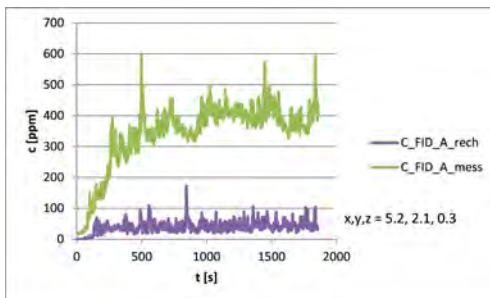


Relative Abweichung $L_2 = 0,95978$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96578$
 Projektionskoeffizient $a = 23,15786$

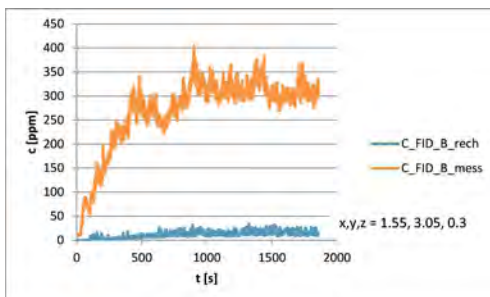
Versuch 1023-1



Relative Abweichung $L_2 = 0,96771$
 Inneres Produkt $\cos = 0,86493$
 Projektionskoeffizient $a = 23,03411$



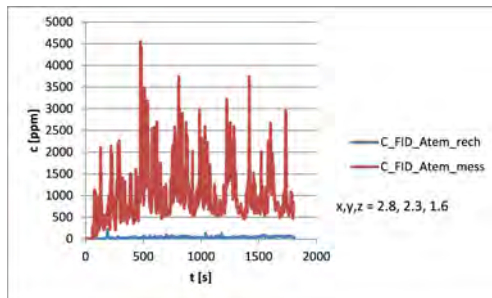
Relative Abweichung $L_2 = 0,88736$
 Inneres Produkt $\cos = 0,92840$
 Projektionskoeffizient $a = 7,57366$



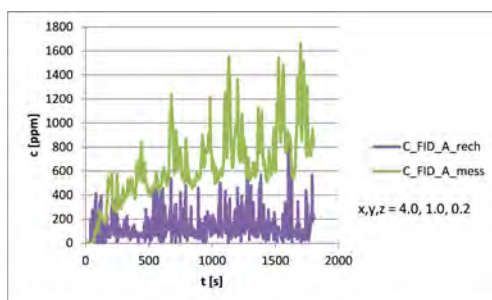
Relative Abweichung $L_2 = 0,95508$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93603$
 Projektionskoeffizient $a = 19,43787$

J.1.2 Szenarien ohne Luftführung über Nebenräume

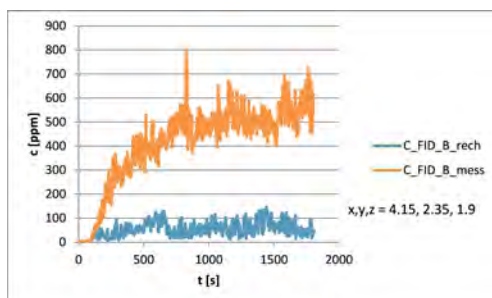
Versuch 1004-3



Relative Abweichung $L_2 = 0,97176$
 Inneres Produkt $\cos = 0,79071$
 Projektionskoeffizient $a = 21,94539$

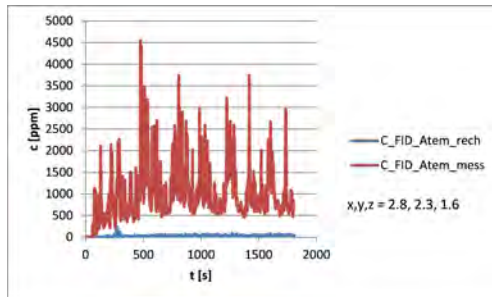


Relative Abweichung $L_2 = 0,83403$
 Inneres Produkt $\cos = 0,77234$
 Projektionskoeffizient $a = 3,33102$

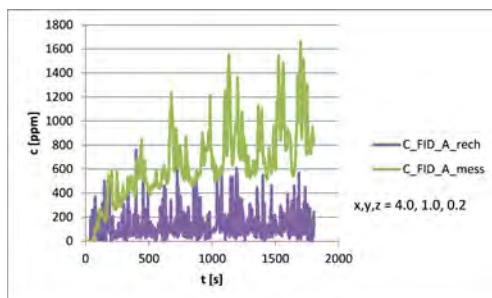


Relative Abweichung $L_2 = 0,88029$
 Inneres Produkt $\cos = 0,88889$
 Projektionskoeffizient $a = 6,47896$

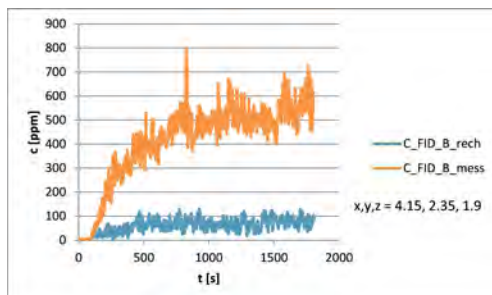
Versuch 1004-4



Relative Abweichung $L_2 = 0,97133$
 Inneres Produkt $\cos = 0,78158$
 Projektionskoeffizient $a = 21,10386$

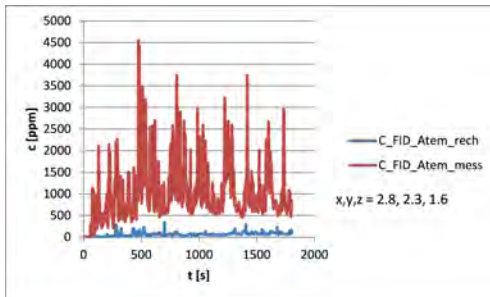


Relative Abweichung $L_2 = 0,84071$
 Inneres Produkt $\cos = 0,75374$
 Projektionskoeffizient $a = 3,28552$

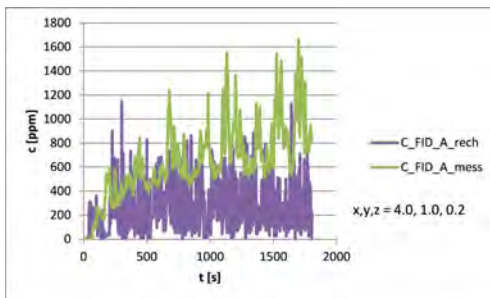


Relative Abweichung $L_2 = 0,85946$
 Inneres Produkt $\cos = 0,94500$
 Projektionskoeffizient $a = 6,29140$

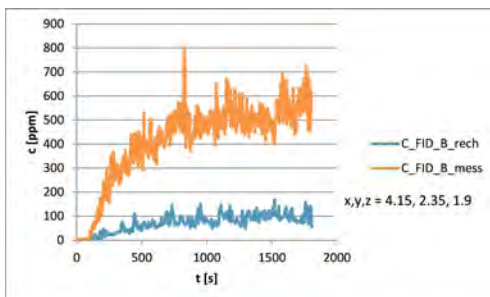
Versuch 1004-5



Relative Abweichung $L_2 = 0,94826$
 Inneres Produkt $\cos = 0,79115$
 Projektionskoeffizient $a = 11,89567$

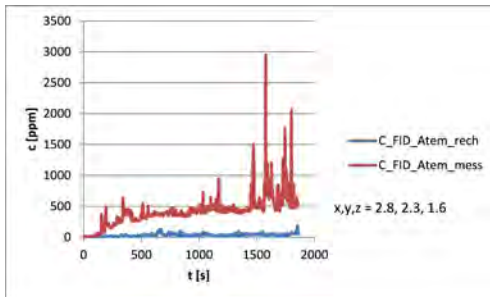


Relative Abweichung $L_2 = 0,71596$
 Inneres Produkt $\cos = 0,75979$
 Projektionskoeffizient $a = 1,65174$

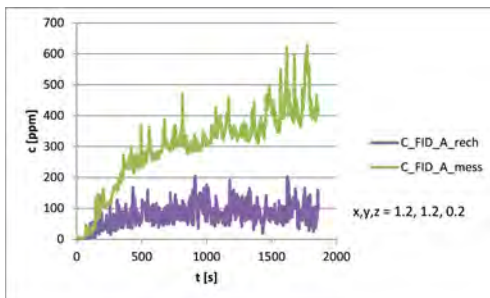


Relative Abweichung $L_2 = 0,83050$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96558$
 Projektionskoeffizient $a = 5,45942$

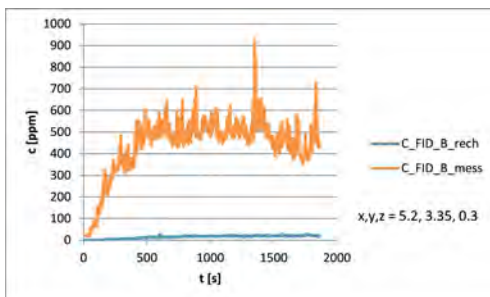
Versuch 1005-3



Relative Abweichung $L_2 = 0,92890$
 Inneres Produkt $\cos = 0,83311$
 Projektionskoeffizient $a = 9,59368$

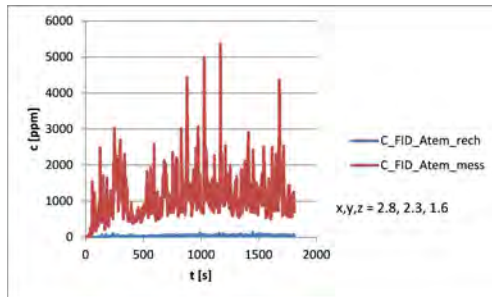


Relative Abweichung $L_2 = 0,75819$
 Inneres Produkt $\cos = 0,92531$
 Projektionskoeffizient $a = 3,44272$

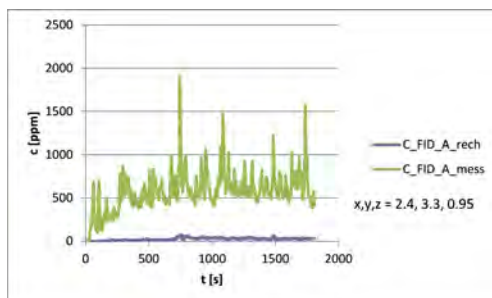


Relative Abweichung $L_2 = 0,96513$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96219$
 Projektionskoeffizient $a = 26,51584$

Versuch 1006-3

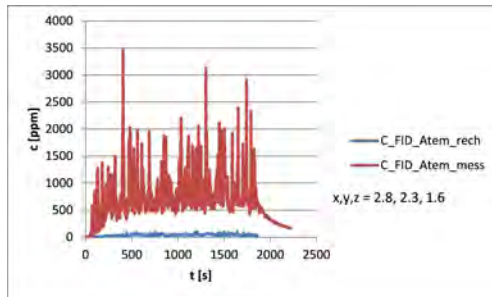


Relative Abweichung $L_2 = 0,96624$
 Inneres Produkt $\cos = 0,85250$
 Projektionskoeffizient $a = 21,38318$

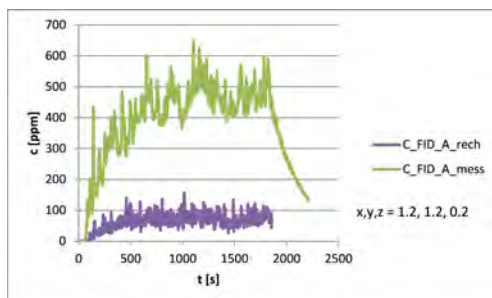


Relative Abweichung $L_2 = 0,95632$
 Inneres Produkt $\cos = 0,91023$
 Projektionskoeffizient $a = 18,87806$

Versuch 1007-3

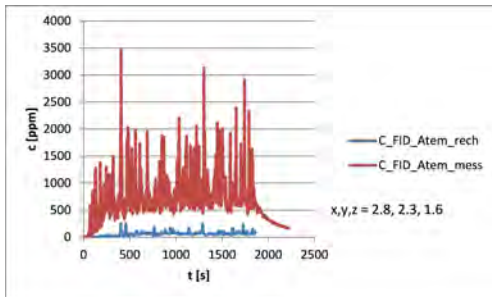


Relative Abweichung $L_2 = 0,95778$
 Inneres Produkt $\cos = 0,86260$
 Projektionskoeffizient $a = 17,48785$

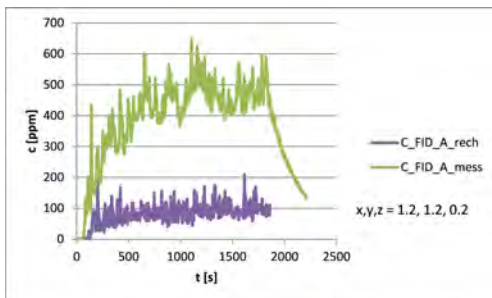


Relative Abweichung $L_2 = 0,84448$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96214$
 Projektionskoeffizient $a = 5,90791$

Versuch 1007-4

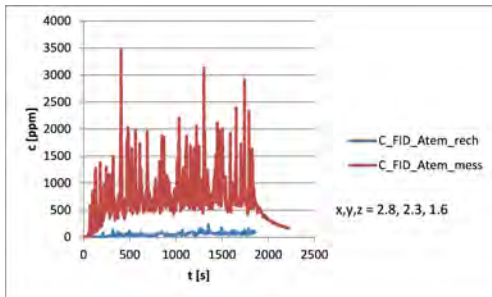


Relative Abweichung $L_2 = 0,93481$
 Inneres Produkt $\cos = 0,84268$
 Projektionskoeffizient $a = 10,73640$

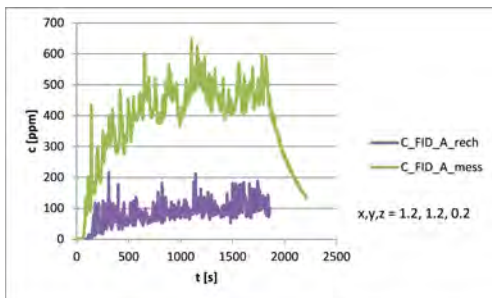


Relative Abweichung $L_2 = 0,80705$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95773$
 Projektionskoeffizient $a = 4,69751$

Versuch 1007-5

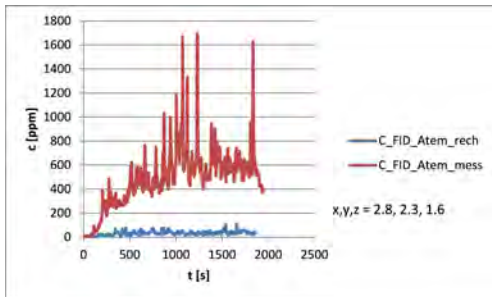


Relative Abweichung $L_2 = 0,94202$
 Inneres Produkt $\cos = 0,83794$
 Projektionskoeffizient $a = 11,94925$

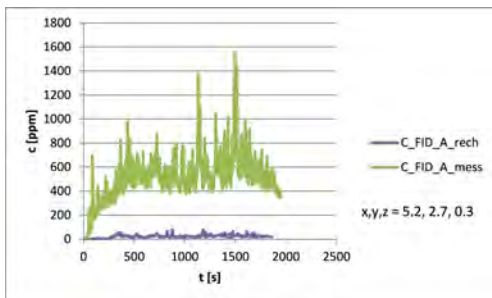


Relative Abweichung $L_2 = 0,79889$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95286$
 Projektionskoeffizient $a = 4,45624$

Versuch 1008-3

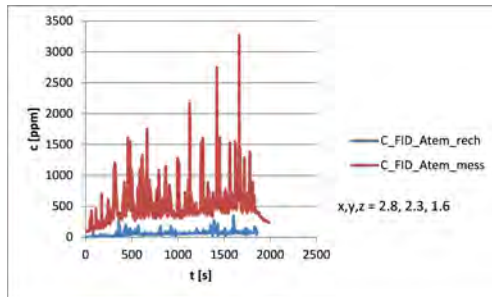


Relative Abweichung $L_2 = 0,94125$
 Inneres Produkt $\cos = 0,88728$
 Projektionskoeffizient $a = 13,28717$

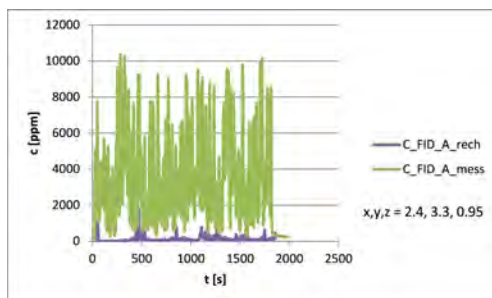


Relative Abweichung $L_2 = 0,95550$
 Inneres Produkt $\cos = 0,90667$
 Projektionskoeffizient $a = 18,37850$

Versuch 1010-2

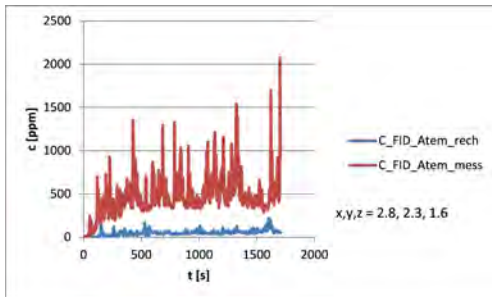


Relative Abweichung $L_2 = 0,89827$
 Inneres Produkt $\cos = 0,80619$
 Projektionskoeffizient $a = 6,18717$

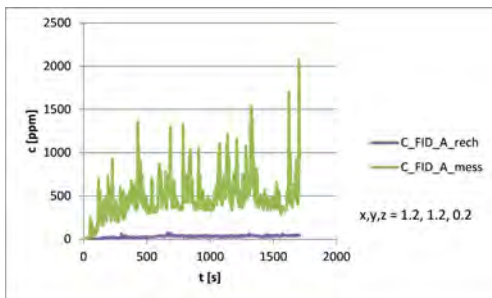


Relative Abweichung $L_2 = 0,97529$
 Inneres Produkt $\cos = 0,53709$
 Projektionskoeffizient $a = 11,29854$

Versuch 1011-2

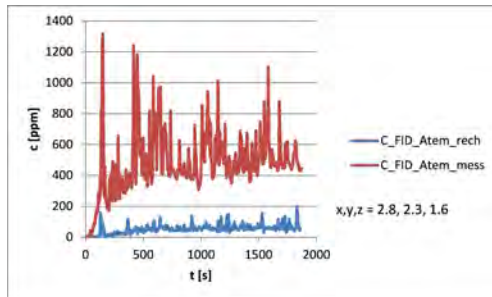


Relative Abweichung $L_2 = 0,90702$
 Inneres Produkt $\cos = 0,84518$
 Projektionskoeffizient $a = 7,52152$

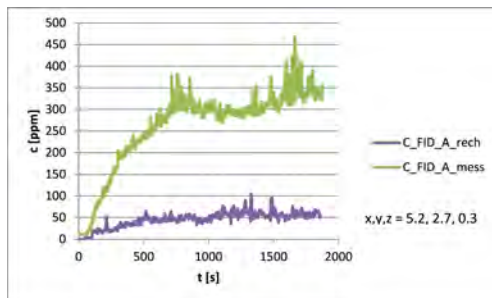


Relative Abweichung $L_2 = 0,92619$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96768$
 Projektionskoeffizient $a = 12,65176$

Versuch 1012-2

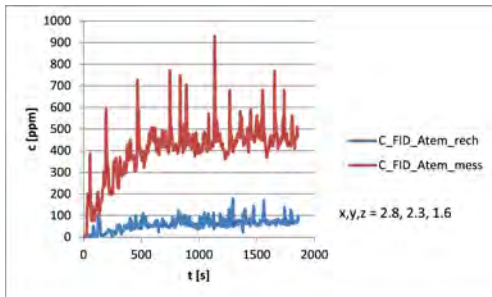


Relative Abweichung $L_2 = 0,89854$
 Inneres Produkt $cos = 0,89415$
 Projektionskoeffizient $a = 7,76655$

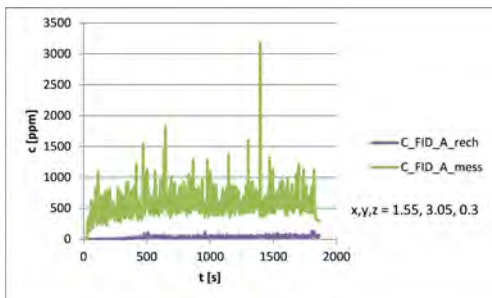


Relative Abweichung $L_2 = 0,82772$
 Inneres Produkt $cos = 0,98276$
 Projektionskoeffizient $a = 5,56919$

Versuch 1013-2

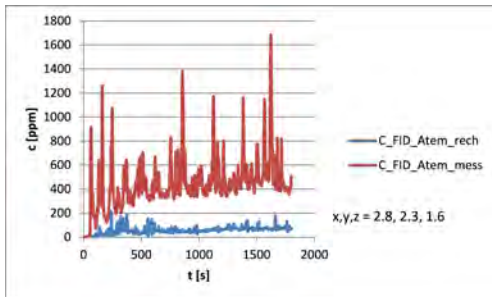


Relative Abweichung $L_2 = 0,85656$
 Inneres Produkt $cos = 0,94255$
 Projektionskoeffizient $a = 6,12750$

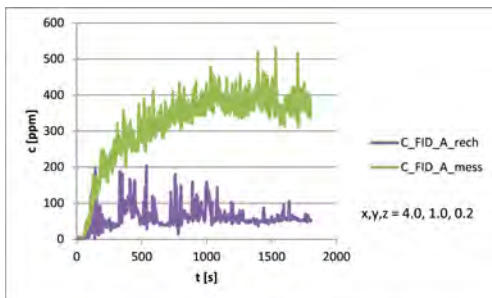


Relative Abweichung $L_2 = 0,94203$
 Inneres Produkt $cos = 0,86533$
 Projektionskoeffizient $a = 12,78296$

Versuch 1014-2

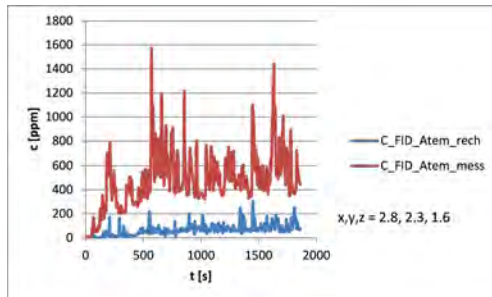


Relative Abweichung $L_2 = 0,88718$
 Inneres Produkt $\cos = 0,86699$
 Projektionskoeffizient $a = 6,51917$

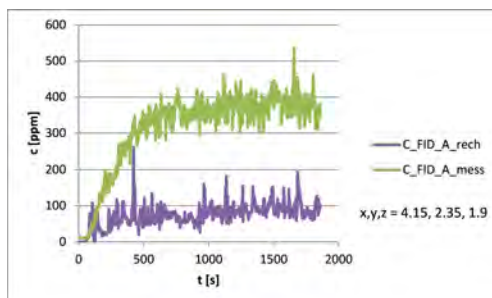


Relative Abweichung $L_2 = 0,82605$
 Inneres Produkt $\cos = 0,90259$
 Projektionskoeffizient $a = 4,56819$

Versuch 1015-2

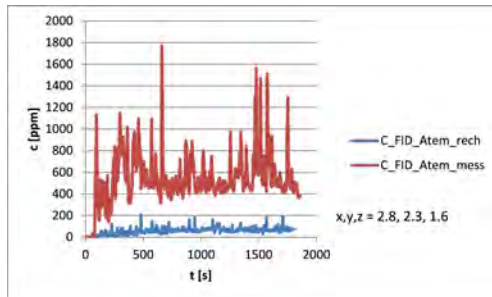


Relative Abweichung $L_2 = 0,87499$
 Inneres Produkt $cos = 0,84196$
 Projektionskoeffizient $a = 5,49899$

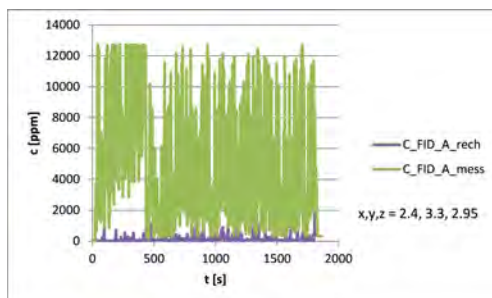


Relative Abweichung $L_2 = 0,77393$
 Inneres Produkt $cos = 0,95169$
 Projektionskoeffizient $a = 3,94425$

Versuch 1016-2

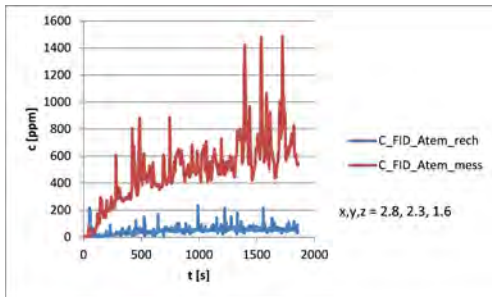


Relative Abweichung $L_2 = 0,90639$
 Inneres Produkt $\cos = 0,87263$
 Projektionskoeffizient $a = 8,00027$

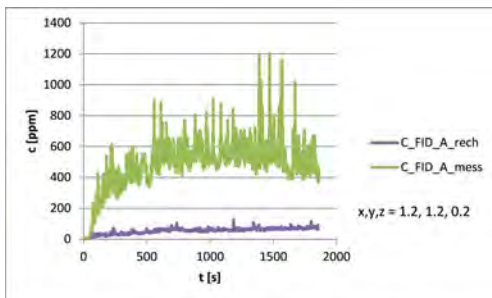


Relative Abweichung $L_2 = 0,98235$
 Inneres Produkt $\cos = 0,40574$
 Projektionskoeffizient $a = 8,87865$

Versuch 1017-2

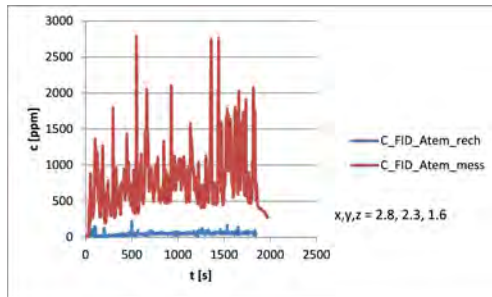


Relative Abweichung $L_2 = 0,91081$
 Inneres Produkt $\cos = 0,88214$
 Projektionskoeffizient $a = 8,60151$

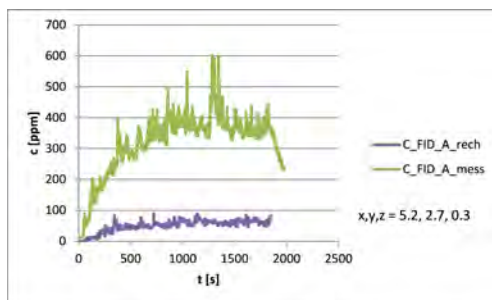


Relative Abweichung $L_2 = 0,89023$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96814$
 Projektionskoeffizient $a = 8,50375$

Versuch 1018-2

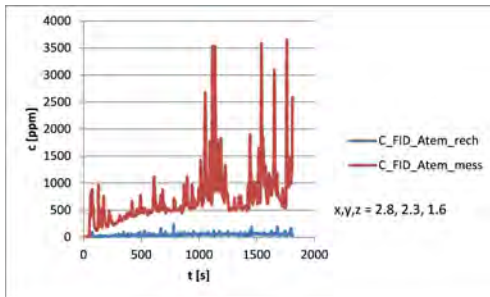


Relative Abweichung $L_2 = 0,95059$
 Inneres Produkt $\cos = 0,85583$
 Projektionskoeffizient $a = 14,68135$

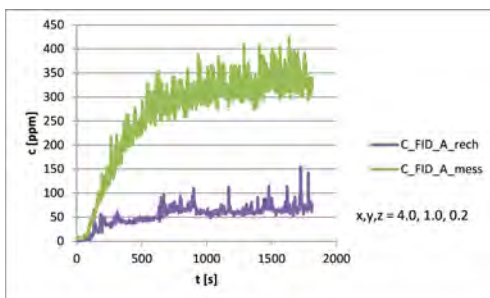


Relative Abweichung $L_2 = 0,84221$
 Inneres Produkt $\cos = 0,98304$
 Projektionskoeffizient $a = 6,10425$

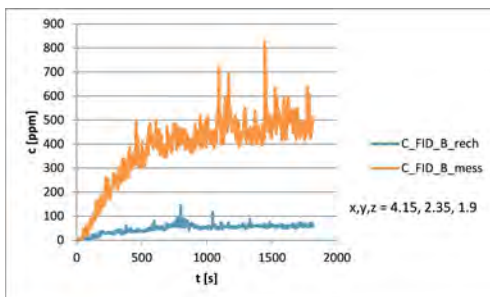
Versuch 1019-2



Relative Abweichung $L_2 = 0,95038$
 Inneres Produkt $\cos = 0,82088$
 Projektionskoeffizient $a = 13,40729$

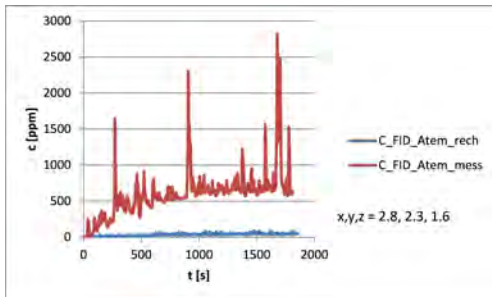


Relative Abweichung $L_2 = 0,79521$
 Inneres Produkt $\cos = 0,98081$
 Projektionskoeffizient $a = 4,67346$

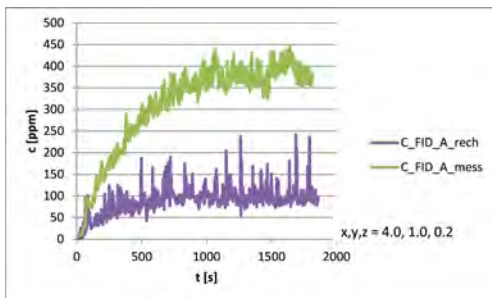


Relative Abweichung $L_2 = 0,87545$
 Inneres Produkt $\cos = 0,98319$
 Projektionskoeffizient $a = 7,74217$

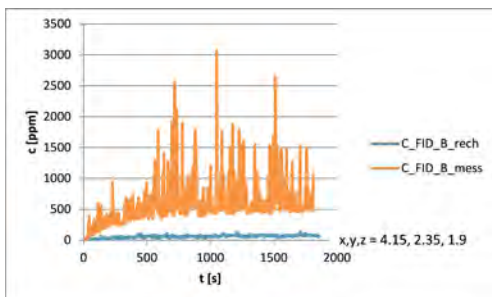
Versuch 1020-2



Relative Abweichung $L_2 = 0,94894$
 Inneres Produkt $\cos = 0,90212$
 Projektionskoeffizient $a = 15,83996$

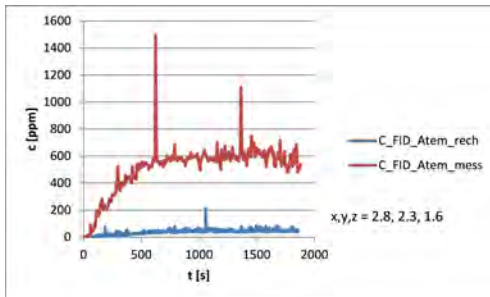


Relative Abweichung $L_2 = 0,72463$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97053$
 Projektionskoeffizient $a = 3,37997$

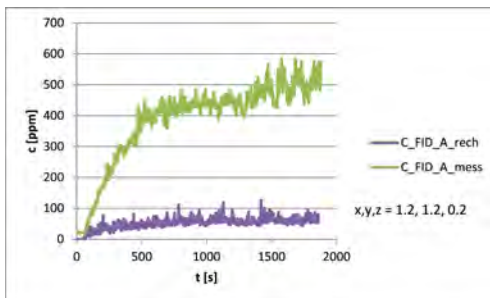


Relative Abweichung $L_2 = 0,91460$
 Inneres Produkt $\cos = 0,88127$
 Projektionskoeffizient $a = 8,96977$

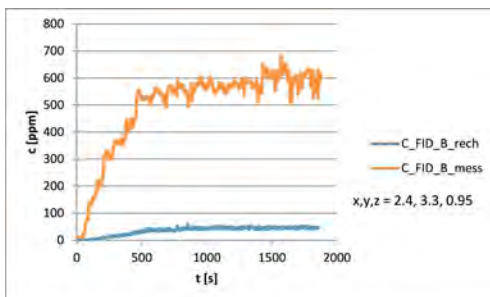
Versuch 1021-2



Relative Abweichung $L_2 = 0,92463$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95832$
 Projektionskoeffizient $a = 12,14074$

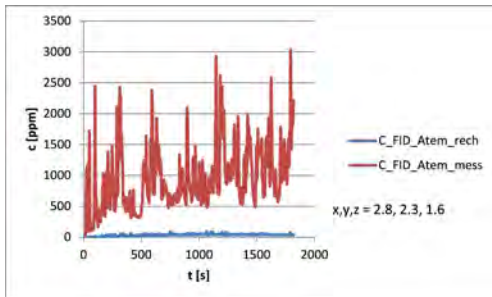


Relative Abweichung $L_2 = 0,86873$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97999$
 Projektionskoeffizient $a = 7,29289$

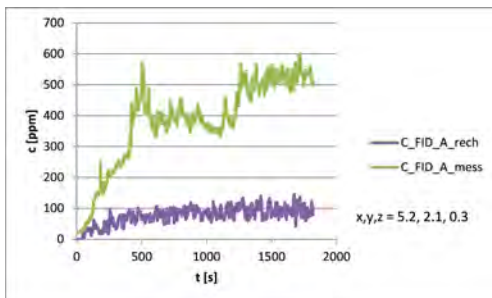


Relative Abweichung $L_2 = 0,92667$
 Inneres Produkt $\cos = 0,98765$
 Projektionskoeffizient $a = 13,28964$

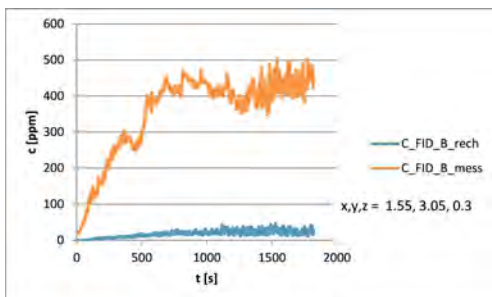
Versuch 1022-2



Relative Abweichung $L_2 = 0,96796$
 Inneres Produkt $\cos = 0,86753$
 Projektionskoeffizient $a = 23,16598$

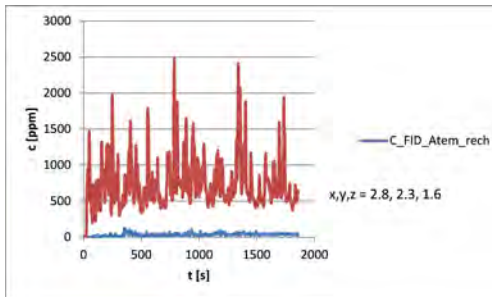


Relative Abweichung $L_2 = 0,80502$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97329$
 Projektionskoeffizient $a = 4,82534$

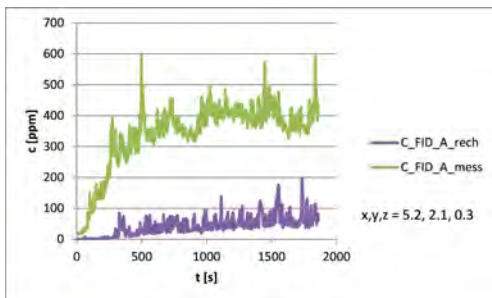


Relative Abweichung $L_2 = 0,95041$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95357$
 Projektionskoeffizient $a = 18,28977$

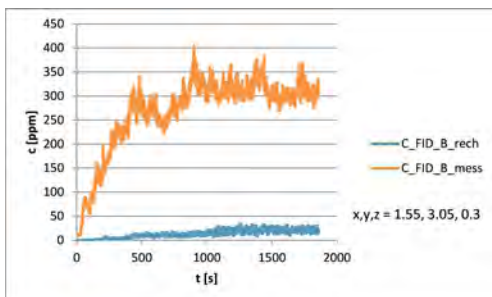
Versuch 1023-2



Relative Abweichung $L_2 = 0,95882$
 Inneres Produkt $\cos = 0,85028$
 Projektionskoeffizient $a = 17,41172$



Relative Abweichung $L_2 = 0,87077$
 Inneres Produkt $\cos = 0,88709$
 Projektionskoeffizient $a = 5,96432$



Relative Abweichung $L_2 = 0,94923$
 Inneres Produkt $\cos = 0,91996$
 Projektionskoeffizient $a = 16,58759$

J.2 Vergleiche zu Isopropanol-Versuchen (Untersuchungsschritt 2)

J.2.1 Ergebnisse der Emissionsberechnung

Szenario	$\dot{m}_{Mess,A1} [g/(s m^2)]$	$\dot{m}_{Rech,A1} [g/(s m^2)]$	$\dot{m}_{Mess,A2} [g/(s m^2)]$	$\dot{m}_{Rech,A2} [g/(s m^2)]$
2001-1	0,02777777778	0,00414934359	0,04629629630	0,00608870771
2002-1	0,11111111111	0,00	0,12962962963	0,03682192234
2002-2	0,11111111111	0,02893904923	0,12962962963	0,03258090122
2003-1	–	–	0,11111111111	0,04373980569
2003-2	–	–	0,11111111111	0,03144523463
2004-1	0,15740740741	0,0358240400	0,12037037037	0,03622029928
2004-2	0,15740740741	0,03660625852	0,12037037037	0,03192849896
2005-1	0,00925925926	0,00097667304	0,04629629630	0,00623993175
2006-1	0,16666666667	0,03218230646	0,13888888889	0,04191572099
2006-2	0,16666666667	0,03123932525	0,13888888889	0,03431323387
2007-1	–	–	0,15740740741	0,04569124686
2007-2	–	–	0,15740740741	0,03217376562
2008-1	0,16666666667	0,03029497529	0,12962962963	0,03360275409
2008-2	0,16666666667	0,03775515910	0,12962962963	0,03445810349
2009-1	0,11111111111	0,04204011881	0,15740740741	0,05322474372
2009-2	0,11111111111	0,02967956298	0,15740740741	0,03641329839
2010-1	0,3703703704	0,00596548104	0,02777777778	0,00613195579
2011-1	0,10185185185	0,02998476224	0,13888888889	0,04613356746
2011-2	0,10185185185	0,02863291566	0,13888888889	0,03119462626
2012-1	–	–	0,13888888889	0,05614499962
2012-2	–	–	0,13888888889	0,03739354533
2013-1	0,15740740741	0,03101620040	0,12962962963	0,03288931544
2013-2	0,15740740741	0,03032851870	0,12962962963	0,03032851870
2014-1	0,04629629630	0,00464074255	0,03703703704	0,00634690810
2015-1	0,11111111111	0,03436800054	0,12037037037	0,03589515720
2015-2	0,11111111111	0,02966283201	0,12037037037	0,02892764870
2016-1	–	–	0,13888888889	0,03557714801
2016-2	–	–	0,13888888889	0,03509899655
2017-1	0,16666666667	0,03127950237	0,12962962963	0,03354911803
2017-2	0,16666666667	0,03651800133	0,12962962963	0,03261306824
2018-1	0,10185185185	0,03881186207	0,12962962963	0,04579487684
2018-2	0,10185185185	0,02922113303	0,12962962963	0,03297152241

Tabelle J.101: Tabellarischer Vergleich gemessener und berechneter Verdunstungs-Massenströme

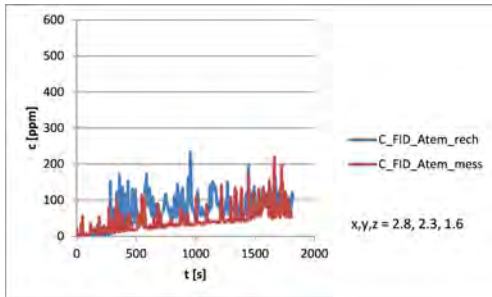
Szenario	$m_{Mess,A1,30min} [g]$	$m_{Rech,A1,30min} [g]$	Faktor Abweichung	$m_{Mess,A2,30min} [g]$	$m_{Rech,A2,30min} [g]$	Faktor Abweichung
2001-1	6,00	0,90	6,69	10,00	1,32	7,60
2002-1	24,00	0,00	–	28,00	7,95	3,52
2002-2	24,00	6,25	3,84	28,00	7,04	3,98
2003-1	–	–	–	24,00	9,45	2,54
2003-2	–	–	–	24,00	6,79	3,53
2004-1	34,00	7,74	4,39	26,00	7,82	3,32
2004-2	34,00	7,91	4,30	26,00	6,90	3,77
2005-1	2,00	0,21	9,48	10,00	1,35	7,42
2006-1	36,00	6,95	5,18	30,00	9,05	3,31
2006-2	36,00	6,75	5,34	30,00	7,41	4,05
2007-1	–	–	–	34,00	9,87	3,45
2007-2	–	–	–	34,00	6,95	4,89
2008-1	36,00	6,54	5,50	28,00	7,26	3,86

2008-2	36,00	8,16	4,41	28,00	7,44	3,76
2009-1	24,00	9,08	2,64	34,00	11,50	2,96
2009-2	24,00	6,41	3,74	34,00	7,87	4,32
2010-1	8,00	1,29	6,21	6,00	1,32	4,53
2011-1	22,00	6,48	3,40	30,00	9,96	3,01
2011-2	22,00	6,18	3,56	30,00	6,74	4,45
2012-1	–	–	–	30,00	12,13	2,47
2012-2	–	–	–	30,00	8,08	3,71
2013-1	34,00	6,70	5,08	28,00	7,10	3,94
2013-2	34,00	7,86	4,33	28,00	6,55	4,27
2014-1	10,00	1,00	9,98	8,00	1,37	5,84
2015-1	24,00	7,42	3,23	26,00	7,75	3,35
2015-2	24,00	6,41	3,74	26,00	6,25	4,14
2016-1	–	–	–	30,00	7,68	3,90
2016-2	–	–	–	30,00	7,58	3,96
2017-1	36,00	6,76	5,33	28,00	7,25	3,86
2017-2	36,00	7,89	4,56	28,00	7,04	3,98
2018-1	22,00	8,38	2,62	28,00	9,89	2,83
2018-2	22,00	6,31	3,49	28,00	7,12	3,93

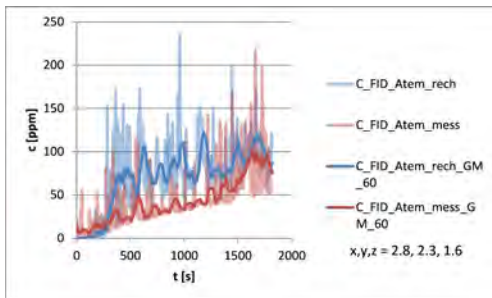
Tabelle J.102: Tabellarischer Vergleich gemessener und berechneter Verdunstungs-Gesamtmassen (gerundet)

J.2.2 Szenarien mit Luftführung über Nebenräume, gemessene Emissions-Massenströme

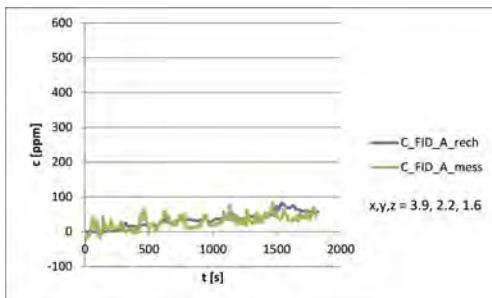
Versuch 2001-1



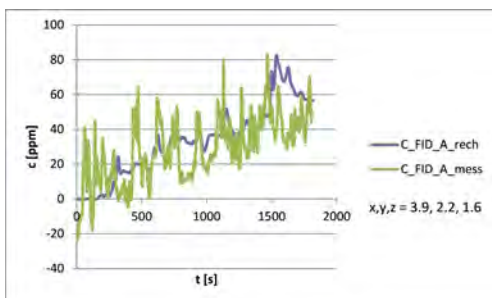
Relative Abweichung $L_2 = 0,87531$
 Inneres Produkt $cos = 0,84268$
 Projektionskoeffizient $a = 0,54976$



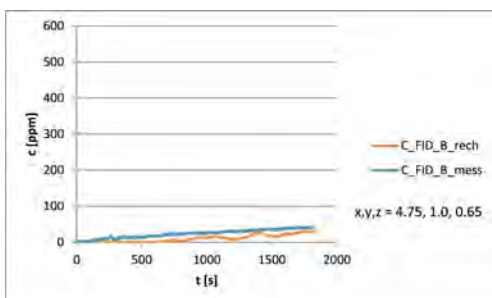
Relative Abweichung $L_2 = 0,74157$
 Inneres Produkt $cos = 0,93171$
 Projektionskoeffizient $a = 0,59035$



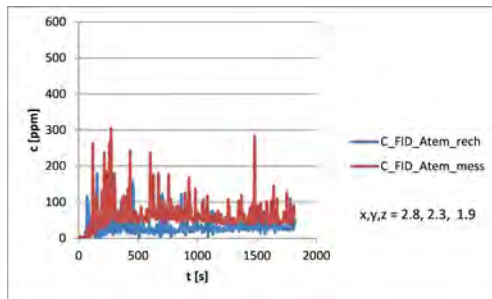
Relative Abweichung $L_2 = 0,50103$
 Inneres Produkt $cos = 0,90026$
 Projektionskoeffizient $a = 0,78404$



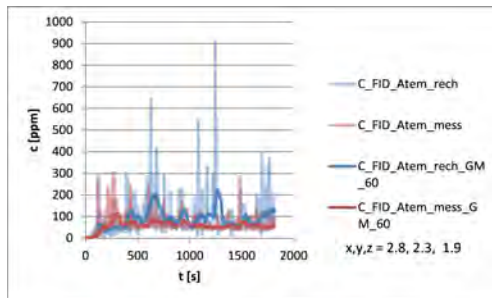
Relative Abweichung $L_2 = 0,55682$
 Inneres Produkt $cos = 0,91821$
 Projektionskoeffizient $a = 1,74280$



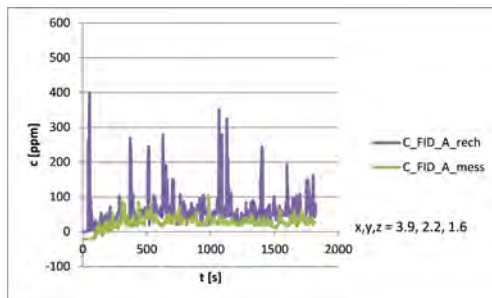
Versuch 2002-1



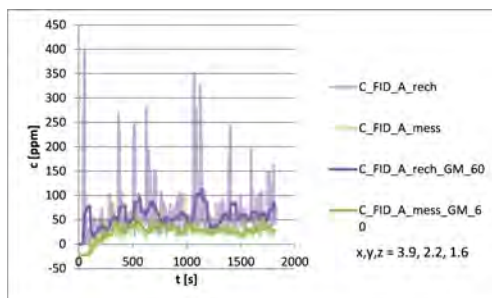
Relative Abweichung $L_2 = 0,68276$
 Inneres Produkt $cos = 0,77665$
 Projektionskoeffizient $a = 1,51297$



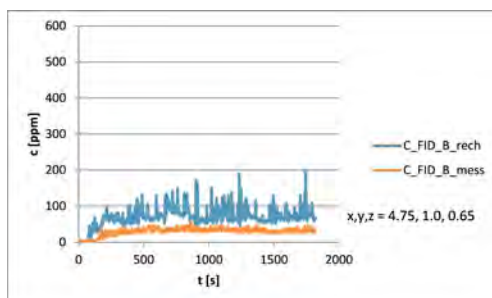
Relative Abweichung $L_2 = 0,54759$
 Inneres Produkt $cos = 0,95207$
 Projektionskoeffizient $a = 1,91224$



Relative Abweichung $L_2 = 1,77776$
 Inneres Produkt $cos = 0,70304$
 Projektionskoeffizient $a = 0,30143$

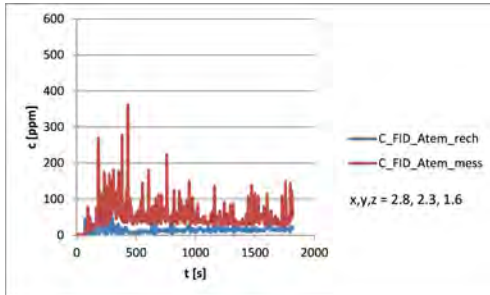


Relative Abweichung $L_2 = 1,30247$
 Inneres Produkt $cos = 0,87858$
 Projektionskoeffizient $a = 0,42031$

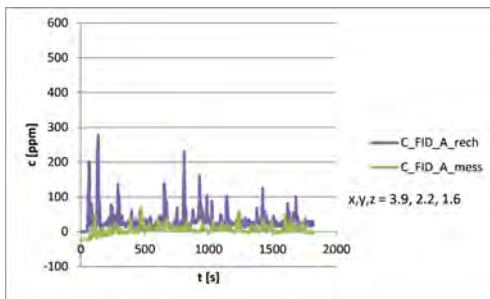


Relative Abweichung $L_2 = 1,44741$
 Inneres Produkt $cos = 0,96093$
 Projektionskoeffizient $a = 0,40348$

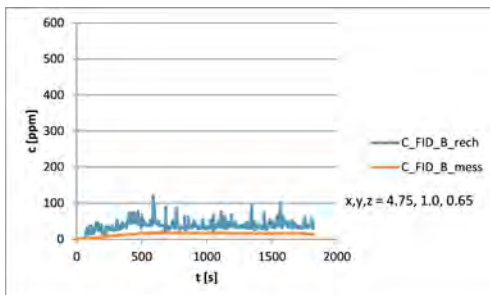
Versuch 2003-1



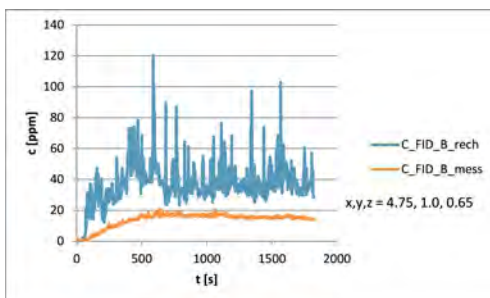
Relative Abweichung $L_2 = 0,80035$
 Inneres Produkt $\cos = 0,78013$
 Projektionskoeffizient $a = 2,77664$



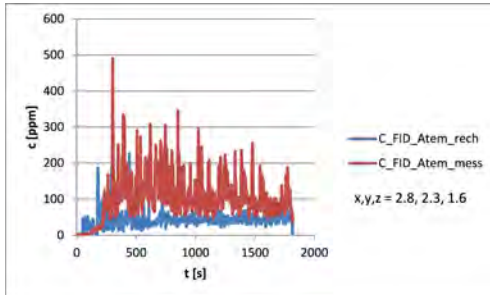
Relative Abweichung $L_2 = 3,07528$
 Inneres Produkt $\cos = 0,27631$
 Projektionskoeffizient $a = 0,08641$



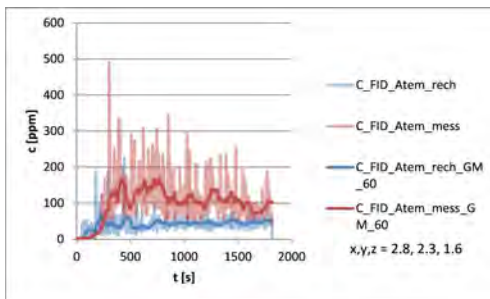
Relative Abweichung $L_2 = 1,78431$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95036$
 Projektionskoeffizient $a = 0,35103$



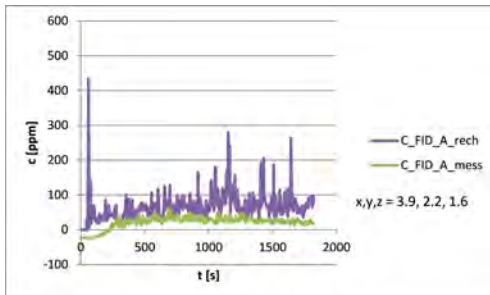
Versuch 2004-1



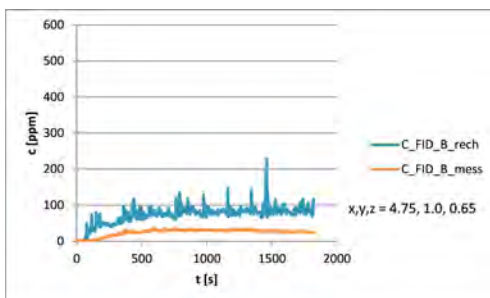
Relative Abweichung $L_2 = 0,72312$
 Inneres Produkt $\cos = 0,79912$
 Projektionskoeffizient $a = 2,01156$



Relative Abweichung $L_2 = 0,64420$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93375$
 Projektionskoeffizient $a = 2,34533$

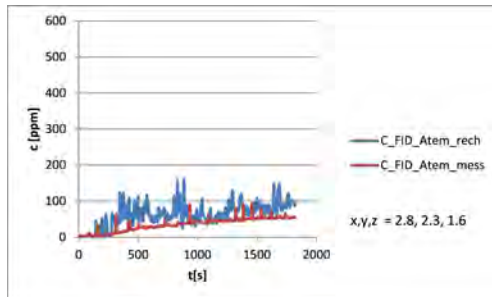


Relative Abweichung $L_2 = 2,10174$
 Inneres Produkt $\cos = 0,76475$
 Projektionskoeffizient $a = 0,27655$

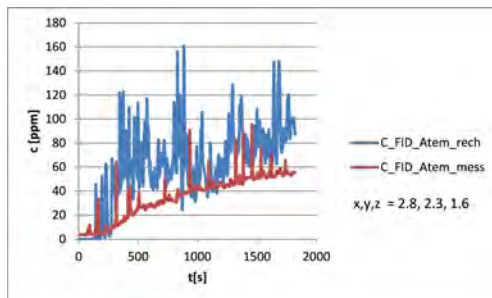


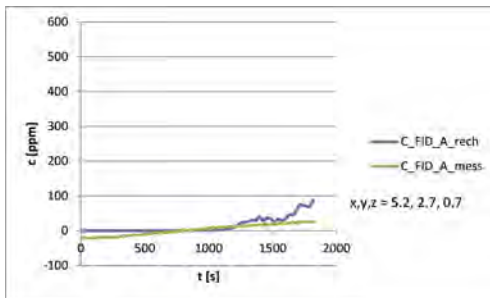
Relative Abweichung $L_2 = 1,96054$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97769$
 Projektionskoeffizient $a = 0,33403$

Versuch 2005-1

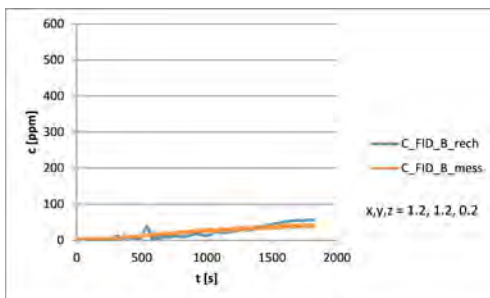
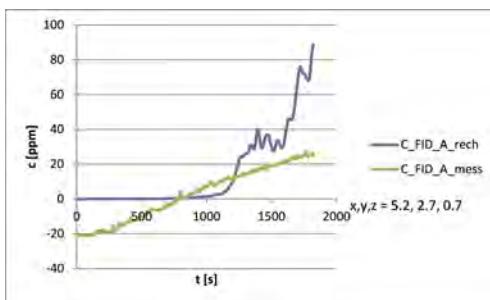


Relative Abweichung $L_2 = 0,89752$
Inneres Produkt $cos = 0,92738$
Projektionskoeffizient $a = 0,53200$

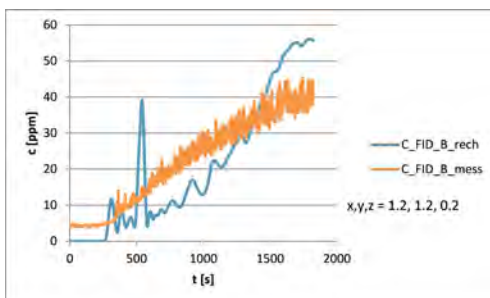




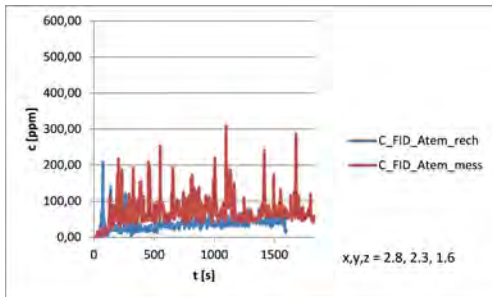
Relative Abweichung $L_2 = 1,18593$
 Inneres Produkt $\cos = 0,73378$
 Projektionskoeffizient $a = 0,43016$



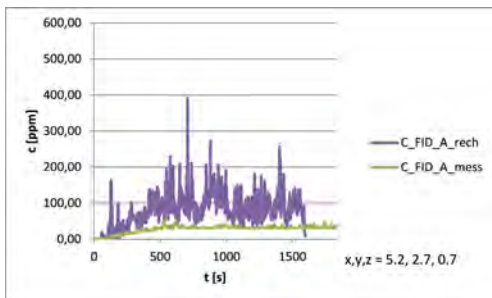
Relative Abweichung $L_2 = 0,36769$
 Inneres Produkt $\cos = 0,94182$
 Projektionskoeffizient $a = 0,86334$



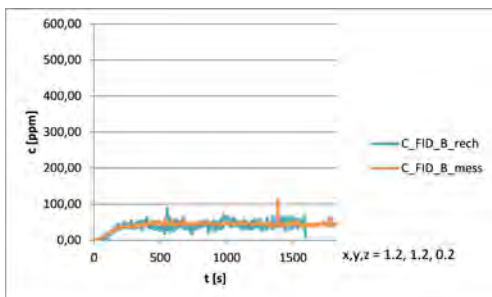
Versuch 2006-1



Relative Abweichung $L_2 = 0,65376$
 Inneres Produkt $cos = 0,81705$
 Projektionskoeffizient $a = 1,60563$

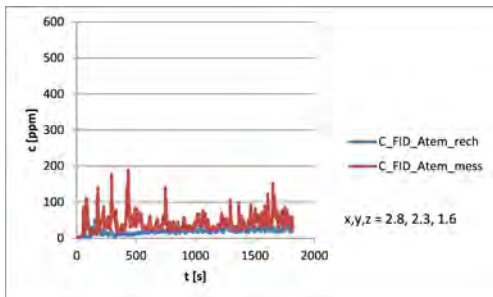


Relative Abweichung $L_2 = 2,26755$
 Inneres Produkt $cos = 0,92292$
 Projektionskoeffizient $a = 0,29229$

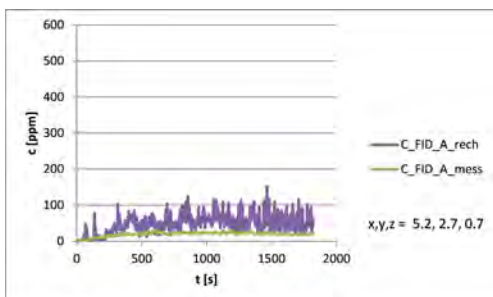
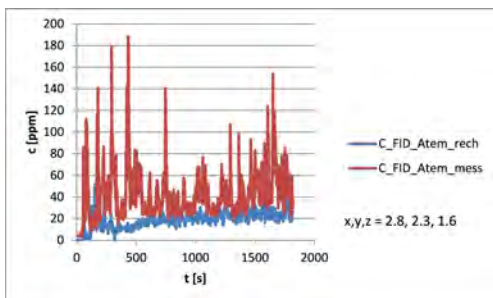


Relative Abweichung $L_2 = 0,22170$
 Inneres Produkt $cos = 0,97517$
 Projektionskoeffizient $a = 0,98396$

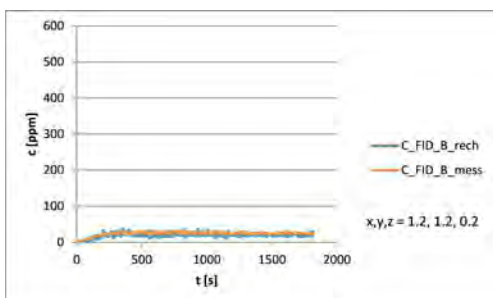
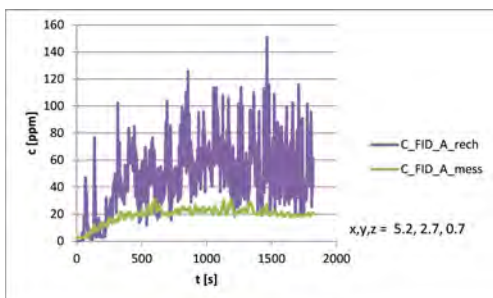
Versuch 2007-1



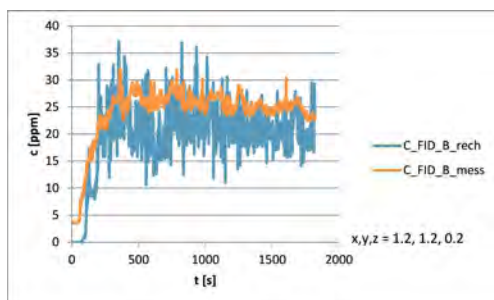
Relative Abweichung $L_2 = 0,68093$
 Inneres Produkt $cos = 0,82980$
 Projektionskoeffizient $a = 1,88751$



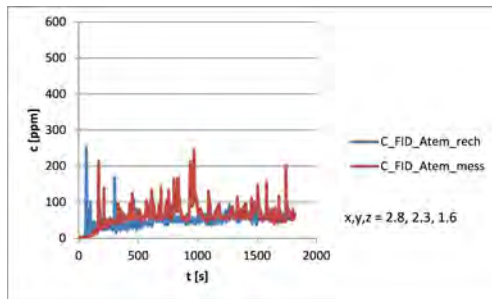
Relative Abweichung $L_2 = 1,73562$
 Inneres Produkt $cos = 0,93276$
 Projektionskoeffizient $a = 0,35459$



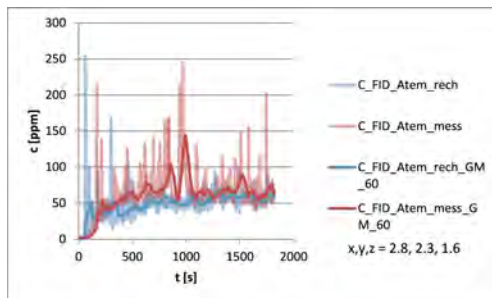
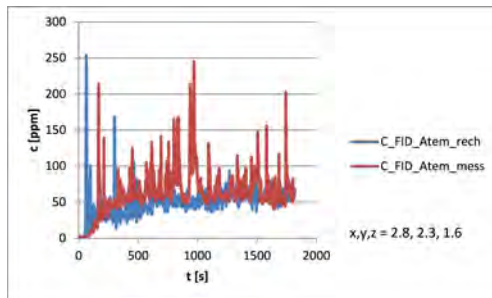
Relative Abweichung $L_2 = 0,23245$
 Inneres Produkt $cos = 0,98057$
 Projektionskoeffizient $a = 1,14556$



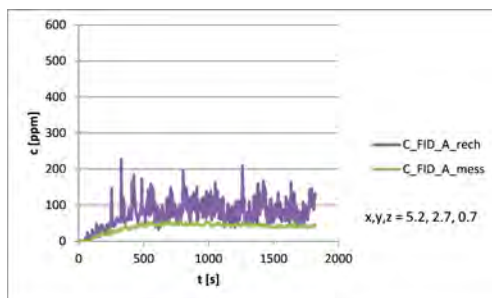
Versuch 2008-1



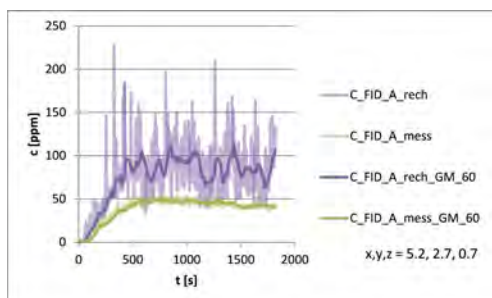
Relative Abweichung $L_2 = 0,49517$
 Inneres Produkt $\cos = 0,87524$
 Projektionskoeffizient $a = 1,13778$



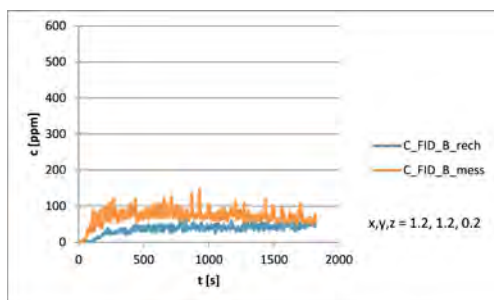
Relative Abweichung $L_2 = 0,35062$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95556$
 Projektionskoeffizient $a = 1,24791$



Relative Abweichung $L_2 = 1,11645$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95930$
 Projektionskoeffizient $a = 0,47037$



Relative Abweichung $L_2 = 0,97928$
 Inneres Produkt $\cos = 0,99244$
 Projektionskoeffizient $a = 0,50532$

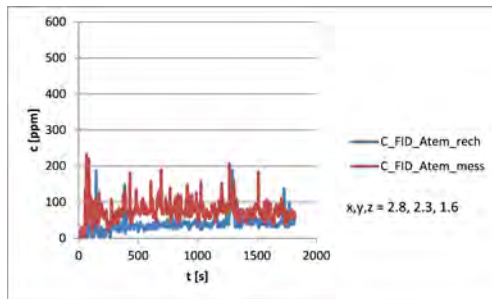


Relative Abweichung $L_2 = 0,51170$

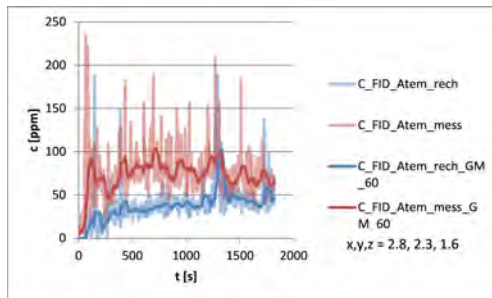
Inneres Produkt $\cos = 0,95231$

Projektionskoeffizient $a = 1,75853$

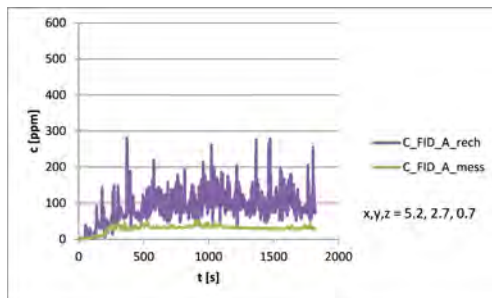
Versuch 2009-1



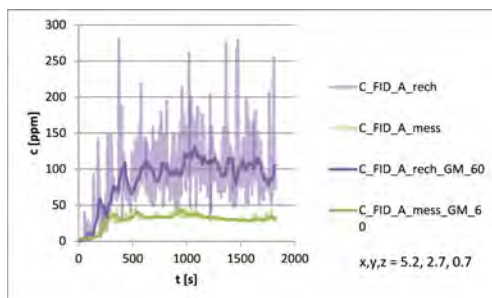
Relative Abweichung $L_2 = 0,59459$
 Inneres Produkt $cos = 0,85745$
 Projektionskoeffizient $a = 1,53246$



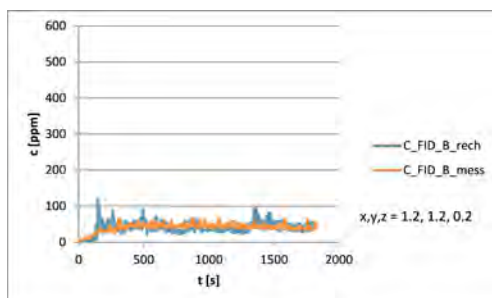
Relative Abweichung $L_2 = 0,51997$
 Inneres Produkt $cos = 0,94314$
 Projektionskoeffizient $a = 1,73601$



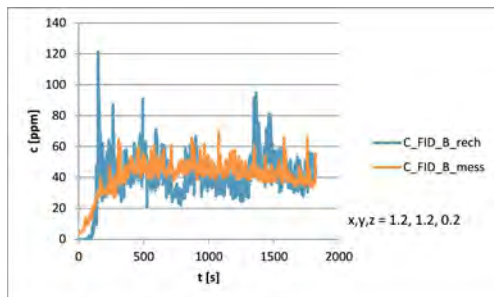
Relative Abweichung $L_2 = 2,20348$
 Inneres Produkt $cos = 0,93098$
 Projektionskoeffizient $a = 0,29993$



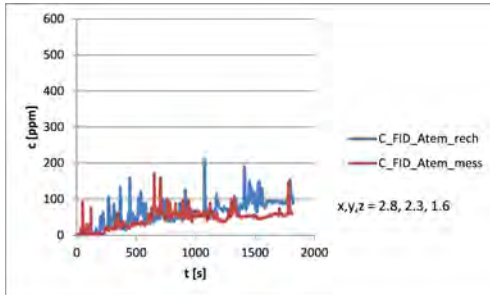
Relative Abweichung $L_2 = 2,00082$
 Inneres Produkt $cos = 0,98066$
 Projektionskoeffizient $a = 0,32998$



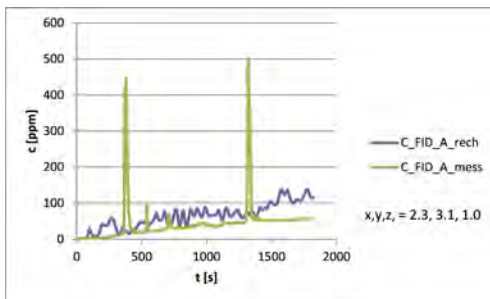
Relative Abweichung $L_2 = 0,31822$
 Inneres Produkt $cos = 0,95100$
 Projektionskoeffizient $a = 0,92665$



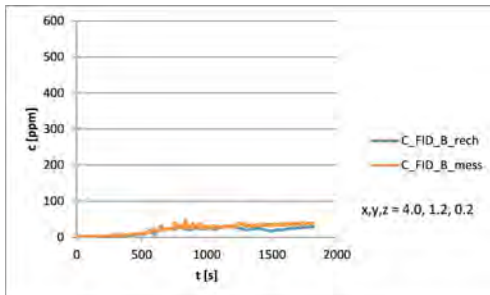
Versuch 2010-1



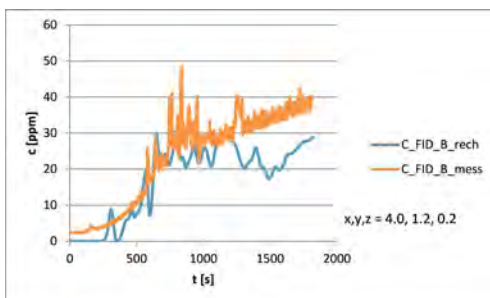
Relative Abweichung $L_2 = 0,66763$
 Inneres Produkt $\cos = 0,89163$
 Projektionskoeffizient $a = 0,64504$



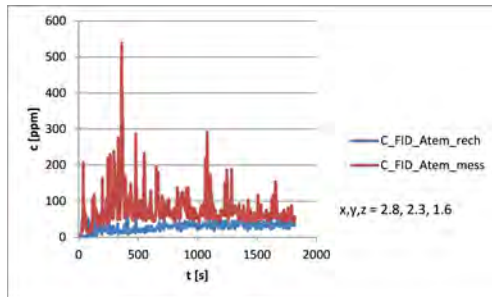
Relative Abweichung $L_2 = 0,89683$
 Inneres Produkt $\cos = 0,58310$
 Projektionskoeffizient $a = 0,60552$



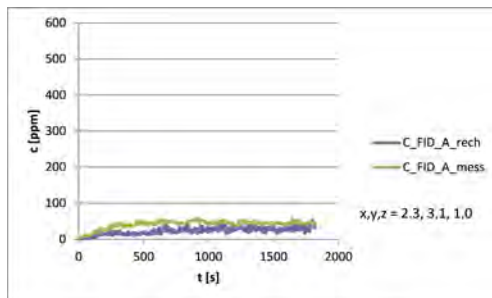
Relative Abweichung $L_2 = 0,31059$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97524$
 Projektionskoeffizient $a = 1,28803$



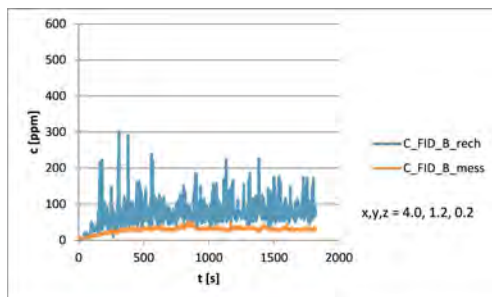
Versuch 2011-1



Relative Abweichung $L_2 = 0,74175$
 Inneres Produkt $\cos = 0,78476$
 Projektionskoeffizient $a = 2,08005$

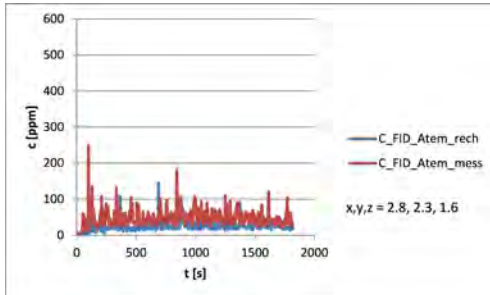


Relative Abweichung $L_2 = 0,46384$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95903$
 Projektionskoeffizient $a = 1,62064$

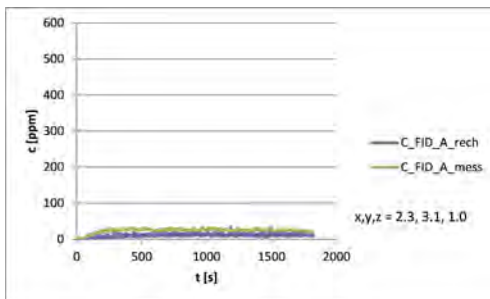


Relative Abweichung $L_2 = 1,84319$
 Inneres Produkt $\cos = 0,92508$
 Projektionskoeffizient $a = 0,33902$

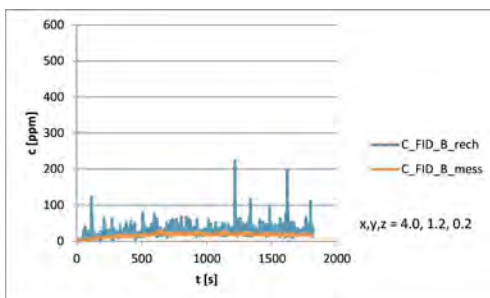
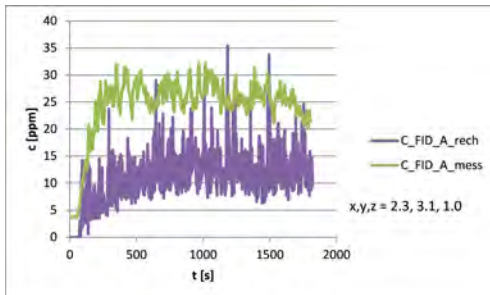
Versuch 2012-1



Relative Abweichung $L_2 = 0,62445$
 Inneres Produkt $cos = 0,82848$
 Projektionskoeffizient $a = 1,50022$

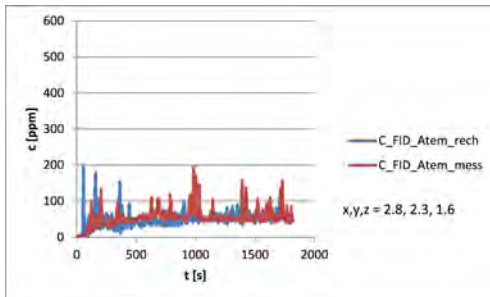


Relative Abweichung $L_2 = 0,55896$
 Inneres Produkt $cos = 0,94569$
 Projektionskoeffizient $a = 1,92612$

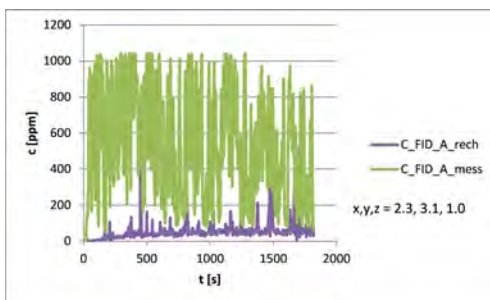


Relative Abweichung $L_2 = 0,90432$
 Inneres Produkt $cos = 0,88829$
 Projektionskoeffizient $a = 0,53277$

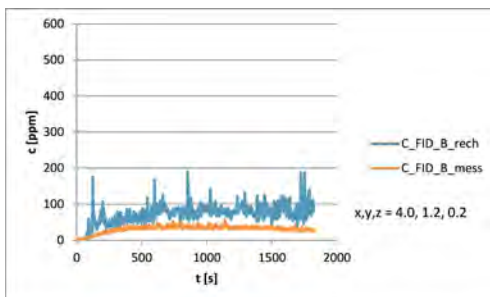
Versuch 2013-1



Relative Abweichung $L_2 = 0,46886$
 Inneres Produkt $cos = 0,88344$
 Projektionskoeffizient $a = 0,98104$

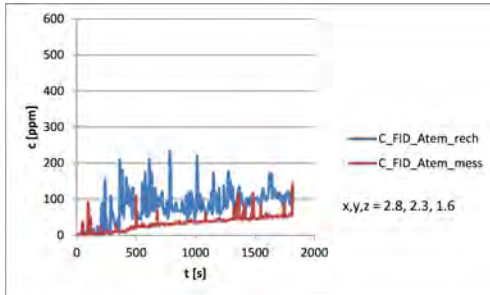


Relative Abweichung $L_2 = 0,93348$
 Inneres Produkt $cos = 0,61093$
 Projektionskoeffizient $a = 5,25175$

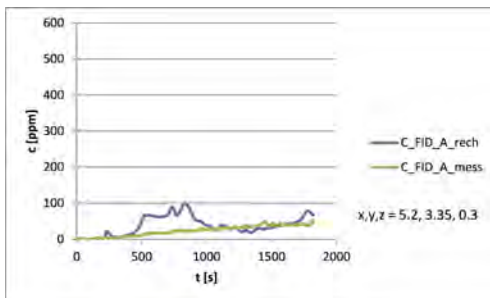


Relative Abweichung $L_2 = 1,38042$
 Inneres Produkt $cos = 0,96830$
 Projektionskoeffizient $a = 0,41361$

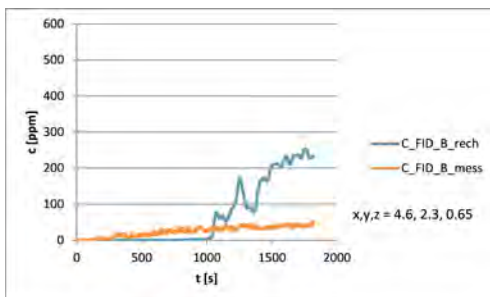
Versuch 2014-1



Relative Abweichung $L_2 = 1,45712$
 Inneres Produkt $cos = 0,88990$
 Projektionskoeffizient $a = 0,39137$

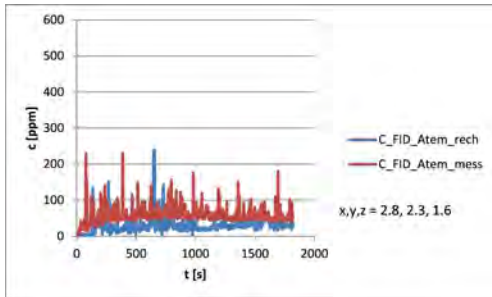


Relative Abweichung $L_2 = 1,03004$
 Inneres Produkt $cos = 0,81975$
 Projektionskoeffizient $a = 0,48914$

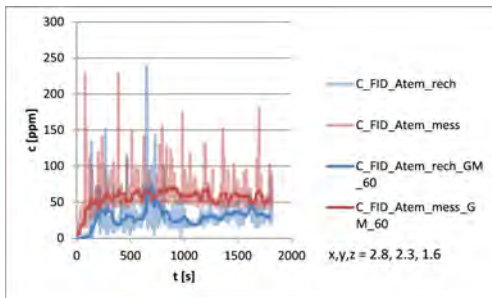


Relative Abweichung $L_2 = 3,18978$
 Inneres Produkt $cos = 0,81047$
 Projektionskoeffizient $a = 0,20539$

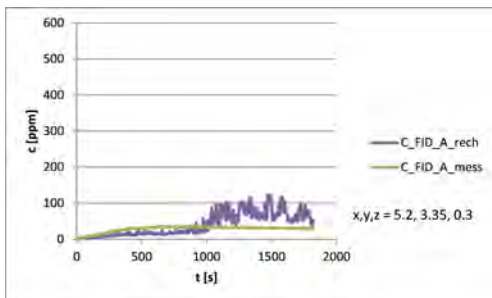
Versuch 2015-1



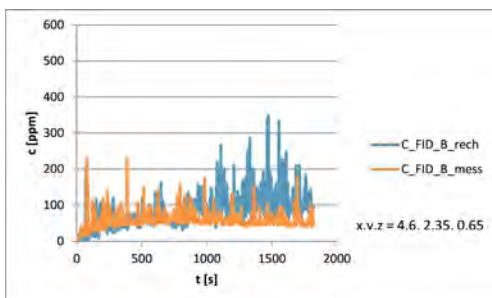
Relative Abweichung $L_2 = 0,64584$
 Inneres Produkt $cos = 0,78674$
 Projektionskoeffizient $a = 1,31822$



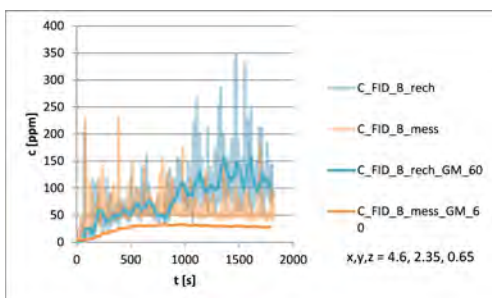
Relative Abweichung $L_2 = 0,51099$
 Inneres Produkt $cos = 0,94282$
 Projektionskoeffizient $a = 1,69722$



Relative Abweichung $L_2 = 1,06951$
 Inneres Produkt $cos = 0,82761$
 Projektionskoeffizient $a = 0,47619$

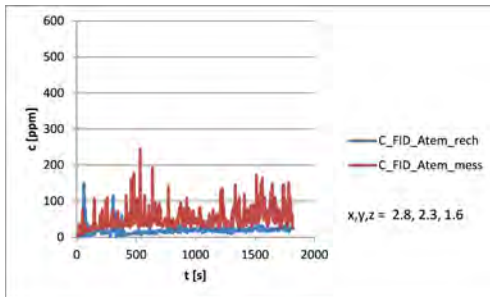


Relative Abweichung $L_2 = 2,56257$
 Inneres Produkt $cos = 0,90333$
 Projektionskoeffizient $a = 0,26338$

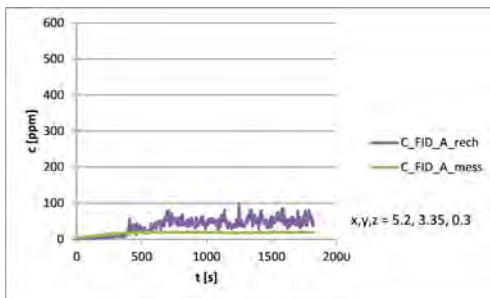


Relative Abweichung $L_2 = 2,32563$
 Inneres Produkt $cos = 0,94887$
 Projektionskoeffizient $a = 0,29169$

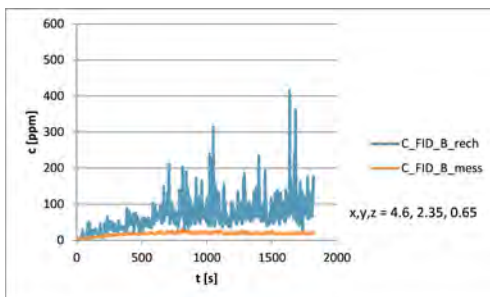
Versuch 2016-1



Relative Abweichung $L_2 = 0,74343$
 Inneres Produkt $\cos = 0,75696$
 Projektionskoeffizient $a = 1,88092$

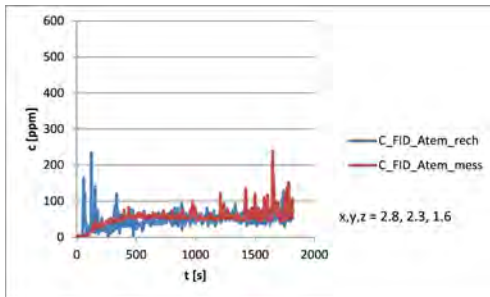


Relative Abweichung $L_2 = 1,55580$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93223$
 Projektionskoeffizient $a = 0,38122$

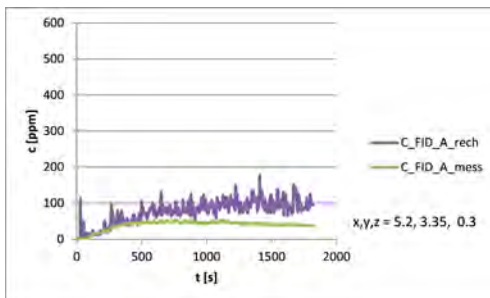


Relative Abweichung $L_2 = 3,30604$
 Inneres Produkt $\cos = 0,90927$
 Projektionskoeffizient $a = 0,21706$

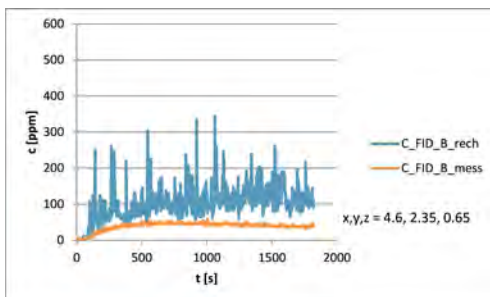
Versuch 2017-1



Relative Abweichung $L_2 = 0,44596$
 Inneres Produkt $\cos = 0,89534$
 Projektionskoeffizient $a = 1,02586$

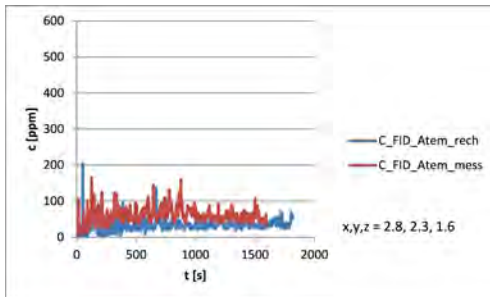


Relative Abweichung $L_2 = 1,06579$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96472$
 Projektionskoeffizient $a = 0,48297$

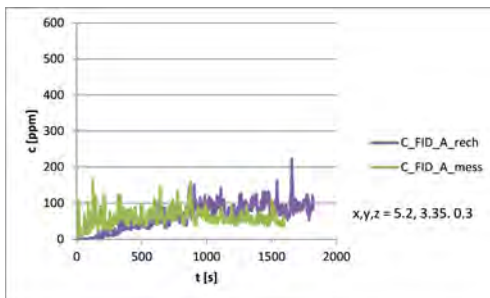


Relative Abweichung $L_2 = 1,83618$
 Inneres Produkt $\cos = 0,94041$
 Projektionskoeffizient $a = 0,34261$

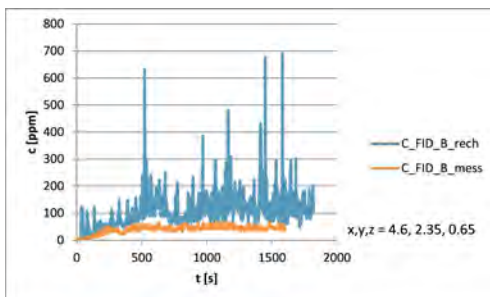
Versuch 2018-1



Relative Abweichung $L_2 = 0,58078$
 Inneres Produkt $\cos = 0,85886$
 Projektionskoeffizient $a = 1,46794$



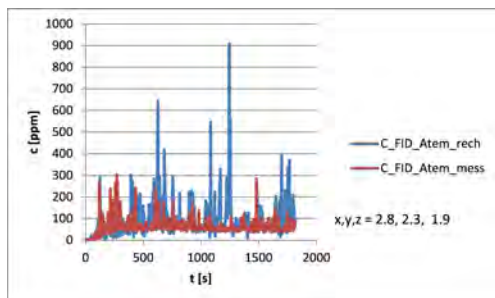
Relative Abweichung $L_2 = 1,46653$
 Inneres Produkt $\cos = 0,94179$
 Projektionskoeffizient $a = 0,39750$



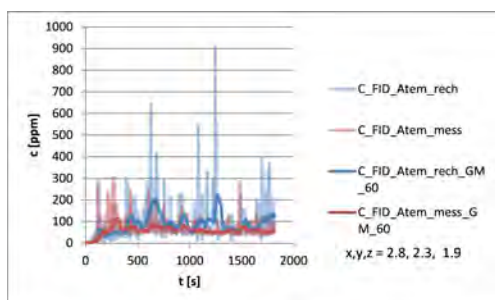
Relative Abweichung $L_2 = 2,09228$
 Inneres Produkt $\cos = 0,88881$
 Projektionskoeffizient $a = 0,30332$

J.2.3 Szenarien ohne Luftführung über Nebenräume, gemessene Emissions-Massenströme

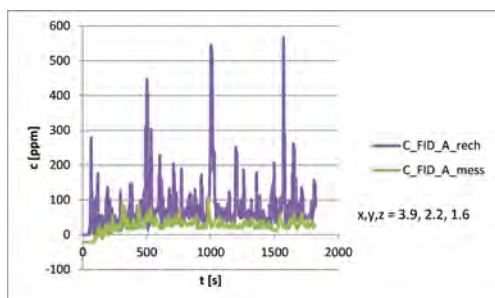
Versuch 2002-2



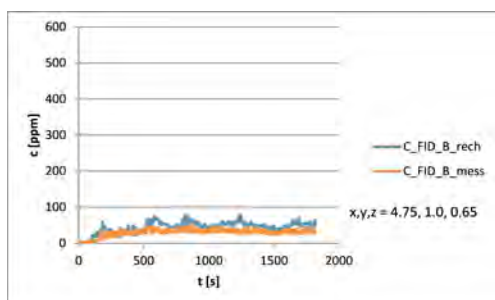
Relative Abweichung $L_2 = 1,28007$
 Inneres Produkt $cos = 0,69081$
 Projektionskoeffizient $a = 0,39540$



Relative Abweichung $L_2 = 0,79016$
 Inneres Produkt $cos = 0,90555$
 Projektionskoeffizient $a = 0,57599$

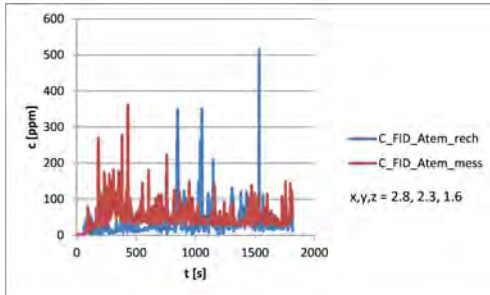


Relative Abweichung $L_2 = 2,70373$
 Inneres Produkt $cos = 0,69571$
 Projektionskoeffizient $a = 0,21068$

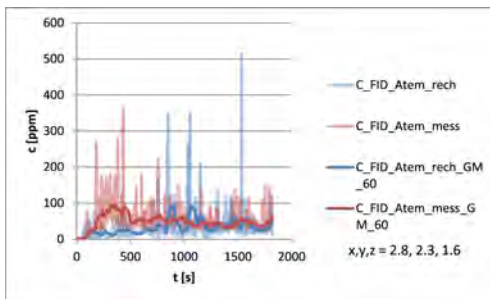


Relative Abweichung $L_2 = 0,54248$
 Inneres Produkt $cos = 0,97684$
 Projektionskoeffizient $a = 0,66211$

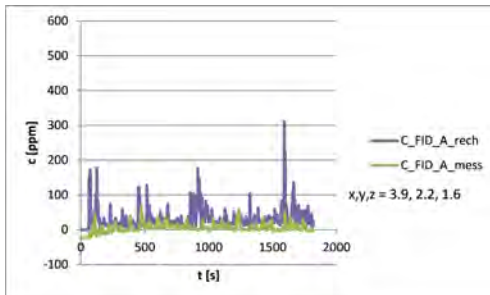
Versuch 2003-2



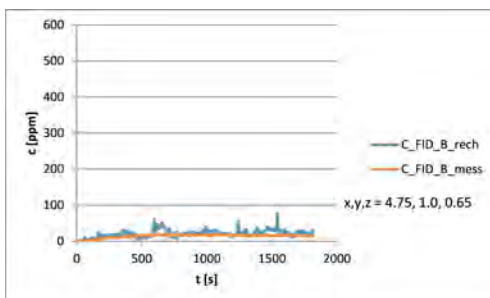
Relative Abweichung $L_2 = 0,90797$
 Inneres Produkt $\cos = 0,53269$
 Projektionskoeffizient $a = 0,61827$



Relative Abweichung $L_2 = 0,60295$
 Inneres Produkt $\cos = 0,80134$
 Projektionskoeffizient $a = 1,10397$

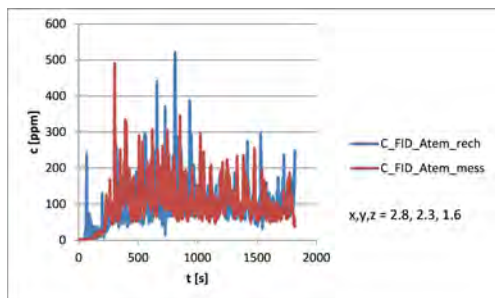


Relative Abweichung $L_2 = 3,08681$
 Inneres Produkt $\cos = 0,31271$
 Projektionskoeffizient $a = 0,09623$

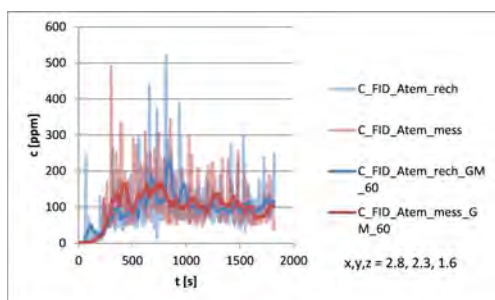


Relative Abweichung $L_2 = 0,71589$
 Inneres Produkt $\cos = 0,94019$
 Projektionskoeffizient $a = 0,59891$

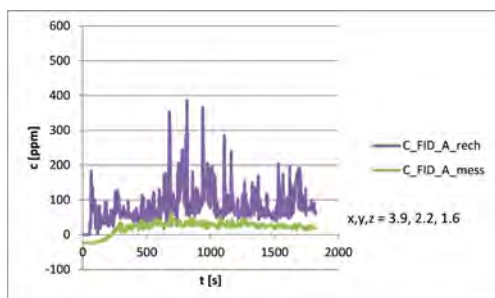
Versuch 2004-2



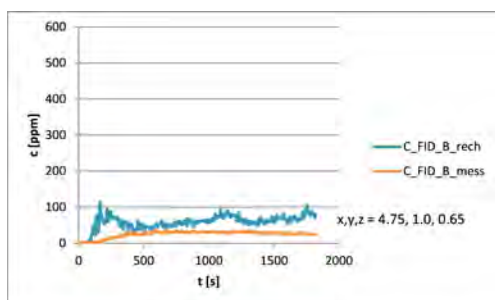
Relative Abweichung $L_2 = 0,63804$
 Inneres Produkt $cos = 0,79620$
 Projektionskoeffizient $a = 0,79720$



Relative Abweichung $L_2 = 0,32190$
 Inneres Produkt $cos = 0,94718$
 Projektionskoeffizient $a = 0,97162$

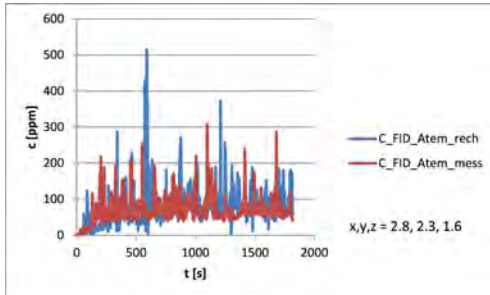


Relative Abweichung $L_2 = 2,80864$
 Inneres Produkt $cos = 0,78068$
 Projektionskoeffizient $a = 0,22185$

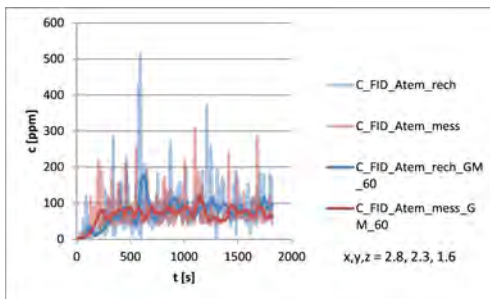


Relative Abweichung $L_2 = 1,41538$
 Inneres Produkt $cos = 0,94383$
 Projektionskoeffizient $a = 0,40681$

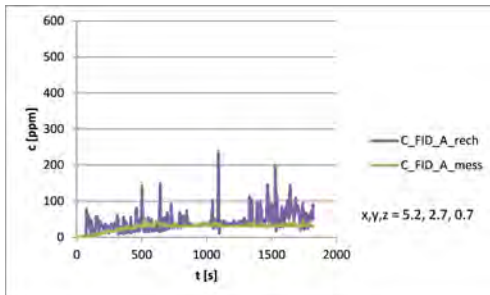
Versuch 2006-2



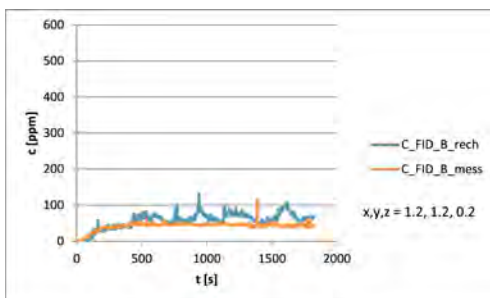
Relative Abweichung $L_2 = 0,75553$
 Inneres Produkt $\cos = 0,77195$
 Projektionskoeffizient $a = 0,65404$



Relative Abweichung $L_2 = 0,41841$
 Inneres Produkt $\cos = 0,92926$
 Projektionskoeffizient $a = 0,82546$

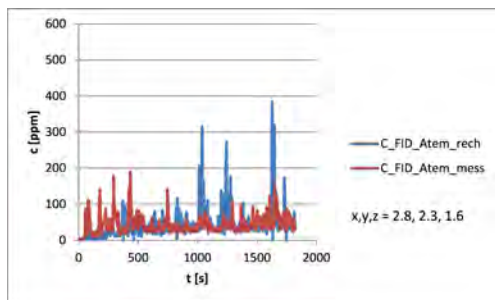


Relative Abweichung $L_2 = 0,89609$
 Inneres Produkt $\cos = 0,86054$
 Projektionskoeffizient $a = 0,53859$

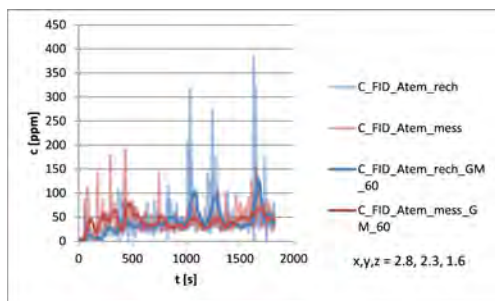


Relative Abweichung $L_2 = 0,51078$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96898$
 Projektionskoeffizient $a = 0,68431$

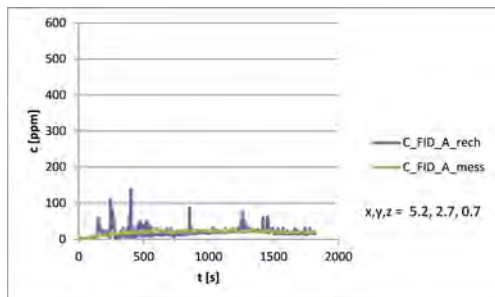
Versuch 2007-2



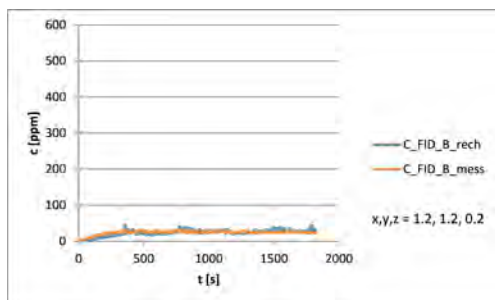
Relative Abweichung $L_2 = 0,89421$
 Inneres Produkt $cos = 0,67385$
 Projektionskoeffizient $a = 57226$



Relative Abweichung $L_2 = 0,54019$
 Inneres Produkt $cos = 0,86817$
 Projektionskoeffizient $a = 0,80274$

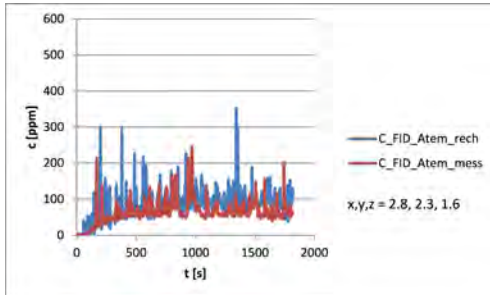


Relative Abweichung $L_2 = 0,64181$
 Inneres Produkt $cos = 0,83017$
 Projektionskoeffizient $a = 0,72306$

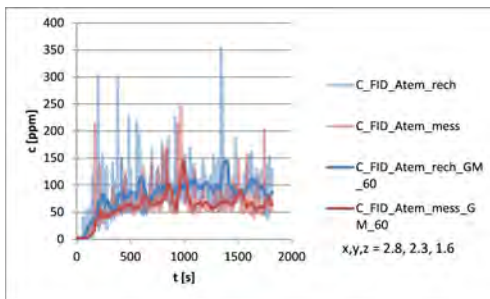


Relative Abweichung $L_2 = 0,22000$
 Inneres Produkt $cos = 0,97567$
 Projektionskoeffizient $a = 0,98168$

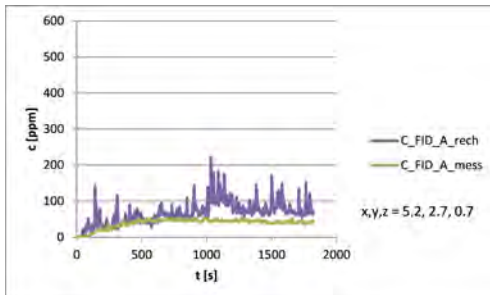
Versuch 2008-2



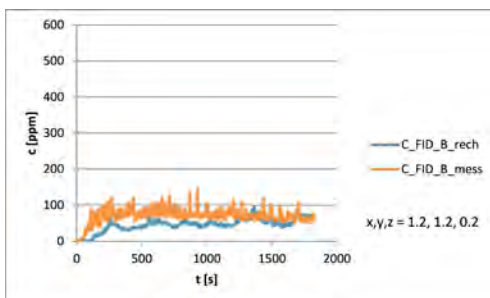
Relative Abweichung $L_2 = 0,69292$
 Inneres Produkt $\cos = 0,87087$
 Projektionskoeffizient $a = 0,64068$



Relative Abweichung $L_2 = 0,44866$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96773$
 Projektionskoeffizient $a = 0,72276$

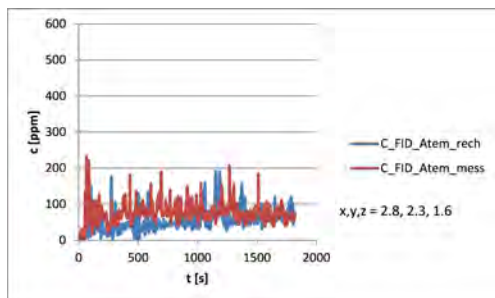


Relative Abweichung $L_2 = 0,90076$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93794$
 Projektionskoeffizient $a = 0,53013$

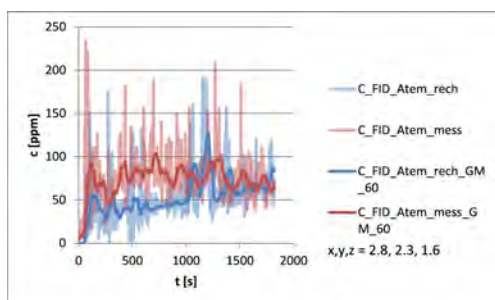


Relative Abweichung $L_2 = 0,43284$
 Inneres Produkt $\cos = 0,94159$
 Projektionskoeffizient $a = 1,40606$

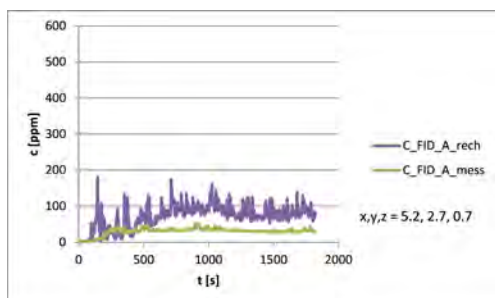
Versuch 2009-2



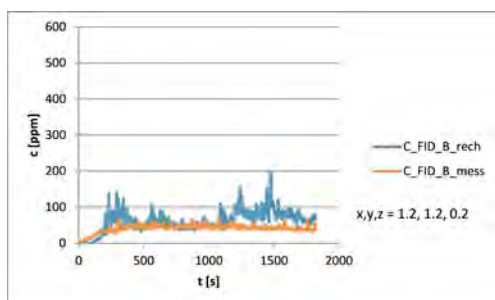
Relative Abweichung $L_2 = 0,53295$
 Inneres Produkt $\cos = 0,84908$
 Projektionskoeffizient $a = 1,09056$



Relative Abweichung $L_2 = 0,40120$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93302$
 Projektionskoeffizient $a = 1,23481$

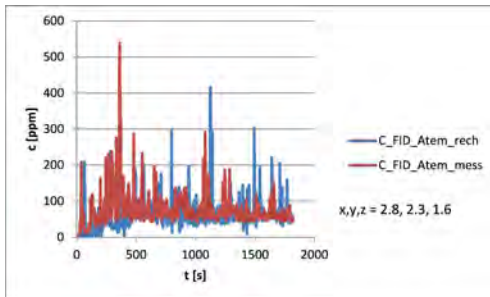


Relative Abweichung $L_2 = 1,60110$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93858$
 Projektionskoeffizient $a = 0,37512$

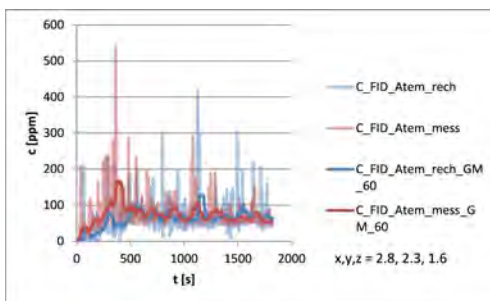


Relative Abweichung $L_2 = 0,77156$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93023$
 Projektionskoeffizient $a = 0,57817$

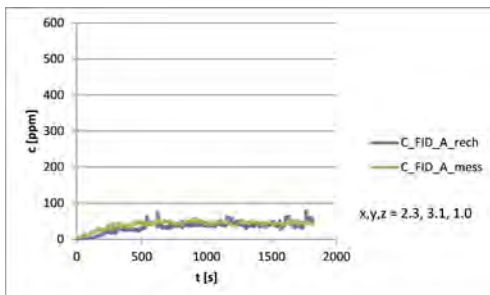
Versuch 2011-2



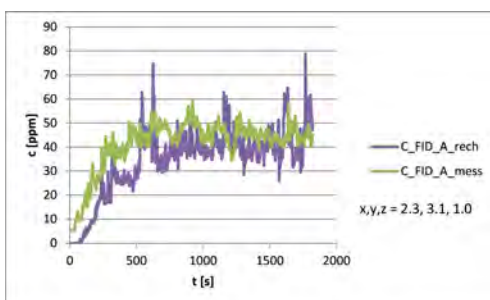
Relative Abweichung $L_2 = 0,72994$
 Inneres Produkt $\cos = 0,70953$
 Projektionskoeffizient $a = 0,78847$

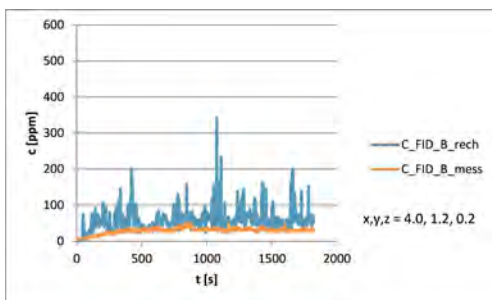


Relative Abweichung $L_2 = 0,40306$
 Inneres Produkt $\cos = 0,91640$
 Projektionskoeffizient $a = 1,05455$

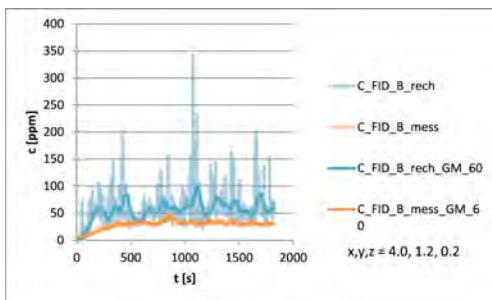


Relative Abweichung $L_2 = 0,25381$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97135$
 Projektionskoeffizient $a = 1,10095$



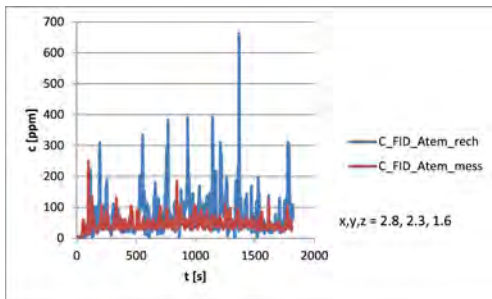


Relative Abweichung $L_2 = 1,26120$
 Inneres Produkt $\cos = 0,90813$
 Projektionskoeffizient $a = 0,43289$

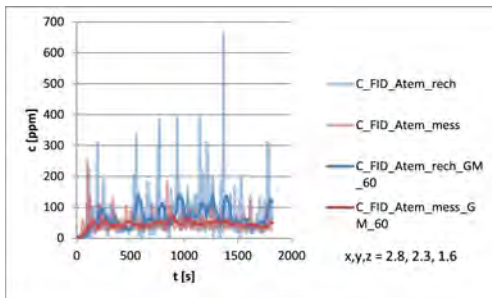


Relative Abweichung $L_2 = 1,02897$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97117$
 Projektionskoeffizient $a = 0,49244$

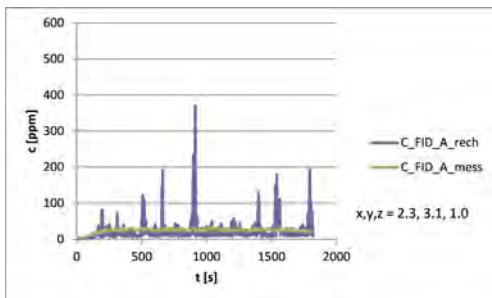
Versuch 2012-2



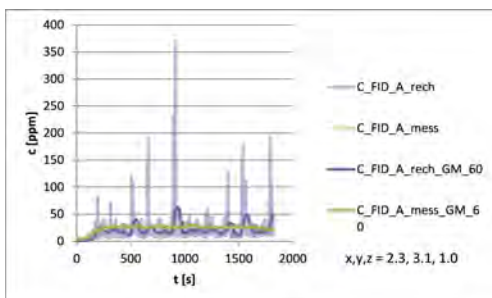
Relative Abweichung $L_2 = 1,31230$
 Inneres Produkt $cos = 0,72939$
 Projektionskoeffizient $a = 0,39442$



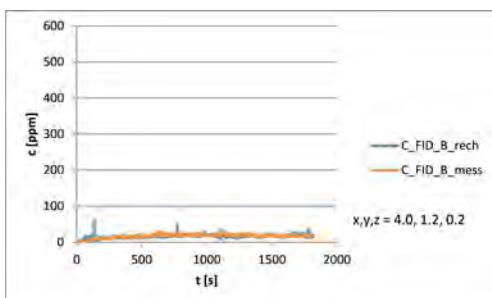
Relative Abweichung $L_2 = 0,80537$
 Inneres Produkt $cos = 0,91992$
 Projektionskoeffizient $a = 0,056666$



Relative Abweichung $L_2 = 0,93357$
 Inneres Produkt $cos = 0,68685$
 Projektionskoeffizient $a = 0,53965$

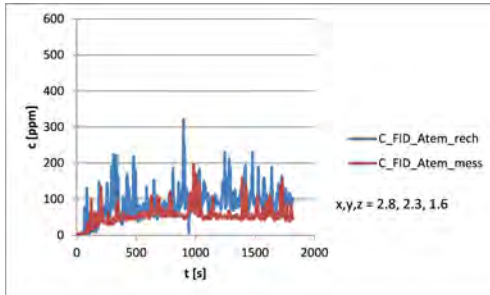


Relative Abweichung $L_2 = 0,42221$
 Inneres Produkt $cos = 0,90723$
 Projektionskoeffizient $a = 0,96130$

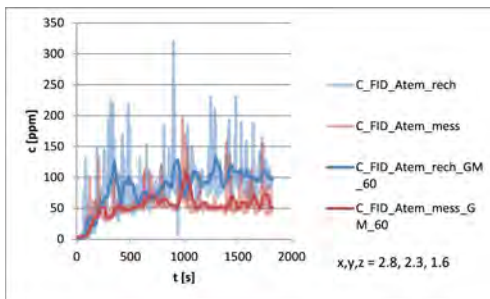


Relative Abweichung $L_2 = 0,24415$
 Inneres Produkt $cos = 0,97104$
 Projektionskoeffizient $a = 1,05458$

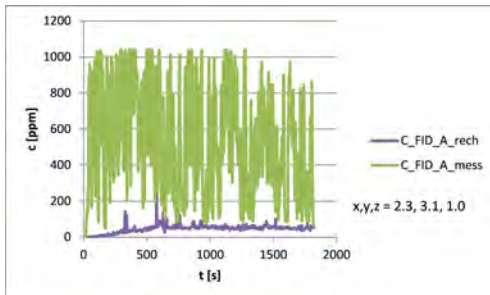
Versuch 2013-2



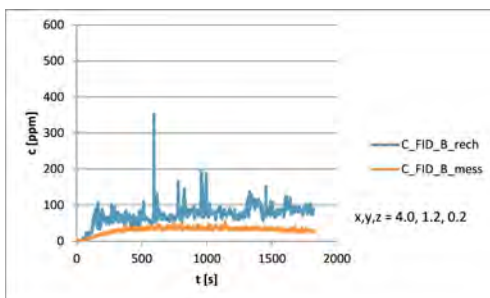
Relative Abweichung $L_2 = 0,84939$
 Inneres Produkt $cos = 0,88556$
 Projektionskoeffizient $a = 0,55463$



Relative Abweichung $L_2 = 0,68930$
 Inneres Produkt $cos = 0,95603$
 Projektionskoeffizient $a = 0,60515$

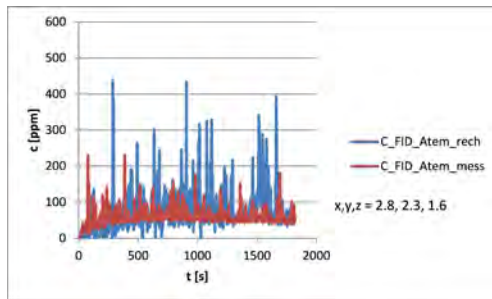


Relative Abweichung $L_2 = 0,93708$
 Inneres Produkt $cos = 0,76798$
 Projektionskoeffizient $a = 9,14936$

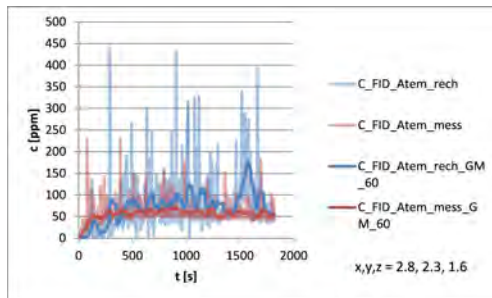


Relative Abweichung $L_2 = 1,47227$
 Inneres Produkt $cos = 0,95693$
 Projektionskoeffizient $a = 0,39868$

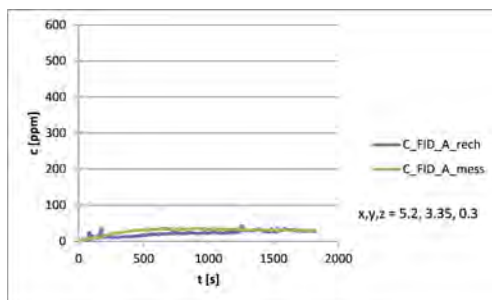
Versuch 2015-2



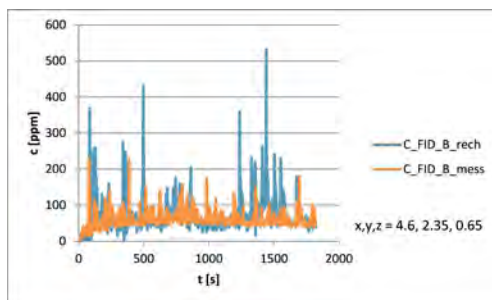
Relative Abweichung $L_2 = 1,02234$
 Inneres Produkt $cos = 0,76391$
 Projektionskoeffizient $a = 0,49068$



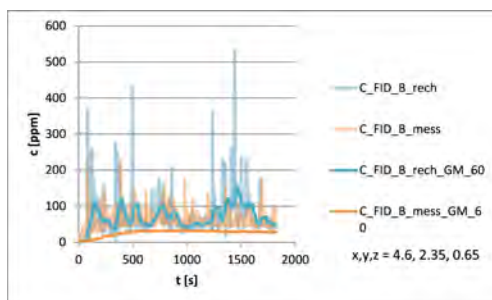
Relative Abweichung $L_2 = 0,59819$
 Inneres Produkt $cos = 0,93359$
 Projektionskoeffizient $a = 0,66091$



Relative Abweichung $L_2 = 0,32163$
 Inneres Produkt $cos = 0,96550$
 Projektionskoeffizient $a = 1,24304$

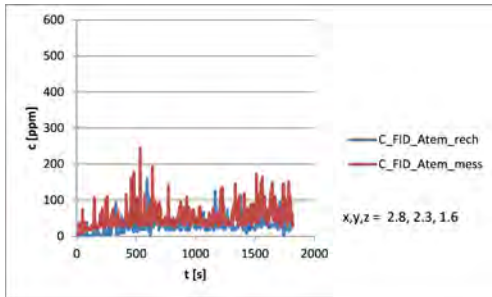


Relative Abweichung $L_2 = 2,41236$
 Inneres Produkt $cos = 0,80262$
 Projektionskoeffizient $a = 0,25561$

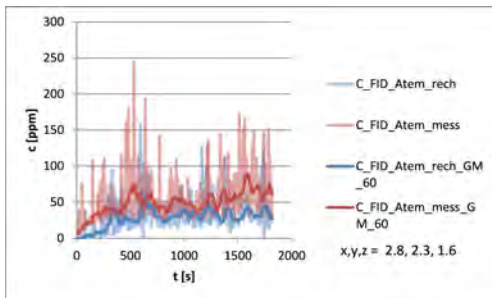


Relative Abweichung $L_2 = 1,89259$
 Inneres Produkt $cos = 0,91770$
 Projektionskoeffizient $a = 0,33152$

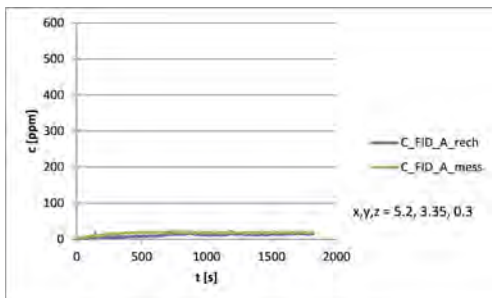
Versuch 2016-2



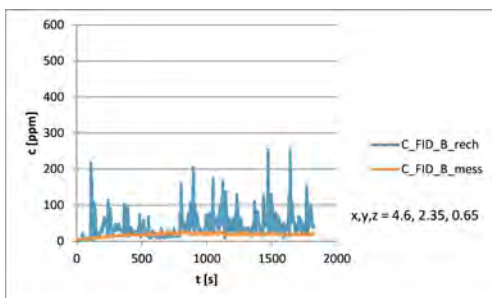
Relative Abweichung $L_2 = 0,64354$
 Inneres Produkt $cos = 0,78625$
 Projektionskoeffizient $a = 1,29650$



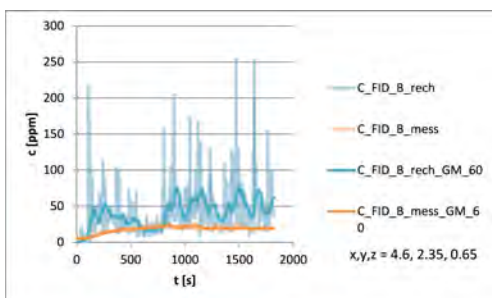
Relative Abweichung $L_2 = 0,46781$
 Inneres Produkt $cos = 0,95094$
 Projektionskoeffizient $a = 1,58483$



Relative Abweichung $L_2 = 0,38604$
 Inneres Produkt $cos = 0,96795$
 Projektionskoeffizient $a = 1,43447$

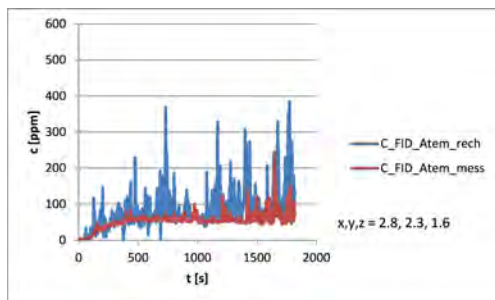


Relative Abweichung $L_2 = 2,00761$
 Inneres Produkt $cos = 0,81933$
 Projektionskoeffizient $a = 0,29866$

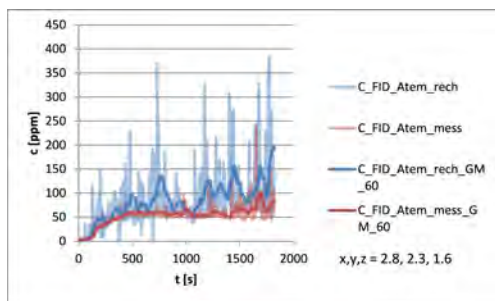


Relative Abweichung $L_2 = 1,51802$
 Inneres Produkt $cos = 0,93127$
 Projektionskoeffizient $a = 0,38724$

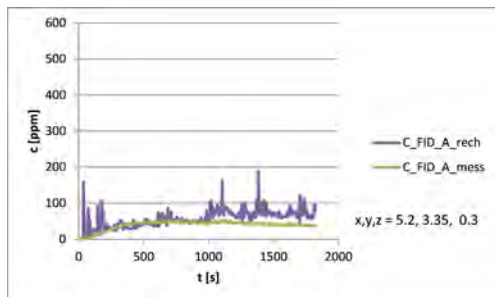
Versuch 2017-2



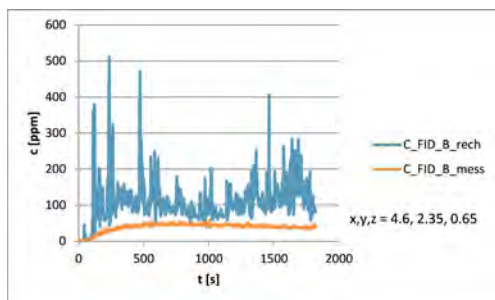
Relative Abweichung $L_2 = 0,99021$
 Inneres Produkt $\cos = 0,87336$
 Projektionskoeffizient $a = 0,52324$



Relative Abweichung $L_2 = 0,69537$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97244$
 Projektionskoeffizient $a = 0,59748$

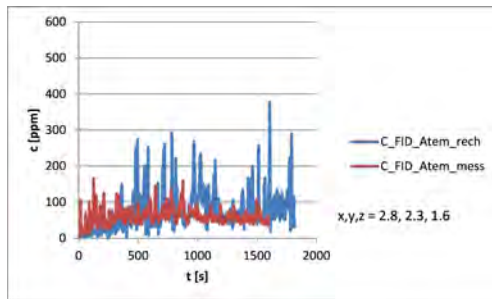


Relative Abweichung $L_2 = 0,64962$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93802$
 Projektionskoeffizient $a = 0,63062$

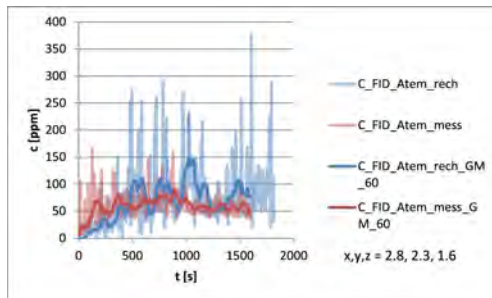


Relative Abweichung $L_2 = 2,14158,$
 Inneres Produkt $\cos = 0,88834$
 Projektionskoeffizient $a = 0,29809$

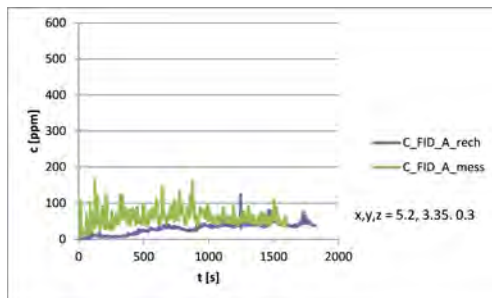
Versuch 2018-2



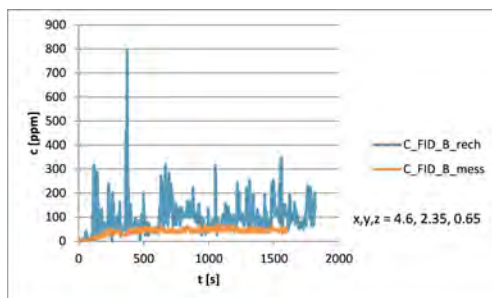
Relative Abweichung $L_2 = 0,81618$
 Inneres Produkt $cos = 0,79993$
 Projektionskoeffizient $a = 0,59117$



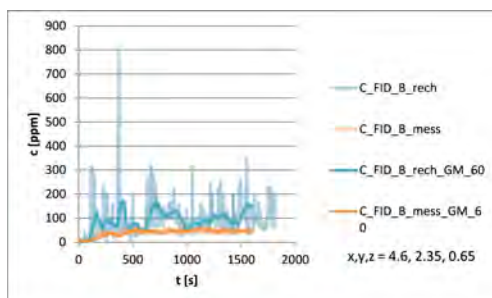
Relative Abweichung $L_2 = 0,52973$
 Inneres Produkt $cos = 0,091430$
 Projektionskoeffizient $a = 0,72812$



Relative Abweichung $L_2 = 0,34855$
 Inneres Produkt $cos = 0,94742$
 Projektionskoeffizient $a = 0,87272$



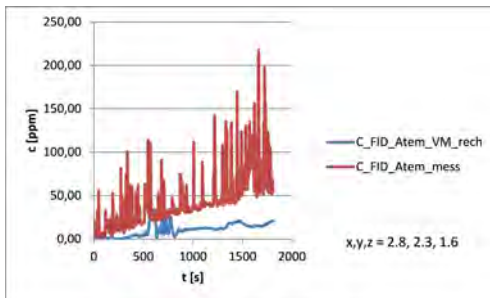
Relative Abweichung $L_2 = 1,90663$
 Inneres Produkt $cos = 0,81941$
 Projektionskoeffizient $a = 0,31064$



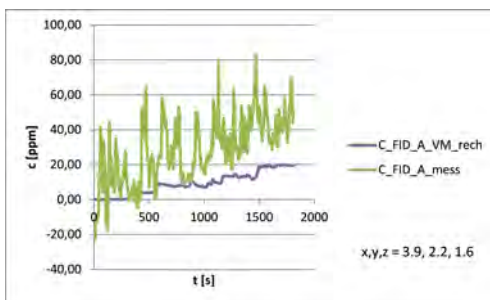
Relative Abweichung $L_2 = 1,45207$
 Inneres Produkt $cos = 0,93133$
 Projektionskoeffizient $a = 0,39852$

J.2.4 Szenarien mit Luftführung über Nebenräume, berechnete Emissions-Massenströme

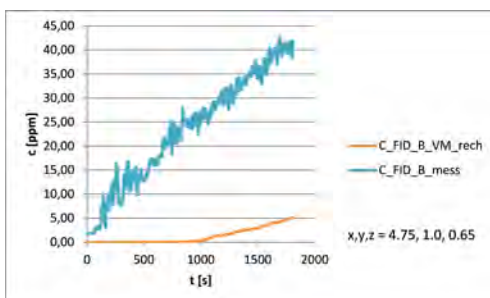
Versuch 2001-2



Relative Abweichung $L_2 = 0,80854$
 Inneres Produkt $\cos = 0,27670$
 Projektionskoeffizient $a = 3,36961$

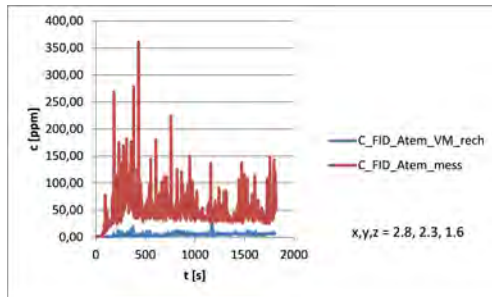


Relative Abweichung $L_2 = 0,72426$
 Inneres Produkt $\cos = 0,88908$
 Projektionskoeffizient $a = 2,71217$

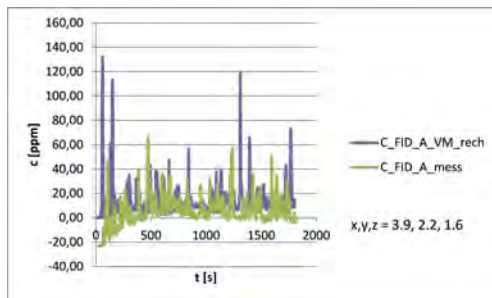


Relative Abweichung $L_2 = 0,93800$
 Inneres Produkt $\cos = 0,83481$
 Projektionskoeffizient $a = 11,07866$

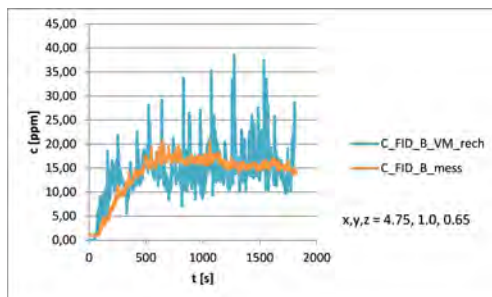
Versuch 2003-3



Relative Abweichung $L_2 = 0,92611$
 Inneres Produkt $\cos = 0,75463$
 Projektionskoeffizient $a = 7,46494$

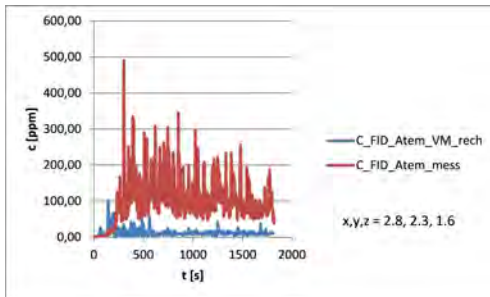


Relative Abweichung $L_2 = 1,57406$
 Inneres Produkt $\cos = 0,21427$
 Projektionskoeffizient $a = 0,14792$

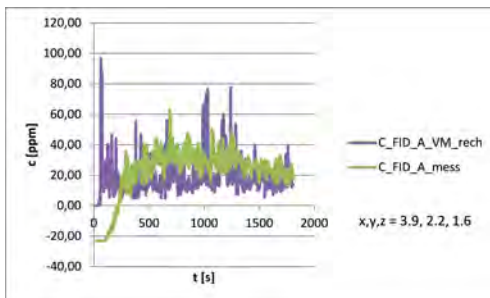


Relative Abweichung $L_2 = 0,29211$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95834$
 Projektionskoeffizient $a = 0,94002$

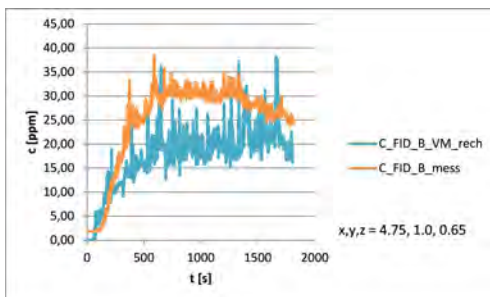
Versuch 2004-3



Relative Abweichung $L_2 = 0,91706$
 Inneres Produkt $\cos = 0,71618$
 Projektionskoeffizient $a = 5,90573$

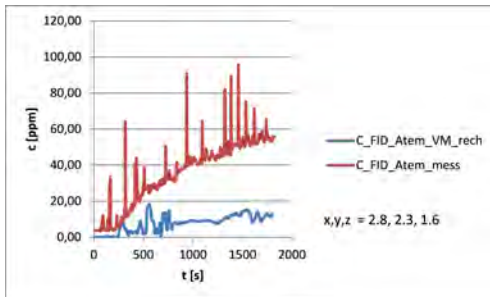


Relative Abweichung $L_2 = 0,73140$
 Inneres Produkt $\cos = 0,69264$
 Projektionskoeffizient $a = 0,85108$

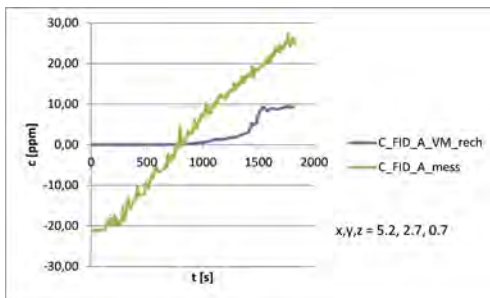


Relative Abweichung $L_2 = 0,34733$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97784$
 Projektionskoeffizient $a = 1,39555$

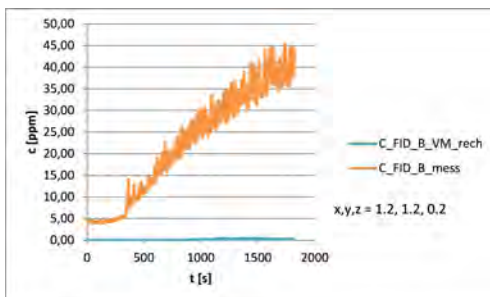
Versuch 2005-2



Relative Abweichung $L_2 = 0,79077$
 Inneres Produkt $cos = 0,94227$
 Projektionskoeffizient $a = 4,17130$

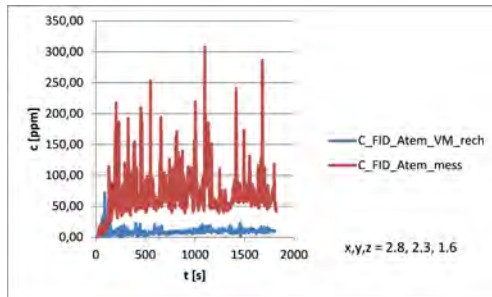


Relative Abweichung $L_2 = 0,83230$
 Inneres Produkt $cos = 0,72557$
 Projektionskoeffizient $a = 2,81872$

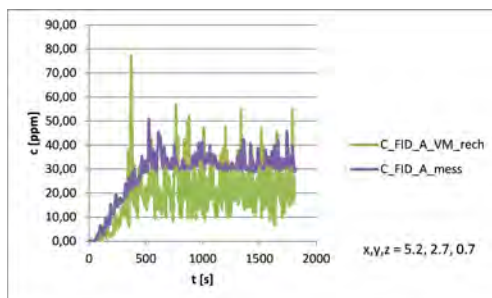


Relative Abweichung $L_2 = 0,99233$
 Inneres Produkt $cos = 0,89948$
 Projektionskoeffizient $a = 105,41905$

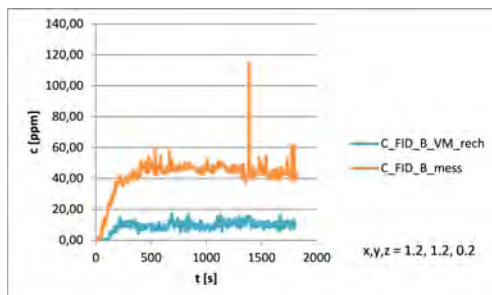
Versuch 2006-3



Relative Abweichung $L_2 = 0,68093$
 Inneres Produkt $\cos = 0,82980$
 Projektionskoeffizient $a = 1,88751$

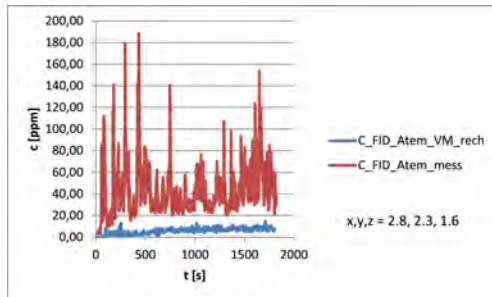


Relative Abweichung $L_2 = 1,73562$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93276$
 Projektionskoeffizient $a = 0,35459$

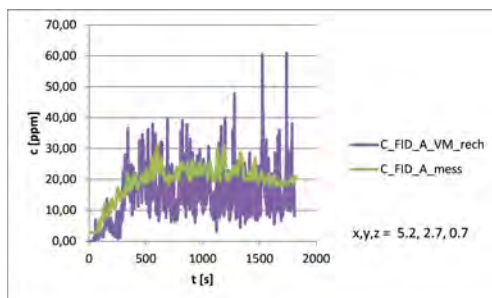


Relative Abweichung $L_2 = 0,23245$
 Inneres Produkt $\cos = 0,98057$
 Projektionskoeffizient $a = 1,14566$

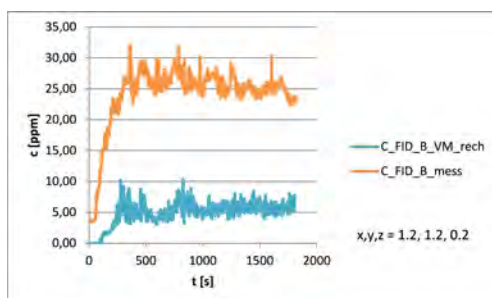
Versuch 2007-3



Relative Abweichung $L_2 = 0,89364$
 Inneres Produkt $\cos = 0,80692$
 Projektionskoeffizient $a = 5,91939$

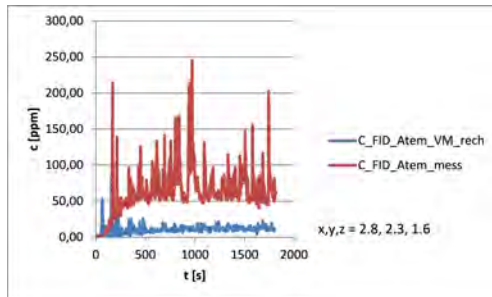


Relative Abweichung $L_2 = 0,41114$
 Inneres Produkt $\cos = 0,91525$
 Projektionskoeffizient $a = 1,09841$

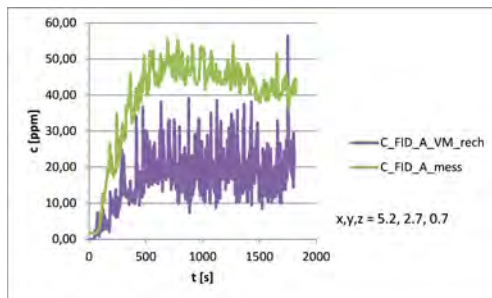


Relative Abweichung $L_2 = 0,79193$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96892$
 Projektionskoeffizient $a = 4,47308$

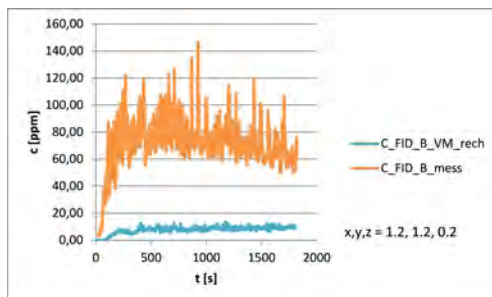
Versuch 2008-3



Relative Abweichung $L_2 = 0,86073$
 Inneres Produkt $cos = 0,82946$
 Projektionskoeffizient $a = 4,75116$

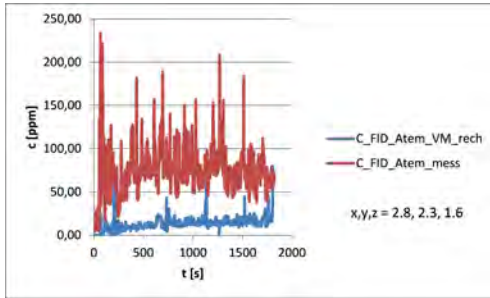


Relative Abweichung $L_2 = 0,58986$
 Inneres Produkt $cos = 0,95613$
 Projektionskoeffizient $a = 2,15274$

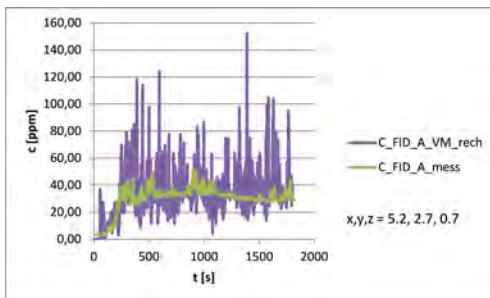


Relative Abweichung $L_2 = 0,89204$
 Inneres Produkt $cos = 0,95893$
 Projektionskoeffizient $a = 8,47232$

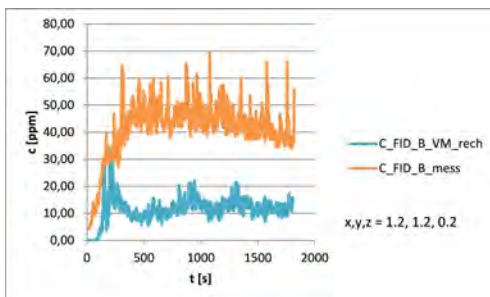
Versuch 2009-3



Relative Abweichung $L_2 = 0,84258$
 Inneres Produkt $cos = 0,83445$
 Projektionskoeffizient $a = 4,23406$

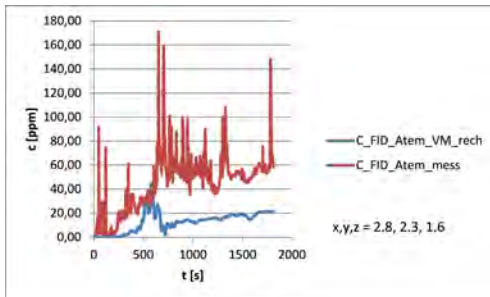


Relative Abweichung $L_2 = 0,52236$
 Inneres Produkt $cos = 0,91276$
 Projektionskoeffizient $a = 0,73710$

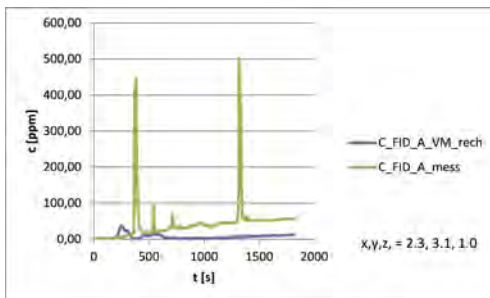


Relative Abweichung $L_2 = 0,72888$
 Inneres Produkt $cos = 0,94116$
 Projektionskoeffizient $a = 3,18641$

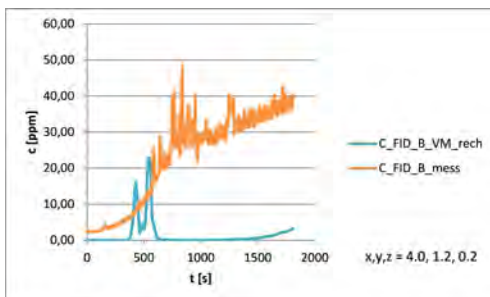
Versuch 2010-2



Relative Abweichung $L_2 = 0,74854$
 Inneres Produkt $\cos = 0,88401$
 Projektionskoeffizient $a = 2,95278$

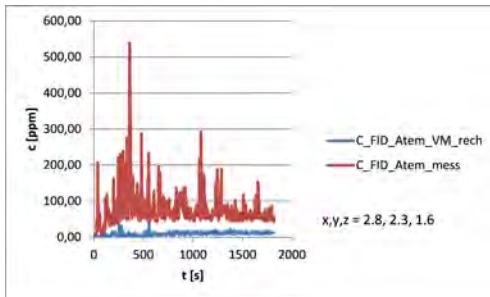


Relative Abweichung $L_2 = 0,95801$
 Inneres Produkt $\cos = 0,38983$
 Projektionskoeffizient $a = 3,10046$

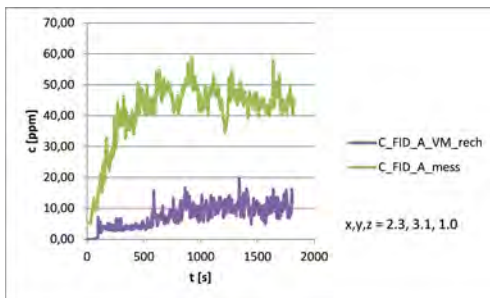


Relative Abweichung $L_2 = 0,97461$
 Inneres Produkt $\cos = 0,24210$
 Projektionskoeffizient $a = 1,61390$

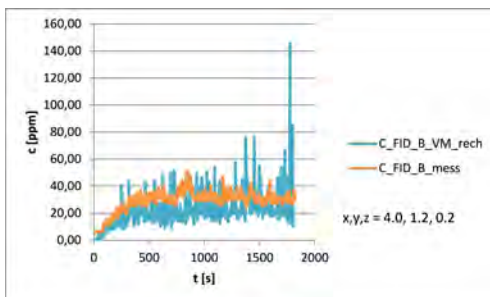
Versuch 2011-3



Relative Abweichung $L_2 = 0,90536$
 Inneres Produkt $\cos = 0,77105$
 Projektionskoeffizient $a = 6,04883$

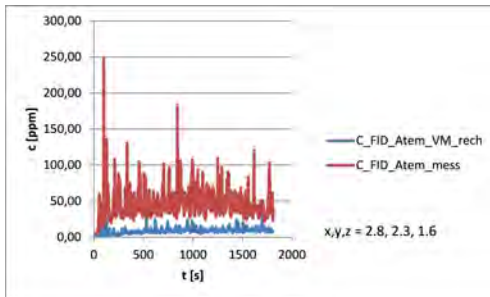


Relative Abweichung $L_2 = 0,81345$
 Inneres Produkt $\cos = 0,94252$
 Projektionskoeffizient $a = 4,69207$

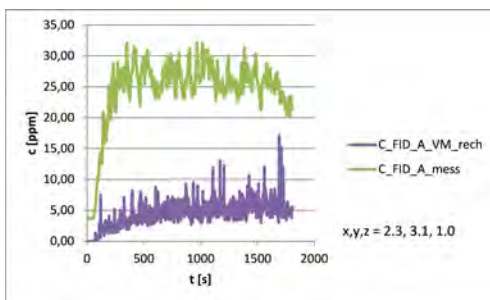


Relative Abweichung $L_2 = 0,41271$
 Inneres Produkt $\cos = 0,91714$
 Projektionskoeffizient $a = 1,13228$

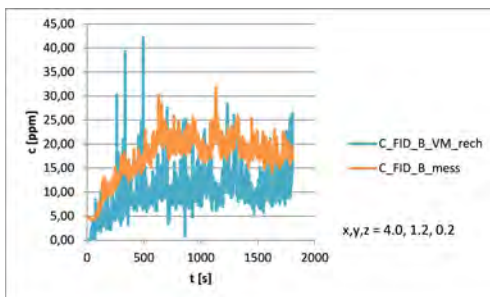
Versuch 2012-3



Relative Abweichung $L_2 = 0,84182$
 Inneres Produkt $\cos = 0,85901$
 Projektionskoeffizient $a = 4,50304$

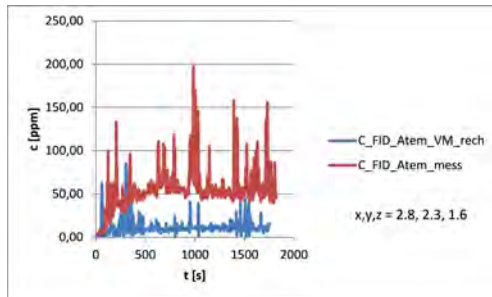


Relative Abweichung $L_2 = 0,81509$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93824$
 Projektionskoeffizient $a = 4,68580$

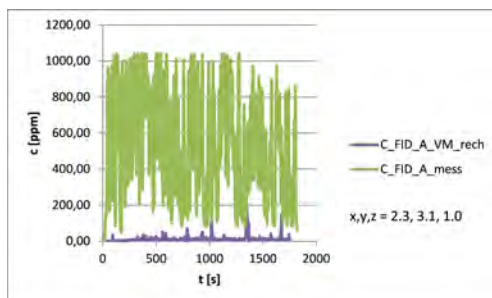


Relative Abweichung $L_2 = 0,47448$
 Inneres Produkt $\cos = 0,94370$
 Projektionskoeffizient $a = 1,56361$

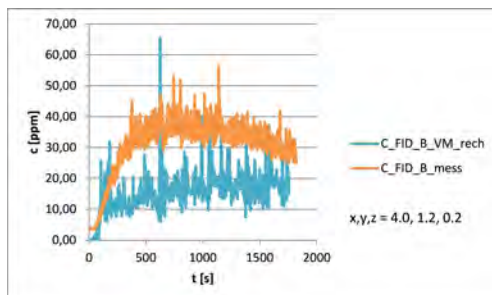
Versuch 2013-3



Relative Abweichung $L_2 = 0,83501$
 Inneres Produkt $\cos = 0,77254$
 Projektionskoeffizient $a = 3,35501$

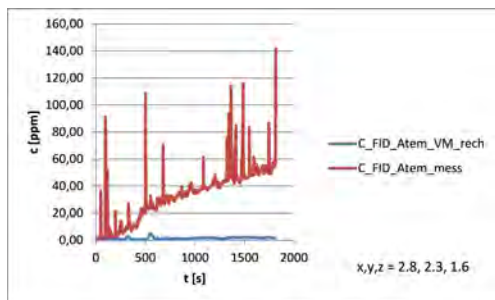


Relative Abweichung $L_2 = 0,98204$
 Inneres Produkt $\cos = 0,47910$
 Projektionskoeffizient $a = 12,37719$

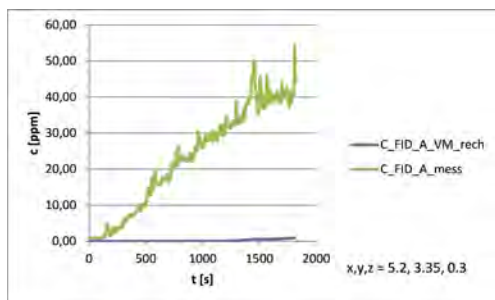


Relative Abweichung $L_2 = 0,54863$
 Inneres Produkt $\cos = 0,94370$
 Projektionskoeffizient $a = 1,86403$

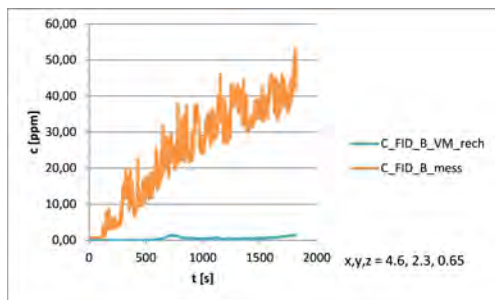
Versuch 2014-2



Relative Abweichung $L_2 = 0,96562$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97330$
 Projektionskoeffizient $a = 22,05959$

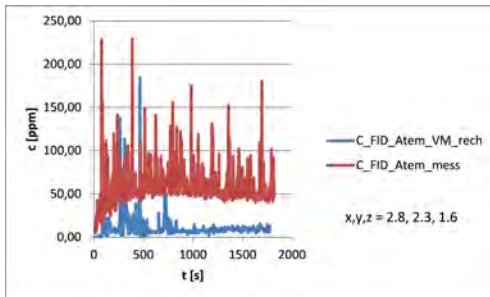


Relative Abweichung $L_2 = 0,99137$
 Inneres Produkt $\cos = 0,76913$
 Projektionskoeffizient $a = 68,32117$

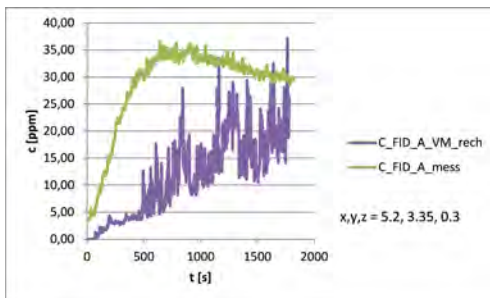


Relative Abweichung $L_2 = 0,98206$
 Inneres Produkt $\cos = 0,86893$
 Projektionskoeffizient $a = 41,95662$

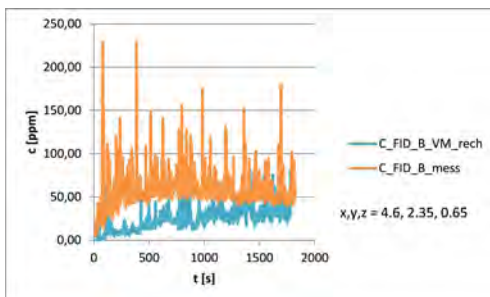
Versuch 2015-3



Relative Abweichung $L_2 = 0,86895$
 Inneres Produkt $cos = 0,57766$
 Projektionskoeffizient $a = 2,06512$

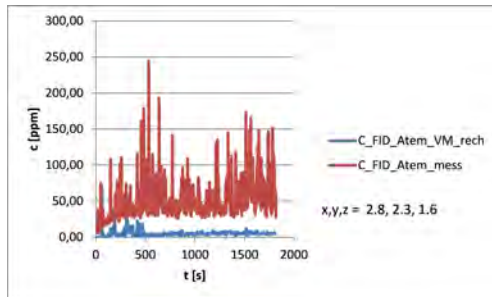


Relative Abweichung $L_2 = 0,61606$
 Inneres Produkt $cos = 0,89119$
 Projektionskoeffizient $a = 1,87874$

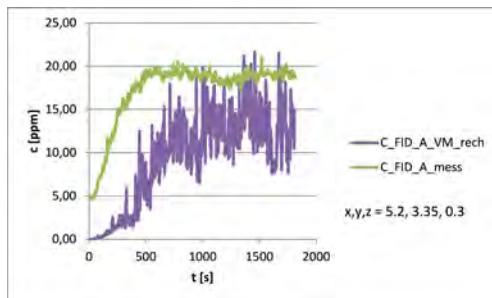


Relative Abweichung $L_2 = 0,39457$
 Inneres Produkt $cos = 0,92153$
 Projektionskoeffizient $a = 0,92935$

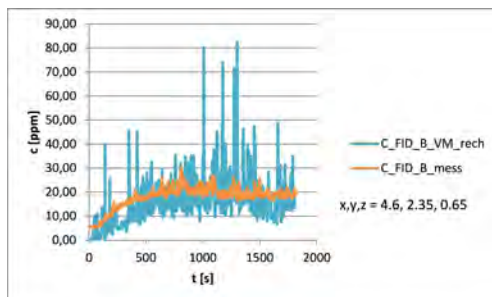
Versuch 2016-3



Relative Abweichung $L_2 = 0,92017$
 Inneres Produkt $\cos = 0,65755$
 Projektionskoeffizient $a = 5,08659$

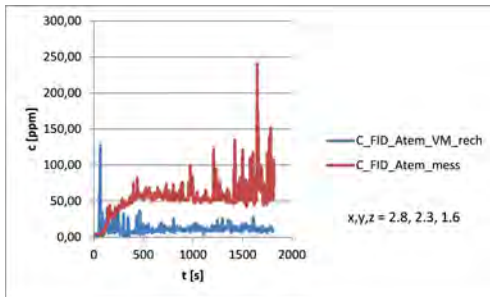


Relative Abweichung $L_2 = 0,49549$
 Inneres Produkt $\cos = 0,92500$
 Projektionskoeffizient $a = 1,52394$

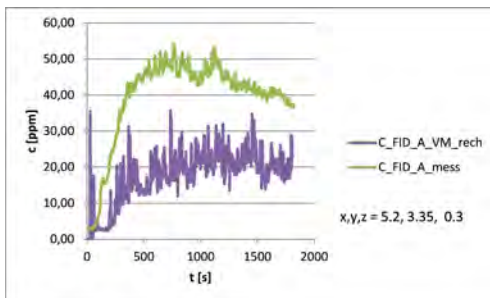


Relative Abweichung $L_2 = 0,43697$
 Inneres Produkt $\cos = 0,90393$
 Projektionskoeffizient $a = 0,90983$

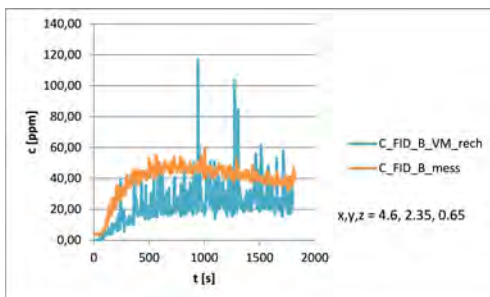
Versuch 2017-3



Relative Abweichung $L_2 = 0,83537$
 Inneres Produkt $\cos = 0,74677$
 Projektionskoeffizient $a = 3,09496$

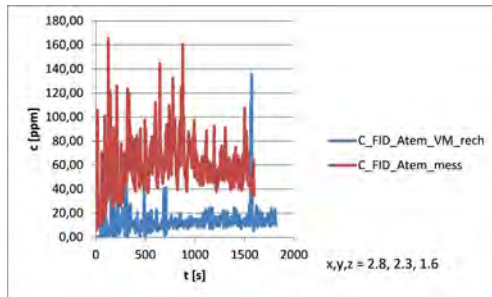


Relative Abweichung $L_2 = 0,56556$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96856$
 Projektionskoeffizient $a = 2,10254$

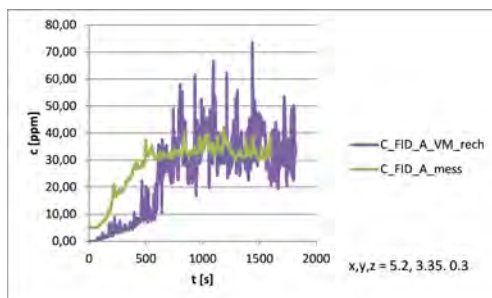


Relative Abweichung $L_2 = 0,47603$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93309$
 Projektionskoeffizient $a = 1,50206$

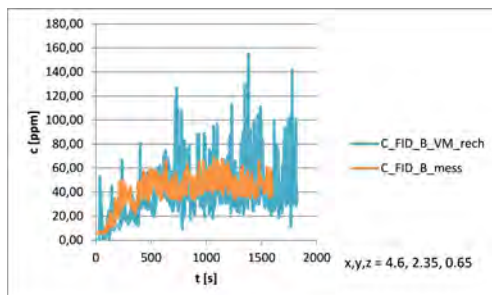
Versuch 2018-3



Relative Abweichung $L_2 = 0,83407$
 Inneres Produkt $\cos = 0,71300$
 Projektionskoeffizient $a = 2,72864$



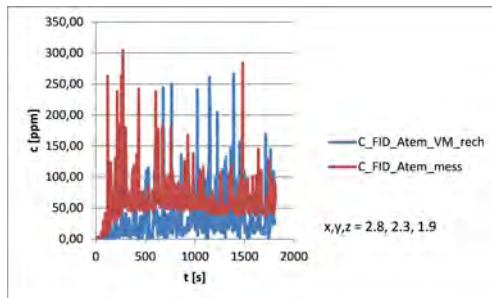
Relative Abweichung $L_2 = 0,38362$
 Inneres Produkt $\cos = 0,92387$
 Projektionskoeffizient $a = 0,97214$



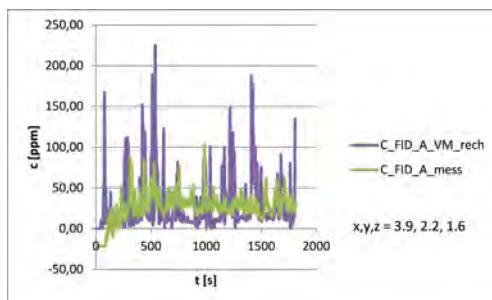
Relative Abweichung $L_2 = 0,41266$
 Inneres Produkt $\cos = 0,91385$
 Projektionskoeffizient $a = 0,92546$

J.2.5 Szenarien ohne Luftführung über Nebenräume, berechnete Emissions-Massenströme

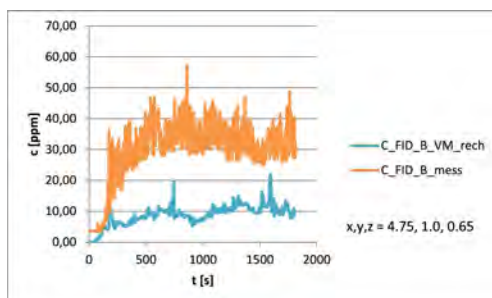
Versuch 2002-4



Relative Abweichung $L_2 = 0,80554$
 Inneres Produkt $\cos = 0,60319$
 Projektionskoeffizient $a = 0,84239$

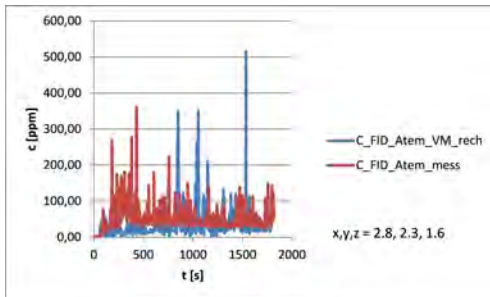


Relative Abweichung $L_2 = 1,05417$
 Inneres Produkt $\cos = 0,61366$
 Projektionskoeffizient $a = 0,46768$

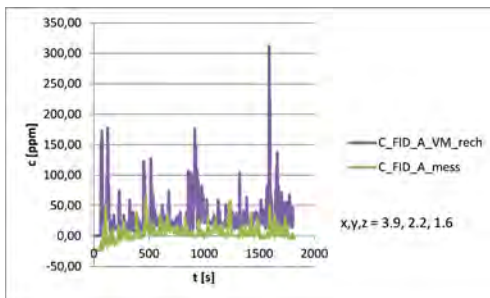


Relative Abweichung $L_2 = 0,71991$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95839$
 Projektionskoeffizient $a = 3,22215$

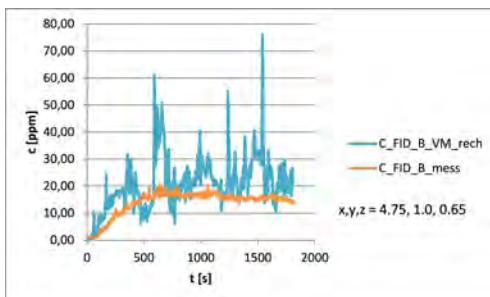
Versuch 2003-4



Relative Abweichung $L_2 = 0,91157$
 Inneres Produkt $cos = 0,52842$
 Projektionskoeffizient $a = 0,61416$

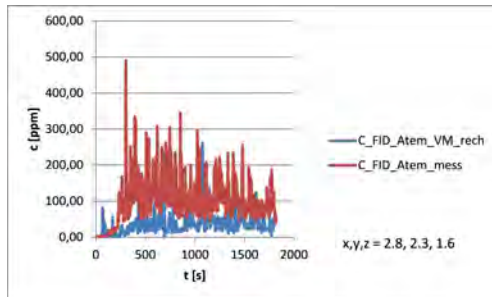


Relative Abweichung $L_2 = 3,08483$
 Inneres Produkt $cos = 0,31321$
 Projektionskoeffizient $a = 0,09643$

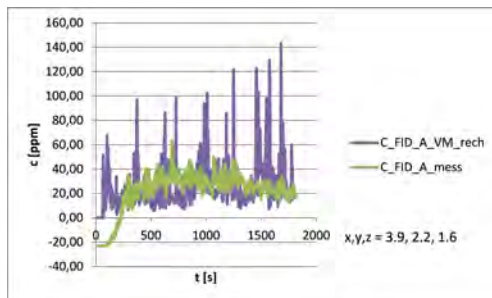


Relative Abweichung $L_2 = 0,71770$
 Inneres Produkt $cos = 0,93747$
 Projektionskoeffizient $a = 0,59898$

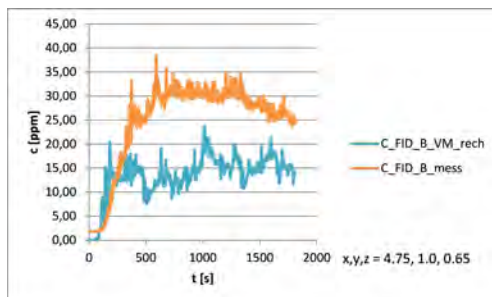
Versuch 2004-4



Relative Abweichung $L_2 = 0,76470$
 Inneres Produkt $\cos = 0,71859$
 Projektionskoeffizient $a = 1,79393$

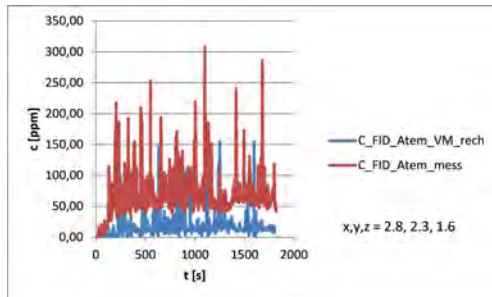


Relative Abweichung $L_2 = 0,86117$
 Inneres Produkt $\cos = 0,71326$
 Projektionskoeffizient $a = 0,58772$

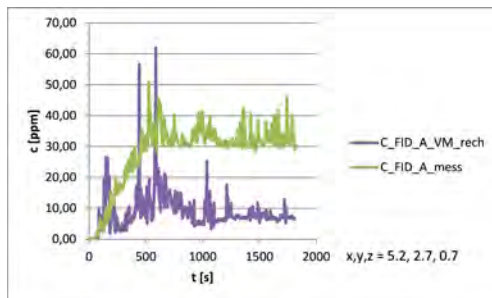


Relative Abweichung $L_2 = 0,50734$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96315$
 Projektionskoeffizient $a = 1,80712$

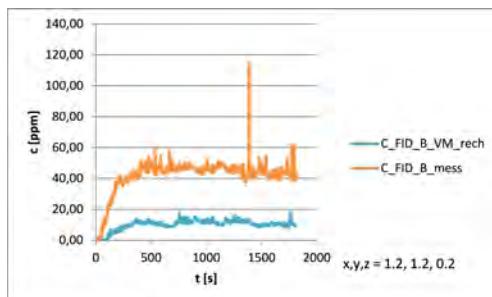
Versuch 2006-4



Relative Abweichung $L_2 = 0,82998$
 Inneres Produkt $\cos = 0,65152$
 Projektionskoeffizient $a = 2,06935$

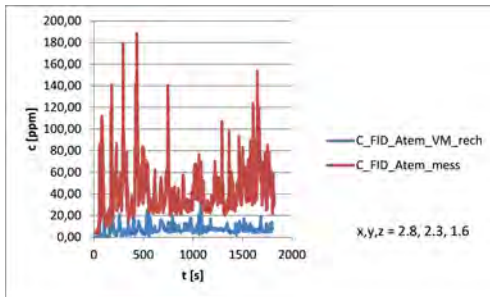


Relative Abweichung $L_2 = 0,73761$
 Inneres Produkt $\cos = 0,84084$
 Projektionskoeffizient $a = 2,47486$

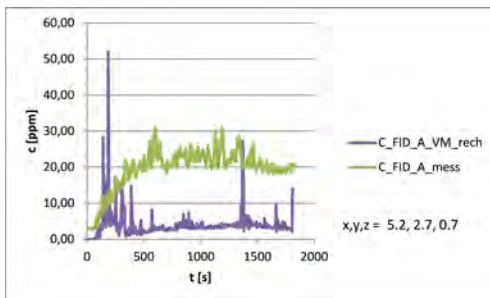


Relative Abweichung $L_2 = 0,76063$
 Inneres Produkt $\cos = 0,98307$
 Projektionskoeffizient $a = 4,01519$

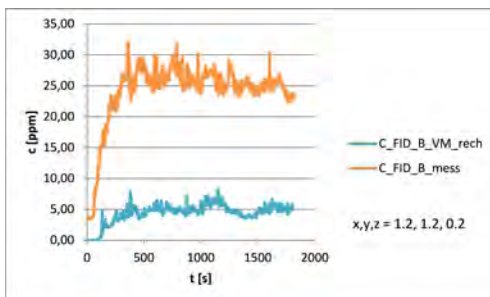
Versuch 2007-4



Relative Abweichung $L_2 = 0,87078$
 Inneres Produkt $\cos = 0,76344$
 Projektionskoeffizient $a = 4,25551$

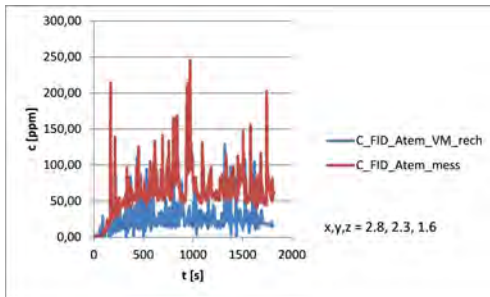


Relative Abweichung $L_2 = 0,84074$
 Inneres Produkt $\cos = 0,69997$
 Projektionskoeffizient $a = 2,73052$

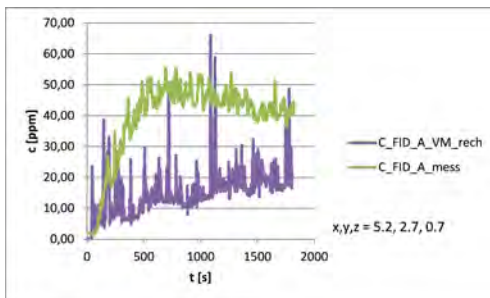


Relative Abweichung $L_2 = 0,81603$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97652$
 Projektionskoeffizient $a = 5,15485$

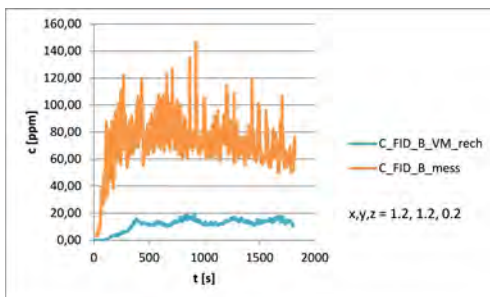
Versuch 2008-4



Relative Abweichung $L_2 = 0,70401$
 Inneres Produkt $cos = 0,79169$
 Projektionskoeffizient $a = 1,79180$

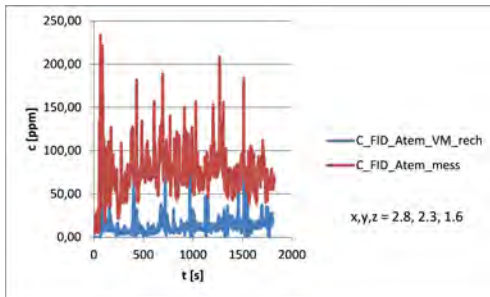


Relative Abweichung $L_2 = 0,65185$
 Inneres Produkt $cos = 0,90963$
 Projektionskoeffizient $a = 2,23332$

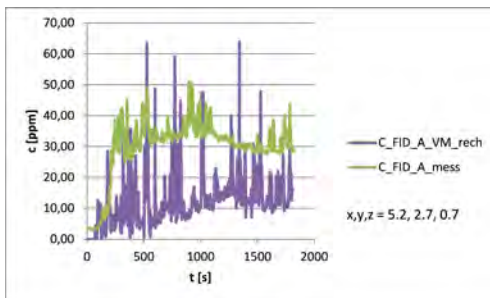


Relative Abweichung $L_2 = 0,84059$
 Inneres Produkt $cos = 0,94331$
 Projektionskoeffizient $a = 5,51553$

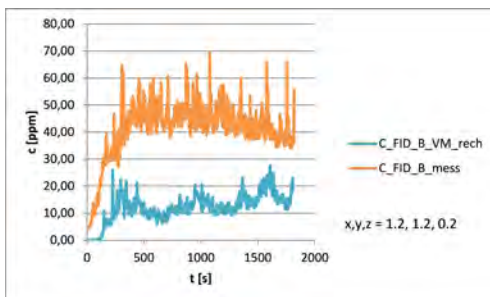
Versuch 2009-4



Relative Abweichung $L_2 = 0,85417$
 Inneres Produkt $cos = 0,75425$
 Projektionskoeffizient $a = 3,62810$

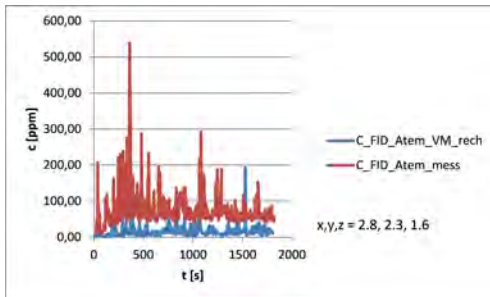


Relative Abweichung $L_2 = 0,64765$
 Inneres Produkt $cos = 0,83419$
 Projektionskoeffizient $a = 1,68655$

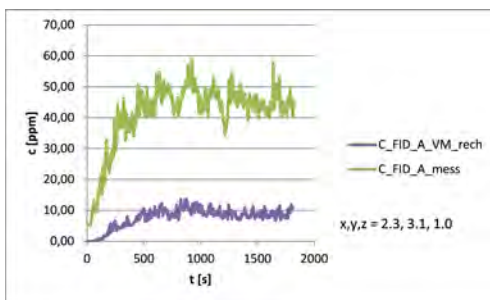


Relative Abweichung $L_2 = 0,71130$
 Inneres Produkt $cos = 0,94367$
 Projektionskoeffizient $a = 3,00516$

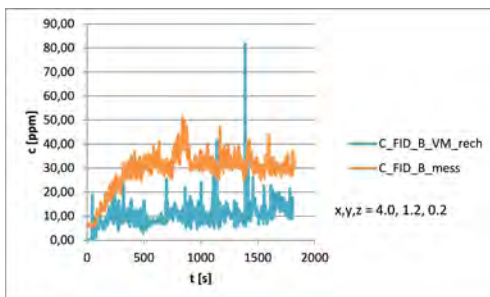
Versuch 2011-4



Relative Abweichung $L_2 = 0,84806$
 Inneres Produkt $cos = 0,65598$
 Projektionskoeffizient $a = 2,43577$

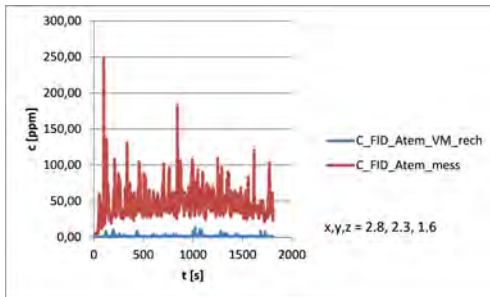


Relative Abweichung $L_2 = 0,81139$
 Inneres Produkt $cos = 0,97922$
 Projektionskoeffizient $a = 5,05828$

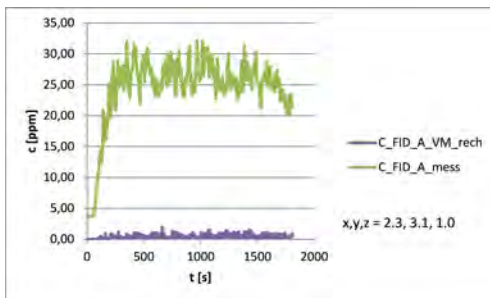


Relative Abweichung $L_2 = 0,68105$
 Inneres Produkt $cos = 0,92220,$
 Projektionskoeffizient $a = 2,55038$

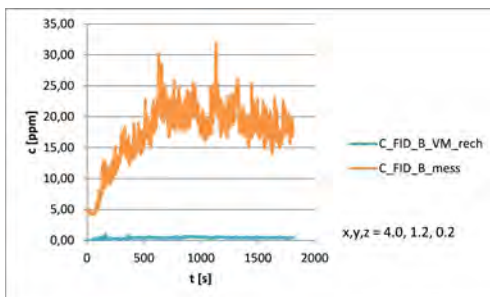
Versuch 2012-4



Relative Abweichung $L_2 = 0,97509$
 Inneres Produkt $\cos = 0,65681$
 Projektionskoeffizient $a = 17,02031$

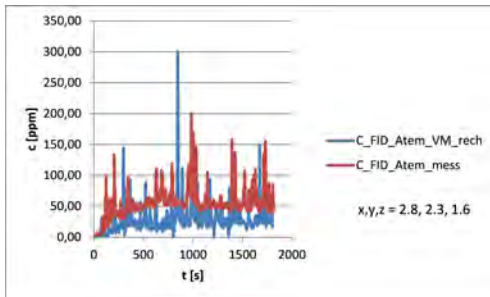


Relative Abweichung $L_2 = 0,98121$
 Inneres Produkt $\cos = 0,88385$
 Projektionskoeffizient $a = 41,45307$

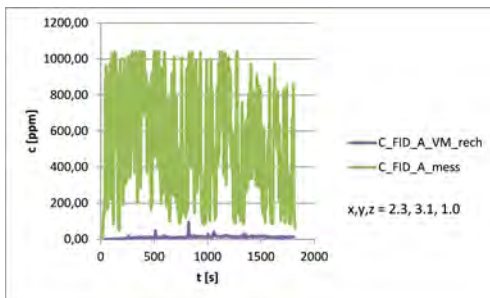


Relative Abweichung $L_2 = 0,97638$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97404$
 Projektionskoeffizient $a = 40,14358$

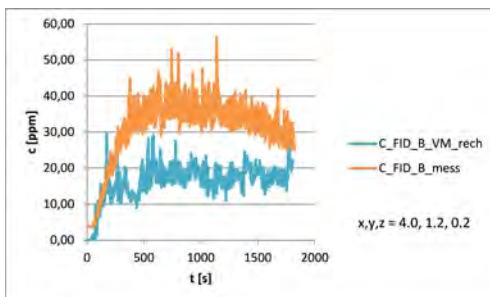
Versuch 2013-4



Relative Abweichung $L_2 = 0,65025$
 Inneres Produkt $\cos = 0,76914$
 Projektionskoeffizient $a = 1,18492$

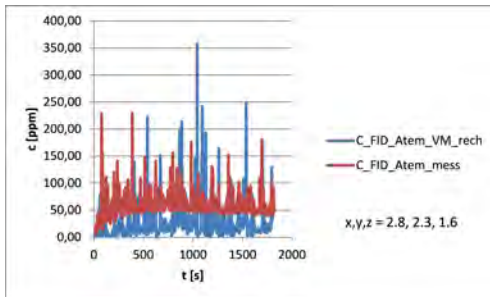


Relative Abweichung $L_2 = 0,98375$
 Inneres Produkt $\cos = 0,75285$
 Projektionskoeffizient $a = 34,64966$

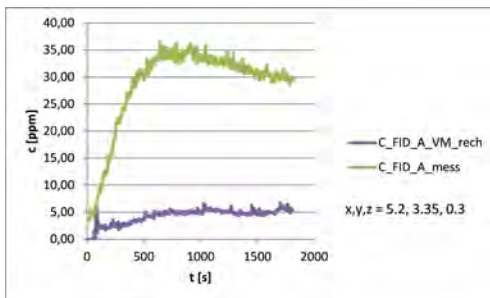


Relative Abweichung $L_2 = 0,50515$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97490$
 Projektionskoeffizient $a = 1,86951$

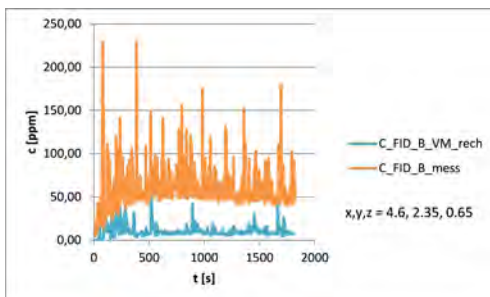
Versuch 2015-4



Relative Abweichung $L_2 = 0,79359$
 Inneres Produkt $\cos = 0,61439$
 Projektionskoeffizient $a = 0,87818$

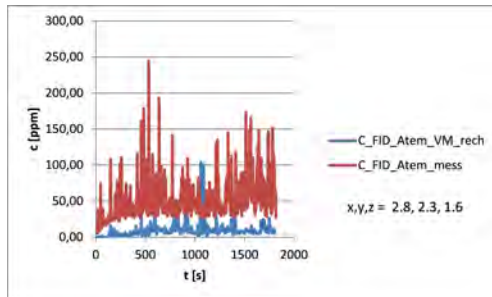


Relative Abweichung $L_2 = 0,85120$
 Inneres Produkt $\cos = 0,98446$
 Projektionskoeffizient $a = 6,49484$

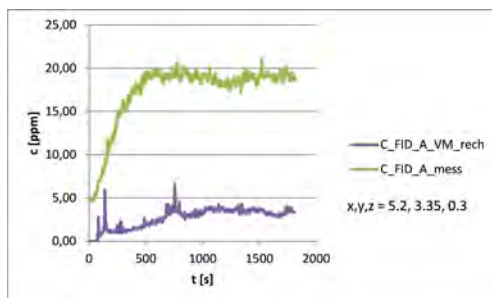


Relative Abweichung $L_2 = 0,69285$
 Inneres Produkt $\cos = 0,81678$
 Projektionskoeffizient $a = 1,88566$

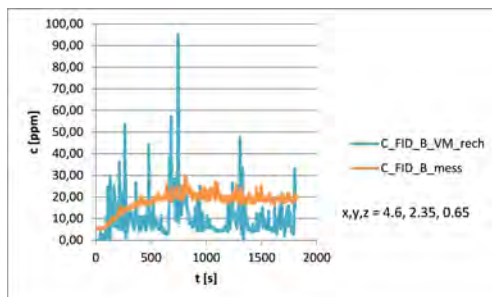
Versuch 2016-4



Relative Abweichung $L_2 = 0,86834$
 Inneres Produkt $\cos = 0,64445$
 Projektionskoeffizient $a = 2,76654$

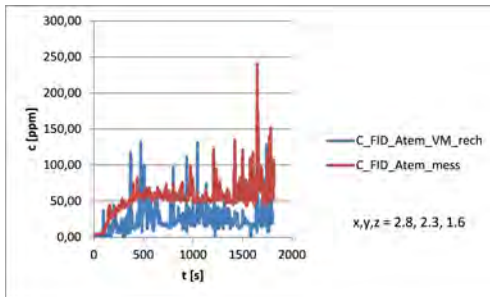


Relative Abweichung $L_2 = 0,84313$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96117$
 Projektionskoeffizient $a = 5,84391$

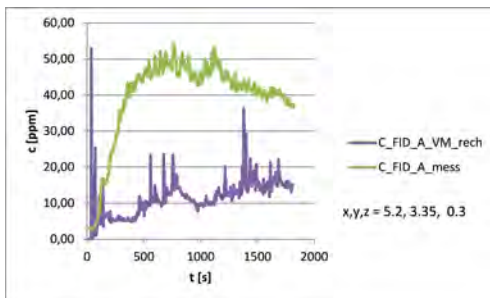


Relative Abweichung $L_2 = 0,65327$
 Inneres Produkt $\cos = 0,76005$
 Projektionskoeffizient $a = 1,09606$

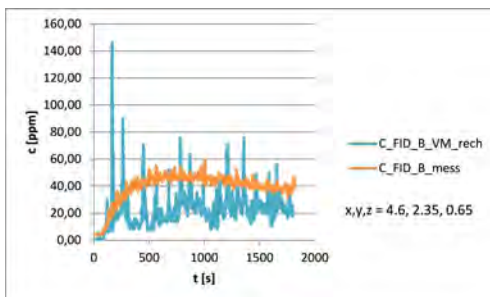
Versuch 2017-4



Relative Abweichung $L_2 = 0,65627$
 Inneres Produkt $\cos = 0,80372$
 Projektionskoeffizient $a = 1,52547$

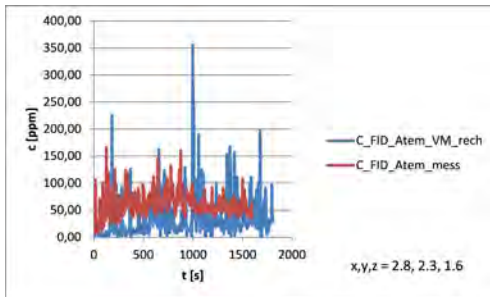


Relative Abweichung $L_2 = 0,73239$
 Inneres Produkt $\cos = 0,92621$
 Projektionskoeffizient $a = 3,10480$

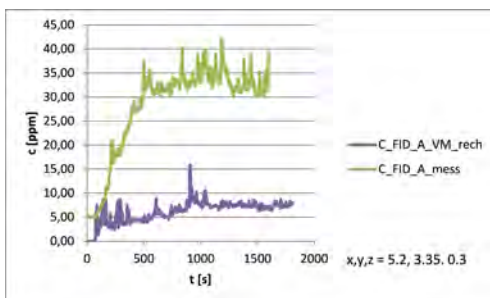


Relative Abweichung $L_2 = 0,53449$
 Inneres Produkt $\cos = 0,87496$
 Projektionskoeffizient $a = 1,34899$

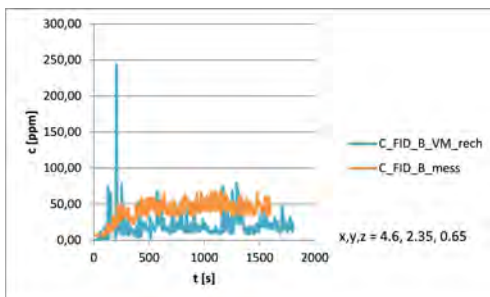
Versuch 2018-4



Relative Abweichung $L_2 = 0,79427$
 Inneres Produkt $\cos = 0,63412$
 Projektionskoeffizient $a = 0,78515$



Relative Abweichung $L_2 = 0,79125$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96861$
 Projektionskoeffizient $a = 4,45492$



Relative Abweichung $L_2 = 0,64341$
 Inneres Produkt $\cos = 0,81038$
 Projektionskoeffizient $a = 1,48829$

K Quantitative Vergleiche der Mess- und Berechnungsergebnisse

K.1 Vergleiche zu Propan-Versuchen (Untersuchungsschritt 1)

Anhang K. Quantitative Vergleiche der Mess- und Berechnungsergebnisse

Versuchsnummer	FID_Atem			Pos. 1			Pos. 2				
	Normale	Inn. Prod.	Proj.-koeff.	FID	Normale	Inn. Prod.	Proj.-koeff.	FID	Normale	Inn. Prod.	Proj.-koeff.
1004-2 (-1 ohne NR)	0,97930	0,84293	34,17906	1	0,89063	0,86602	6,71405	2	0,88538	0,96117	8,01661
1004-3	0,97176	0,79071	21,94539	1	0,83403	0,77234	3,33102	2	0,88029	0,88889	6,47896
1004-4	0,97133	0,78158	21,10386	1	0,84071	0,75374	3,28552	2	0,85946	0,94500	6,29140
1004-5	0,94826	0,79115	11,89567	1	0,71596	0,75979	1,65174	2	0,83050	0,96558	5,45942
1005-2 (-1 ohne NR)	0,94037	0,92073	14,13586	3	0,87287	0,92854	6,70208	4	0,90285	0,96639	9,57605
1005-3	0,92890	0,83311	9,59368	3	0,75819	0,92531	3,44272	4	0,96513	0,96219	26,51584
1006-2 (-1 ohne NR)	0,97953	0,86130	36,11319	5	0,95482	0,93699	19,36820	-	Ausfall FID		
1006-3	0,96624	0,85250	21,38318	5	0,95632	0,91023	18,87806	-			
1007-2 (-1 ohne NR)	0,96509	0,86373	21,23994	3	0,88706	0,93158	7,60862	-			
1007-3	0,95778	0,86260	17,48785	3	0,84448	0,96214	5,90791	-			
1007-4	0,93481	0,84268	10,73640	3	0,80705	0,95773	4,69751	-			
1007-5	0,94202	0,83794	11,94925	3	0,79889	0,95286	4,45624	-			
1008-2 (-1 ohne NR)	0,94997	0,94140	17,67196	7	0,91846	0,90122	9,85780	-			
1008-3	0,94125	0,88728	13,28717	7	0,95550	0,90667	18,37850	-			
1010-1	0,93595	0,81957	10,94072	5	0,97285	0,47425	7,86362	-			
1010-2	0,89827	0,80619	6,18717	5	0,97529	0,53709	11,29854	-			
1011-1	0,94175	0,90721	14,03501	3	0,91742	0,96385	11,21081	-			
1011-2	0,90702	0,84518	7,52152	3	0,92619	0,96768	12,65176	-			
1012-1	0,94228	0,92071	14,60473	7	0,88644	0,96527	8,16611	-			
1012-2	0,89854	0,89415	7,76655	7	0,82722	0,98276	5,56919	-			
1013-1	0,90882	0,96292	10,12904	8	0,96475	0,87430	21,56391	-			
1013-2	0,85656	0,94255	6,12750	8	0,94203	0,86533	12,78296	-			
1014-1	0,92735	0,88157	10,57568	1	0,84633	0,94899	5,80120	-			
1014-2	0,88718	0,86699	6,51917	1	0,82605	0,90259	4,56819	-			
1015-1	0,93524	0,90239	12,47261	2	0,88499	0,97738	8,28040	-			
1015-2	0,87499	0,84196	5,49899	2	0,77393	0,95169	3,94425	-			
1016-1	0,91977	0,89848	9,95644	5	0,97466	0,44259	7,29106	-			
1016-2	0,90639	0,87263	8,00027	5	0,98235	0,40574	8,87865	-			
1017-1	0,90801	0,88751	8,44427	3	0,89923	0,97457	9,39752	-			
1017-2	0,91081	0,88214	8,60151	3	0,89023	0,96814	8,50375	-			
1018-1	0,94663	0,82634	12,62456	7	0,86652	0,98829	7,30402	-			
1018-2	0,95059	0,85583	14,68135	7	0,84221	0,98304	6,10425	-			
1019-1	0,95115	0,82642	13,81291	1	0,84856	0,97499	6,24096	2	0,90610	0,98639	10,34637
1019-2	0,95038	0,82088	13,40729	1	0,79521	0,98081	4,67346	2	0,87545	0,98319	7,74217
1020-1	0,96204	0,92882	22,65414	1	0,81193	0,95103	4,74953	2	0,94404	0,87009	13,39729
1020-2	0,94894	0,90212	15,83996	1	0,72463	0,97053	3,37997	2	0,91460	0,88127	8,96977
1021-1	0,93858	0,98427	15,75637	3	0,91658	0,98310	11,56707	5	0,93174	0,99260	14,42574
1021-2	0,92463	0,95832	12,14074	3	0,86873	0,97999	7,29289	5	0,92667	0,98765	13,28964
1022-1	0,97145	0,88221	27,14934	7	0,83760	0,97347	5,80364	8	0,95978	0,96578	23,15786
1022-2	0,96796	0,86753	23,16598	7	0,80502	0,97329	4,82534	8	0,95041	0,95357	18,28977
1023-1	0,96771	0,86493	23,03411	7	0,88736	0,92840	7,57366	8	0,95508	0,93603	19,43787
1023-2	0,95882	0,85028	17,41172	7	0,87077	0,88709	5,96432	8	0,94923	0,91996	16,58759

K.2 Vergleiche zu Isopropanol-Versuchen (Untersuchungsschritt 2)

Anhang K. Quantitative Vergleiche der Mess- und Berechnungsergebnisse

Versuchsnummer	FID_Atem			Pos. 1				Pos. 2			
	Normale	Inn. Prod.	Proj.-koeff.	FID	Normale	Inn. Prod.	Proj.-koeff.	FID	Normale	Inn. Prod.	Proj.-koeff.
2001-1	0,87531	0,84268	0,54976	1	0,50103	0,90026	0,78404	2	0,55682	0,91821	1,74280
2001-2	0,80854	0,27670	3,36961	1	0,72426	0,88908	2,71217	2	0,93800	0,83481	11,07866
2002-1	0,68276	0,77665	1,51297	1	1,77776	0,70304	0,30143	2	1,44741	0,96093	0,40348
2002-2	1,28007	0,69081	0,39540	1	2,70373	0,69571	0,21068	2	0,54248	0,97684	0,66211
2002-3											
2002-4	0,80554	0,60319	0,84239	1	1,05417	0,61366	0,46768	2	0,71991	0,95839	3,22215
2003-1	0,80035	0,78013	2,77664	1	3,07528	0,27631	0,08641	2	1,78431	0,95036	0,35103
2003-2	0,90797	0,53269	0,61827	1	3,08681	0,31271	0,09623	2	0,71589	0,94019	0,59891
2003-3	0,92611	0,75463	7,46494	1	1,57406	0,21427	0,14792		0,29211	0,95834	0,94002
2003-4	0,91157	0,52842	0,61416	1	3,08483	0,31321	0,09643		0,71770	0,93747	0,59898
2004-1	0,72312	0,79912	2,01156	1	2,10174	0,76475	0,27655	2	1,96054	0,97769	0,33403
2004-2	0,63804	0,79620	0,79720	1	2,80864	0,78068	0,22185	2	1,41538	0,94383	0,40681
2004-3	0,91706	0,71618	5,90573	1	0,73140	0,69264	0,85108	2	0,34733	0,97784	1,39555
2004-4	0,76470	0,71859	1,79393	1	0,86117	0,71326	0,58772	2	0,50734	0,96315	1,80712
2005-1	0,89752	0,92738	0,53200	3	1,18593	0,73378	0,43016	4	0,36769	0,94182	0,86334
2005-2	0,79077	0,94227	4,17130	3	0,83230	0,72557	2,81872	4	0,99233	0,89948	105,41905
2006-1	0,65376	0,81705	1,60563	3	2,26755	0,92292	0,29229	4	0,22170	0,97517	0,98936
2006-2	0,75553	0,77195	0,65404	3	0,89609	0,86054	0,53859	4	0,51078	0,96898	0,68431
2006-3	0,68093	0,82980	1,88751	3	1,73562	0,93276	0,35459	4	0,23245	0,98057	1,14566
2006-4	0,82998	0,65152	2,06935	3	0,73761	0,84084	2,47486	4	0,76063	0,98307	4,01519
2007-1	0,68093	0,82980	1,88751	3	1,73562	0,93276	0,35459	4	0,23245	0,98057	1,14556
2007-2	0,89421	0,67385	0,57226	3	0,64181	0,83017	0,72306	4	0,22000	0,97567	0,98168
2007-3	0,89364	0,80692	5,91939	3	0,41114	0,91525	1,09841	4	0,79193	0,96892	4,47308
2007-4	0,87078	0,76344	4,25551	3	0,84074	0,69997	2,73052	4	0,81603	0,97652	5,15485
2008-1	0,49517	0,87524	1,13778	3	1,11645	0,95930	0,47037	4	0,51170	0,95231	1,75853
2008-2	0,69292	0,87087	0,64068	3	0,90076	0,93794	0,53013	4	0,43284	0,94159	1,40606
2008-3	0,86073	0,82946	4,75116	3	0,58986	0,95613	2,15274	4	0,89204	0,95893	8,47232
2008-4	0,70401	0,79169	1,79180	3	0,65185	0,90963	2,23332	4	0,84059	0,94331	5,51553
2009-1	0,59459	0,85745	1,53246	3	2,20348	0,93098	0,29993	4	0,31822	0,95100	0,92665
2009-2	0,53295	0,84908	1,09056	3	1,60110	0,93858	0,37512	4	0,77156	0,93023	0,57817
2009-3	0,84258	0,83445	4,23406	3	0,52236	0,91276	0,73710	4	0,72888	0,94116	3,18641
2009-4	0,85417	0,75425	3,62810	3	0,64765	0,83419	1,68655	4	0,71130	0,94367	3,00516
2010-1	0,66763	0,89163	0,64504	5	0,89683	0,58310	0,60552	6	0,31059	0,97524	1,28803
2010-2	0,74854	0,88401	2,95278	5	0,95801	0,38983	3,10046	6	0,97461	0,24210	1,61390
2011-1	0,74175	0,78476	2,08005	5	0,46384	0,95903	1,62064	6	1,84319	0,92508	0,33902
2011-2	0,72994	0,70953	0,78847	5	0,25381	0,97135	1,10095	6	1,26120	0,90813	0,43289
2011-3	0,90536	0,77105	6,04883	5	0,81345	0,94252	4,69207	6	0,41271	0,91714	1,13228
2011-4	0,84806	0,65598	2,43577	5	0,81139	0,97922	5,05828	6	0,68105	0,92220	2,55038
2012-1	0,62445	0,82848	1,50022	5	0,55896	0,94569	1,92612	6	0,90432	0,88829	0,53277
2012-2	1,31230	0,72939	0,39442	5	0,93357	0,68685	0,53965	6	0,24415	0,97104	1,05458
2012-3	0,84182	0,85901	4,50304	5	0,81509	0,93824	4,68580	6	0,47448	0,94370	1,56361
2012-4	0,97509	0,65681	17,02031	5	0,98121	0,88385	41,45307	6	0,97638	0,97404	40,14358
2013-1	0,46886	0,88344	0,98104	5	0,93348	0,61093	5,25175	6	1,38042	0,96830	0,41361
2013-2	0,84939	0,88556	0,55463	5	0,93708	0,76798	9,14936	6	1,47227	0,95693	0,39868
2013-3	0,83501	0,77254	3,35501	5	0,98204	0,47910	12,37719	6	0,54863	0,94370	1,86403
2013-4	0,65025	0,76914	1,18492	5	0,98375	0,75285	34,64966	6	0,50515	0,97490	1,86951
2014-1	1,45712	0,88990	0,39137	7	1,03004	0,81975	0,48914	8	3,18978	0,81047	0,20539
2014-2	0,96562	0,97330	22,05959	7	0,99137	0,76913	68,32117	8	0,98206	0,86893	41,95662
2015-1	0,64584	0,78674	1,31822	7	1,06951	0,82761	0,47619	8	2,56257	0,90333	0,26338
2015-2	1,02234	0,76391	0,49068	7	0,32163	0,96550	1,24304	8	2,41236	0,80262	0,25561
2015-3	0,86895	0,57766	2,06512	7	0,61606	0,89119	1,87874	8	0,39457	0,92153	0,92935
2015-4	0,79359	0,61439	0,87818	7	0,85120	0,98446	6,49484	8	0,69285	0,81678	1,88566
2016-1	0,74343	0,75696	1,88092	7	1,55580	0,93223	0,38122	8	3,30604	0,90927	0,21706
2016-2	0,64354	0,78625	1,29650	7	0,38604	0,96795	1,43447	8	2,00761	0,81933	0,29866
2016-3	0,92017	0,65755	5,08659	7	0,49549	0,92500	1,52394	8	0,43697	0,90393	0,90983
2016-4	0,86834	0,64445	2,76654	7	0,84313	0,96117	5,84391	8	0,65327	0,76005	1,09606
2017-1	0,44596	0,89534	1,02586	7	1,06579	0,96472	0,48297	8	1,83618	0,94041	0,34261
2017-2	0,99021	0,87336	0,52324	7	0,64962	0,93802	0,63062	8	2,14158	0,88834	0,29809
2017-3	0,83537	0,74677	3,09496	7	0,56556	0,96856	2,10254	8	0,47603	0,93309	1,50206
2017-4	0,65627	0,80372	1,52547	7	0,73239	0,92621	3,10480	8	0,53449	0,87496	1,34899
2018-1	0,58078	0,85886	1,46794	7	1,46653	0,94179	0,39750	8	2,09228	0,88881	0,30332
2018-2	0,81618	0,79993	0,59117	7	0,34855	0,94742	0,87272	8	1,90663	0,81941	0,31064
2018-3	0,83407	0,71300	2,72864	7	0,38362	0,92387	0,97214	8	0,41266	0,91385	0,92546
2018-4	0,79247	0,63412	0,78515	7	0,79125	0,96861	4,45492	8	0,64341	0,81038	1,48829

L Fotodokumentation

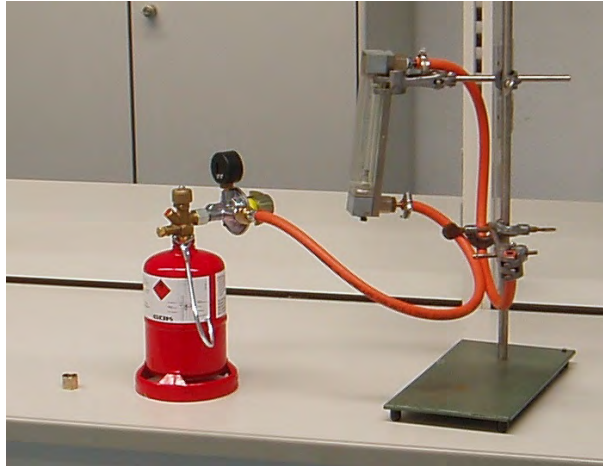


Abbildung L.1: Installation zur Propan-Emission



Abbildung L.2: Installation zur Isopropanol-Verdunstung



Abbildung L.3: Auslassöffnung Zuluft ohne Drallkörper,
Installation zur Messung der Zulufttemperatur



Abbildung L.4: Einschränkung der Zuluftöffnungen