

Brandversuche in Straßentunneln

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 57

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Brandversuche in Straßentunneln

Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung

von

Bernhard Steinauer
Georg Mayer

isac – Institut für Straßenwesen Aachen
RWTH Aachen

Peter Kündig

Kündig Ingenieurbüro
Zürich

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 57

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M- Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 03.375/2004/FGB:
Brandversuche in Straßentunneln
–Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung

Projektbetreuung
Christof Sistenich

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Referat Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-86509-734-7

Bergisch Gladbach, September 2007

Kurzfassung – Abstract

Brandversuche in Straßentunneln

Um das oft komplexe Zusammenwirken von einzelnen betriebstechnischen Einrichtungen zur Detektion von Brandereignissen und Steuerung der Lüftung sowie den übrigen sicherheitstechnischen Systemen überprüfen zu können, werden nach ZTV-ING im Rahmen der Abnahme Funktionsprüfungen gefordert, indem Brände simuliert und die zu prüfenden Größen messtechnisch erfasst werden. Reale Brandversuche in Straßentunnel sind jedoch unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit und des notwendigen technischen Aufwandes zur Erfassung der interessierenden Branddaten und zum Schutz der betriebstechnischen Einrichtungen sowie des Bauwerkes in der Anzahl der Szenarien wie in der Energiefreisetzung begrenzt. Die unter vertretbarem Aufwand erreichbare Brandleistung beträgt ca. 5 MW. Um dennoch Aussagen über das Verhalten des Systems bei höheren Brandleistungen und unterschiedlichen, realen Randbedingungen (Brandorte, Verkehrsbelegung, Windverhältnisse usw.) zu erhalten, sollten Simulationsrechnungen durchgeführt werden können. Diese erlauben eine sehr flexible Modellierung des Tunnels und die Ermittlung sämtlicher relevanter Größen an beliebigen Punkten im Untersuchungsgebiet. Da die Randbedingungen sehr tunnelspezifisch sein können, sind zur Kalibrierung entsprechender Rechenprogramme Eingangswerte aus standardisierten Brandversuchen hilfreich. Ziel der Untersuchung war es daher, mit Hilfe eines geeigneten Rechenprogramms Anforderungen an einen Brandversuch hinsichtlich der notwendigen Daten zur Funktionsüberprüfung und zur Brandhochrechnung zu definieren. Zur Durchführung der Simulationsrechnungen wurde der "Fire Dynamics Simulator" (FDS) verwendet, der über das National Institute of Standards and Technology als Open Source-Rechenprogramm erhältlich ist. Grundlage des Rechenprogramms bilden die Gleichungen für die Massen-, Impuls-, Energie- und Stofferhaltung, die im 3-dimensionalen Raum numerisch gelöst werden und als Ergebnis Geschwindigkeits-, Temperatur- und Konzentrationsfelder bereitstellen. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden verschiedene Versuchsreihen des Memorial-Tunnel-Fire-Ventilation-Test-Program (MTFVTP) zur Verifizierung der Rechenergebnisse herangezogen. Die vergleichende Gegenüberstellung der einen Brand charakterisierenden Größen Geschwindigkeit und Temperatur ergaben eine überwiegend gute Übereinstimmung der Messwerte aus den Brandversuchen mit den Simulationsergebnissen. Basierend auf den Berechnungen zu den Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen wurden schließlich unter den Aspekten der Funktionsüberprüfung der betriebstechnischen Einrichtungen und der Erfassung von Eingangsgrößen für Simulationsrechnungen Anforderungen zur Versuchsanordnung, Branddauer, Brandgut und Erfassung der relevanten Messgrößen im Längs- und Querschnitt sowie Anforderungen zu Schutzvorkehrungen abgeleitet. Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Definition "eines" Standardbrandversuchs nicht zweckmäßig ist, da die Zielsetzungen sich zu sehr unterscheiden. Dagegen konnten konkrete Grundlagen und Empfehlungen zur Festlegung standardisierter Brandversuche für die gemäß RAGT und ZTV-ING vorgesehenen Funktionstests erarbeitet werden. Außerdem konnte gezeigt werden, dass das für die Simulationsrechnungen verwendete Programm FDS derzeit ein adäquates Instrument bildet, nicht nur bezüglich der Simulation von Tunnelbränden unter realen Gegebenheiten und der resultierenden Strömungs- und Temperaturverhältnissen sowie Rauchkonzentrationen, sondern auch in Bezug auf die benötigte Rechner- und Speicherkapazität.

Fire Tests in Road Tunnels

The ZTV-ING guidelines require tests of function for the acceptance of work in order to check the complex interactions between separate operational control equipment units for the fire detection, tunnel ventilation and the other security systems. These tests include the simulation of tunnel fires and the measurement of the relevant values to be checked. But, real tunnel fire tests are constricted regarding the number of scenarios and the heat release rate, considering both the economic efficiency and the necessary technical effort required to record the interesting fire data and to protect the operational control equipment and the construction. The heat release rate that can be achieved with a justifiable effort is approximately 5 MW. In order to get statements about the behaviour of the system facing higher heat release rates and different, real boundary conditions, still, it should be possible to carry out simulations, which allow a very flexible modelling of the tunnel and the determination of all relevant data at any points in the study area. As the boundary conditions tend to be very specific for each tunnel, initial values derived from real fire tests are helpful for the calibration of suitable calculation programs. Therefore, the aim of the project was the definition of requirements for a fire test regarding the necessary data for the test of function and the projection of the fire using a suitable calculation program. The simulations were carried out with the "Fire Dynamics Simulator" (FDS), which is available at the National Institute of Standards and Technology as a Open Source—program. The program is based on the conservation laws for mass, momentum, energy and species which are solved numerically in the 3-dimensional space. The results are velocity-, temperature- and concentration fields. In the course of this project, different series of tests from the Memorial-Tunnel-Fire-Ventilation-Test-Program (MTFVTP) were used for the verification of the calculation results. The comparison of the characteristic values velocity and temperature from both test data and simulation results showed good correspondance. Based on the calculations of temperature and velocity distributions, and regarding tests of function of the operational control equipment and recording of initial values for simulations, requirements were derived for the experimental investigation design, fire duration, burnt material, measurement of the relevant data and protection precautions. The project showed that the definition of a "single" standard fire test is not advisable, as the aims differ too much. But, concrete bases and recommendations for the definition of standardized fire tests required by the tests of function according to the RABT and ZTV-ING guidelines were acquired. Additionally, it could be shown that the program FDS that was used for the simulations provides momentarily an adequate instrument — on one hand for the simulation of tunnel fires under real conditions and the resulting velocity and temperature situations and smoke concentrations and on the other hand to show the necessary Computer and storage capacities.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	11
Abkürzungsverzeichnis	12
1 Einleitung.....	15
1.1 Brandsimulationen	15
1.1.1 Zielsetzungen von Brandsimulationen.....	15
1.2 Aufgabe des Forschungsvorhabens	17
2 Methodische Vorgehensweise und Arbeitsprogramm.....	18
3 Grundlagenstudie	21
3.1 Analyse durchgeführter Brandversuche	21
3.1.1 Ausgewählte Brandversuche mit Wannenbränden:.....	22
3.1.2 Ausgewählte Brandversuche mit Gasbrennern:	28
3.1.3 Ausgewählte Brandversuche mit realen Kfz:	30
3.1.4 Zusammenfassung und grundlegende Erkenntnisse	30
3.2 Memorial Tunnel Brandversuche.....	34
3.2.1 Geometrische Verhältnisse.....	35
3.2.2 Versuchsprogramm	36
3.2.3 Messeinrichtungen.....	38
3.2.4 Szenarienauswahl	41
3.2.4.1 Querlüftung	41
3.2.4.2 Halbquerlüftung (reversierbar).....	42
3.2.4.3 Längslüftung	44
3.3 Analyse vorhandener Simulationsprogramme.....	45
3.4 Auswahl eines Simulationsprogramms zur Durchführung der Berechnungen.....	49
3.4.1 Mathematisches Modell	49
3.4.2 Überprüfung prinzipieller Modelleigenschaften.....	50
4 Datenaufbereitung.....	52
5 Modellierung.....	53

5.1	Tunnelgeometrie	53
5.1.1	Querlüftung	54
5.1.2	Halbquerlüftung (Verteilte Absaugung).....	55
5.1.3	Längslüftung	56
5.2	Rand- und Anfangsbedingungen	57
5.2.1	Querlüftung	57
5.2.2	Halbquerlüftung	58
5.2.3	Längslüftung	58
5.3	Längsneigung	59
5.4	Brandstelle / Brandherd	59
6	Ergebnisse der Simulationsrechnungen.....	61
6.1	Querlüftung	61
6.2	Halbquerlüftung	64
6.3	Längslüftung	67
6.4	Längslüftung mit lokaler Gitterverfeinerung	69
6.5	Schlussfolgerungen	72
7	Vorschlag eines Standardbrandversuchs.....	73
7.1	Anforderungen	73
7.2	Art des Brandversuchs bzw. Brandgut	74
7.3	Brandablauf	74
7.3.1	Wannenbrand – und Brandmittel	75
7.3.2	Branddauer	75
7.3.3	Brandleistung	76
7.3.4	Erzeugte Rauchmenge	78
7.3.5	Tunnelluftströmung	79
7.4	Versuchsaufbau	85
7.4.1	Brandquelle.....	85
7.4.2	Messeinrichtungen zur Erfassung der Strömungsgeschwindigkeiten, Temperaturen und der Rauchsichtung – bzw. Rauchausbreitung.....	86
7.5	Schutzvorkehrungen.....	88
8	Fazit und Ausblick	94

9	Literaturverzeichnis	97
---	----------------------------	----

Anhänge

Anhang A: Programmübersicht

Anhang B: Simulationsergebnisse Brandversuche V1xx Querlüftung

Anhang C: Simulationsergebnisse Brandversuche V2xx Halbquerlüftung

Anhang D: Simulationsergebnisse Brandversuche V6xx Längslüftung

Anhang E: Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen Modelltunnel

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Methodisches Vorgehen	18
Abbildung 3-1:	Brandversuche mit Gasbrennern in 4. Röhre Elbtunnel (links) und Tunnel Schwarzer Berg (rechts)	21
Abbildung 3-2:	Brandversuche mit Stahlwannen im Rennsteigtunnel (links) und Tunnel Dölzschen (rechts)	22
Abbildung 3-3:	Brandentwicklung, Energiefreisetzungsrates als Funktion der Zeit	32
Abbildung 3-4:	Temperaturverteilungen in Funktion der Brandleistung (EU 499 FIRETUN, 1998)	33
Abbildung 3-5:	Temperaturverteilungen bei verschiedenen Fahrzeugbränden (nach EU 499 FIRETUN, 1998)	34
Abbildung 3-6:	Querschnitt des Memorial Tunnels (MTFVTP, 1995; Mayer, 2006).....	35
Abbildung 3-7:	Untersuchte Lüftungssysteme.....	36
Abbildung 3-8:	Anordnung der Strahlventilatoren im Memorial Tunnel.....	37
Abbildung 3-9:	Anordnung der Fahrzeugsilhouetten im Tunnel (MTFVTP, 1995; Mayer, 2006)	38
Abbildung 3-10:	Anordnung der Sensoren im Längsschnitt (MTFVTP, 1995; Mayer, 2006)	39
Abbildung 3-11:	Anordnung der Sensoren im Tunnelquerschnitt (Versuche mit Zwischendecke) (MTFVTP, 1995; Mayer, 2006)	40
Abbildung 3-12:	Anordnung der Sensoren im Tunnelquerschnitt (Versuche ohne Zwischendecke) (MTFVTP, 1995; Mayer, 2006)	40
Abbildung 3-13:	Rauchausbreitung bei unterschiedlichen Randbedingungen (5MW, $t=240s$)	51
Abbildung 5-1:	Modelliertes Querlüftungssystem mit Zuluftöffnungen (blau), Abluftöffnungen (rot) und Brandstelle (gelb)	54
Abbildung 5-2:	Modelliertes Halbquerlüftungssystem mit Abluftöffnungen (rot) und Brandstelle (gelb).....	55
Abbildung 5-3:	Modelliertes Langslüftungssystem mit Ventilatoren (blau) und Brandstelle (gelb).....	56
Abbildung 5-4:	Modellierung der Längsneigung.....	59
Abbildung 6-1:	Simulierte Energiefreisetzungsrates bei ausgewählten Brandversuchen mit Querlüftung	61

Abbildung 6-2:	Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 360$ s	62
Abbildung 6-3:	Temperaturen im Verkehrsraum nach $t = 360$ s.....	63
Abbildung 6-4:	Simulierte Energiefreisetzungsraten bei ausgewählten Brandversuchen mit Halbquerlüftung.....	64
Abbildung 6-5:	Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 360$ s	65
Abbildung 6-6:	Temperaturen im Verkehrsraum nach $t = 360$ s.....	66
Abbildung 6-7:	Simulierte Energiefreisetzungsraten bei ausgewählten Brandversuchen mit Längslüftung.....	67
Abbildung 6-8:	Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 360$ s	68
Abbildung 6-9:	Temperaturen im Verkehrsraum nach $t = 360$ s.....	68
Abbildung 6-10:	Simulierte Energiefreisetzungsraten bei ausgewählten Brandversuchen mit Längslüftung und lokaler Gitterverfeinerung	70
Abbildung 6-11:	Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum bei lokaler Gitterverfeinerung nach $t = 360$ s.....	71
Abbildung 6-12:	Temperaturen im Verkehrsraum bei lokaler Gitterverfeinerung nach $t = 360$ s	71
Abbildung 7-1:	Berechnete Temperaturverteilung im Gewölbequerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 6,0$ m/s, $t = 360$ s, $\dot{Q} = 5$ MW.....	81
Abbildung 7-2:	Berechnete Temperaturverteilung im Rechteckquerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 6,0$ m/s, $t = 360$ s, $\dot{Q} = 5$ MW.....	81
Abbildung 7-3:	Berechnete Temperaturverteilung im Gewölbequerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 2,0$ m/s, $t = 360$ s, $\dot{Q} = 5$ MW.....	82
Abbildung 7-4:	Berechnete Temperaturverteilung im Gewölbequerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 3,0$ m/s, $t = 360$ s, $\dot{Q} = 5$ MW.....	82
Abbildung 7-5:	Berechnete Temperaturverteilung im Rechteckquerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 2,0$ m/s, $t = 360$ s, $\dot{Q} = 5$ MW.....	83
Abbildung 7-6:	Berechnete Temperaturverteilung im Rechteckquerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 3,0$ m/s, $t = 360$ s, $\dot{Q} = 5$ MW.....	83
Abbildung 7-7:	Brandquelle, bestehend aus 3 - 4 zylindrischen Stahlbehältern, je nach verwendetem Brandmittel	85
Abbildung 7-8:	Berechnete Temperaturverteilung im Rechteckquerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 2,0$ m/s, $t = 360$ s, $\dot{Q} = 5$ MW.....	86

Abbildung 7-9: Berechnete Geschwindigkeitsverteilung im Rechteckquerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 2,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ s}$, $\dot{Q} = 5 \text{ MW}$	87
Abbildung 7-10: Anordnung der Messstellen in Bezug auf den Brandort.....	88
Abbildung 7-11: Berechnete Temperaturverteilung im Gewölbequerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 0,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ s}$, $\dot{Q} = 5 \text{ MW}$	89
Abbildung 7-12: Berechnete Temperaturverteilung im Rechteckquerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 0,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ s}$, $\dot{Q} = 5 \text{ MW}$	89
Abbildung 7-13: Berechnete Temperaturverteilung im Rechteckquerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 2,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ s}$, $\dot{Q} = 5 \text{ MW}$	90
Abbildung 7-14: Isothermen, Verlauf der in Versuch H21, Teil 2, beobachteten Rauchgas/Luftgrenze und Luftgeschwindigkeiten, bei $v_0 = 1,5 \text{ m/s}$ und $E = 3,1 \text{ MW}$, für die stationäre Phase (60. Minute)	91
Abbildung 7-15: Berechnete Temperaturverteilung im Gewölbequerschnitt quer zur Tunnelachse, $u = 0,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ s}$, $\dot{Q} = 5 \text{ MW}$	92
Abbildung 7-16: Berechnete Temperaturverteilung im Rechteckquerschnitt quer zur Tunnelachse, $u = 0,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ s}$, $\dot{Q} = 5 \text{ MW}$	92

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Aktuelle Brandversuche	31
Tabelle 3-2:	Fahrzeug-Silhouetten (MTFVTP, 1995).....	37
Tabelle 3-3:	Anfangs- und Randbedingungen für Brandversuche mit Querlüftung	42
Tabelle 3-4:	Anfangs- und Randbedingungen für Brandversuche mit Halbquerlüftung	43
Tabelle 3-5:	Anfangs- und Randbedingungen für Brandversuche mit Längslüftung (Versuche 617a, 618a mit Fahrzeug-Silhouetten Versuche 624B und 625B mit Schaumlöschung)	44
Tabelle 3-6:	Übersicht zu CFD-Programmen	47
Tabelle 3-7:	Übersicht zu Zonen-Modellen	48
Tabelle 4-1:	Umrechnungsfaktoren	52
Tabelle 5-1:	Randbedingungen Querlüftung.....	57
Tabelle 5-2:	Randbedingungen Halbquerlüftung	58
Tabelle 5-3:	Brennstoffspezifische Werte (Tewarson, 1995).....	59
Tabelle 5-4:	Brandleistung - Brandfläche	60
Tabelle 6-1:	Mittlere Abweichungen der Geschwindigkeiten und Temperaturen für die simulierten Querlüftungssysteme.....	63
Tabelle 6-2:	Mittlere Abweichungen der Geschwindigkeiten und Temperaturen für die simulierten Halbquerlüftungssysteme	66
Tabelle 6-3:	Mittlere Abweichungen der Geschwindigkeiten und Temperaturen für die simulierten Längslüftungssysteme	69
Tabelle 6-4:	Mittlere Abweichungen der Geschwindigkeiten und Temperaturen für die simulierten Längslüftungssysteme bei lokaler Gitterverfeinerung.....	72
Tabelle 7-1:	Branddaten verschiedener offener Feuer nach Ergebnissen durchgeführter Versuche, Brandleistung der Wannenbrände berechnet gemäß Gleichung 3-1	75
Tabelle 7-2:	Rußentstehungsanteile für reale Kfz (Steinert, 1996).....	78
Tabelle 7-3:	Rußentstehungsanteile (Tewarson, 1995).....	79

Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen:

D	Diffusionskoeffizient
D^*	Charakteristischer Branddurchmesser
f	Äußere Kraftgröße (Schwerkraft ausgeschlossen)
g	Erdbeschleunigung
h	Enthalpie; Wärmeübertragungszahl
h_i	Enthalpie des i-ten Stoffes
k	Wärmeleitfähigkeit; suppression decay factor
\dot{m}_i'''	Massenerzeugungsrate des i-ten Stoffes je Volumeneinheit
p	Druck
\mathbf{q}_r	Radialer Wärmestromvektor
\dot{Q}	Totale Wärmeerzeugungsrate
Q^*	Charakteristische Brandgröße
T	Temperatur
t	Zeit
$\mathbf{u}=(u,v,w)$	Geschwindigkeitsvektor
u_T	Tunnelluftgeschwindigkeit, Mittelwert im freien Tunnelquerschnitt
\dot{m}_i''''	Produktionsrate des i-ten Stoffes je Volumeneinheit
$\mathbf{x}=(x,y,z)$	Raumvektor
Y_i	Massenteil des i-ten Stoffes
y_s	Rußgehalt
ΔH	Verbrennungswärme
ΔH_O	Energiefreisetzung je verbrauchter Einheit Sauerstoffmasse
κ	Absorptionskoeffizient
ρ	Dichte
τ	viskoser Spannungstensor
$\boldsymbol{\omega}=(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$	Wirbelvektor

Abkürzungen:

CFD Computational Fluid Dynamics

FDS Fire Dynamics Simulator

MPI Message Passing Interface

NIST National Institute of Standards and Technology

1 Einleitung

Entscheidend für den sicheren Betrieb eines Tunnels ist das schnelle und zuverlässige Zusammenwirken bestimmter betriebstechnischer Einrichtungen. Insbesondere im Brandfall muss möglichst rasch die Branddetektion erfolgen, worauf dann zur Unterstützung der Selbstrettung der Tunnelnutzer durch geeignete automatische Steuerung der Lüftung möglichst lange rauchfreie Zonen aufrechterhalten werden. Die Steuerung der Lüftung ist von dem zu Grunde liegenden Lüftungskonzept abhängig und variiert in Abhängigkeit von der Tunnellänge, dem eingesetzten Lüftungssystem (Längslüftung, Querlüftung, Halbquerlüftung) sowie der Verkehrsart (Richtungsverkehr, Gegenverkehr).

1.1 Brandsimulationen

Um die komplexen Wirkungsbeziehungen zwischen den einzelnen Systemen zur Detektion von Brandereignissen und zur Steuerung der Lüftung sowie den übrigen sicherheitstechnischen Systemen überprüfen zu können, werden nach ZTV-ING im Rahmen der Abnahme Funktionsprüfungen für die einzelnen Systeme gefordert, indem Brände simuliert und die zu prüfenden Größen messtechnisch erfasst werden. Wie die Brandsimulationen im Einzelnen durchzuführen sind, ist jedoch nicht weiter spezifiziert, bzw. wird bis heute in Abhängigkeit der Zielsetzung von Fall zu Fall festgelegt.

1.1.1 Zielsetzungen von Brandsimulationen

Die Zielsetzungen von Brandsimulationen können außer den Funktionsprüfungen von fertiggestellten Betriebseinrichtungen auch Variantenstudien im Rahmen der Auslegung von Tunnelanlagen oder Risikoanalysen für bestehende oder geplante Tunnel sein. Die vorliegende Untersuchung beschränkt sich jedoch auf Brandsimulationen zum Zweck der Funktionsprüfungen in Straßentunneln, wie sie die RABT und die ZTV-ING fordern.

Eine entsprechende Zielsetzung kann die Funktionsprüfung des Brandmeldesystems sein, oder der Nachweis der Funktion und des Zusammenspiels von sicherheitsrelevanten Betriebseinrichtungen wie der Tunnellüftung und der Sicherung der Rettungswege. Eine Überprüfung der automatischen Abläufe des Lüftungs- und Sicherheitssystems von der Alarmauslösung über die Tunnelsperrung bis zum Schalten der Ventilatoren und Betätigen der richtigen Lüftungsklappen kann z. B. nur durch einen oder mehrere klar definierte Brandversuche im Tunnel durchgeführt werden. Zudem ist die Anschaulichkeit eines realen Brandversuchs für das Betriebspersonal wie für die Einsatzkräfte von großer Bedeutung. Da die Systeme wie auch die Randbedingungen von Tunnel zu Tunnel unterschiedlich sind, müssen solche Versuche bei jedem Tunnel mit entsprechender Ausstattung durchgeführt werden.

Reale Brandversuche in Straßentunneln sind jedoch unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit und des notwendigen technischen Aufwandes zum Schutz der betriebstechnischen Einrichtungen und des Bauwerkes in der Anzahl der Szenarien wie in der Energiefreisetzung begrenzt. Die unter vertretbarem Aufwand erreichbare Brandleistung beträgt ca. 5 MW. Um

Aussagen über das Verhalten des Systems bei höheren Brandleistungen zu erhalten, muss daher entweder auf Brandversuche in entsprechend ausgestatteten Brandräumen oder auf Simulationsrechnungen ausgewichen werden.

Bei der Durchführung von Brandversuchen im Tunnel ist neben dem organisatorischen Aufwand ein nicht zu vernachlässigender messtechnischer Aufwand zur Erfassung der erforderlichen Messgrößen zu berücksichtigen.

Demgegenüber erlauben CFD-Simulationen eine sehr flexible Modellierung des Untersuchungsraumes und die Ermittlung sämtlicher relevanter Größen an beliebigen Punkten im Rechengbiet. Nach erfolgter Kalibrierung an realen Brandversuchen in Tunneln ist eine Übertragbarkeit der Ergebnisse aufgrund der allgemeingültig formulierten mathematischen Zusammenhänge auf beliebige Szenarien gegeben. Somit sind umfangreiche Variationsstudien unter Berücksichtigung unterschiedlicher Randbedingungen möglich.

Aufgrund der beschriebenen Umstände drängt sich hinsichtlich der Zielsetzungen der Brandsimulation folgende Differenzierung zwischen Brandversuchen und rechnerischen Brandsimulationen auf:

Zielsetzung von Brandversuchen:

- Test des Brandmeldesystems unter realen und definierten Randbedingungen
- Punktueller Nachweis der Lüftungsfunktionen und weiterer automatischer Betriebstechnischer Abläufe im Brandfall, d. h. unter bestimmten Rand- und Anfangsbedingungen
- Visualisierung der sich im Brandfall einstellenden Strömungsverhältnisse und der Wirkung der Brandfall-Lüftung bei einer auf 5 MW begrenzten Brandleistung und ohne den Einfluss des Verkehrs. Dabei geht es darum, die wesentlichen Effekte der Wärme- und Rauchproduktion wie die Rauchsichtung und die Rauchausbreitung unter den herrschenden Randbedingungen und unter dem Einfluss der Tunnellüftung klar zu erkennen.
- Verifizierung der Ergebnisse aus numerischen Berechnungen unter vorgegebenen Randbedingungen. (Dies erfordert die messtechnische Erfassung bestimmter physikalischer Größen während des Brandversuchs.) Verifizierte numerische Berechnungen dienen im weiteren als Basis für die Hochrechnung auf größere Brandleistungen und alternative Szenarien (Brandorte, Verkehrsbelegung, Windverhältnisse usw.).
- Test der Alarmierung und des Zusammenspiels der Einsatzkräfte im Brandfall

Zielsetzung von rechnerischen Brandsimulationen:

- Nachweis der Leistungsfähigkeit der Brandfall-Lüftung bei Brandleistungen > 5 MW. Verlässliche Aussagen über das Zusammenwirken betriebstechnischer Einrichtungen

bei großen Brandleistungen (bis 100 MW) und die sich dabei einstellenden Fluchtbedingungen

- Geschwindigkeit und Ausdehnung der Rauchausbreitung für verschiedene Szenarien, die sich nach Brandort, Brandleistung und Verfügbarkeit oder Ausfall der Brandlüftung unterscheiden.
- Aufschluss über den Einfluss bestimmter Randbedingungen auf die Strömungsverhältnisse unter dem Regime der Brandfall-Lüftung. Dazu zählen der Verkehrseinfluss, meteorologische Einflüsse, alternative Einstellungen des Lüftungssystems usw.
- Erkennung lokaler Brandwirkungen bei Brandleistungen > 5 MW, wie Temperaturverteilung, Ausdehnung und Mächtigkeit einer Rauchschichtung.

1.2 Aufgabe des Forschungsvorhabens

Die Aufgabe des Forschungsvorhabens ist zweiteilig. Einerseits ist ein Standardbrandversuch für Straßentunnel zu definieren, der die unterschiedlichen Anforderungen der o. g. Ziele von Brandversuchen erfüllen kann. Mit der Festlegung eines Standardbrandversuchs wird in Zukunft eine bundesweite Vereinheitlichung der Durchführung und der Dokumentation von Brandversuchen angestrebt. Andererseits soll ein Berechnungsprogramm evaluiert werden, mit dessen Hilfe die o. g. Ziele der rechnerischen Brandsimulation erreicht werden können. Das betreffende Programm sollte allgemein zugänglich sein bzw. ohne Einschränkungen zu erwerben und mit den standesüblichen Ressourcen an Rechnern sowie den für Ingenieuren üblichen Kenntnissen der Informatik betrieben werden können.

2 Methodische Vorgehensweise und Arbeitsprogramm

Schwerpunkte des Forschungsvorhabens bilden zum einen die Definition von Standardbrandversuchen und zum anderen die Abbildung von Bränden mittels numerischer Berechnungen. Der Grundgedanke im methodischen Vorgehen besteht darin, mit Hilfe eines kalibrierten Simulationsmodells Empfehlungen zur Anordnung von Messstellen und Erfassung von Messgrößen und zur Hochrechnung auf höhere Brandlasten zu geben sowie Anforderungen an einen Standardbrandversuch abzuleiten.

Die methodische Vorgehensweise ist aus dem in Abbildung 2-1 dargestellten Ablaufschema ersichtlich.

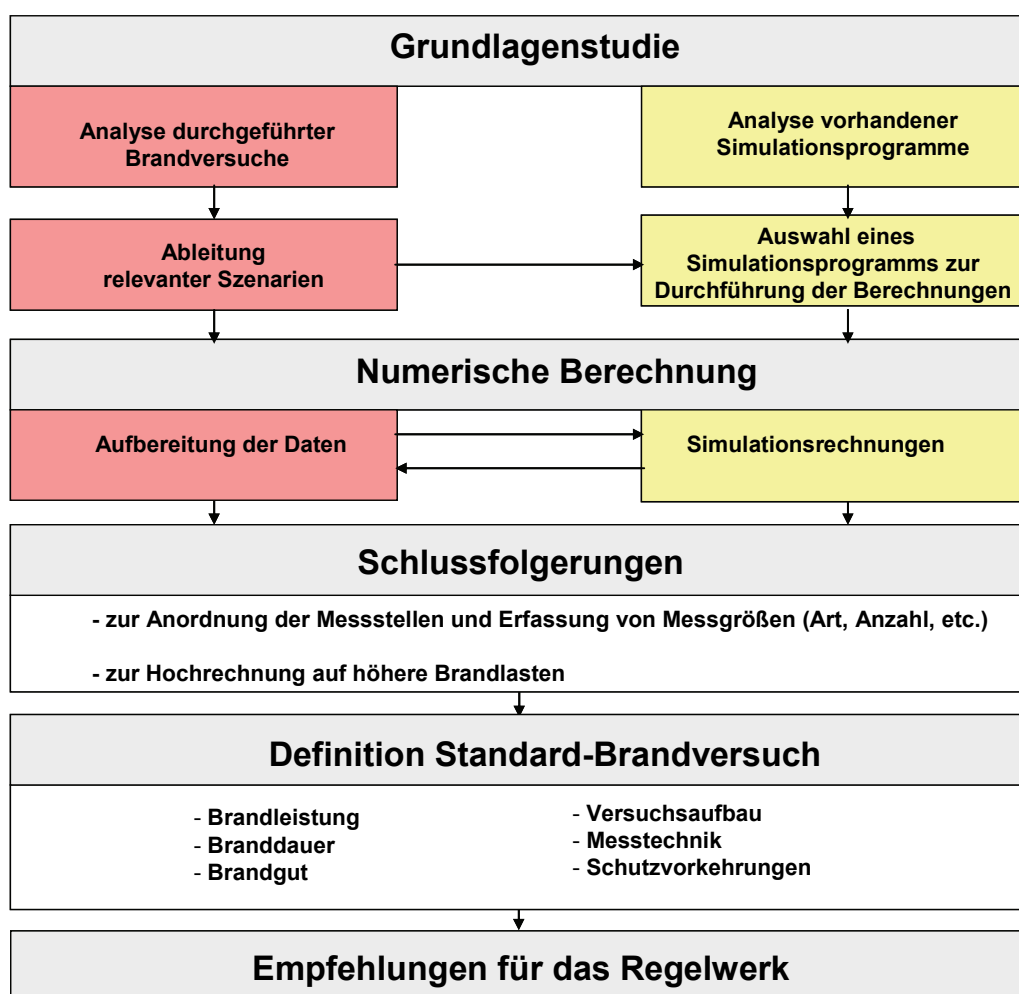


Abbildung 2-1: Methodisches Vorgehen

Zunächst erfolgt in einer Grundlagenstudie die Bestandsaufnahme bisher durchgeführter Brandversuche. Hierbei werden Brandversuche aus dem Inland als auch aus dem Ausland einbezogen und zunächst in Bezug auf den Versuchsaufbau, die realisierte Energiefreisetzung, Schutzmassnahmen und die resultierenden Temperaturen und Rauchausbreitungs-

verhältnisse analysiert. In Kapitel 3.1 findet sich eine Zusammenstellung ausgewählter Versuche, die hinsichtlich des Vorhabens von Interesse sind.

Weiter werden die Versuche hinsichtlich Verfügbarkeit der Daten und ihrer Eignung zur numerischen Nachbildung analysiert. Parallel hierzu erfolgt eine Analyse der verfügbaren Simulationsprogramme zur Nachbildung von Bränden hinsichtlich des zu Grunde liegenden mathematischen Modells, der numerischen Methode, den Anforderungen an Ressourcen, der Möglichkeit zur Veränderung des Programmablaufs sowie der Benutzerfreundlichkeit. Darauf aufbauend werden relevante Szenarien abgeleitet und ein zur Durchführung der Berechnungen geeignetes Simulationsmodell ausgewählt.

Die Durchführung numerischer Simulationsrechnungen erfordert detaillierte Angaben zur Geometrie und zu den thermischen Eigenschaften des Tunnels, den abzubildenden Strömungshindernissen (Fahrzeuge, Einbauten, ...) im Tunnel, zu den Anfangsbedingungen (Zustand am Anfang der Simulation zum Zeitpunkt $t=0$) sowie den Randbedingungen (Zustand am Rand des Strömungsfeldes) und schließlich zu den Branddaten. Entsprechende Daten für die relevanten Szenarien müssen aus realen Brandversuchen übernommen werden können.

Solche für eine grundlegende numerische Simulation brauchbare Daten sind im notwendigen Umfang z. Z. nur aus den Memorial Tunnel Fire Ventilation Tests (MTFVTP, 1995) verfügbar. Diese müssen allerdings erst iso-konform aufbereitet werden. Die Memorial Tunnel Fire Ventilation Tests werden im Folgenden als Basis für die Evaluation eines geeigneten numerischen Rechenmodells bzw. Simulationsprogramms verwendet.

Die Validierung der Simulationsergebnisse erfolgt durch Vergleich der Rechenergebnisse mit den lokal erfassten Messwerten zu diskreten Zeitschritten. In Abhängigkeit von den aus den Memorial Tunnel Fire Ventilation Tests zur Verfügung stehenden Daten erfolgen Simulationsrechnungen für unterschiedliche Brandleistungen zwischen 10 MW und 100 MW.

Auf Basis der durchgeführten Simulationsrechnungen werden im weiteren Empfehlungen zur Anordnung von Messstellen und Erfassung von Messgrößen sowie zur Hochrechnung auf höhere Brandlasten gegeben.

Ableitung erforderlicher Messgrößen

Durch Validierung der Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen können Aussagen zur Genauigkeit der Rechenergebnisse getroffen werden. Hierbei zeigt sich, an welchen Stellen zusätzliche Messgrößen erfasst werden müssen bzw. wo auf Grund bereits guter Übereinstimmung auf Messwerte verzichtet werden kann. Somit lassen sich über die zur Simulation notwendigen Randbedingungen Aussagen über die Art, Anzahl und Anordnung der zu erfassenden Messgrößen ableiten.

Hochrechnung auf höhere Brandlasten

Mit Hilfe des kalibrierten Simulationsmodells lassen sich für beliebige Szenarien funktionale Zusammenhänge zwischen Brandleistung und Rauchausbreitung bzw. Temperaturverlauf ableiten.

Die Simulationsrechnungen ermöglichen für unterschiedliche geometrische Randbedingungen in Abhängigkeit von der Brandleistung, der freigesetzten Rauchmenge sowie der Strömungsverhältnisse Aussagen zum Temperaturverlauf und zur Rauchausbreitung. Somit lassen sich auf Basis einer maximal zulässigen Temperatur während eines Brandversuches die Eingangsgrößen iterativ bestimmen. Damit sind insbesondere Aussagen zum Versuchsaufbau (Brandleistung, Branddauer, Brandgut), zur Anordnung von Messeinrichtungen und zu ggf. erforderlichen Schutzmaßnahmen möglich.

Die numerische Simulationsrechnung kann also zur Festlegung der Parameter eines Standardbrandversuchs für Straßentunnel ausgehend von vorgegebenen Randbedingungen herangezogen werden.

Im Hinblick auf die Definition eines Standardbrandversuchs soll jedoch nicht auf die Auswertung verschiedener durchgeführter Brandversuche verzichtet werden. Erfahrungen und Daten aus solchen Versuchen geben wertvolle Hinweise zur Art der Durchführung, über mehr und weniger geeignetes Brandgut, erreichbare Temperaturen, Temperaturverteilung, Rauchausbreitung und Schutzvorkehrungen usw.

3 Grundlagenstudie

3.1 Analyse durchgeführter Brandversuche

In den vergangenen 10 bis 15 Jahren wurde eine Reihe von Brandversuchen im Maßstab 1:1 durchgeführt. Das Spektrum reicht hierbei von einzelnen Brandversuchen in realen Straßentunneln bzw. Versuchsstollen bis zu groß angelegten Versuchsreihen wie dem EU 499 FIRETUN oder dem Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program (MTFVTP, 1995). Bei der Simulation von Bränden zur Funktionsüberprüfung der sicherheitstechnischen Anlagen wie des Brandmeldesystems und der Tunnellüftung kann prinzipiell unterschieden werden zwischen Versuchen mit Gasbrennern und Versuchen mit Wannenbränden.

Brandversuche mit Gasbrennern

Brandsimulationsanlagen mit Gasbrennern haben den Vorteil, die Energiefreisetzung relativ exakt vorgeben zu können und rückstandsfrei zu verbrennen. Ein erheblicher Nachteil ist jedoch, dass zur Untersuchung der Rauchausbreitung zusätzlich Rauchpartikel in den Wärmestrom eingeleitet werden müssen, deren Dosierung nur schwer steuerbar ist. Die im Rahmen des FE 03.344/2002/FRB während der Brandversuche in der 4. Röhre Elbtunnel Hamburg gesammelten Erfahrungen haben ergeben, dass mit derartigen Brandsimulationsanlagen nur bedingt einem realen Brand entsprechende Rauchvolumen und Rauchdichten erzeugt werden können. In Abbildung 3-1 ist exemplarisch der Aufbau von Brandsimulationsanlagen mit Gasbrennern dargestellt.



Abbildung 3-1: Brandversuche mit Gasbrennern in 4. Röhre Elbtunnel (links) und Tunnel Schwarzer Berg (rechts)

Brandversuche mit Wannenbränden

Wannenbrände werden häufig mit einem Diesel/Benzingemisch oder mit Heptan durchgeführt. Sie zeichnen sich durch ihren technisch einfachen Aufbau aus. Typischerweise werden Stahlwannen mit einer Grundfläche von 1,0 m² oder 2,0 m² verwendet. Zur Simulation eines Fahrzeugbrandes mit 5 MW Energiefreisetzung werden nach RABT 20 I Benzin auf einer Gesamtfläche von 4 m² benötigt, was durch einfaches Zusammenstellen der Wannen und gleichmäßiges Verteilen des Brandgutes realisiert werden kann. Zum Schutz der Fahrbahn vor Wärmeeinwirkung eignet sich Dämmmaterial aus handelsüblichen Glaswolleplatten. Da bei Wannenbränden die Rauchgasmenge direkt durch das Abbrennen von Benzin, Diesel o. ä. erzeugt wird, entspricht auch die Rauchdichte weitgehend einem realen Brand, wie er in Straßentunneln vorkommen kann. Eine Steuerung des Brandablaufs ist nach der Zündung eines Wannenbrandes jedoch nur schwer möglich.

Abbildung 3-2 zeigt die Situation bei Brandversuchen mit Wannenbränden unter Verwendung von Benzin.



Abbildung 3-2: Brandversuche mit Stahlwannen im Rennsteigtunnel (links) und Tunnel Dölschen (rechts)

3.1.1 Ausgewählte Brandversuche mit Wannenbränden:

Im Folgenden werden beispielhaft einige dokumentierte Brandversuche aus Tunneln in Deutschland, Österreich, Frankreich, Schweiz, Norwegen und den U.S.A kurz beschrieben.

In Österreich werden Brandversuche zur Funktionsüberprüfung der sicherheitstechnischen Anlagen in Straßentunneln nach den Österreichischen Richtlinien RVS mittels Diesel/Benzin-Wannenbränden durchgeführt.

**- Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program (MTFVTP),
September 1993 bis März 1995**

Ziel: Aufbau einer möglichst umfassenden Datenbank zur Ausbreitung von Rauch und Temperatur für Längs- und Querlüftungssysteme bei unterschiedlichen Randbedingungen.

Versuchsaufbau: Brandsimulationsanlage befindet sich 237 m vom Süd-Portal und 616 m vom Nordportal entfernt. Insgesamt stehen 4 Brandwannen mit Flächen von 4,5 m², 9,0 m², 13,5 m² und 22,5 m² zur Verfügung. Als Brandmittel dient schwefelarmes Heizöl. Durch Kombination der Wannen lassen sich Brandleistungen bis 100 MW realisieren. Über die Tunnellänge sind 15 Messquerschnitte installiert, die das Erfassen von Geschwindigkeiten, Temperaturen und Konzentrationen ermöglichen.

Schutzvorkehrungen: keine Angaben vorhanden

Versuchsdurchführung: Insgesamt wurden 98 Brandversuche durchgeführt. Neben der Brandleistung konnte durch Umbauten im Tunnel auch das Lüftungssystem variiert werden. Somit waren Brandversuche mit Längs- und Querlüftungssysteme möglich.

Ergebnisse der Versuche:

- Die jahrelang übliche Bemessungsgrundlage von $0,155 \text{ m}^3/\text{s}/n_{FS}/\text{m}$ zur Dimensionierung von Brandlüftungen kann nicht allgemeingültig bestätigt werden.
- Mit Hilfe von Strahlventilatoren kann ein Backlayering bis zu Brandleistungen von 100 MW wirkungsvoll unterdrückt werden.
- Zur Vermeidung eines Backlayerings ist bei einem 100 MW-Brand eine Längsströmungsgeschwindigkeit $u_T = 3 \text{ m/s}$ ausreichend.
- Strahlventilatoren auf der Rauchabtriebsseite neigen aufgrund des Temperatureinflusses bei einer zu großen Nähe zum Brandherd zu frühzeitigem Ausfall.
- Einsektionale, ausgeglichene Querlüftungssysteme sind als effektive Brandlüftung ungeeignet. Mit Hilfe von einsektionalen, unausgeglichenen Querlüftungssystemen können Brandleistungen bis 20 MW bewältigt werden. Mittels multisektionaler Querlüftungssysteme eignen sich auch für Brandleistungen über 20 MW, da mit diesen Lüftungssystemen eine Längsströmung erzeugt werden kann.
- Einsektionale Halbquerlüftungssysteme im Zuluftbetrieb sind für eine effektive Rauch- und Temperaturbeeinflussung ungeeignet. Mit Hilfe von reversierbaren einsektionalen Halbquerlüftungssystemen ist jedoch eine bedingte Rauch- und Temperaturbeeinflussung möglich.
- Längsströmungsgeschwindigkeiten beeinflussen die Rauch- und Wärmeentwicklung eines Brandes signifikant. Daher sind Lüftungssysteme, die gleichzeitig eine kontrollierte Längsströmung und eine Rauchabsaugung ermöglichen gut geeignet, um einer Rauch- und Temperatúrausbreitung entgegenzuwirken.

- Rauchabzugsöffnungen die im Abstand von 100 m mit einer Fläche zwischen 9,3 m² und 27,9 m² angeordnet sind, ermöglichen das Absaugen großer Rauchvolumenströme und eignen sich für Brandleistungen bis 20 MW.
- Große Absaugschlitze (2,8 m²) mit einem Abstand von ca. 10 m ermöglichen im Vergleich zu herkömmlichen Querlüftungssystemen eine verbesserte Temperatur und Rauchbeeinflussung.
- Eine natürliche Lüftung führt im Fall eines Brandes zu beträchtlichen Temperaturanstiegen und Rauchmengen oberhalb des Brandherdes.
- Das Hochfahren der Lüftung sollte so schnell wie möglich nach der Detektion erfolgen, da sich Rauch und Temperatur sehr schnell ausbreiten können.
- Im Abstand von 213 m zum Brandherd wurden im Einlauf der Axialventilatoren bei einem 100 MW-Brand 163°C, bei einem 50 MW-Brand 124°C und bei einem 20 MW-Brand 107°C als maximale Temperaturen gemessen.
- Die Beeinträchtigung der Sicht durch Rauch erfolgt wesentlich schneller als die Beeinträchtigung durch Temperatureinfluss. CO-Konzentrationen erreichten zu keinem Zeitpunkt die zulässigen Grenzwerte.

- Lärchbergtunnel (1994)

Ziel: Überprüfen der Funktionstüchtigkeit der Sicherheitseinrichtungen, wie Branddetektion, Alarmauslösung, Tunnelsperrung, Brandlüftung usw.

Versuchsaufbau: Brandort in Tunnelmitte, Abstand zu den beiden Portalen je ca. 500 m. Stahltonne von 1m² Fläche, gefüllt mit 20 l Diesel, 5 l Benzin und 10 l Wasser, aufgestellt auf Ziegelsteinen (ca. 15 cm ab Boden). Keine Kfz im Tunnel.

Schutzvorkehrungen: Keine bes. Schutzvorkehrungen am Bauwerk und den Einrichtungen.

Durchführung 1. Versuch: Zündung bei natürlicher Längsströmung von ca. $u_T = 1$ m/s. Branddetektion durch Linienmelder nach ca. 1 Minute Branddauer.

Ergebnisse des 1. Versuchs:

Mehr oder weniger geschichtete Rauchausbreitung, zunächst in beide Richtungen. Gute Sicht- und Atembedingungen für eine rechtzeitige Selbstrettung. Durch das Einschalten von Strahlventilatoren im rauchfreien Bereich auf der Ostseite des Brandes (mit Blasrichtung West) gelingt es, den Rauch vollständig nach Westen und durch das Westportal ins Freie zu blasen. Die Tunnelluftgeschwindigkeit beträgt ca. 1.5 m/s.

Durchführung 2. Versuch: Zündung bei natürlicher Längsströmung von ca. $u_T = 3.5$ m/s. Branddetektion durch Linienmelder nach ca. 2 Minuten Branddauer.

Ergebnisse des 2. Versuchs:

Einseitige Rauchausbreitung in Richtung der Grundströmung → vollständige Verrauchung diese Tunnelastes, bevor die Brandlüftung aktiviert wurde. Danach Umkehr der Rauchströmung mittels der Lüftung, resultierende Strömungsgeschwindigkeit $u_T = 3.5 \text{ m/s}$. Der verrauchte Tunnelast wird innerhalb von 5 Minuten rauchfrei, während die andere Tunnelhälfte komplett verraucht wird.

- Brandversuche im Selztal-Tunnel (2000)

Ziel: Test der Wirkungsweise einer Sprühnebelanlage im Brandfall bei Längslüftung.

Versuchsaufbau: Brandort in Tunnelmitte, Abstand zu den beiden Portale je ca. 500 m. 2 Stahl-tassen von 1 m^2 Fläche, gefüllt mit 20 l Heizöl extra leicht und 5 l Benzin. Keine Kfz im Tunnel. Messung der Temperatur auf 1 m, 2.5 m, 4,0 und 5,2 m über der Fahrbahn, in 20 m (vor) und 40 m Abstand vom Brandort (nach Sprühbogen). Messung der Strömungsgeschwindigkeit, der Sichtweite ca. 100 m nach der Sprühanlage bzw. dem Brandort.

Schutzvorkehrungen: Keine bes. Schutzvorkehrungen am Bauwerk und den Einrichtungen.

Durchführung und Ergebnisse der Versuche: Keine Angaben.

- Brandversuch im Schmittentunnel (L = 5.1 km)

Ziel: Überprüfen der Funktionstüchtigkeit der Sicherheitseinrichtungen, wie Branddetektion, Brandlüftung usw.

Versuchsaufbau: Brandort im längsbelüfteten Tunnelabschnitt, nahe der Ausfahrt Schüttdorf Nord. 2 Stahl-tassen von je 1 m^2 Fläche, gefüllt mit je 20 l Diesel, 5 l Benzin und 10 l Wasser, aufgestellt auf Ziegelsteinen (ca. 15 cm ab Boden), Brandleistung ca. 3.2 MW. Keine Kfz im Tunnel.

Schutzvorkehrungen: Keine bes. Schutzvorkehrungen am Bauwerk und den Einrichtungen.

Versuchsdurchführung: Zündung bei natürlicher Längsströmung von $< 1 \text{ m/s}$. Branddetektion durch Linienmelder nach ca. 1 Minute Branddauer.

Ergebnisse des Versuchs:

Mehr oder weniger geschichtete Rauchausbreitung, zunächst in beide Richtungen. Gute Sicht- und Atembedingungen für eine rechtzeitige Selbstrettung. Durch das Einschalten der Rauchabsaugung tunnelerwärts vom Brandort und von Strahlventilatoren in den Ausfahrtsästen gelingt es, den Rauch kontrolliert abzusaugen und das anfängliche „backlayering“ zu reduzieren. Die Tunnelluftgeschwindigkeit ist sehr unterschiedlich in den verschiedenen Abschnitten, entsprechend der unterschiedlichen Strömungsquerschnitte.

- Brandversuche Straßentunnel im Zuge der A86 bei Paris, Januar 1999, Versuche zum Belüftungssystem

Ziele: Überprüfen der Wirksamkeit des mechanischen Lüftungssystems zur Rauchabführung und Verifikation der rechnerischen Simulationen, welche als Grundlage für das Brandlüftungs- und Rettungskonzept verwendet wurden.

Versuchsaufbau: Kalibrierte Behälter mit n-Heptan für eine Brandleistung von 5 MW während ca. 25 Minuten.

Schutzvorkehrungen: Schutzvorkehrungen (Folie) am Bauwerk und den Einrichtungen, über 30 m vor und nach dem Brandort.

Versuchsdurchführung: 6 Versuche, wobei jeweils unterschiedliche Lüftungsregimes eingestellt worden sind. Zündung des Feuers bei mechanisch erzeugter Längsströmung von $u_T = 1.0, 1.5, 2.0$ und 3.0 m/s. Branddetektion durch Linienmelder nach ca. 1 Minute Branddauer. Entrauchung durch den Fahrraum oder durch den Fahrraum und große Rauchabzugsöffnungen in der Tunneldecke.

Ergebnisse der Versuche:

Keine Angaben vorhanden.

- Brandversuche im Tunnel Rosenau / Nordtangente Basel, 2000

Ziel: Überprüfen der Funktionstüchtigkeit der Sicherheitseinrichtungen, wie Branddetektion, Brandlüftung, der technischen Schaltungen (automatisches Einschalten der Lüftung, der automatischen Verkehrssignalsteuerung und automatische Steuerung der Überwachungskameras), Leistungsfähigkeit der eingebauten Hydranten

Versuchsaufbau: Brandort in Bezug auf das Brandmeldesystem (Linienmelder) wurde variiert. Behälter auf der Fahrbahn, gefüllt mit je 12 l n-Heptan, ohne Angabe der Brandleistung. Keine Kfz im Tunnel.

Schutzvorkehrungen: Keine bes. Schutzvorkehrungen am Bauwerk und den Einrichtungen.

Versuchsdurchführung: Zündung bei natürlicher Lüftung. Branddetektion durch Linienmelder oder Sichttrübungsmessung, abhängig vom Brandort relativ zu den Messeinrichtungen nach ca. 0.5 bis 2.5 Minuten Branddauer, resp. gar nicht.

Ergebnisse des Versuchs:

Gute Ergebnisse in Bezug auf die Rauchausbreitung und die Sichtverminderung, ohne übermäßige Russproduktion.

- Brandversuche im Rennsteigtunnel, 27.5. – 5-6.2003

Ziel: Test der Lüftungsanlagen sowie der Sicherheitseinrichtungen im Brandfall

Versuchsaufbau: Der Funktionstest der Lüftungsanlage und Sicherheitseinrichtungen erforderte insgesamt 7 Brandversuche an unterschiedlichen Stationen in beiden Tunnelröhren des Rennsteigtunnels. Die Protokollierung der Luftgeschwindigkeit, der Temperaturverlauf sowie sämtliche Meldungen und Alarmer während des Versuchszeitraums erfolgte über die Betriebstechnik. Als Brandtassen dienten quadratische Stahlwannen, mit denen durch Kombination Brandflächen von 2 m² und 4 m² realisiert werden konnten. Bei den Versuchen nach RABT wurden 20 l Benzin auf 5 Brandtassen mit einer Gesamtfläche von 4 m² verteilt. Im Gegensatz dazu diente bei den Versuchen nach RVS ein Gemisch aus 5 l Benzin, 20 l Diesel und 10 l Wasser als Brandmittel, das auf 3 Brandtassen mit einer Gesamtfläche von 2 m² gleichmäßig verteilt wurde.

Schutzvorkehrungen: Zum Schutz der Fahrbahn vor übermäßiger Wärme, wurden im unmittelbaren Nahbereich der Brandstelle Glaswolleunterlagen ausgelegt.

Versuchsdurchführung: Insgesamt wurden 2 Brandversuche nach den Bedingungen der RABT 2003 und 5 Brandversuche nach den Anforderungen nach RVS durchgeführt. Die Strömungsgeschwindigkeiten u_T betragen bei den Versuchen nach RABT ca. 6 m/s bei den Versuchen nach RVS variierten sie zwischen 3 und 5,5 m/s.

Ergebnisse des Versuchs:

Der Rauch breitete sich bei sämtlichen Versuchen in Richtung der voreingestellten Längsströmung aus. Dabei erfolgte nach ca. 100 m eine Durchmischung über den gesamten Querschnitt. Die Sichtweite betrug hierbei weniger als 5 m. Die Detektion des Brandes erfolgte über das installierte Brandmeldekabel in Abhängigkeit der Energiefreisetzung zwischen 1:18 Minuten und 2:59 Minuten.

Aufgrund ihrer quadratischen Form und dem damit verbundenen Spannungsspitzen neigten die Benzinwannen gegen Ende des jeweiligen Versuchs zum Durchschlagen bzw. Aufwölben des Wannenbodens. Dadurch konnten kleine Mengen des Brandmittels in die Umgebung gelangen.

Brandversuche im Kappelbergtunnel, 22.04.2006

Ziel: Test der Lüftungsanlagen sowie der Sicherheitseinrichtungen im Brandfall.

Versuchsaufbau: Zur Überprüfung der Lüftungsanlage und Sicherheitseinrichtungen wurden insgesamt 3 Brandversuche 300 m vor dem Westportal durchgeführt. Als Brandtassen dienten halbsphärische Stahlwannen, mit Brandflächen von jeweils 1 m². Die Versuche wurden nach RABT 2003 mit insgesamt 20 l Benzin durchgeführt. Damit eine konstante und waagerechte Fläche während der Versuche erhalten bleibt, wurden die Tassen mit Wasser gefüllt.

Schutzvorkehrungen: Zum Schutz der Fahrbahn vor Wärmeeinfluss, wurden im unmittelbaren Nahbereich der Brandstelle Glaswolleunterlagen ausgelegt. Des Weiteren wurden die betriebstechnischen Einrichtungen an der Decke (Schlitzantenne, Kabeltrasse) im Bereich des Brandes mit Glaswolle geschützt.

Versuchsdurchführung: Zur Durchführung der Versuche nach RABT 2003 wurde eine Längsströmungsgeschwindigkeit von 6 m/s über die installierten Strahlventilatoren voreingestellt. Unmittelbar vor der Zündung des Brandmittels wurden die Strahlventilatoren deaktiviert, so dass Strömungsgeschwindigkeit mit der Zeit deutlich abnahm.

Ergebnisse des Versuchs:

Der Rauch breitete sich zunächst in Richtung der voreingestellten Längsströmung aus. Aufgrund der sich stark reduzierenden Längsströmung kam es bis zum Aktivieren des Brandprogramms bei Strömungsgeschwindigkeiten u_T unter ca. 1,5 m/s zu einer Rauchsichtung und zu deutlichen Backlayering-Effekten. Nach dem Aktivieren des Brandprogramms mit einhergehendem Hochfahren der Strahlventilatoren erfolgte der Rauchabtrieb in Richtung Portal. Hierbei wurde der Rauch über den gesamten Rauchabtriebsquerschnitt verteilt und strömte über nicht verschlossene Notausgänge in die Nachbaröhre.

Aufgrund ihrer halbsphärischen Ausbildung der Benzinwannen konnten keine Spannungsspitzen im Wannenboden auftreten. Dadurch auch nicht zum Durchschlagen bzw. Aufwölben des Wannenbodens.

3.1.2 Ausgewählte Brandversuche mit Gasbrennern:

- Brandversuche im Elbtunnel Hamburg, 17. bis 20 September 2002

Ziel: Überprüfung der Sicherheitseinrichtungen auf ihre Funktion und ihr Zusammenwirken im Brandfall insbesondere unter den Aspekten der Detektion, dem Aktivieren des Brandprogramms sowie der Wirkung der Rauchabzugsanlage.

Versuchsaufbau: Die Brandsimulationsanlage, bestehend aus drei 2,4 MW und vier 0,5 MW Propangasbrennern mit darüber angeordneten Turbulenzgeneratoren wurde in Tunnelmitte installiert. Die Einmischung von Rauch in den Plume erfolgte mittels Rauchkanonen. Die Dosierung des Rauches erfolgt über die Menge und die Abbrenngeschwindigkeit des verwendeten Rauchmittels.

Schutzvorkehrungen: Zum Schutz der Zwischendecke vor Wärmeeinwirkung, wurden Brandschutzplatten über eine Länge von 100 m angebracht

Versuchsdurchführung: Insgesamt wurden 6 Brandversuche mit Rauchfreisetzung durchgeführt. Die Brandleistungen variierten hierbei zwischen 2,4 MW und 7,2 MW. Die Längsströmungsgeschwindigkeiten u_T variierten in den einzelnen Versuchen zwischen 0,6 m/s und 6 m/s.

Ergebnisse des Versuchs: Längsströmungsgeschwindigkeiten von 6 m/s führen zu einer stark verzögerten Detektion des Brandes. Eine stabile Rauchschiebung mit Backlayering konnte nur bis Längsströmungsgeschwindigkeiten von 0,6 m/s festgestellt werden. Mit zunehmender Längsströmungsgeschwindigkeit wird der Rauch nur noch in eingestellter Strömungsrichtung transportiert und den gesamten Querschnitt verteilt.

- Brandversuche im Tunnel Schwarzer Berg, 27.7.2005

Ziel: Überprüfung der Sicherheitseinrichtungen auf ihre Funktion und ihr Zusammenwirken

Versuchsaufbau: Die Brandsimulationsanlage bestand aus einem modifizierten Pkw mit im Innenraum installierten Propangasbrennern. Der Rauch wurde mittels Rauchkanonen in den Plume über dem Fahrzeug eingemischt.

Schutzvorkehrungen: Brandschutzplatten unter dem Fahrzeug, Brandschutzmaterialien im Fahrzeug

Versuchsdurchführung:

Keine näheren Angaben vorhanden

Ergebnisse des Versuchs:

Keine näheren Angaben vorhanden

Brandversuche in Einhausung Hösbach, 13.11.2005

Ziel: Überprüfung der Sicherheitseinrichtungen auf ihre Funktion und ihr Zusammenwirken. Von besonderem Interesse waren die Detektion des Brandes sowie das Öffnen der Rauchabzüge.

Versuchsaufbau: Die Brandsimulationsanlage bestand aus einem modifizierten Pkw mit im Innenraum installierten Propangasbrennern. Der Rauch wurde mittels Rauchkanonen in den Plume über dem Fahrzeug eingemischt. Die Längsströmungsgeschwindigkeit wurde mittels des installierten Strahlventilators und drei mobiler Ventilatoren eingestellt.

Schutzvorkehrungen: Brandschutzplatten unter dem Fahrzeug, Brandschutzmaterialien im Fahrzeug

Versuchsdurchführung: Aufgrund der vorherrschenden meteorologischen Verhältnisse konnte lediglich eine Längsströmungsgeschwindigkeit von $u_T = 5,0$ m/s voreingestellt werden. Mit Zündung des Brandes wurden die mobilen Ventilatoren abgestellt und der Rauch breitete sich zunächst in voreingestellter Strömungsrichtung über den Querschnitt verteilt aus. Nach der Detektion des Brandes öffnen sich die Rauchabzüge im Bereich des Brandes. Die meteorologischen Verhältnisse führen jedoch dazu, dass sich eine Längsströmungsgeschwindigkeit entgegen der ursprünglichen Richtung einstellt und der Rauch im Fahrraum gehalten wird.

Ergebnisse des Versuchs: Meteorologische Verhältnisse können dazu führen, dass die durch einen Brand freigesetzte Energie nicht genügt, eine ausreichende Konvektion zu erzeugen.

3.1.3 Ausgewählte Brandversuche mit realen Kfz:

EU 499 FIRETUN 1990-1992

Ziel: Grundlagenforschung zum Abbrandverhalten von Straßen und Schienenfahrzeugen sowie von Vergleichsbrandlasten wie Fichtenholzkrippen und Heptan

Versuchsaufbau: Insgesamt wurden 20 Brandversuche mit realen Fahrzeugen und Vergleichsbrandlasten in einem Stollen einer ehemaligen Kupfermine durchgeführt. Die Brandversuche fanden 295 m vom Portal entfernt statt. 2000 m hinter dem Brandort endet der Stollen in einem nahezu vertikalen Schacht. An 18 Messquerschnitten konnten Geschwindigkeiten, Temperaturen und Konzentrationen erfasst werden.

Schutzvorkehrungen: Es waren keine besonderen Schutzvorkehrungen erforderlich

Versuchsdurchführung: Für die Brandversuche mit realen Kraftfahrzeugen standen 2 Pkw, ein Bus und ein Lkw zur Verfügung.

Ergebnisse der Versuche: Die Versuche liefern u. a. Aussagen zu Energiefreisetzungsrate und Rauchentstehungsanteilen realer Fahrzeuge. So ergab ein Pkw mit hohem Kunststoffanteil eine Energiefreisetzungsrate von 6 MW mit einem Rauchentstehungsanteil von 0,08 kg/kg. Der Brandversuch mit einem Bus lieferte eine Energiefreisetzungsrate von 34 MW und ein Rauchentstehungsanteil von 0,05 kg/kg. Der in Brand gesetzte Lkw erzeugte eine Energiefreisetzungsrate von ca. 100 MW bei einem Rauchentstehungsanteil von 0,025 kg/kg.

3.1.4 Zusammenfassung und grundlegende Erkenntnisse

In Tabelle 3-1 sind die Tunnel aufgeführt, über die entsprechende Dokumentationen verfügbar waren. Daraus ist neben des Typs der eingesetzten Brandsimulationsanlage, die bei den Versuchen erzielten Brandleistungen sowie die Art des Brandraumes (Straßentunnel, Stollen) und das untersuchte Lüftungssystem, zu entnehmen. Darüber hinaus ist die Anzahl der Versuche und der Zeitraum der Versuchsdurchführung enthalten. Insgesamt stehen somit die Daten bzw. Dokumentationen aus 13 Brandversuchen zur Verfügung.

Die Brandversuche in Stollen, wie sie beispielsweise im Rahmen des EU499-FIRETUN in Norwegen oder im FE 03.344/2002/FRB im Versuchsstollen Hagerbach in der Schweiz durchgeführt worden sind, lassen sich jedoch nur schwer auf reale Tunnel übertragen, da weder Querschnittsform und Größe noch die Wandflächen realen Tunneln entsprechen. Da-

her eignen sich diese Versuche nur bedingt, um Aussagen zum Zusammenwirken betriebstechnischer Einrichtungen zu erhalten.

Brandversuch	Durchführung	Land	Brandtyp	Brandleistung	Brandraum	Lüftungssystem	Anz. Versuche
Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program	1990 - 1995	USA	Benzinwannen	10 MW 20 MW 50 MW 100 MW	Straßentunnel	- Querlüftung - Halbquerlüftung - Längslüftung	98
EU 499 Firetun	1996	Norwegen	Reale Fahrzeuge	6 MW (Pkw) 34MW (Bus) 100 MW (Lkw)	Stollen	Längslüftung mit Abzugschacht	20
Lärchbergtunnel	1994	Österreich	Benzinwanne	1,5 MW	Straßentunnel	Längslüftung	2
Schmittentunnel		Österreich	Benzinwannen	3,2 MW	Straßentunnel	Längslüftung	
A86 bei Paris	1999	Frankreich	Benzinwannen	5 MW	Straßentunnel		6
Rosenau	2000	Schweiz	Benzinwannen		Straßentunnel		
Versuchstollen Hagerbach	2001	Schweiz	Benzinwannen	bis 5 MW	Stollen	Längslüftung	7
4. Röhre Elbtunnel Hamburg	2002	Deutschland	Gasbrenner	2,4 MW 2,9 MW 7,2 MW	Straßentunnel	Längslüftung mit Rauchabzugskanal	6
Rennsteigtunnel	2003	Deutschland	Benzinwannen	3 MW 5 MW	Straßentunnel	Längslüftung mit Luftaustauschzentralen	7
Tunnel Dölzsch	2004	Deutschland	Benzinwannen	3 MW 5MW	Straßentunnel	Längslüftung	2
Tunnel Schwarzer Berg	2005	Deutschland	Gasbrenner	5 MW	Straßentunnel	Längslüftung	1
Kappelbergtunnel	2006	Deutschland	Benzinwannen	5 MW	Straßentunnel	Längslüftung	3
Einhausung Hösbach	2005	Deutschland	Gasbrenner	5 MW	Straßentunnel	Längslüftung	1

Tabelle 3-1: Aktuelle Brandversuche

Brandentwicklung und Rauchproduktion:

Die Rauchproduktion wie die Heißgastemperatur sind gemäß EU 499 FIRETUN etwa proportional zur Energiefreisetzungsrate bzw. zur Brandleistung. Die Energiefreisetzung eines offenen Brandes hat einen typischen Verlauf, wobei drei Phasen unterschieden werden können: die Brandentstehung, eine stationäre Phase und die Abkühlphase.

Bei einem Standardbrandversuch sollte, um reproduzierbare Verhältnisse zu erreichen, in einer kurzen Zeit von weniger als einer Minute die stationäre Phase (konstante Energiefreisetzungsrate) erreicht werden. Die Höhe der Energiefreisetzungsrate sollte dann lediglich vom Brandgut und die Dauer der Energiefreisetzung von der Brandgutmenge abhängig sein.

Die Russanteile im Rauch sind brandgutabhängig unterschiedlich.

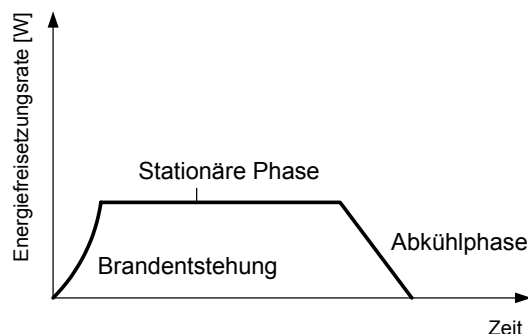


Abbildung 3-3: Brandentwicklung, Energiefreisetzungsrates als Funktion der Zeit

Brandleistung:

Unter der Brandleistung wird im Allgemeinen die maximale Energiefreisetzungsrates verstanden. Sie lässt sich aus dem effektiven Heizwert des Brandguts und der Abbrandrate durch Multiplikation theoretisch berechnen. Da die Abbrandrate u. a. von der Brandfläche abhängig ist, ergeben Wannenbrände (Poolfire) mit gegebener freier Oberfläche eine gut definierte Energiefreisetzung im Gegensatz zu Holzpaletten oder Fahrzeugen, bei denen die Oberfläche des Brandguts nicht eindeutig bestimmt ist. Bei der Bestimmung der Energiefreisetzung bzw. der Brandleistung ist u. a. der Verbrennungsgrad zu berücksichtigen, da bei der Verbrennung nicht der gesamte Energieinhalt des Brandguts umgesetzt wird. Der Verbrennungsgrad gibt an, wie hoch der effektive Heizwert bezogen auf den unteren Heizwert ist. Erfahrungsgemäß kann bei Wannenbränden, in Abhängigkeit des verwendeten Brandmittels von Verbrennungsgraden zwischen 70 und 90 % ausgegangen werden. Bei Wannenbränden mit flüssigem Brandmittel ergibt sich die effektive Brandleistung für ein bestimmtes Brandgut nach dem folgenden Berechnungsansatz von Babrauskas (1995).

$$\dot{Q} = A_f \cdot \dot{m}'' \cdot \chi \cdot H_u = A_f \cdot \dot{m}''_{\infty} \cdot (1 - e^{-k \cdot \beta' \cdot D}) \cdot \chi \cdot H_u \quad (\text{Gl. 3-1})$$

mit: \dot{Q} : Brandleistung [kW]

A_f : Brandfläche [m²]

\dot{m}'' : Abbrandrate bezogen auf die Brandfläche [kg/ s, m²]

\dot{m}''_{∞} : Theoretische Abbrandrate für Wannen Durchmesser $\varnothing > 0.2$ m

χ : Verbrennungsgrad [-]

H_u : unterer Heizwert [kJ/kg]

$k \cdot \beta'$: Extinktionsparameter

D : Durchmesser [m]

Temperaturen:

Von Bedeutung für die Versuchsdurchführung sind die zu erwartenden Temperaturen. Interessante Ergebnisse dazu liegen aus EU 499 FIRETUN (1998) vor.

Die Temperaturverteilung wie auch die maximalen Temperaturen hängen sowohl von der Energiefreisetzung als auch von der Längslüftung im Tunnel ab. Heptanbrände (Abbildung 3-4), zum Vergleich: Fahrzeugbrände (Abbildung 3-5 aus EU 499 FIRETUN (1998)).

Bei einer Brandleistung von 3.1 MW (Heptanbrand, Brandfläche = 1 m²) wurde im stationären Zustand jeweils bei 0.6 m/s und 1.5 m/s Längsgeschwindigkeit eine maximale Temperatur von 200 °C unter der Tunneldecke gemessen. Bei einer auf 10.1 MW erhöhten Brandleistung (Heptanbrand, Brandfläche = 3 m², Längsgeschwindigkeit 1.5 m/s und 2.5 m/s), wurde jeweils eine maximale Temperatur von 400°C registriert (Abbildung 3-4). Im betrachteten Bereich der Längslüftung war deren Einfluss auf die Maximaltemperatur sehr gering, hingegen auf die Temperaturverteilung sehr ausgeprägt.

Die Abbildung 3-5 aus EU 499 FIRETUN (1998) zeigt u. a. Maximaltemperatur und Temperaturverteilung eines Pkw-Brandes (C11), welcher mit einem Heptanbrand von 1 m² Fläche vergleichbar ist.

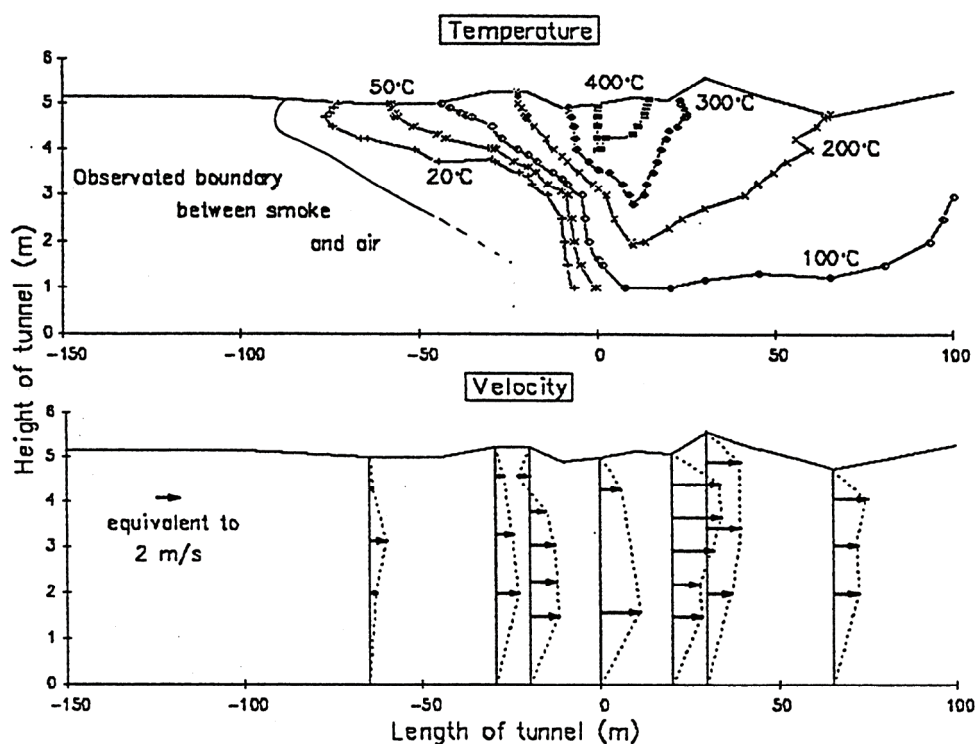


Abbildung 3-4: Temperaturverteilungen in Funktion der Brandleistung (EU 499 FIRETUN,1998)

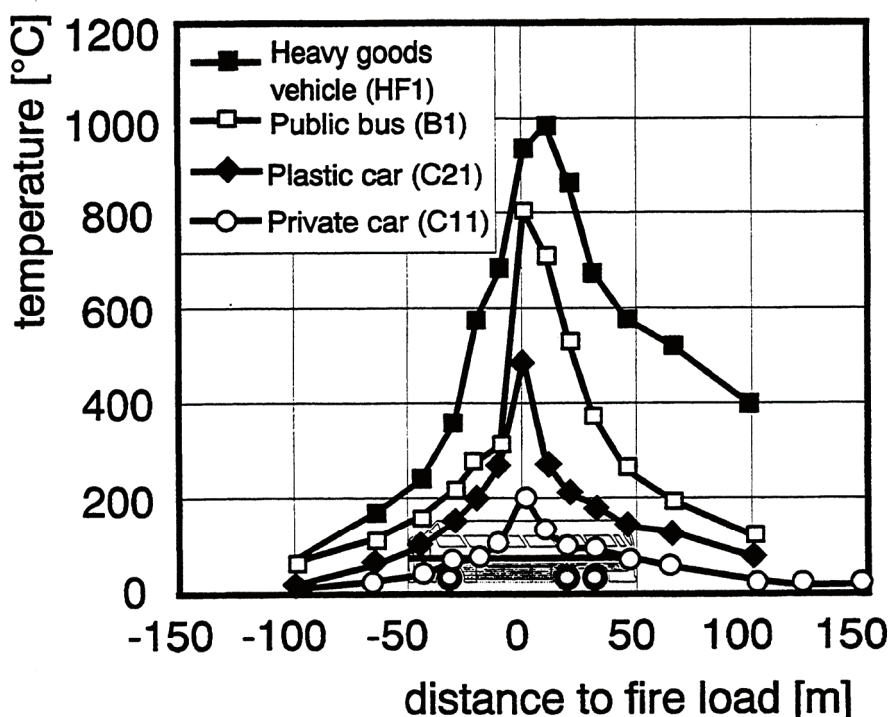


Abbildung 3-5: Temperaturverteilungen bei verschiedenen Fahrzeugbränden (nach EU 499 FIRETUN,1998)

3.2 Memorial Tunnel Brandversuche

Die Brandversuche im Memorial Tunnel wurden im Auftrag des US-amerikanischen Massachusetts Highway Departments und der Federal Highway Administration zwischen September 1993 und März 1995 mit dem Ziel durchgeführt, eine möglichst umfassende Datenbank über die Ausbreitung von Rauch und Temperatur für Längs- und Querlüftungssysteme bei unterschiedlichen Randbedingungen zu erhalten. Hierzu wurden 98 Brandversuche im Maßstab 1:1 durchgeführt, in denen neben dem Lüftungssystem die Brandleistung, die Belüftungsraten sowie die Betriebszustände variiert wurden. Um den Einfluss von statischen Hindernissen auf die Strömungsverhältnisse im Tunnel untersuchen zu können, wurden außerdem Fahrzeugsilhouetten eingesetzt. Somit sind die Memorial Tunnel Brandversuche die umfangreichsten Untersuchungen, die bisher zu dieser Thematik durchgeführt wurden. Sämtliche Versuche sind in MTFVTP (1995) ausführlich dokumentiert und stehen im MS Word- und Excel-Format auf Datenträgern zur Verfügung.

Aufgrund der Datenqualität und -quantität werden in dieser Untersuchung für die Validierung numerischer Berechnungen die Ergebnisse aus den Memorial Tunnel Brandversuchen verwendet.

3.2.1 Geometrische Verhältnisse

Der Memorial Tunnel ist ein stillgelegter, zweistreifiger, 853 Meter langer Richtungsverkehrstunnel aus dem Jahr 1953 mit einem Gesamtquerschnitt von 60,4 m². Die Gradiente des Tunnels weist eine Steigung von 3,2% vom Südportal zum Nordportal auf.

Ursprünglich war der Memorial Tunnel mit einem Querlüftungssystem mit oben liegendem Zu- und Abluftkanal ausgestattet, so dass dem Verkehrsraum eine Fläche von 36,2 m² zur Verfügung stand. Die Belüftung des Tunnels erfolgte über ein Zuluftgebäude am Südportal, die Entlüftung über ein Abluftgebäude am Nordportal. Zu- und Abluftkanal waren so durch eine vertikale Wand getrennt, dass sich ihre Querschnittsflächen linear von Portal zu Portal änderten. Die Zuluft wurde über neben dem Fahrbahnrand angeordneten Öffnungen in den Verkehrsraum eingebracht. Die Abluft wurde durch regelmäßig über die Tunnellänge verteilte Abluftöffnungen abgesaugt. Detailliertere Angaben zu den geometrischen Abmessungen sind Abbildung 3-6 zu entnehmen.

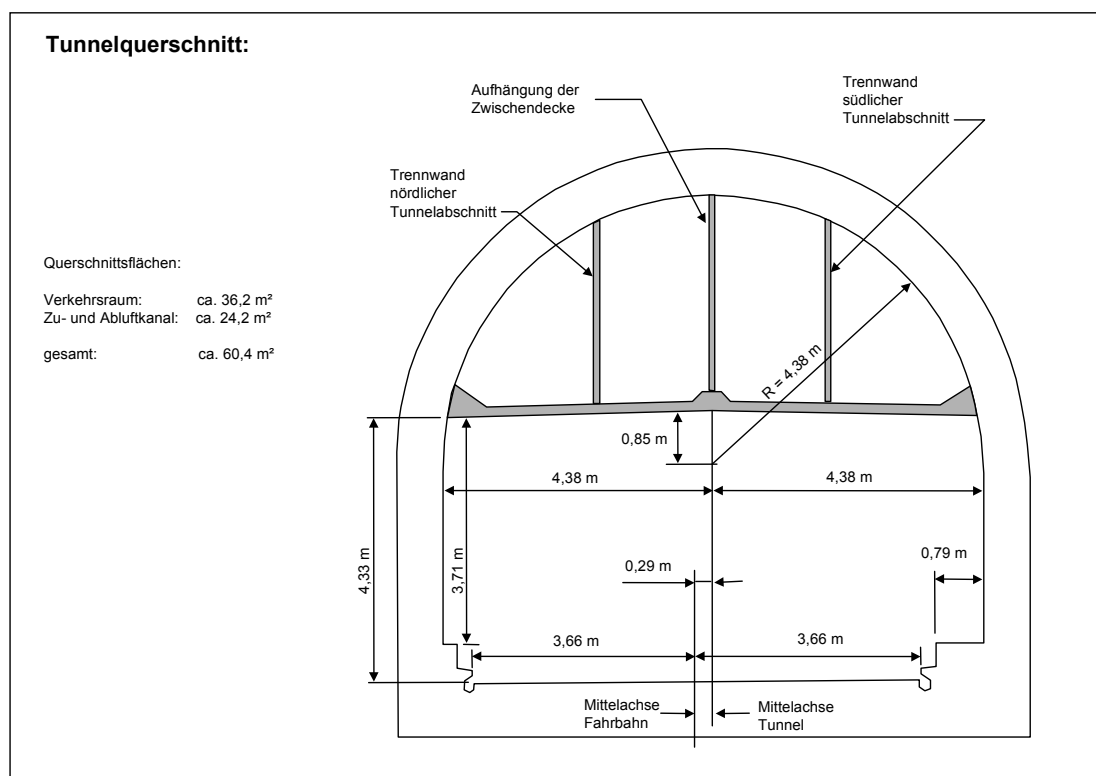


Abbildung 3-6: Querschnitt des Memorial Tunnels (MTFVTP, 1995; Mayer, 2006)

3.2.2 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm umfasste insgesamt 98 Brandversuche mit Brandleistungen von 10, 20, 50 und 100 MW. Im Einzelnen wurden in den Brandversuchen die in nachfolgender Abbildung 3-7 dargestellten Lüftungssysteme untersucht. Die in den Klammern verwendeten Abkürzungen entsprechen dabei den Bezeichnungen aus den einzelnen Versuchen.

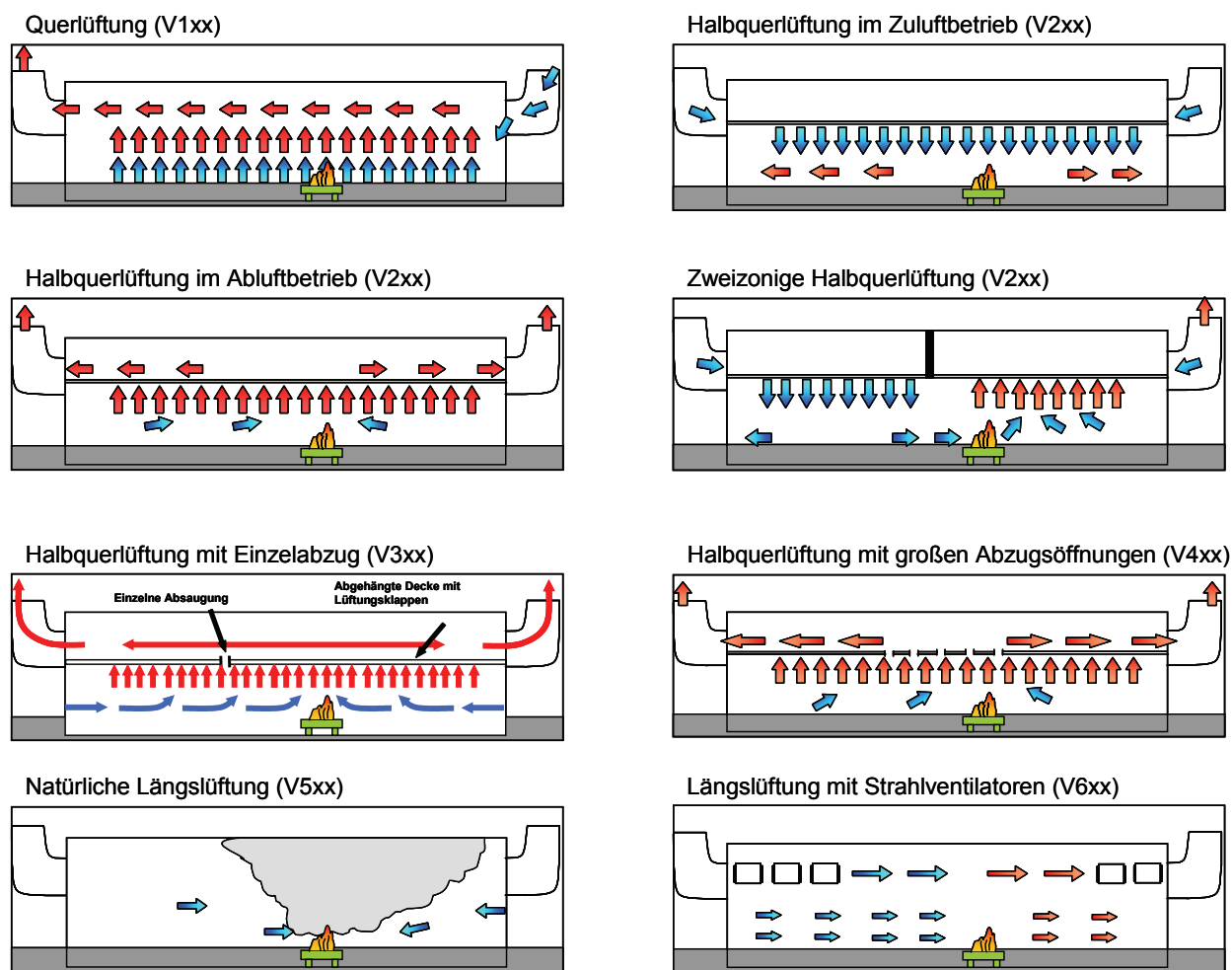


Abbildung 3-7: Untersuchte Lüftungssysteme

Im Fall der Brandversuche mit natürlicher Längslüftung sowie der Längslüftung mit Strahlventilatoren wurde die Zwischendecke aus dem Querschnitt entfernt, damit ein bei diesen Systemen üblicher Tunnelquerschnitt zur Verfügung stand.

Zur Erzeugung einer Längsströmung wurden insgesamt 24 Strahlventilatoren, die in Dreiergruppen im Tunnelgewölbe angeordnet waren, gleichmäßig über die Tunnellänge verteilt

installiert. Der Abstand von Ventilatorgruppe zu Ventilatorgruppe betrug, wie aus Abbildung 3-8 ersichtlich, 99,50 m.

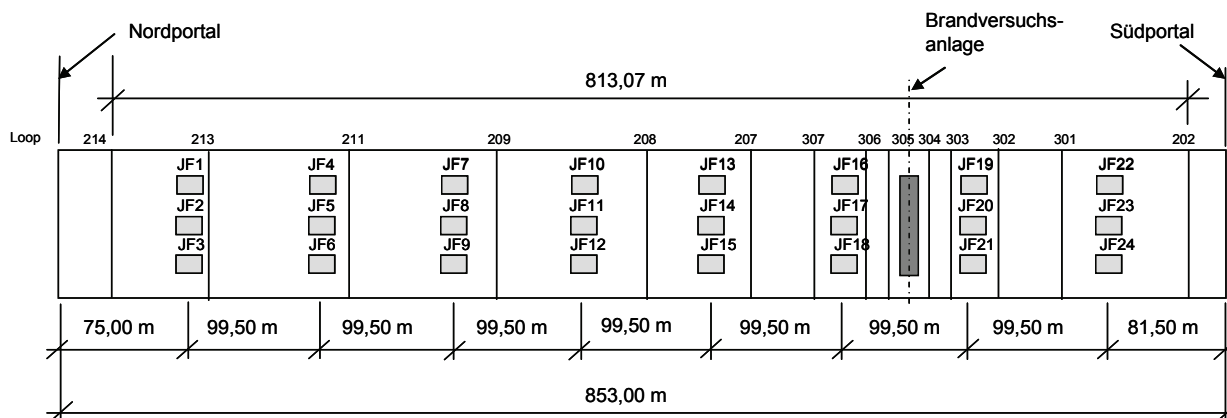


Abbildung 3-8: Anordnung der Strahlventilatoren im Memorial Tunnel

Zur Berücksichtigung des Einflusses von stehenden Fahrzeugen auf die Strömungsverhältnisse im Tunnel wurden bei ausgewählten Versuchen Fahrzeugsilhouetten, bestehend aus rechteckigen, unterschiedlich großen Stahlplatten nördlich des Brandherdes in den Tunnelquerschnitt eingebracht (siehe Abbildung 3-9). Die Abmessungen der Silhouetten entsprachen den typischen Querschnittsflächen eines Pkw, Van oder Lkw (siehe Tabelle 3-2). Zur Abbildung dieser drei Fahrzeugtypen standen insgesamt 16 Fahrzeugsilhouetten zur Verfügung, welche in den betreffenden Versuchen mit Hindernissen alle gleichzeitig im Tunnel angebracht waren.

Typ	Breite	Höhe	Anzahl
Pkw	1,54 m	1,45 m	9
Van	1,83 m	1,98 m	4
Lkw	2,44 m	4,12 m	3

Tabelle 3-2: Fahrzeug-Silhouetten (MTFVTP, 1995)

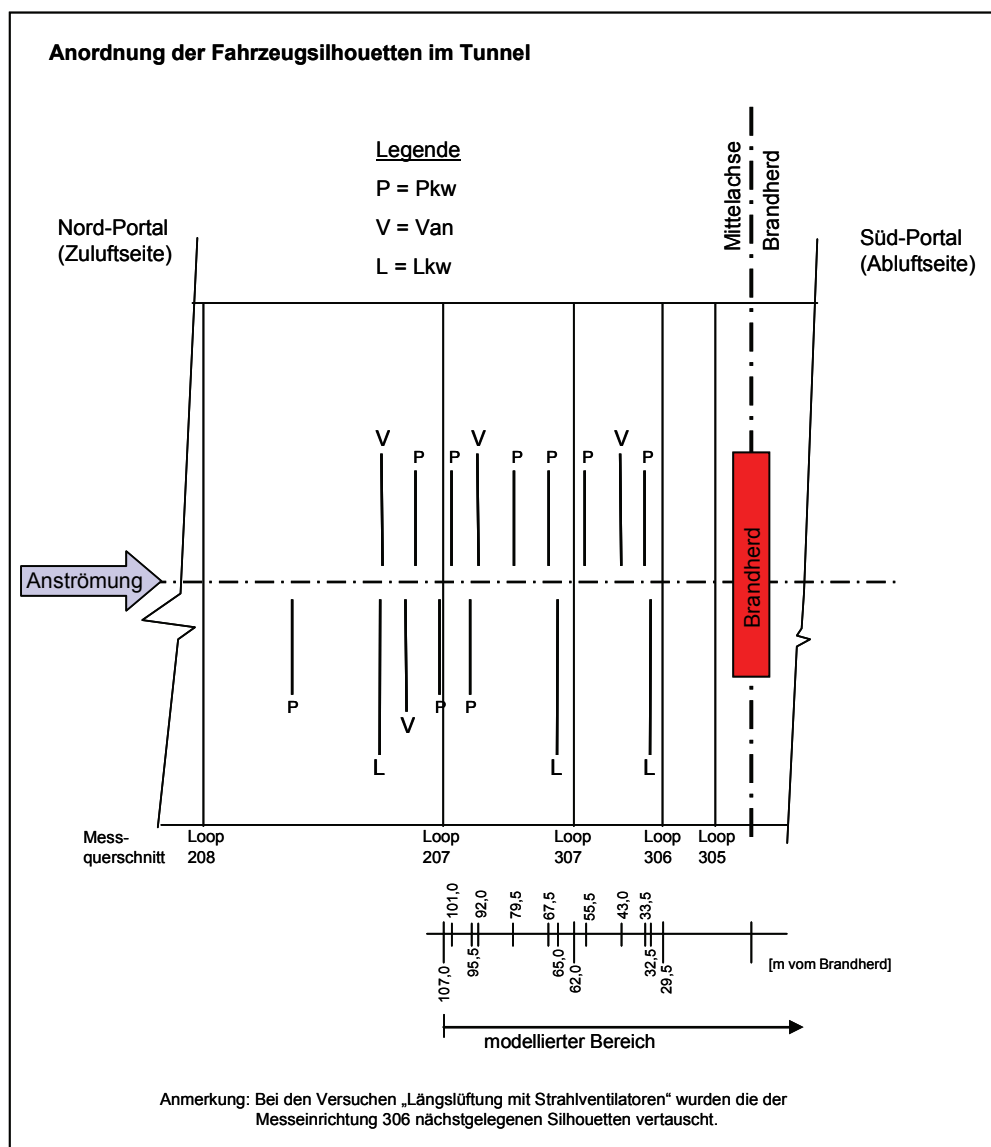


Abbildung 3-9: Anordnung der Fahrzeugsilhouetten im Tunnel (MTFVTP, 1995; Mayer, 2006)

3.2.3 Messeinrichtungen

Die Erfassung von Geschwindigkeit, Temperatur sowie Kohlenmonoxid und Kohlendioxid erfolgte mit entsprechenden Messwerterfassungen an unterschiedlichen Messquerschnitten im Tunnel. Die Rauchausbreitung wurde mittels Videokameras ausgewertet. Insgesamt standen zur Messwerterfassung 15 über die Tunnellängsachse verteilte Messquerschnitte (Loops) zur Verfügung (siehe Abbildung 3-10). Die Anordnung der Sensoren im jeweiligen Messquerschnitt zeigt Abbildung 3-11 für den Untersuchungsfall mit Zwischendecke und Abbildung 3-12 bei entfernter Zwischendecke.

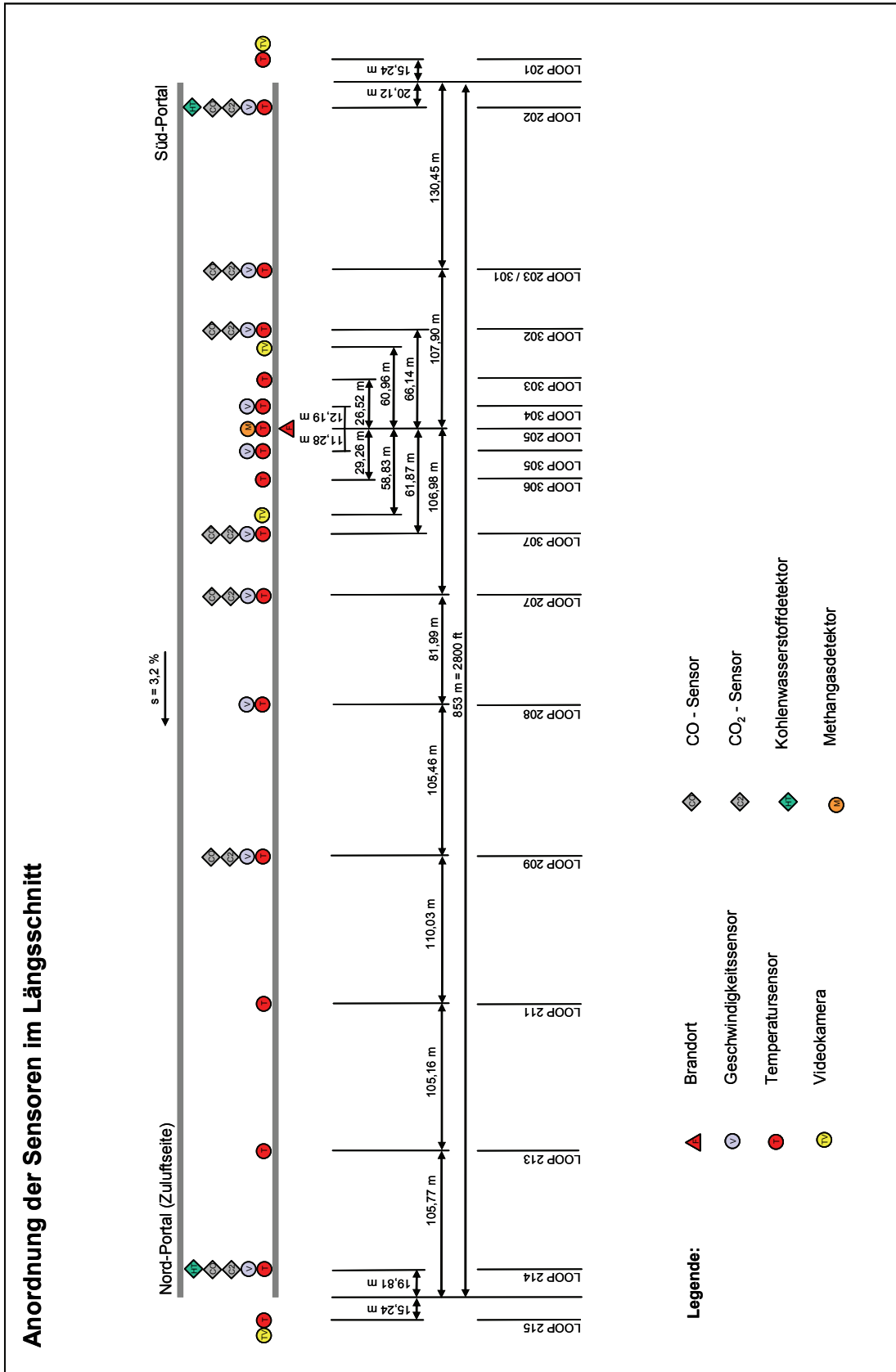


Abbildung 3-10: Anordnung der Sensoren im Längsschnitt (MTFVTP, 1995; Mayer, 2006)

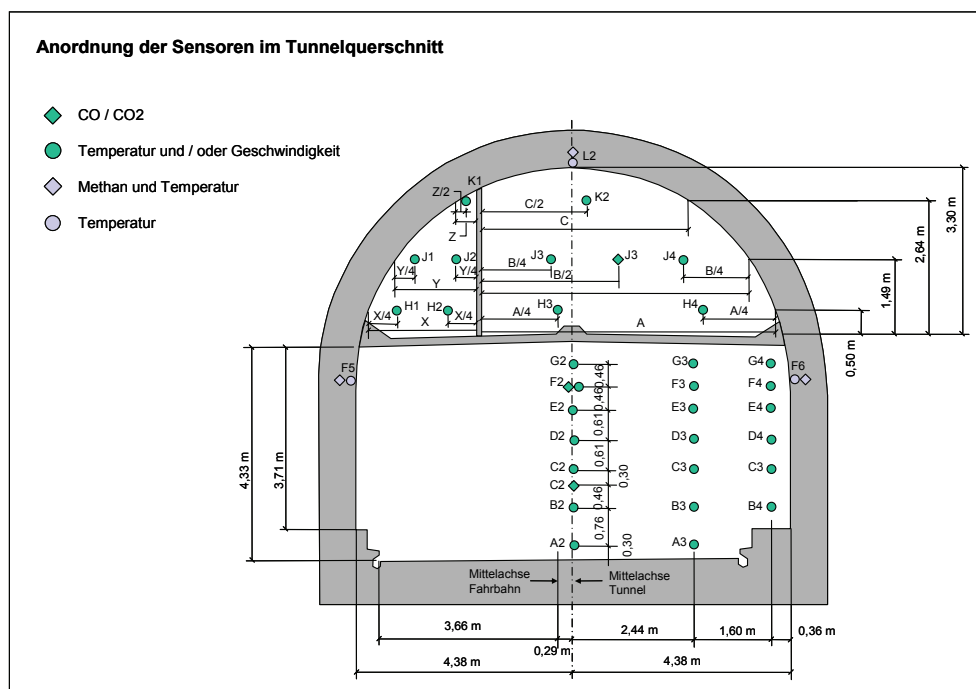


Abbildung 3-11: Anordnung der Sensoren im Tunnelquerschnitt (Versuche mit Zwischendecke) (MTFVTP, 1995; Mayer, 2006)

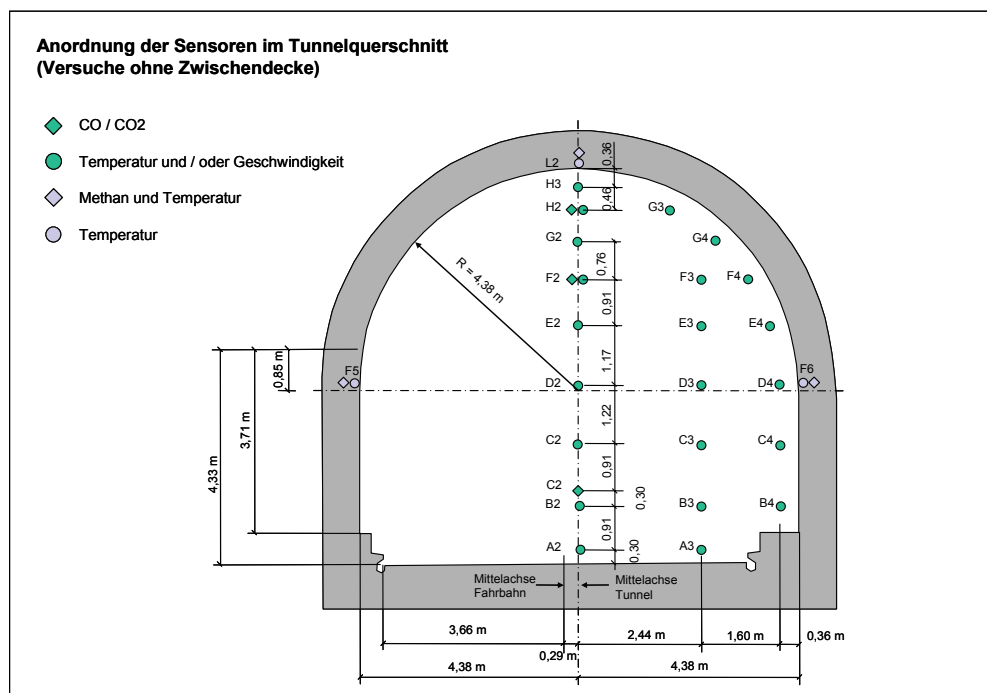


Abbildung 3-12: Anordnung der Sensoren im Tunnelquerschnitt (Versuche ohne Zwischendecke) (MTFVTP, 1995; Mayer, 2006)

3.2.4 Szenarienauswahl

Aus der Vielzahl der Versuche muss eine Auswahl getroffen werden, die der numerischen Simulation zugeführt wird. In den Simulationsrechnungen sollen besonders die in deutschen Straßentunneln üblichen Lüftungssysteme Berücksichtigung finden. Somit beschränkt sich die Auswahl der zu simulierenden Szenarien auf die folgenden drei Grundtypen von Lüftungssystemen:

- Querlüftung
- Halbquerlüftung im Absaugbetrieb
- Längslüftung.

Im Folgenden werden die für diese Lüftungssysteme durchgeführten Brandversuche analysiert und jeweils 4 Brandversuche für die numerische Simulation ausgewählt.

3.2.4.1 Querlüftung

Insgesamt wurden 19 Brandversuche mit dem Querlüftungssystem durchgeführt, in denen die Brandleistung zwischen 10 MW und 50 MW variiert werden konnte. Davon wurden 4 Brandversuche mit einer Brandleistung von 50 MW sowie 14 Brandversuche mit einer Brandleistung von 20 MW gefahren. Lediglich ein Brandversuch wurde bei einer Energiefreisetzung von 10 MW durchgeführt. Neben der Brandleistung wurden das Aktivieren der Lüftung sowie die Menge der Zu- und Abluft variiert. Die Lüftung befand sich entweder bereits zu Beginn des jeweiligen Versuchs in Betrieb oder wurde nach 2 bzw. 5 Minuten hochgefahren. Durch das Einstellen unterschiedlicher Zu- und Abluftmengen konnten sowohl ausgeglichene als auch unausgeglichene Lüftungssysteme untersucht werden. Die Zuluftmengen variierten hierbei zwischen 0,039 und 0,155 m³/s/n_{FS}/L., die Abluftmengen wurden auf Werte zwischen 0,062 und 0,155 m³/s/n_{FS}/L eingestellt.

Bei der Auswahl der zu simulierenden Brandversuche sollte nach Möglichkeit das gesamte Spektrum an Brandleistungen Berücksichtigung finden. Ein weiteres Ausschlusskriterium ist das Aktivieren der Lüftung. Es wird angestrebt, möglichst nur solche Brandversuche auszuwählen, bei denen sich die Lüftung bereits zu Beginn der Zündung in Betrieb befindet, da dadurch definierte Anfangsbedingungen vorhanden sind. Darüber hinaus sollen sowohl ausgeglichene als auch unausgeglichene Lüftungszustände in den numerischen Simulationen abgebildet werden.

Einen Überblick über sämtliche Brandversuche mit Querlüftungssystem gibt Tabelle 3-3 wieder. Darin sind in grün die Brandversuche markiert, welche für die numerischen Simulationen ausgewählt wurden.

Versuchs-Nr.	Brandleistung	Brandfläche	Strömungsgeschw. im Verkehrsraum	Aktivieren der Lüftung	Zuluftmenge	Abluftmenge	Temperatur	
							innen	außen
[-]	[MW]	[m ²]	[m/s]	[min]	[m ³ /s/n _{FS} /m]	[m ³ /s/n _{FS} /m]	[°C]	[°C]
101CR	10	4,5	0,74	2	0,101	0,093	21,6	-
102	20	9,0	0,73	-	0,039	0,139	20,4	25
102R	20	9,0	- 0,64	2	0,039	0,139	19,5	25
102R1	20	9,0	- 0,82	2	0,036	0,139	17,9	23
103	20	9,0	0,00	2	0,101	0,093	18,2	19
104	20	9,0	- 0,09	0	0,039	0,139	17,6	14
105	20	9,0	- 0,53	2	0,039	0,093	15,9	-
106	20	9,0	0,62	-	0,039	0,108	17,3	23
107	20	9,0	1,02	5	0,101	0,093	19,0	24
108	20	9,0	- 0,38	2	0,070	0,062	18,9	-
109	20	9,0	- 0,38	5	0,070	0,062	19,5	21
110	50	22,5	- 0,41	0	0,101	0,093	17,2	25
111	50	22,5	0,84	0	0,039	0,139	19,5	29
112A	20	9,0	1,13	2	0,155	0,155	17,6	-
113A	50	22,5	- 0,67	0	0,155	0,155	15,1	-
115A	50	22,5	- 0,73	2	0,155	0,155	13,0	-
126B	20	9,0	0,37	2	0,039	0,155	14,5	-
126BR	20	9,0	- 0,18	2	0,039	0,155	14,8	-
128B	20	9,0	0,71	2	0,101	0,155	15,1	-

Tabelle 3-3: Anfangs- und Randbedingungen für Brandversuche mit Querlüftung

3.2.4.2 Halbquerlüftung (reversierbar)

Die Brandversuche mit einem Halbquerlüftungssystem im Abluftbetrieb umfassten insgesamt 16 Versuche bei Brandleistungen von 20 und 50 MW. Davon wurden 12 Versuche mit einer Brandleistung von 20 MW und 4 Versuche mit einer Brandleistung von 50 MW durchgeführt. Das Aktivieren der Lüftung erfolgte in 13 Fällen nach 2 Minuten, und je einmal nach einer halben Minute und nach 5 Minuten. Der Abluftvolumenstrom variierte zwischen 0,108 und 0,217 m³/s/n_{FS}/L. In den überwiegenden Fällen wurde jedoch eine Abluftmenge von 0,124 bzw. 0,155 m³/s/n_{FS}/L eingestellt.

Da lediglich zwei unterschiedliche Brandleistungen zum Einsatz kamen, werden für die numerische Simulationen je zwei Szenarien ausgewählt. Dabei sollte die abzuführende Abluftmenge einen möglichst weiten Bereich abdecken. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander sollte außerdem das Aktivieren der Lüftung nach denselben Zeitvorgaben erfolgen.

In Tabelle 3-4 sind sämtliche Brandversuche des MTFVTP für Halbquerlüftung im Abluftbetrieb aufgeführt. Die für die numerischen Simulationsrechnungen ausgewählten Szenarien sind grün hinterlegt.

Versuchs-Nr.	Brandleistung	Brandfläche	Strömungsgeschw. im Verkehrsraum	Aktivieren der Lüftung	Abluftmenge	Temperatur	
						innen	außen
[-]	[MW]	[m ²]	[m/s]	[min]	[m ³ /s/n _{FS} /m]	[°C]	[°C]
202	20	9,0	0,75	2	0,124	11,7	16,7
203	20	9,0	0,00	2	0,108	14,2	11,7
205	20	9,0	- 0,66	5	0,124	7,1	- 4,6
207A	20	9,0	- 0,86	2	0,124	4,6	-
208A	20	9,0	- 0,19	0,5	0,124	11,1	13,0
210	20	9,0	- 1,00	2	0,124	11,6	14,1
212	20	9,0	- 0,46	2	0,124	10,0	8,1
214A	50	22,5	- 0,23	2	0,155	9,4	-
215A	50	22,5	- 1,35	2	0,124	8,5	8,9
216A	50	22,5	0,37	2	0,155	15,8	23,3
217A	50	22,5	1,45	2	0,124	12,6	-
218B	20	9,0	0,86	2	0,155	16,8	-
247B	20	9,0	0,23	2	0,124	9,7	-
248B	20	9,0	0,04	2	0,155	8,9	-
249B	20	9,0	0,10	-	0,124	25,6	-
252B	20	9,0	0,78	2	0,217	21,8	-

Tabelle 3-4: Anfangs- und Randbedingungen für Brandversuche mit Halbquerlüftung

3.2.4.3 Längslüftung

Die Brandversuche mit installiertem Längslüftungssystem umfassen 15 Versuche mit unterschiedlichen Brandleistungen und Längsströmungsgeschwindigkeiten. Die Brandleistungen variierten bei den Brandversuchen mit Längslüftungssystem zwischen 10 und 100 MW. Insgesamt wurden drei 10 MW -, vier 20 MW -, fünf 50 MW - und drei 100 MW - Versuche durchgeführt. Die Längsströmungsgeschwindigkeiten reichten bis 5,95 m/s.

Vorrangiges Ziel bei der Auswahl von Szenarien für die numerischen Simulationsrechnungen ist die Berücksichtigung des gesamten Brandleistungsspektrums. Des Weiteren sollte nach Möglichkeit die Lüftung bei Brandbeginn bereits aktiviert sein, um keine Verfälschungen durch zusätzliche Störgrößen zu erhalten. Darüber hinaus sollte eine möglichst große Variation in den Längsströmungsgeschwindigkeiten vorhanden sein.

In Tabelle 3-5 sind die Versuche mit Längslüftung zusammengestellt. Grün markiert sind darin die Versuche, die in den Simulationen berücksichtigt werden.

Versuchs-Nr.	Brandleistung	Brandfläche	Strömungsgeschw. im Verkehrsraum	Aktivieren der Lüftung	Temperatur	
					innen	außen
[-]	[MW]	[m ²]	[m/s]	[min]	[°C]	[°C]
605	10	4,5	5,95	0	5,6	1
606a	10	4,5	- 0,68	5	3,4	1
617a	10	4,5	3,95	0	7,4	
607	20	9,0	3,15	0	7,8	3,3
608	20	9,0	- 0,47	2	9,6	4,5
618a	20	9,0	- 0,06	2	10,4	10,8
610	50	22,5	4,34	0	7,5	4,4
611	50	22,5	- 0,86	2	8,1	7,2
612b	50	22,5	- 0,61	5	8,0	6,9
622b	50	22,5	3,67	0	10,6	4,4
615b	100	45,0	- 0,61	2	7,5	5,1
621a	100	45,0	1,52	0	8,3	1,1
623b	20	9,0	3,13	0	13,0	26,3
624b	50	22,5	-0,56	2	13,7	27,9
625b	100	45,0	1,14	0	14,7	28,5

Tabelle 3-5: Anfangs- und Randbedingungen für Brandversuche mit Längslüftung (Versuche 617a, 618a mit Fahrzeug-Silhouetten Versuche 624B und 625B mit Schaumlöschung)

3.3 Analyse vorhandener Simulationsprogramme

Zur Berechnung der Rauch- und Brandausbreitung in Tunneln ist eine Reihe von Programmen verfügbar. Eine prinzipielle Einteilung der Programme kann nach der Art der zu Grunde liegenden Modelle vorgenommen werden. Zu unterscheiden sind hierbei sogenannte Zonenmodelle, bei denen der Brandraum gewöhnlich in zwei Zonen mit einer Kaltgas- und einer Heißgasschicht sowie dem Plumbereich unterteilt wird und die sogenannten CFD-basierten Modellen, bei denen das Rechengebiet durch die Verwendung eines Gitters räumlich aufgelöst (diskretisiert) wird.

Die Berechnung der relevanten Größen erfolgt bei den Zonenmodellen durch Bilanzieren der Massen – und Energieströme zwischen den einzelnen Zonen unter Verwendung des idealen Gasgesetzes und Funktionen zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Dichte und innerer Energie. Hierzu wird auf analytische und empirische Modelle zurückgegriffen. Dies führt schließlich auf gewöhnliche Differentialgleichungen, die in eine analytische Lösung überführbar sind. Von Vorteil ist bei diesen Methoden, dass die Lösung bereits nach wenigen Minuten Rechenzeit vorliegt. Nachteilig ist jedoch, dass die den Berechnungen zugrunde liegenden Annahmen streng genommen nur für den Fall, für den sie formuliert wurden gelten und somit keine Allgemeingültigkeit aufweisen. Darüber hinaus lassen sich mit diesen Modellen nur beschränkt kleinskalige Einflüsse abbilden.

Die CFD-basierten Methoden basieren dagegen auf den allgemeingültigen, kontinuierlich formulierten Erhaltungsgleichungen zur Massen-, Impuls-, Energie- und Stoffhaltung. Dies führt jedoch auf ein System von gekoppelten Differentialgleichungen, die keiner analytischen Lösung mehr zugänglich sind. Daher müssen diese kontinuierlich formulierten Gleichungen durch geeignete Verfahren so diskretisiert werden, dass sie mit Hilfe von Rechnern numerisch gelöst werden können. Die CFD-basierten Methoden unterscheiden sich schließlich in der Art der Diskretisierung. Als Diskretisierungsverfahren haben sich insbesondere die Finite-Differenzen-Methode (FDM), die Finite-Volumen-Methode (FVM) und die Finite-Element-Methode (FEM) etabliert. Darüber hinaus existieren eine Reihe weiterer Verfahren, auf die an dieser Stelle jedoch nicht weiter eingegangen hier und lediglich auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen wird. Von Vorteil ist bei diesen Methoden, dass selbst kleinstskalige Vorgänge berechenbar werden. Durch die Verwendung entsprechender Sub-Modelle lassen sich weitere physikalische Effekte abbilden, wie beispielsweise Turbulenzen, Wirkung von Sprinklern, Sichttrübung durch Partikel, Flammen usw. Nachteilig ist jedoch bei den CFD-basierten Modellen die gegenüber den Zonenmodellen deutlich größeren Rechenzeiten (Tage) und der erheblich größere Ressourcenbedarf (Rechenleistung und Speicher). Durch die Rechnerentwicklung ist es inzwischen möglich, selbst auf PCs Tunnel dreidimensional über die gesamte Länge abzubilden.

Einen Überblick über die verfügbaren Programme zur Berechnung der Rauch- und Brandausbreitung in Tunnel ist in Tabelle 3-6 (CFD-Modelle) und Tabelle 3-7 (Zonen-Modelle) gegeben. Eine detailliertere Zusammenstellung über die Leistungsmerkmale der einzelnen Programme gibt Anhang A wieder. Dargestellt sind sowohl kommerzielle als auch Open

Source Programme. Prinzipiell lassen sich mit sämtlichen Programmen Aussagen zur Wirkung der Lüftung im Brandfall treffen. Je nach Hauptanwendungsgebiet unterscheiden sich die Programme in ihrer Funktionalität zur Abbildung von Bränden. Nur wenige Programme wurden speziell hierfür entwickelt. Im Bereich der CFD-Modelle sind dies der Fire Dynamics Simulator (FDS), Phoenics und Tunfire. Im Bereich der Zonenmodelle ist CFAST am weitesten entwickelt.

Durch die numerische Lösung der Erhaltungsgleichungen sind alle CFD-Modelle in der Lage, Geschwindigkeits-, Druck-, Temperaturverteilungen sowie Konzentrationen im Raum zu berechnen. Unterschiede resultieren im Wesentlichen aus der Integration physikalischer Submodelle. So sind Modelle, die hauptsächlich für Verbrennungsvorgänge von vorgemischten Flammen entwickelt wurden, i. d. R. nur bedingt geeignet, um Brände zu simulieren, da hierzu andere Eingangsgrößen wie beispielsweise die Energiefreisetzungsrates benötigt werden. So kann sich die Modellierung eines Brandes mit derartigen Modellen sehr aufwändig gestalten. Darüber hinaus können mit diesen Programmen nur über Umwege Aussagen über die sich einstellenden Sichtverhältnisse getroffen werden. Aufgrund der Spezialisierung auf vorgemischte Flammen sind diese Modelle auch wenig geeignet, die Ausbreitung von Bränden zu berechnen. Des Weiteren sind bei diesen CFD-Modellen auch keine Submodelle zur Abbildung von Detektoren integriert. Somit kann auch nicht direkt ein Zusammenhang zwischen Detektion und der Steuerung von Lüftungs- und Löscheinrichtungen hergestellt werden.

Aus diesen Gründen sollte nach Möglichkeit auf ein Modell mit Spezialisierung auf Brände zurückgegriffen werden. Dadurch minimiert sich insbesondere der Modellierungsaufwand. Außerdem lassen sich Brände häufig realistischer wiedergeben.

Mit Hilfe von Zonenmodellen werden stets nur grobe Abschätzungen zu den interessierenden Größen möglich sein. Modellbedingt wird von vornherein eine Unterteilung des Rechenraums in eine Heißgasschicht und in eine Kaltgasschicht vorgenommen. Zwischen den Schichten werden dann einfache Massen- und Energiebilanzen gebildet. In Tunneln mit unterschiedlichen Lüftungseinrichtungen und Fahrzeugen im Rechenraum ist aber eine derartige Trennung nicht zwingend vorhanden. Sollen diese Einflüsse berücksichtigt werden, so ist der Modellierungsaufwand mindestens so hoch wie bei CFD-Modellen.

Name (Entwickler, Vertrieb)	Typ (Methode)	Verfügbarkeit	Ergebnisse / Aussagen										
			Geschwindigkeits- verteilung	Druckverteilung	Temperaturverteilung	Konzentrationen	Sichtverhältnisse (Extinktion, Sichtweite)	Energiefreisetzung	Wärmeübertragung	Brandausbreitung	Ansprechen von Detektoren	Wirkung der Lüftung	Wirkung von Löscheinrichtungen
CFX (vormals FLOW3D) (ANSYS)	CFD (FVM)	Kommerziell	√	√	√	√	-	-	√	-	√	√	√
Fire Dynamics Simulator (Kevin McGrattan, NIST, USA)	CFD (FDM)	Open Source	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
FLUENT Version 6.2 (FLUENT)	CFD (FVM)	Kommerziell	√	√	√	√	-	-	√	-	-	√	√
JASMINE (BRE: Building Research Estab- lishment, UK)	CFD (FVM)	Kommerziell	√	√	√	√	-	-	√	-	-	√	√
PHOENICS	CFD (FVM)	Kommerziell	√	√	√	√	-	-	√	√	√	√	√
SMARTFIRE (FSEG University of Greenwich)	CFD (FVM)	Kommerziell	√	√	√	√	-	-	√	√	√	√	-
SOLVENT (Innovative Research Inc. / Par- sons Brinckerhoff)	CFD (FVM)	Kommerziell	√	√	√	√	-	-	-	-	-	√	-
Star-CD (CD-adapco)	CFD (FVM)	Kommerziell	√	√	√	√	-	-	√	-	-	√	√
TUNFIRE. (BRE: Building Research Estab- lishment, UK)	CFD (FVM)	Kommerziell	√	√	√	√	√	√	√	√	-	√	√
VESTA (TNO)	CFD (FDM)	-	√	√	√	√	-	-	-	-	-	√	-

Tabelle 3-6: Übersicht zu CFD-Programmen

Name (Entwickler, Vertrieb)	Typ (Methode)	Verfügbarkeit	Ergebnisse / Aussagen											
			Geschwindigkeiten - in Zonen - an Brandraumübergängen	Druckverlauf - in Zonen und. - an Brandraumübergängen	Temperaturen - in Zonen - an Brandraumübergängen	Konzentrationen in Zonen und. an Brandraumübergängen	Sichtverhältnisse (Extinktion, Sichtweite) - in Zonen - an Brandraumübergängen	Energiefreisetzung	Wärmeübertragung	Brandausbreitung	Ansprechen von Detektoren	Wirkung der Lüftung	Wirkung von Löscheinrichtungen	
Diana (TNO Building and construction research)	Zonen- Modell	Kommerziell	√	√	√	√				√		√		
MRFC Multi Room Fire Code (Technische Universität Wien)	Zonen- Modell	Kommerziell	√	√	√	√			√	√	√		√	√
CFAST - Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (NIST, USA)	Zonen- Modell	Open Source	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
CRISP (BRE: Building Research Estab- lishment, UK)	Zonen- Modell	Kommerziell	√	√	√	√					√		√	

Tabelle 3-7: Übersicht zu Zonen-Modellen

3.4 Auswahl eines Simulationsprogramms zur Durchführung der Berechnungen

Für die weiteren Untersuchungen wurde der Fire Dynamics Simulator gewählt. Hierbei handelt es sich um ein Programm, das vom National Institute of Standards and Technology (NIST) des US Department of Commerce speziell für die Simulation von Bränden entwickelt worden ist. Die Entwicklung des Codes begann vor ca. 25 Jahren und wird stetig fortgeführt. Die aktuelle Version 4.0.7 ist seit März 2006 als Open Source, d.h. ohne Lizenzgebühren, verfügbar.

3.4.1 Mathematisches Modell

Grundlage für die Berechnung bilden folgende kontinuierlich formulierten Erhaltungsgleichungen:

$$\text{Massenerhaltung} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (\text{Gl. 3-2})$$

$$\text{Stoffhaltung} \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i \mathbf{u} = \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}_i''' \quad (\text{Gl. 3-3})$$

$$\text{Impulserhaltung} \quad \rho \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{u} \right) + \nabla p = \rho \cdot \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (\text{Gl. 3-4})$$

$$\text{Energieerhaltung} \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} - \nabla \cdot \mathbf{q}_r + \nabla \cdot \mathbf{k} \nabla T + \sum_i \nabla \cdot h_i \rho D_i \nabla Y_i \quad (\text{Gl. 3-5})$$

Die zeitliche und räumliche Diskretisierung erfolgt bei dem FDS mit Hilfe der Finiten Differenzen Methode. D.h. der Differentialquotient

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{u(x+h, y) - u(x, y)}{h} \quad (\text{Gl. 3-6})$$

wird durch den Differenzenquotient

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u(x+h, y) - u(x, y)}{h} \quad (\text{Gl. 3-7})$$

approximiert.

Die zeitliche Diskretisierung erfolgt hierbei mit einem expliziten Predictor-Corrector Verfahren 2-ter Ordnung. Die räumlichen Ableitungen werden durch Finite Differenzen zweiter Ordnung approximiert. Zur Vermeidung von Oszillationen in der Lösung werden die Ortsableitungen auf einem sogenannten Versetzten Gitter (staggered grid) diskretisiert. D.h. die skalaren

Größen (Druck, Temperatur, Konzentration) werden im Zellmittelpunkt angenommen, die vektoriellen Größen (Geschwindigkeit) auf den Zellrändern.

Der verwendete Algorithmus zählt zu den sog. Druckkorrekturverfahren. Dabei wird ein nicht divergenzfreies Geschwindigkeitsfeld mit Hilfe des Druckes durch Lösen einer Poissongleichung in ein divergenzfreies Geschwindigkeitsfeld überführt. Für weitere Einzelheiten sei an dieser Stelle auf das Technical Reference Guide verwiesen.

Im FDS sind darüber hinaus noch eine Reihe von Submodellen implementiert. Neben einem Turbulenzmodell (LES) sind ein Flammenmodell sowie ein Modell zur Berechnung der Wärmestrahlung integriert. Darüber hinaus werden Verbrennungsvorgänge durch ein Reaktionsmodell berücksichtigt. Zur Abschätzung der Wirkung von Löscheinrichtungen ist ein Partikelmodell implementiert, mit dem die Sprühwirkung von Sprinklern nachgebildet werden kann. Außerdem lassen sich wärme- und rauchsensitive Detektoren modellseitig abbilden und beispielsweise mit Ventilatoren oder Sprinklern verknüpfen. Zur Berücksichtigung atmosphärischer Einflüsse ist ferner ein Windmodell integriert. Durch Vorgabe von Entzündungstemperaturen einzelner Stoffe kann auch eine Brandausbreitung berechnet werden.

3.4.2 Überprüfung prinzipieller Modelleigenschaften

Bevor das Simulationsmodell für die weitere Untersuchung eingesetzt wird, sollen vorab die prinzipiellen Eigenschaften untersucht werden. Modelliert wird ein Tunnel mit gleich bleibenden geometrischen Randbedingungen. Variiert werden dann die Längsströmungsgeschwindigkeit und die Längsneigung. Beträgt die Längsneigung $s = 0\%$ und ist die Längsströmungsgeschwindigkeit $u = 0$ m/s, so sollte durch das Modell eine symmetrische Rauchausbreitung berechnet werden. Wird demgegenüber die Längsneigung s ohne Aufprägung einer Längsströmungsgeschwindigkeit verändert, so muss durch das Modell der sog. Kamineffekt wiedergegeben werden können. Darüber hinaus sollte das Modell in Lage, sein Effekte wie das Backlayering korrekt wiederzugeben. In Abbildung 3-13 ist die Rauchausbreitung für einen 5 MW-Brand nach 240 s für die genannten Fälle dargestellt. Es zeigt sich, dass prinzipiell sämtliche Szenarien durch das Modell korrekt wiedergegeben werden können, so dass einem Einsatz für die weiteren Untersuchungen zunächst nichts entgegensteht.

$u = 0 \text{ m/s}$
 $s = 0\%$



$u = 0 \text{ m/s}$
 $s = 3\%$



$u = 2 \text{ m/s}$
 $s = 0\%$



Abbildung 3-13: Rauchausbreitung bei unterschiedlichen Randbedingungen (5MW, $t=240\text{s}$)

4 Datenaufbereitung

Bevor mit den eigentlichen Simulationsrechnungen begonnen werden konnte, mussten die vorliegenden Daten aus den Memorial Tunnel Versuchen in iso-Einheiten übergeführt werden. Hierzu mussten geeignete Algorithmen entwickelt werden, welche die sehr unterschiedlichen Dateistrukturen zweifelsfrei erkennen und die Daten entsprechend umrechnen und in das Ausgangsformat zurückschreiben. Im Einzelnen wurden die in nachfolgender Tabelle 4-1 aufgeführten Umwandlungen vorgenommen.

Original Einheit	Beschreibung	iso-Einheit	Umrechnung
ft	foot	m	1ft = 0,3048 m
sqft	Square feet	m ²	1sqft = 0,0929 m ²
cf	Cubic feet	m ³	1cf = 0,0283 m ³
fpm	Feet per minute	m/s	$1\text{fpm} = \frac{0,3048\text{m}}{60\text{s}}$
cfm	Cubic feet per minute	m ³ /s	$1\text{cfm} = \frac{(0,3048\text{m})^3}{60\text{s}}$
F	Fahrenheit	K	$T = \frac{5}{9} \cdot (x_F - 32) + 273,15$
F	Fahrenheit	°C	$T = \frac{5}{9} \cdot (x_F - 32)$
LBS	Pound	kg	1LBS = 0,45359237 kg

Tabelle 4-1: Umrechnungsfaktoren

Diese Umrechnungen wurden für alle Datenblätter sämtlicher Brandversuche (ca. 800) durchgeführt. Somit existieren erstmals verwertbare Daten für die weiteren Untersuchungen.

Zur vergleichenden Visualisierung der Daten wurde isac-vis verwendet. Dieses Visualisierungsprogramm, ursprünglich konzipiert als Postprozessor von isac-flow, erlaubt das gleichzeitige Visualisieren von Daten unterschiedlich skalierten Datensätze durch Führen von Schnitten durch die jeweilige Datenmenge. Sämtliche vergleichenden Darstellungen wurden mit dieser Umgebung erstellt.

5 Modellierung

Die Modellierung des Tunnels umfasst zum einen die Definition der Geometrie auf einem Gitter und zum anderen die Vorgabe von Anfangs- und Randbedingungen. Darüber hinaus sind zusätzliche Bedingungen erforderlich, wie beispielsweise Angaben zur Simulationsdauer und dem Aktivieren und Deaktivieren von bestimmten Ereignissen.

Um eine möglichst realistische Anfangssituation zu erreichen, werden sämtliche Simulationen eine Minute vor der Zündung des Brandmittels begonnen. Somit ist gewährleistet, dass bei Zündung ein eingeströmter Zustand vorherrscht. Nach Aktivierung der Zündung erfolgt in Abhängigkeit der jeweiligen Schaltbedingungen das Zu- und Abschalten der Ventilatoren. Insgesamt werden sämtliche Simulationen über eine Dauer von 6 Minuten durchgeführt.

5.1 Tunnelgeometrie

Für die folgenden Untersuchungen wurde der Memorial Tunnel über seine gesamte Länge von 853 m modelliert. Somit ist es möglich, den Tunnel in seiner ganzen Funktion abzubilden. Die räumliche Auflösung erfolgte mit einem äquidistanten Gitter mit einem Gitterabstand von 0,5 m. Dies stellt einen guten Kompromiss zwischen einer wünschenswerten feineren Auflösung und dem Ressourcenbedarf dar. Denn mit jeder Halbierung der Gitterweite verachtfachen sich der Rechenaufwand und der Speicherbedarf. Für eine Gitterweite von 0,25 m können die Berechnungen unter Windows XP bereits nicht mehr durchgeführt werden, da Windows XP maximal 2 GB RAM adressieren kann. Mit einer Auflösung von 0,5 m lassen sich zudem die wesentlichen Strukturen in einem Tunnel bereits gut abbilden.

5.1.1 Querlüftung

Zur Nachbildung des Querlüftungssystems im Memorial Tunnel wurde der Verkehrsraum bis zur Zwischendecke abgebildet. Daraus resultiert unter Berücksichtigung der räumlichen Diskretisierung von 0,5 m eine Anzahl von insgesamt $1706 * 20 * 11 = 375.320$ Knoten. Da exakte Angaben zur Ausbildung der Zu- und Abluftöffnungen fehlen, wurden deren Abmessungen anhand von Fotos abgeschätzt und mit einer Fläche von $0,5 \text{ m}^2$ angenommen. Die Verteilung der Zu- und Abluftöffnungen erfolgte gleich verteilt über die gesamte Tunnellänge im Abstand von 4,5 m. Die Zuluftöffnungen sind wie im Originaltunnel seitlich über dem Notgehweg und die Abluftöffnungen in der Zwischendecke über einem Fahrstreifen angeordnet. Einen Ausschnitt aus dem Modelltunnel zeigt Abbildung 5-1. Darin sind die Zuluftöffnungen blau und die Abluftöffnungen rot gekennzeichnet.

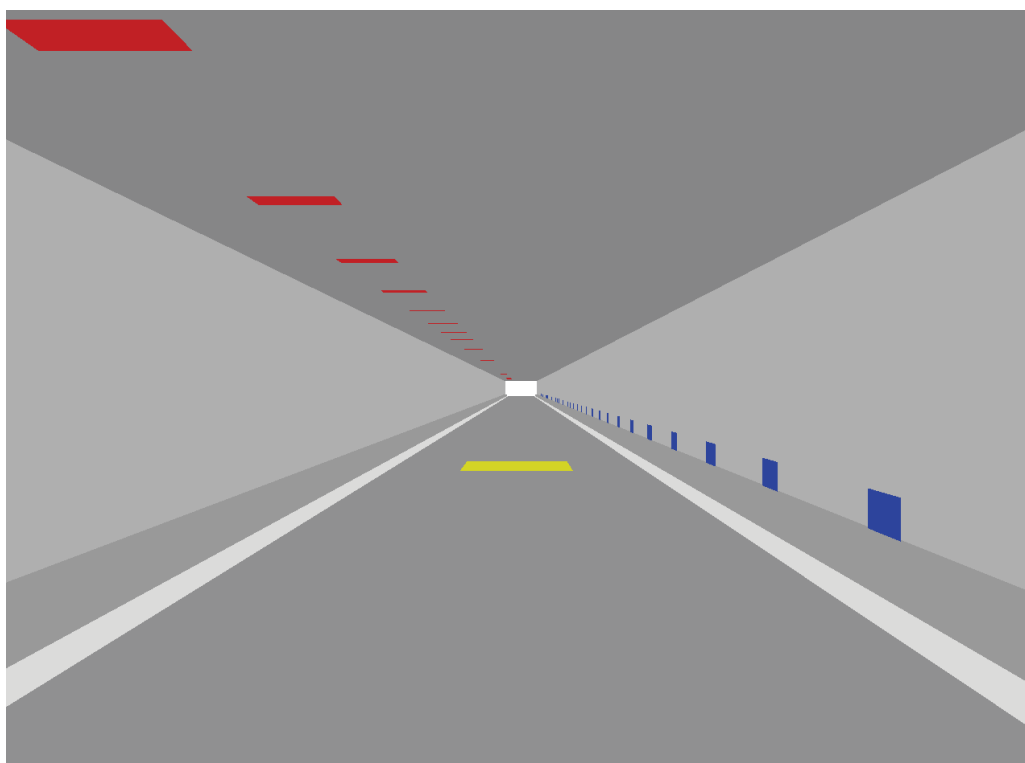


Abbildung 5-1: Modelliertes Querlüftungssystem mit Zuluftöffnungen (blau), Abluftöffnungen (rot) und Brandstelle (gelb)

5.1.2 Halbquerlüftung (Verteilte Absaugung)

Die Modellierung der Halbquerlüftung entspricht in weiten Teilen der in Kapitel 5.1.1 beschriebenen Nachbildung des Querlüftungssystems. Gegenüber dem Modelltunnel mit Querlüftungssystem wurden lediglich die Zuluftöffnungen aus der Modellierung herausgenommen, so dass alle weiteren geometrischen Abmessungen bestehen bleiben. Das Rechengebiet besteht somit ebenfalls aus $1706 * 20 * 11 = 375.320$ Knoten. Die Abluftöffnungen bleiben gleich verteilt über die Tunnellänge im Abstand von 4,5 m und einer Fläche von $0,5 \text{ m}^2$ angeordnet. Abbildung 5-2 zeigt den modellierten Tunnel mit reversierbarem Halbquerlüftungssystem. Die Abluftöffnungen sind darin wiederum rot gekennzeichnet.

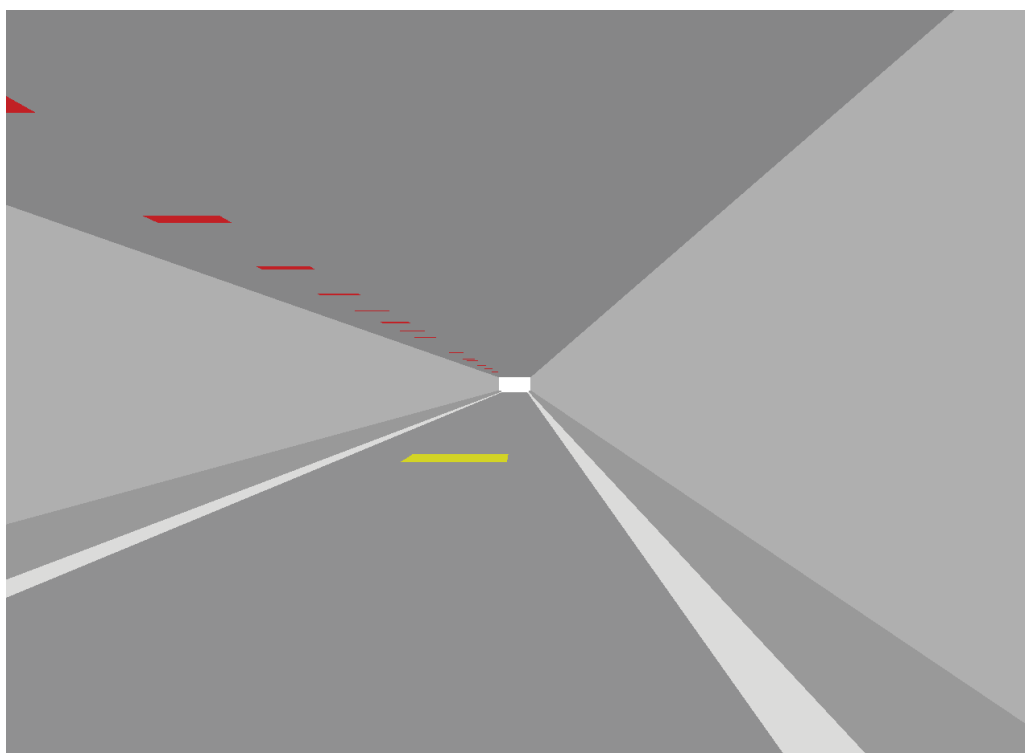


Abbildung 5-2: Modelliertes Halbquerlüftungssystem mit Abluftöffnungen (rot) und Brandstelle (gelb)

5.1.3 Längslüftung

Entsprechend dem Originaltunnel wurde der Modelltunnel für das Längslüftungssystem ohne Zwischendecke und mit Gewölbe abgebildet. Daraus resultiert bei gleicher räumlicher Diskretisierung mit einer Maschenweite von 0,5 m ein Rechengebiet mit $1706 * 20 * 18 = 614.160$ Knoten. Die Anordnung der Strahlventilatoren erfolgte gemäß Abbildung 3-8 in Dreiergruppen über die Tunnellängsachse verteilt mit einer Fläche von 1,0 m x 1,0 m. Die Modellierung des Tunnels zeigt beispielhaft Abbildung 5-3. Darin sind die Ventilatoren blau und im Vordergrund die Brandstelle gelb dargestellt.

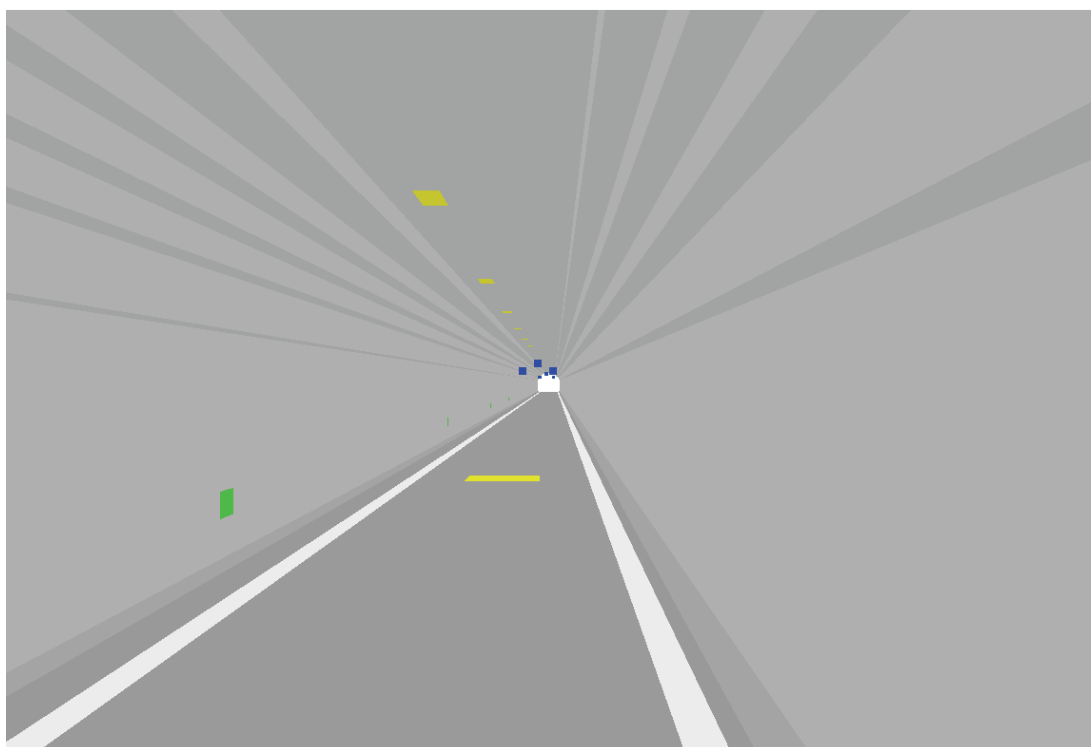


Abbildung 5-3: Modelliertes Längslüftungssystem mit Ventilatoren (blau) und Brandstelle (gelb)

5.2 Rand- und Anfangsbedingungen

Bei dem den Berechnungen zu Grunde liegenden Gleichungssystem handelt es sich um ein typisches Anfangs-Randwertproblem. D.h., um eine eindeutige Lösung zu erhalten, müssen Rand- und / oder Anfangsbedingungen vorgegeben werden. Zu unterscheiden sind hierbei sog. Dirichlet-Bedingungen, bei denen Werte von Strömungsgrößen am Rand vorgegeben werden und sog. Neumann-Bedingungen, bei denen der Gradient von Strömungsgrößen senkrecht zum Rand vorgegeben wird. Durch Anfangsbedingungen wird demgegenüber der gesamte Rechenraum mit Anfangswerten zum Zeitpunkt $t = 0$ belegt.

Um das freie Ein- bzw. Ausströmen von Luft an den Tunnelportalen zu ermöglichen, werden hier über Neumann-Bedingungen formulierte Ausströmränder (OPEN) verwendet. Im Tunnelinnern dienen als Anfangsbedingungen die vorherrschende mittlere Geschwindigkeit sowie gemittelte Temperaturen. Als Anfangswerte für die Außentemperaturen werden die angegebenen Werte aus den Versuchsprotokollen verwendet. Den Tunnelwänden wird als Anfangsbedingung die Temperatur im Tunnelinnern aufgeprägt.

5.2.1 Querlüftung

Zur Modellierung der Querlüftung müssen die Einströmränder (Dirichlet-Bedingungen) der Zu- und Abluftöffnungen bekannt sein. Mit Hilfe der in Tabelle 5-1 dargestellten Anfangs- und Randbedingungen lassen sich über folgenden formalen Zusammenhang die Ein- und Austrittsgeschwindigkeiten in den Zu- und Abluftöffnungen berechnen.

Zuluft	Abluft
$Q_z = q_z^* \cdot L \cdot n_{FS}$	$Q_a = q_a^* \cdot L \cdot n_{FS}$
$q_z = \frac{Q_z}{(L/l_z)}$	$q_a = \frac{Q_a}{(L/l_a)}$
$v_z = \frac{q_z}{A_z}$	$v_a = \frac{q_a}{A_a}$
Q_z Zuluftbedarf	Q_a Abluftbedarf
q_z Volumenstrom Zuluftöffnung	q_a Volumenstrom Abluftöffnung
v_z Austrittsgeschwindigkeit	v_a Austrittsgeschwindigkeit
A_z Fläche Zuluftöffnung	A_a Fläche Abluftöffnung
L Tunnellänge	L Tunnellänge
l_z Abstand Lüftungsöffnungen	l_a Abstand Lüftungsöffnungen

Tabelle 5-1: Randbedingungen Querlüftung

5.2.2 Halbquerlüftung

Die Modellierung der Einströmrränder durch Vorgabe der Geschwindigkeitswerte auf den Abluftöffnungen (Dirichlet-Bedingungen) kann mittels den in Tabelle 5-2 dargestellten Anfangs- und Randbedingungen und nachfolgendem Zusammenhang erfolgen.

Abluft
$Q_a = q_a^* \cdot L \cdot n_{FS}$
$q_a = \frac{Q_a}{(L/l_a)}$
$v_a = \frac{q_a}{A_a}$
Q_a Abluftbedarf q_a Volumenstrom Abluftöffnung v_a Austrittsgeschwindigkeit A_a Fläche Abluftöffnung L Tunnellänge l_a Abstand Lüftungsöffnungen n_{FS} Anzahl Fahrstreifen

Tabelle 5-2: Randbedingungen Halbquerlüftung

5.2.3 Längslüftung

Die Modellierung der Ventilatoren erfolgt als Freistrahler. Hierzu wird auf der vorgegebenen Fläche ein Einströmrand definiert, indem die Strahlggeschwindigkeit als Dirichlet-Bedingungen vorgegeben wird. Die Anordnung der Strahlventilatoren wurde entsprechend den Angaben in Abbildung 3-8 vorgenommen. Um die Schaltzustände der einzelnen Ventilatoren in Abhängigkeit von der Zeit nachbilden zu können, mussten Schaltmatrizen entwickelt werden. In Anhang D sind sämtliche Schaltzustände für jeden Brandversuch mit Längslüftung dargestellt. Darin sind in Betrieb befindliche Ventilatoren grün und außer Betrieb befindliche Ventilatoren rot markiert.

5.3 Längsneigung

Die Modellierung der mit 3,2 % angegebenen Längsneigung des Memorial Tunnels erfolgt durch Aufspaltung der Gravitation in ihre Komponenten bei entsprechender Drehung des Tunnels gegenüber der horizontalen Lage (siehe Abbildung 5-4). Dadurch werden in Richtung des höher liegenden Portals (Nordportal) wirkende Auftriebskräfte berücksichtigt (Kamineffekt.)

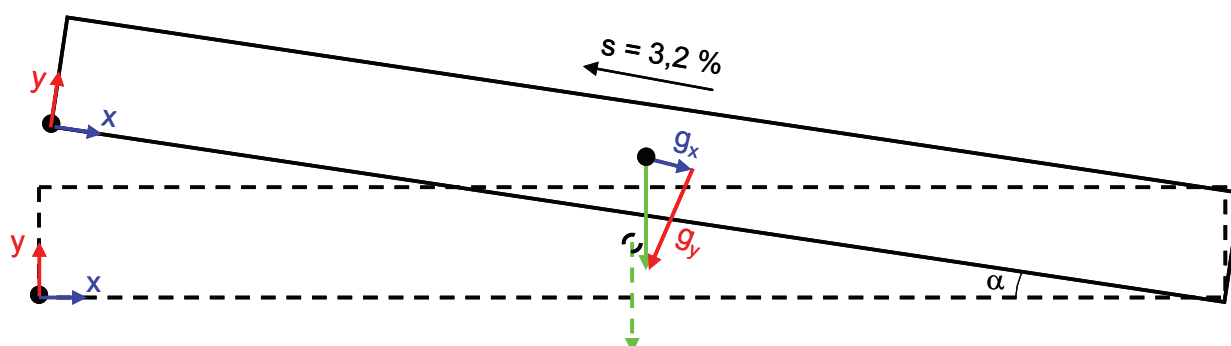


Abbildung 5-4: Modellierung der Längsneigung

5.4 Brandstelle / Brandherd

In sämtlichen Versuchen des MTFVTP wurde als Brandmittel Diesel bzw. Heizöl (low sulfur No. 2 fuel oil) eingesetzt. Neben brennstoffspezifischen Angaben müssen zur Modellierung der Brandstelle die Brandfläche sowie die auf die Brandfläche bezogene Energiefreisetzungsrate (HRRPUA) in kW/m^2 angegeben werden.

Sämtlichen Simulationen liegen folgende brennstoffspezifischen Werte nach Tewarson (1995) zu Grunde (Tabelle 5-3):

Molmasse	C7 H16	100 g/mol
Stöchiometrische Koeffizienten	O ₂	11
	CO ₂	7
	H ₂ O	8
Rauchentstehungsanteil	YS	0,10

Tabelle 5-3: Brennstoffspezifische Werte (Tewarson, 1995)

In Abhängigkeit von der einzustellenden Brandleistung wurden in den Memorial Tunnel Versuchen unterschiedlich große Benzinwannen eingesetzt. Dabei verhält sich die Brandleistung proportional zur Brandfläche, d.h. jede Verdoppelung der Brandfläche führt auch zu einer Verdoppelung der Brandleistung. Die auf die Brandfläche bezogene Energiefreisetzungsrate (HRRPUA) ist somit für sämtliche Berechnungen konstant 2.222 kW/m². In nachfolgender Tabelle 5-4 sind die während der Brandversuche im Memorial Tunnel verwendeten Brandflächen den jeweiligen Brandleistungen gegenübergestellt.

Brandleistung [MW]	10	20	50	100
Brandfläche [m ²]	4,5	9,0	22,5	45
HRRPUA [kW/m ²]	2.222	2.222	2.222	2.222

Tabelle 5-4: Brandleistung - Brandfläche

Darüber hinaus können Angaben zum zeitlichen Verlauf der Energiefreisetzung gemacht werden. Dadurch ist es möglich, die unterschiedlichen Phasen der Energiefreisetzung während eines Brandes nachzubilden. Im Rahmen dieser Untersuchung liegt sämtlichen Simulationläufen die Annahme zu Grunde, dass nach Brandbeginn innerhalb von 120 Sekunden die maximale Brandleistung erreicht wird.

6 Ergebnisse der Simulationsrechnungen

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen zeigen eine überwiegend gute Übereinstimmung mit den Messwerten aus den Memorial Tunnel Brandversuchen. Als Maß für die Güte der Simulationsrechnungen dienen die mittleren Abweichungen der Simulationswerte von den Messwerten bezogen auf den jeweiligen Messwertbereich eines Brandversuchs. Dadurch ist eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben. Nachfolgend werden die Ergebnisse getrennt für das jeweilige Lüftungssystem diskutiert.

6.1 Querlüftung

In nachfolgender Abbildung 6-1 sind die simulierten Energiefreisetzungsraten der einzelnen Brandversuche mit Querlüftungssystem dargestellt. Es zeigt sich, dass mit den modellierten Grundeinstellungen (HRRPUA 2.222 kW/m^2) sehr gut die nominellen Brandleistungen erreicht werden.

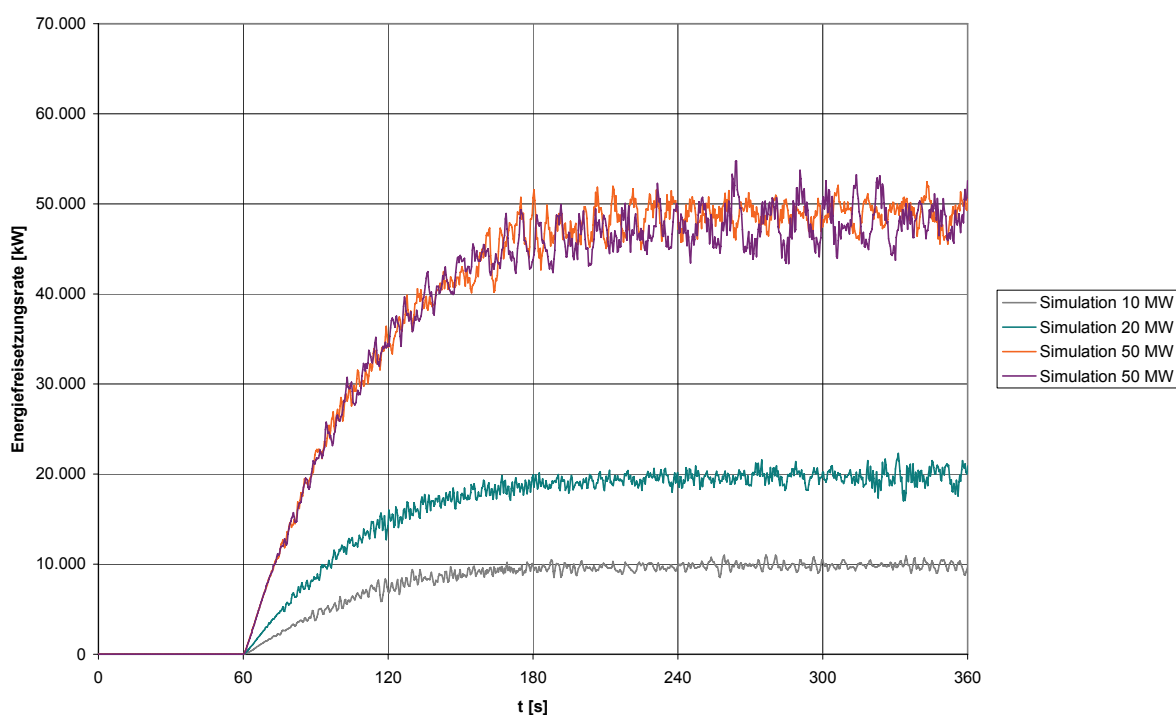


Abbildung 6-1: Simulierte Energiefreisetzungsraten bei ausgewählten Brandversuchen mit Querlüftung

Im Folgenden werden nun exemplarisch die Simulationsergebnisse zum Brandversuch V104 vorgestellt. Die Ergebnisse der weiteren Simulationsrechnungen befinden sich im Anhang B.

Wie aus Abbildung 6-2 zu erkennen ist, decken sich die simulierten Geschwindigkeitswerte nach 360 s sehr gut mit den Messwerten aus dem Memorial Tunnel. Lediglich an Loop 207/301 treten Abweichungen bezüglich des Geschwindigkeitsverlaufs ab der mittleren Tunnelhöhe auf. Betrachtet man jedoch die beiden benachbarten Querschnitte Loop 208 und Loop 307, so könnten diese Abweichungen auch aus einem Messfehler bzw. nicht dokumentierten Einbauten im Querschnitt herrühren.

Ebenfalls sehr gut wiedergegeben wird durch die Simulation der durch die unausgeglichene Querlüftung bewirkte Nulldurchgang der Geschwindigkeitsprofile und der damit verbundene Vorzeichenwechsel.

Betrachtet man den Temperaturverlauf in Abbildung 6-3, so ist nach 360 s ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung der Simulationswerte mit den Messwerten erkennbar. Lediglich im Bereich von Loop 205 treten größere Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Werten auf.

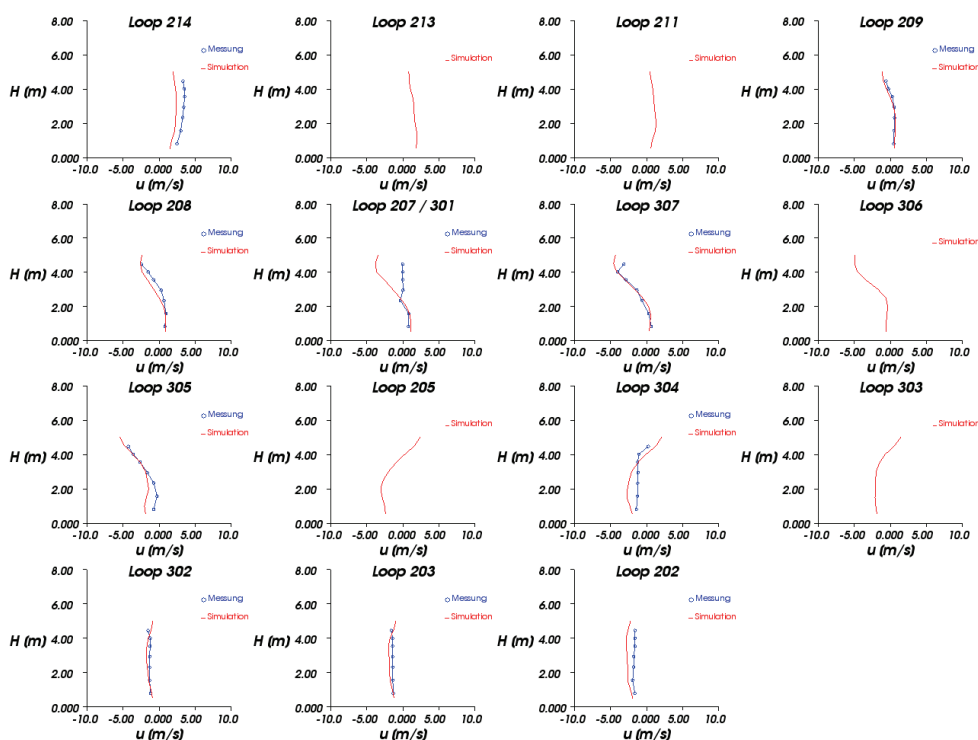


Abbildung 6-2: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 360$ s

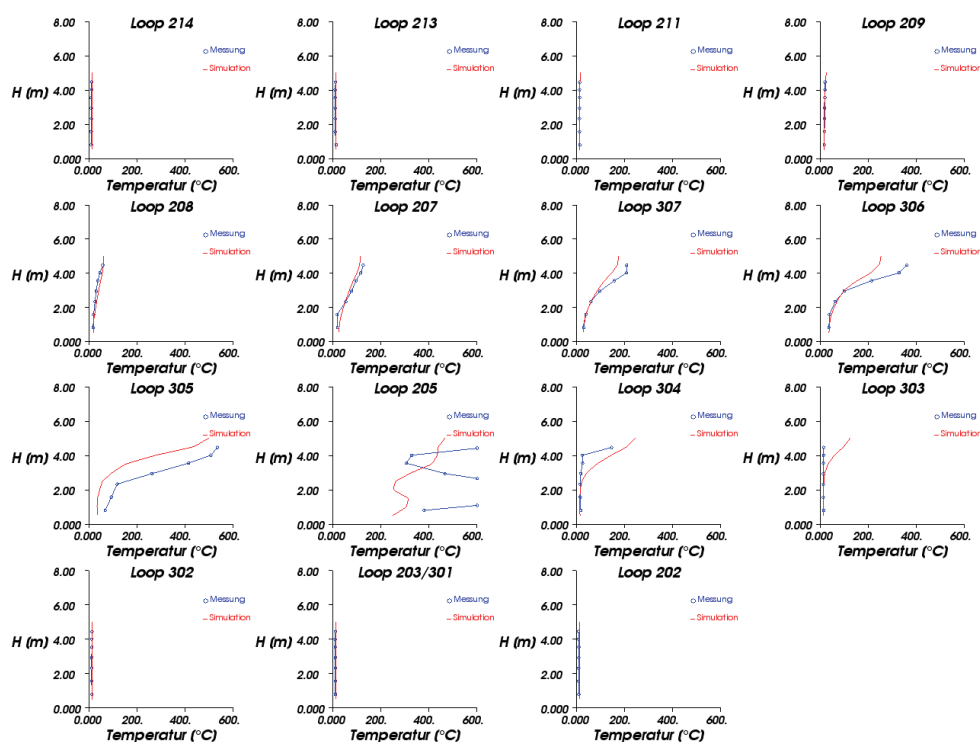


Abbildung 6-3: Temperaturen im Verkehrsraum nach $t = 360$ s

Die auf den Messwertebereich bezogenen mittleren Abweichungen betragen für $t = 360$ s im Fall der Geschwindigkeiten 8,09 % und im Fall der Temperaturen 2,67 %. Dies entspricht einer mittleren Abweichung der berechneten Werte von den Messwerten von 0,65 m/s bzw. 26,71 °C. In nachfolgender Tabelle 6-1 sind die mittleren Abweichungen der Geschwindigkeiten und Temperaturen sämtlicher simulierter Querlüftungssysteme zu den Zeitschritten $t = 60$ s und $t = 360$ s aufgeführt. Die Abweichungen der Geschwindigkeiten variieren hierbei zwischen 8,09 % und 23,20%. Die Temperaturen weichen zwischen 0,18 % und 4,53 % von den Messwerten ab.

Versuchs – Nr.	Mittlere Abweichungen [%]			
	Geschwindigkeiten		Temperaturen	
	$t = 60$ s	$t = 360$ s	$t = 60$ s	$t = 360$ s
V101	11,24	15,60	0,18	2,89
V104	18,71	8,09	1,07	2,67
V111	18,31	23,20	1,16	4,32
V113 A	11,01	12,25	0,12	4,53

Tabelle 6-1: Mittlere Abweichungen der Geschwindigkeiten und Temperaturen für die simulierten Querlüftungssysteme

6.2 Halbquerlüftung

In nachfolgender Abbildung 6-4 sind die simulierten Energiefreisetzungsraten der einzelnen Brandversuche mit reversierbarem Halbquerlüftungssystem dargestellt. Es zeigt sich, dass mit den modellierten Grundeinstellungen (HRRPUA 2.222 kW/m²) sehr gut die nominellen Brandleistungen erreicht werden.

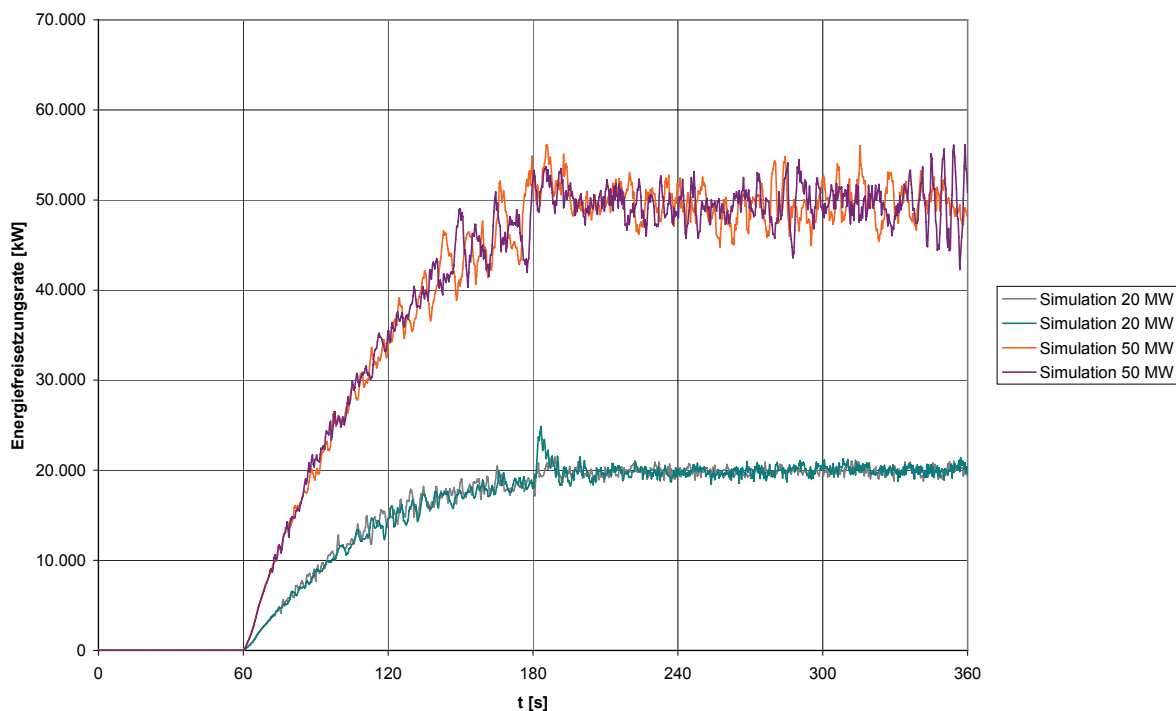


Abbildung 6-4: Simulierte Energiefreisetzungsraten bei ausgewählten Brandversuchen mit Halbquerlüftung

Im Folgenden werden nun exemplarisch die Simulationsergebnisse zum Brandversuch V203 vorgestellt. Die Ergebnisse der weiteren Simulationsrechnungen befinden sich im Anhang C.

Wie aus Abbildung 6-5 ersichtlich, zeigen sich qualitativ gute Übereinstimmungen zwischen den simulierten und gemessenen Geschwindigkeitswerten. Aufgrund der im Abluftbetrieb gefahrenen Halbquerlüftung müssen sich die Geschwindigkeitsprofile in ihren Vorzeichen zu den Portalen hin umkehren. Dieser Sachverhalt wird durch die Simulation korrekt wiedergegeben.

Die Temperaturprofile zeichnen sich durch eine sehr gute Übereinstimmung der simulierten Werte mit den Messwerten aus (siehe Abbildung 6-6). Lediglich im unmittelbaren Brandbereich bei Loop 205 sind größere Abweichungen zwischen den gemessenen und den simulierten Werten zu verzeichnen.

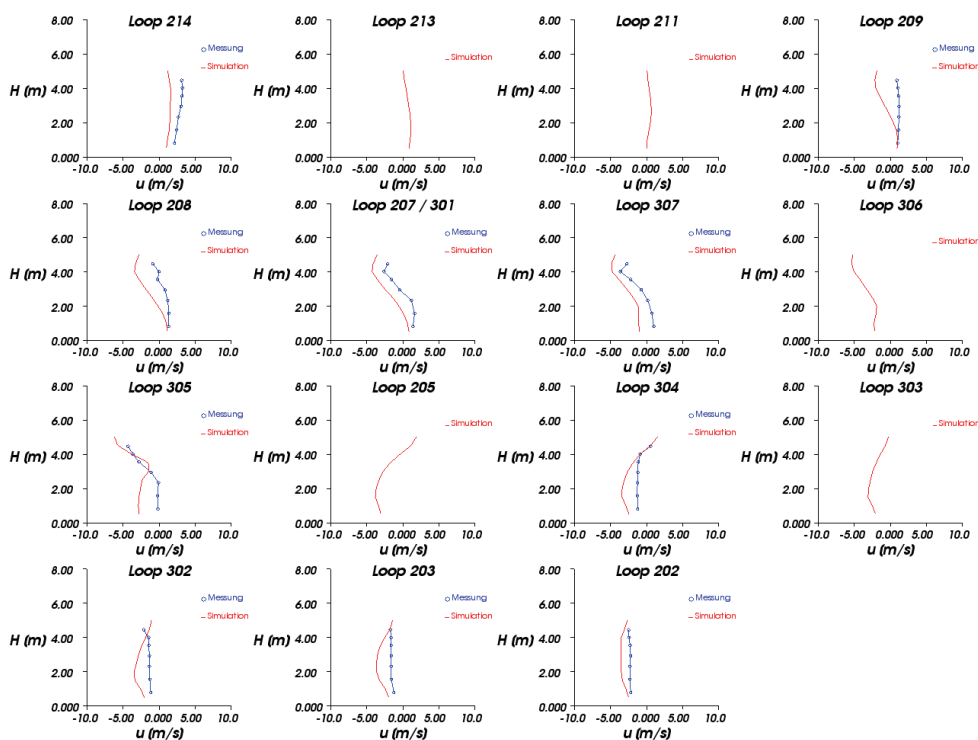


Abbildung 6-5: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 360$ s

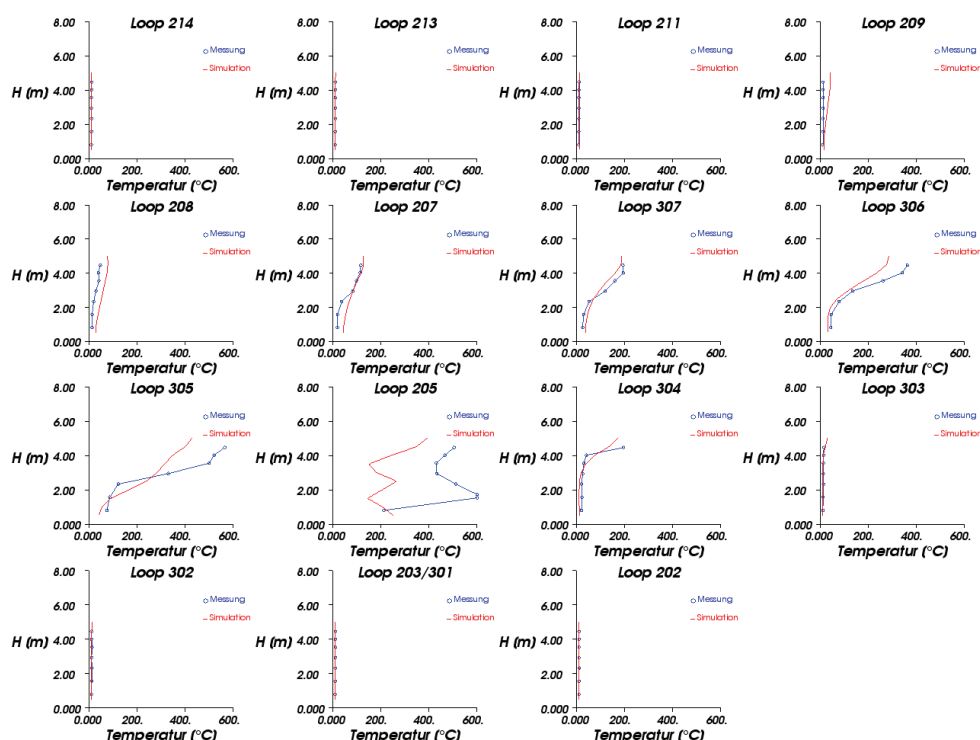


Abbildung 6-6: Temperaturen im Verkehrsraum nach $t = 360$ s

Die mittleren Abweichungen der Geschwindigkeiten betragen nach $t = 360$ s 20,08 %. Die Temperaturen weichen nach $t = 360$ s um 4,75 % von den Messwerten ab. Dies entspricht einer mittleren Abweichung der berechneten Werte von den Messwerten von 1,51 m/s bzw. 32,62 °C. In nachfolgender Tabelle 6-2 sind die ermittelten Abweichungen für die simulierte Halbquerlüftungssysteme zu den Zeitschritten $t = 60$ s und $t = 360$ s aufgeführt. Die Abweichungen der Geschwindigkeiten streuen zu Beginn des Brandes zwischen 0,98 % und 4,56% und nach 360 s zwischen 13,75% und 21,52 %. Die Temperaturen weichen zu Brandbeginn zwischen 0,48 % und 3,6 % und nach 5 Minuten zwischen 3,55 % und 4,89 % von den Messwerten ab.

Versuchs – Nr.	Mittlere Abweichungen [%]			
	Geschwindigkeiten		Temperaturen	
	$t = 60$ s	$t = 360$ s	$t = 60$ s	$t = 360$ s
V202	2,03	21,52	3,6	4,89
V203	1,57	20,08	1,12	4,75
V214 A	0,98	18,71	0,48	4,85
V215 A	4,56	13,75	0,60	3,55

Tabelle 6-2: Mittlere Abweichungen der Geschwindigkeiten und Temperaturen für die simulierte Halbquerlüftungssysteme

6.3 Längslüftung

In nachfolgender Abbildung 6-7 sind die simulierten Energiefreisetzungsraten der einzelnen Brandversuche für das Längslüftungssystem dargestellt. Es zeigt sich, dass mit den modellierten Grundeinstellungen (HRRPUA 2.222 kW/m²) sehr gut die nominellen Brandleistungen erreicht werden.

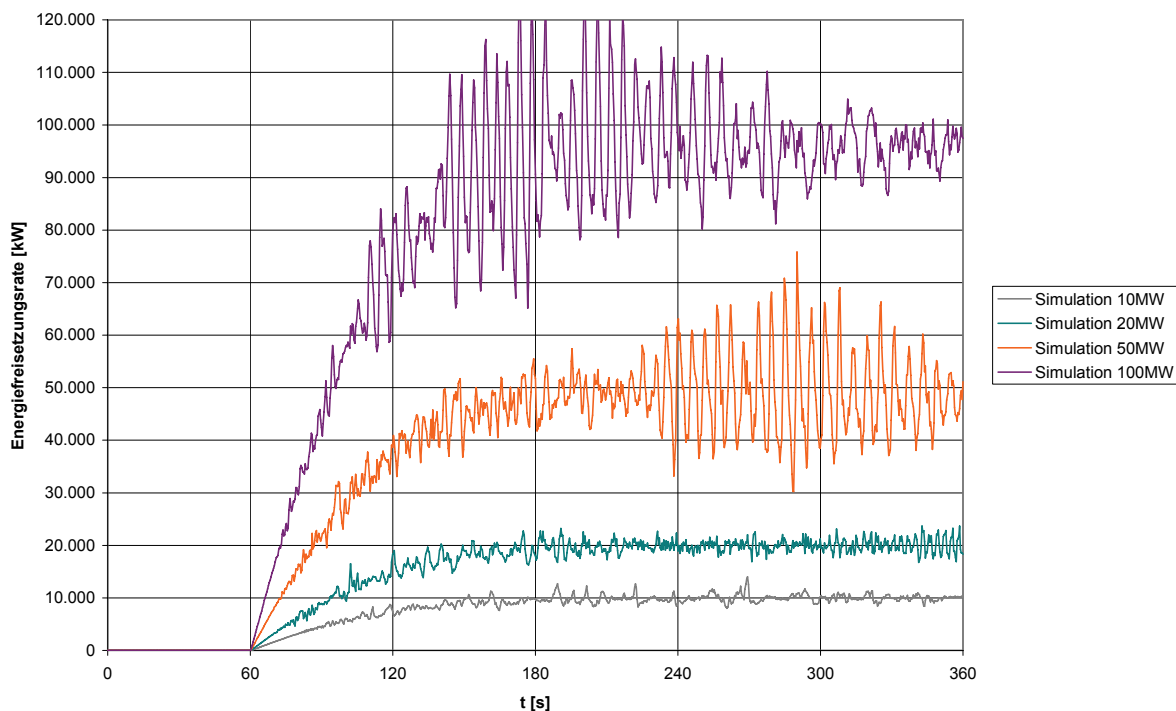


Abbildung 6-7: Simulierte Energiefreisetzungsraten bei ausgewählten Brandversuchen mit Längslüftung

Im Folgenden werden nun exemplarisch die Simulationsergebnisse zum Brandversuch V605 vorgestellt. Die Ergebnisse der weiteren Simulationsrechnungen befinden sich im Anhang D.

Betrachtet man die simulierten Geschwindigkeiten im Vergleich zu den gemessenen Geschwindigkeiten nach 360 s in Abbildung 6-8, so kann man eine gute Übereinstimmung an sehr vielen Querschnitten feststellen. Häufig wird der Verlauf korrekt wiedergegeben. Prinzipiell neigen die Simulationsergebnisse tendenziell dazu, etwas über den Messwerten zu liegen. Gründe hierfür könnten in einer zu groß angenommenen Strahlgeschwindigkeit der Ventilatoren liegen oder in sich verändernden äußeren Bedingungen.

Im nächsten Schritt sollen die berechneten Temperaturen den gemessenen Temperaturen gegenübergestellt werden. Wiederum wird der Zeitpunkt nach 360 s betrachtet. Es ist aus Abbildung 6-9 zu erkennen, dass die simulierten Werte sehr gut mit den gemessenen Werten übereinstimmen. Lediglich in unmittelbarer Brandnähe bei Loop 205 sind größere Abwei-

chungen zu verzeichnen. Bereits an den unmittelbar angrenzenden Querschnitten ist jedoch wieder eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten feststellbar.

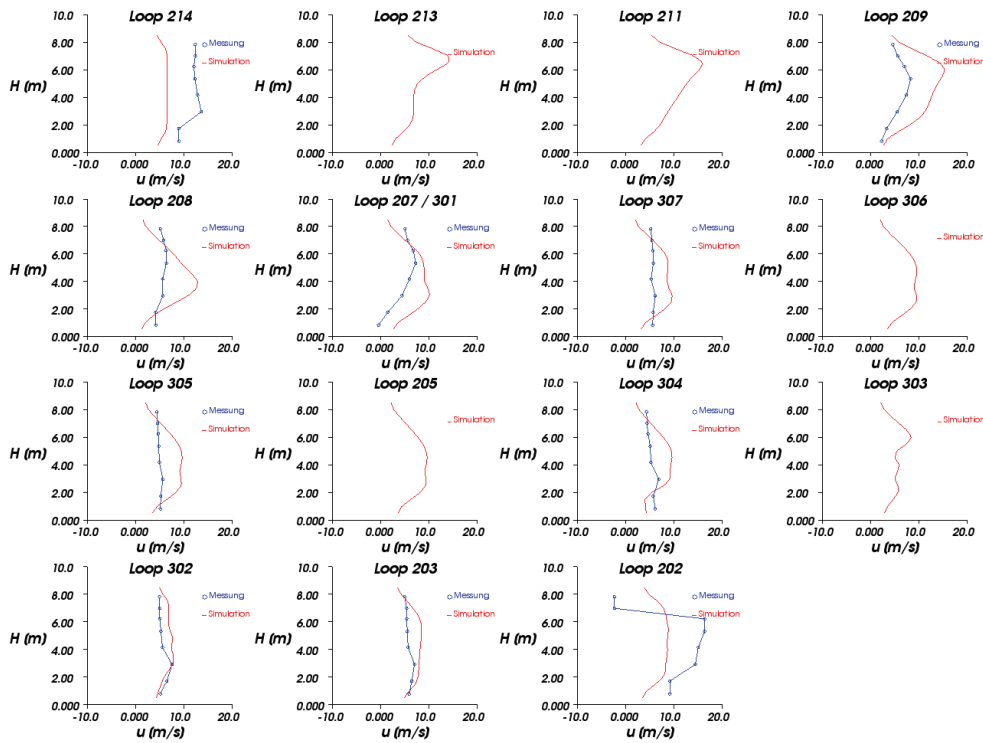


Abbildung 6-8: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 360$ s

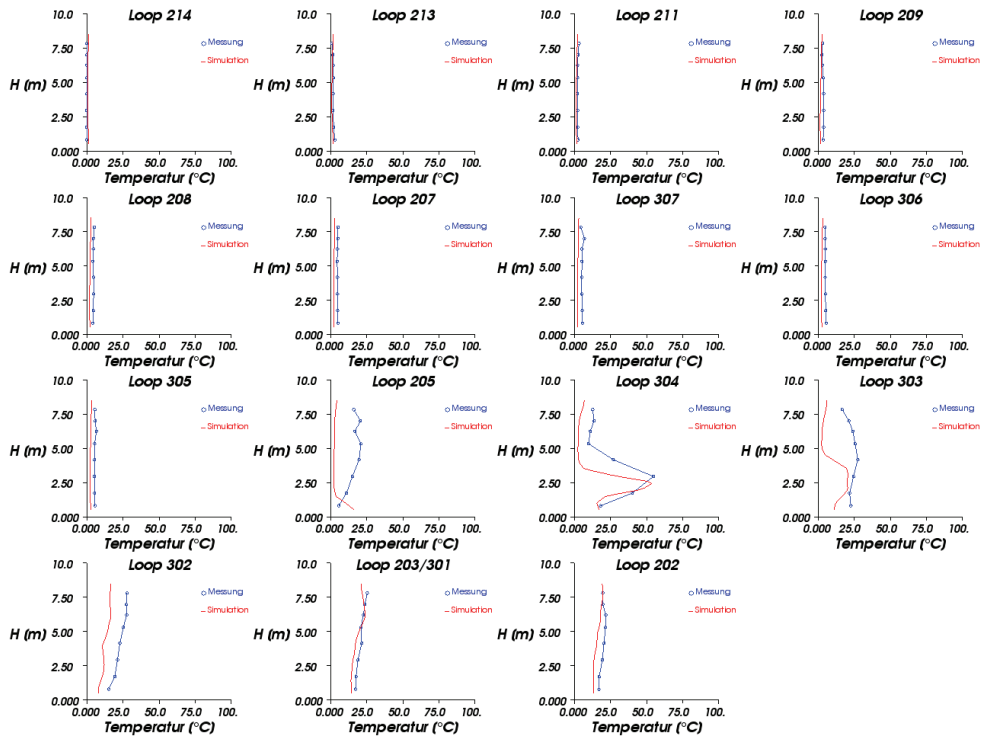


Abbildung 6-9: Temperaturen im Verkehrsraum nach $t = 360$ s

Wie aus nachfolgender Tabelle 6-3 ersichtlich, betragen für den Brandversuch V605 nach $t = 360$ s die mittleren Abweichungen der Geschwindigkeiten 15,69 % und die mittleren Abweichungen der Temperaturen 7,72%. Dies entspricht einer mittleren Abweichung von den Messwerten von 3,32 m/s bzw. 4,22 °C. Die in nachfolgender Tabelle 6-3 aufgeführten Abweichungen für die simulierten Längslüftungssysteme streuen im Fall der Geschwindigkeiten zwischen 13,30 % und 27,15 %. Die Temperaturen weichen zwischen 0,35 % und 17,10 % von den Messwerten ab.

Versuchs – Nr.	Mittlere Abweichungen [%]			
	Geschwindigkeiten		Temperaturen	
	t = 60 s	t = 360 s	t = 60 s	t = 360 s
V605	14,17	15,69	1,28	7,72
V607	27,15	22,80	0,35	4,02
V610	12,68	13,30	0,90	17,10
V621 A	13,39	18,54	9,78	13,10

Tabelle 6-3: Mittlere Abweichungen der Geschwindigkeiten und Temperaturen für die simulierten Längslüftungssysteme

6.4 Längslüftung mit lokaler Gitterverfeinerung

Gegenüber den in den vorangegangenen Modellierungen mit äquidistantem Gitter soll hier untersucht werden, ob insbesondere die im vorangegangenen Kapitel 6.3 aufgetretenen Oszillationen der Energiefreisetzungsraten durch eine lokale Gitterverfeinerung im Brandbereich reduziert werden können und allgemein eine Steigerung in der Abbildungsgenauigkeit erreicht werden kann. Das Rechengebiet wurde hierzu in fünf Bereiche mit unterschiedlichen Auflösungen unterteilt. In einem Bereich von 15 m zu beiden Seiten des Brandherdes wurde eine Gitterweite von 0,125 m gewählt, die in einem weiteren 15 m Abschnitt auf 0,25 m verdoppelt wird. In den daran anschließenden Bereichen bis zu den Portalen wurde wiederum eine Gitterweite von 0,5 m gewählt. Die Berechnungen erfolgten nun parallel auf einem Cluster aus drei 3,2 GHz PC's, die mittels Message Passing Interface (MPI) miteinander kommunizierten. Die Berechnungen benötigten pro Rechenlauf ca. 200 h (8Tage).

Abbildung 6-10 zeigt die simulierten Energiefreisetzungsraten für einen 10, 20 und 50 MW Brand. Gegenüber den Berechnungen mit einem äquidistanten Gitter von 0,5 m Gitterweite treten deutlich weniger Oszillationen in den simulierten Energiefreisetzungsraten auf. Die Simulation eines 100 MW Brandes konnte nicht erfolgreich durchgeführt werden, da das Rechenprogramm aufgrund numerischer Instabilitäten die Berechnungen stets abbrach.

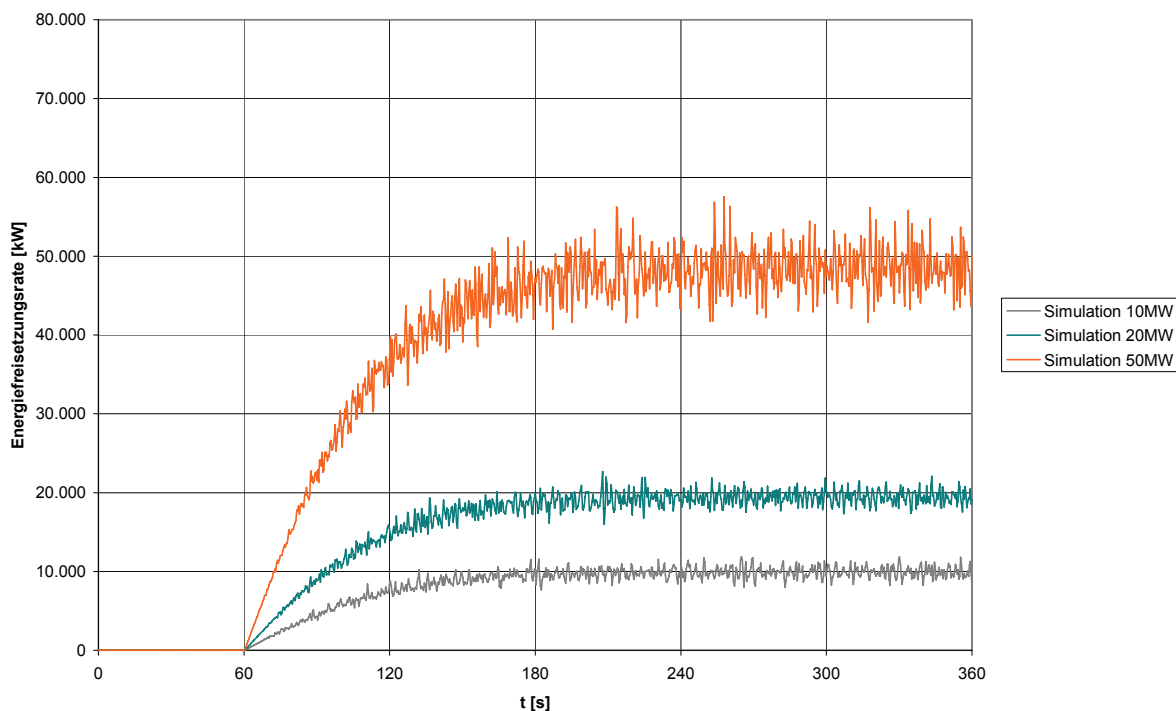


Abbildung 6-10: Simulierte Energiefreisetzungsraten bei ausgewählten Brandversuchen mit Längslüftung und lokaler Gitterverfeinerung

Die Ursache für numerische Instabilitäten sind häufig steile Gradienten der Strömungsgrößen an den Gittergrenzen. Abhilfe kann hier durch eine Ausdehnung der kleinskaligen Gitter erreicht werden. Dies setzt jedoch den Einsatz weiterer Rechner voraus.

In den nachfolgenden Abbildungen Abbildung 6-11 und Abbildung 6-12 sind die Ergebnisse für den Brandversuch V605 unter Verwendung der lokalen Gitterverfeinerung den Messwerten aus den Memorial Tunnel Versuchen vergleichend gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass die berechneten Geschwindigkeiten und Temperaturen sowohl qualitativ als auch quantitativ wiederum sehr gut mit den Messwerten übereinstimmen.

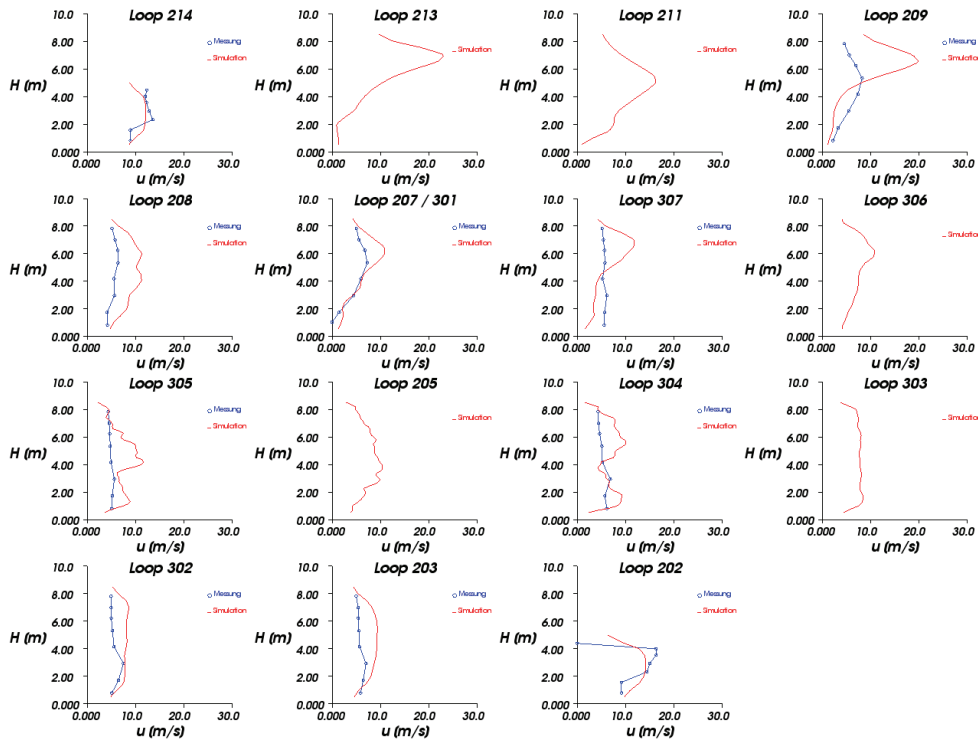


Abbildung 6-11: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum bei lokaler Gitterverfeinerung nach $t = 360$ s

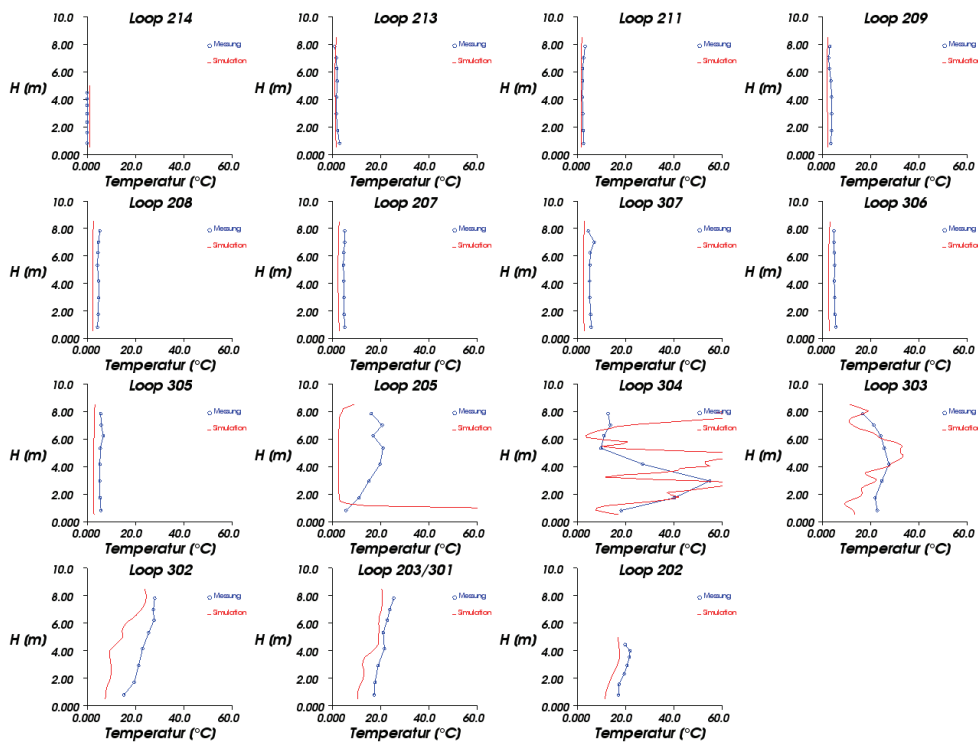


Abbildung 6-12: Temperaturen im Verkehrsraum bei lokaler Gitterverfeinerung nach $t = 360$ s

Vergleicht man die Ergebnisse aus Tabelle 6-4 mit denen aus Tabelle 6-3 ohne lokale Gitterverfeinerung, so kann festgestellt werden, dass die ermittelten Abweichungen zu den Messwerten nahezu unverändert bleiben. 5 Minuten nach Brandauslösung ($t = 360$ s) sind in den Geschwindigkeiten Abweichungen zwischen 10,25 und 26,68% zu verzeichnen. Die Temperaturabweichungen variieren zwischen 4,6 % und 10,4 %.

Versuchs – Nr.	Mittlere Abweichungen [%]			
	Geschwindigkeiten		Temperaturen	
	t = 60 s	t = 360 s	t = 60 s	t = 360 s
V605	13,92	10,25	1,00	9,42
V607	33,19	26,68	0,36	4,60
V610	20,07	15,25	1,43	10,40
V621 A	-	-	-	-

Tabelle 6-4: Mittlere Abweichungen der Geschwindigkeiten und Temperaturen für die simulierten Längslüftungssysteme bei lokaler Gitterverfeinerung

6.5 Schlussfolgerungen

Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messwerten hat eine überwiegend gute Übereinstimmung mit den Messwerten ergeben. Bezogen auf den Messwertbereich weichen jedoch die simulierten Geschwindigkeitswerte deutlicher als die Temperaturen von den Messwerten ab. Während die Abweichungen der Geschwindigkeiten zwischen 0,98 % und 27,15 % streuen, weichen die Temperaturen zwischen 0,12 % und 17,10 % von den Messwerten ab. Ursachen für diese Abweichungen können zum einen Messwertungenauigkeiten sein und zum anderen in ungenügend dokumentierten Anfangs- und Randbedingungen liegen. Zu bedenken ist auch, dass die simulierten Werte den Messwerten exakt zu einem Zeitpunkt an einem definierten Ort gegenübergestellt werden. Bereits geringe Verschiebungen in der Zeitachse oder im Raum können bereits zu deutlichen Veränderungen in den Ergebnissen führen. Eine Verringerung in den Abweichungen zwischen den Messwerten und den Simulationsergebnissen kann zum Teil auch durch die Verwendung eines feineren Gitters in interessierenden Bereichen erreicht werden. Die im Rahmen der Untersuchung festgestellten Abweichungen werden teilweise auch durch McGrattan und Hamins (2002) in ihrer „Studie zur Numerical Simulation of the Howard Street Tunnel Fire“ bestätigt. Bei ihren Berechnungen mit dem FDS wurden ebenfalls Abweichungen von ca. 10% festgestellt.

Das Erreichen der weiteren Untersuchungsziele, insbesondere der gewünschten Aussagen zur Definition eines Standardbrandversuchs, ist unter Berücksichtigung dieser Erfahrungen jedoch gut möglich.

7 Vorschlag eines Standardbrandversuchs

7.1 Anforderungen

Die Zielsetzung von Funktionsprüfungen im Sinne der RABT und der ZTV-ING können mehr oder weniger umfassend sein. Im einfachsten Fall handelt es sich um die Funktionsprüfung eines Brandmeldekabels im eingebauten Zustand. Komplexer und umfangreicher ist die Überprüfung von Lüftungsschaltungen in Abhängigkeit bestimmter Brandszenarien (Brandort und Umgebungsbedingungen) und deren Wirkung auf die Rauchausbreitung im Tunnel. Dabei sind in der Regel mehrere Brandversuche nötig. Das Ziel kann auch die Überprüfung des Zusammenwirkens der Sicherheitseinrichtungen mit den Handlungsabläufen der Einsatzkräfte sein. Für die unterschiedlichen Zielsetzungen wird ein einheitlicher Versuchsaufbau mit den notwendigen Schutzvorkehrungen und eine einheitliche messtechnische Ausrüstung vorgesehen.

Die Vorgaben betreffend den Standardbrandversuch beziehen sich auf die folgenden Parameter:

- Art des Brandversuchs bzw. Brandgut
- Branddauer
- Brandleistung
- Erzeugte Rauchmenge
- Geschwindigkeit der Tunnelluftströmung
- Versuchsaufbau
- Messtechnik
- Schutzvorkehrungen.

Gewisse Vorgaben sind unterschiedlich bei Richtungsverkehrstunneln und bei Gegenverkehrstunneln, im Gewölbequerschnitt und im Rechteckquerschnitt.

Bei der Messtechnik kommen Vereinfachungen in Bezug auf die Standardausrüstung in Frage, wenn kein quantitativer Anspruch an die Versuchsergebnisse besteht. Ansonsten gilt der nachfolgend beschriebene Standard. Für den Standardbrandversuch gelten folgende grundlegenden Anforderungen:

- Einfacher Versuchsaufbau und einfache Durchführbarkeit
- Mindeststandard der Messtechnik
- Geringer notwendiger Aufwand für Schutzvorkehrungen an Bauwerk und technischer Tunnelausstattung
- Reproduzierbarkeit

-
- Definierte Energiefreisetzungsrate bzw. Brandleistung, aufgrund der zu erwartenden Temperaturen nicht über 5 MW
 - Rauchproduktion entsprechend einem Fahrzeugbrand oder einem Benzinlachenbrand, welche bezüglich Rauchentwicklung in der gleichen Größenordnung liegen.
 - Realistische Brandwirkung mit:
 - typischer Temperaturverteilung,
 - Beeinflussung der Längsströmung,
 - zunächst geschichteter Rauchausbreitung.

7.2 Art des Brandversuchs bzw. Brandgut

Die Durchführung von Brandversuchen kann sowohl durch mit flüssigem Brennstoff gefüllten Wannen (sog. Wannenbrände, Poolfire) als auch mit Gasbrennern sinnvoll erfolgen. Aufgrund der gut definierbaren Branddaten und der einfachen Handhabung stehen Wannenbrände im Vordergrund. Als Brandgut werden in der Regel Benzin, Diesel oder n-Heptan eingesetzt. Die Brandfläche und das Brandgut definieren hierbei die Energie- sowie die Rauchfreisetzungsrate. Die Brandgutmenge bestimmt die Branddauer.

Das Abbrennen ganzer Fahrzeuge oder von Holzstapeln u. ä. würde sich wegen der nicht definierten Brandleistung für einen Standardbrandversuch schlecht eignen.

Gasbrenner kommen in Frage, wenn neben einer definierten Energiefreisetzung auch eine mit einem Benzin-, Diesel- oder Heptanbrand vergleichbare Rauchfreisetzung gewährleistet ist. Mittels geeigneter Regelungstechnik können die Energiefreisetzungsrate sowie die Branddauer kontrolliert werden. Die Rauchproduktion erfordert jedoch zusätzlichen technischen Aufwand. Versuche mit Gasbrennern sind daher sowohl technisch als auch in der Durchführung anspruchsvoll und aufwändig (know how + Personal).

Nach den Erfahrungen sowohl mit Wannenbränden als auch mit Gasbrennern werden derzeit für Standardbrandversuche Wannenbrände empfohlen.

7.3 Brandablauf

Der Brandablauf wird durch eine Energiefreisetzungskurve charakterisiert. Typischerweise lassen sich die drei Phasen Brandentstehung, stationäre Phase und Abkühlphase unterscheiden. Da der Versuchsbrand reproduzierbar sein sollte, ist eine schnelle Brandentwicklung anzustreben. D. h. es muss rasch eine bestimmte, konstante Energiefreisetzung erreicht werden. So kann der Einfluss veränderlicher Randbedingungen gering gehalten werden. Die vorgegebene, konstante Brandleistung sollte innerhalb ca. 30 Sekunden erreicht werden. Um die vorgegebene Brandleistung dann während einer bestimmten Zeitdauer ein-

halten zu können, sollte der Brand brandgutgesteuert, d. h. ausreichend belüftet sein, was im Tunnel normalerweise gewährleistet ist.

7.3.1 Wannenbrand – und Brandmittel

In Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. sind die wesentlichen Branddaten von in Frage kommenden Wannenbränden zusammengestellt. Die Daten zeigen, dass für eine bestimmte Energiefreisetzung bei Verwendung von n-Heptan eine um etwa 1/3 kleinere Brandfläche wie unter Verwendung von Benzin und Diesel benötigt wird. Andererseits ist die Abbrandrate von n-Heptan rund doppelt so groß wie jene von Benzin bei nahezu gleichem Energieinhalt. Dies bedeutet, dass die Brandmittelmenge für eine vorgegebene Branddauer bei n-Heptan rund doppelt so groß ist wie bei Benzin. Da Heptan bei der Verbrennung weniger Ruß erzeugt als Benzin und Diesel, wird Heptan als Brandmittel oft der Vorzug gegeben.

Brandgut	Dichte bei T = 15°C [kg/m ³]	Unterer Heizwert Hu [kJ/kg]	Theoretische Abbrandrate \dot{m}''_{∞} [kg/m ² s]	Extinkti- onspa- parameter $\kappa\beta$ [1/m]	Verbren- nungs- grad χ [-]	Effektive Brand- leistung \dot{Q}_{eff} [MW/m ²]	Rußfrei- setzungs- anteil [kg/kg]	Anmerkungen
Benzin (Wannen- brand) Wannen-Ø 1.0 m	730	43.700	0.055	2.1	0.7	1.53	ca. 0.09	Stark rußend
Diesel (Wannen- brand) Wannen-Ø 1.0 m	815 - 855	39.700	0.035	1.7	0.9	1.07	ca. 0.1	Stark rußend
n-Heptan (Wannen- brand) Wannen-Ø 1.0 m	700	44.600	0.101	1.1	0.7	2.24	0.037	Schnelle Energiefrei- setzung, mäßige Ruß- produktion

Tabelle 7-1: Branddaten verschiedener offener Feuer nach Ergebnissen durchgeführter Versuche, Brandleistung der Wannenbrände berechnet gemäß Gleichung 3-1

7.3.2 Branddauer

Anforderungen:

Der Versuchsbrand sollte, abhängig von der Zielsetzung und der Tunnellänge, 3 – 10 Minuten dauern. Für den Funktionstest einer Brandmeldeanlage reicht eine Branddauer von 3 Minuten je Versuch.

Um die Temperaturen und die Strömungsgeschwindigkeiten in einem quasi stationären Zustand messen zu können bzw. um die Wirkung der Brandlüftung zu testen, kann eine Branddauer von 5 bis 10 Minuten erforderlich sein. Maßgebend für die notwendige Branddauer ist dabei letztlich die Zeit, welche vergeht, bis die Strömungsverhältnisse sich unter dem Einfluss des Brandes neu eingestellt haben. Diese Zeit hängt von mehreren Faktoren ab, beispielsweise von der Tunnellänge, der Längsneigung, vom Brandort, von der Anzahl Kfz im Tunnel usw. Haupteinflussgröße ist die Tunnellänge. Berechnungen ergaben für die Dauer, bis sich nach einem Brandausbruch eine neue quasistationäre Tunnelluftgeschwindigkeit eingestellt hat, zwischen 4 Minuten bei einem 1 km langen Richtungsverkehrstunnel und mindestens 8 Minuten bei einem 4 km langen Richtungsverkehrstunnel.

Die Erfahrungen mit Wannenbränden zeigen, dass innerhalb von ca. 30 Sekunden die maximale Energiefreisetzung erreicht wird. Danach sollte ein Versuchsbrand, entsprechend der Zielsetzung, während mindestens 2.5 bis ca. 10 Minuten bei konstanter Brandleistung gehalten werden. Im Zweifelsfall ist vorab eine rechnerische Abschätzung vorzunehmen.

Einstellung der Branddauer:

Im Fall von Wannenbränden wird die Branddauer bei gegebener Wannenfläche durch die flächenbezogene Menge und die Dichte des Brandguts sowie die flächenbezogene Abbrandrate nach der folgenden Beziehung bestimmt.

$$\text{Branddauer } t \text{ [s]} = \text{Brandgutmenge [l/m}^2\text{]}/1000 \times \text{Dichte [kg/m}^3\text{]} / \text{Abbrandrate [kg/m}^2\text{s]} \quad (\text{Gl. 7-1})$$

Für eine Branddauer von $t = 5$ Minuten sind, ausgehend von o. g. Daten, bei Verwendung von n-Heptan 30.8 l/m² notwendig. Im Fall der Verwendung von Benzin werden 20.2 l/m² benötigt.

Die effektive Abbrandrate kann abhängig von den Umgebungsbedingungen um ca. +/- 10% variieren und beeinflusst somit auch die Branddauer in entsprechendem Mass.

7.3.3 Brandleistung

Mit Brandleistung wird in der Regel die maximale Energiefreisetzungsrage, welche während einer signifikanten Zeitspanne auftritt, bezeichnet. Die Energiefreisetzungsrage bestimmt die Rauchgastemperatur und liefert die treibende Kraft für die Rauchausbreitung.

Bei den meisten Brandversuchen, welche in den letzten Jahren zur Überprüfung der Lüftungsfunktionen und der Brandmeldeanlage in verschiedenen Ländern, so in Österreich, Frankreich, in der Schweiz und in der Bundesrepublik durchgeführt worden sind, betrug die Brandleistung nominell 3 bis 5 MW. Eine genaue Angabe der effektiven Brandleistung ist

schwierig, da diese nicht nur vom Brandgut selbst, sondern mitunter von der Abbrandrate und vom Verbrennungsgrad abhängig ist. Die letzteren beiden Parameter werden durch die Oberfläche des Brandguts, durch die Brandfläche und die umgebende Luftströmung mit beeinflusst.

Bei der Festlegung der Brandleistung des Versuchsbrandes wird von einem Pkw-Brand ausgegangen. Ein Pkw-Brand erzeugt erfahrungsgemäß für die Tunnelnutzer bereits gefährliche Rauchgasmengen und Temperaturen, welche an der Tunneldecke eine Temperatur von 100 °C oder mehr erreichen und damit eine Branddetektion mittels temperatursensibler Brandmeldesysteme ermöglichen. Andererseits stellt ein Pkw-Brand aufgrund der Temperaturen und der Rauchentwicklung weder für das Bauwerk noch für die Feuerwehr ein Problem dar.

Da Fahrzeuge aus einer Vielzahl mehr oder weniger brennbarer Komponenten zusammengesetzt sind und in der Regel unterschiedliche Mengen an Kraftstoff sowie unterschiedliche Ladung mitführen, resultieren entsprechend unterschiedliche Brandleistungen.

Schneider, Lebeda und Max (1994) geben Branddaten für Pkw-Brände an. Danach beträgt der effektive Heizwert eines bestimmten Pkw 35'000 kJ/kg und die aus Versuchen ermittelte bzw. abgeschätzte Abbrandrate 109 g/s (Verbrennungsgrad berücksichtigt). Dies führt zu einer effektiven Brandleistung von:

$$\dot{Q} = 0.109 \text{ kg/s} \cdot 35'000 \text{ kJ/kg} = 3.815 \text{ MW.} \quad (\text{Gl. 7-2})$$

Allgemein wird bei Pkw-Bränden mit einer Brandleistung von 3 – 5 MW gerechnet.

Besser definierte Brandleistungen ergeben Wannenbrände mit definiertem Brandmittel und klar definierter Oberfläche. Die Brandleistung für Wannenbrände lässt sich nach Gleichung 3-1 berechnen.

Die bei der Verbrennung von Flüssigbrennstoffen wie Benzin, Diesel oder Heptan entstehenden Rauchmengen und – dichten entsprechen weitgehend dem Rauch brennender Fahrzeuge. Dies ist ein wesentlicher Grund für die Durchführung von Wannenbränden in Tunnelbrandversuchen.

So wurden im Zuge der A86 bei Paris Brandversuche mittels n-Heptan in kalibrierten Behältern, welche eine Brandleistung von 5 MW während etwa 25 Minuten lieferten, bei Tunnelluftgeschwindigkeiten von 0, 1.5, 2.0 und 3.0 m/s durchgeführt. Um jegliches Risiko einer Beschädigung der vorhandenen Ausrüstung sowie des Bauwerks zu vermeiden, wurden vom Brandort aus nach beiden Seiten über eine Länge von 30 m Schutzvorkehrungen getroffen.

Bei der Verwendung von n-Heptan kann unter Verwendung von geeigneten Behältern mit einem unteren Heizwert von 44.6 MJ/kg und einer Abbrandrate von 0.101 kg/(m²s) gemäß Tabelle 7-1 gerechnet werden. Unter Berücksichtigung eines typischen Verbrennungsgrads von 70 % resultiert eine flächenbezogene Brandleistung von ca. 2.24 MW/m².

Benzin und Diesel, welche besonders in Österreich und bisher auch in Deutschland als Brandmittel für Tunnelbrandversuche verwendet werden, weisen eine geringere Abbrandrate als Heptan, bei etwa gleichem Heizwert, auf, was eine entsprechend kleinere, flächenbezogene Brandleistung ergibt (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Noch exakter definierte Brandleistungen lassen sich mit Gasbrennern, deren Brennstoffdüsen kalibriert sind, erzeugen. Da Gasbrenner kaum Rauch erzeugen, muss eine dem Rauch von Wannenbränden äquivalente Sichttrübung durch spezielle Zugaben approximiert werden.

Zum Erreichen der im Standardbrandversuch angestrebten, nominellen Brandleistung von 5 MW sind bei Verwendung von Benzin 3,0 m² und von Diesel 4,1 m² erforderlich (entspricht 3 bzw. 4 Stahlbehältern mit einer freien Oberfläche von je ca. 1.0 m²). Bei Verwendung von n-Heptan genügen zwei Stahltagen mit einer freien Oberfläche von je ca. 1.0 m².

7.3.4 Erzeugte Rauchmenge

Im Brandversuch bildet eine realitätsnahe Freisetzung von Rauchpartikeln neben den Bedingungen für die Verteilung des Rauchs im Tunnel die Basis für die Charakterisierung der vom Brand ausgehenden Einschränkung der Sicht- und Atemverhältnisse. Aus den EU 499 FIRETUN – Versuchen ist der Rußentstehungsanteil bei vollständiger Verbrennung Y_s [kg/kg], bezogen auf die Brandgutmenge, für verschiedene Fahrzeuge und Brennstoffe bei vollständiger Verbrennung bekannt (siehe Tabelle 7-2). Diese dienen hier als Anhaltswerte für die im Brandversuch nachzubildende Rauchfreisetzung.

Fahrzeug	Y_s [kg/kg]
Pkw mit geringem Kunststoffanteil	0,095
Pkw mit hohem Kunststoffanteil	0,08
Reisebus	0,05

Tabelle 7-2: Rußentstehungsanteile für reale Kfz (Steinert, 1996)

Flüssige Brennstoffe wie Benzin, Diesel oder Heptan ergeben mit kompletten Fahrzeugen vergleichbare Russfreisetzungsraten, welche proportional zur Energiefreisetzungsraten sind (vgl. Tabelle 7-3). U. a. aus diesem Aspekt eignet sich ein Wannenbrand unter Verwendung eines der genannten Brennstoffe sehr gut für einen Brandversuch im Tunnel. Bei Verwendung von Gasbrennern muss der Rauch durch Zugabe äquivalenter Partikelmengen erzeugt werden

Brennstoff	Y_s (Ruß) [kg/kg]
Heptane (C ₇ H ₁₆)	0,037
langkettige Kohlenwasserstoffe	0,059
Heizöl/Rohöl, Diesel	0,097

Tabelle 7-3: Rußentstehungsanteile (Tewarson, 1995)

7.3.5 Tunnelluftströmung

Stärke und Richtung der Tunnelluftströmung gehören zusammen mit den Umgebungskenngrößen Luftdruck und Temperatur zu den Randbedingungen eines Brandversuchs und haben einen entscheidenden Einfluss auf die Richtung und die Geschwindigkeit der Rauchausbreitung sowie auf die Temperaturverteilung und damit auch auf die Geschwindigkeit der Branderkennung. Daher ist es wichtig, dass im Brandversuch die Geschwindigkeit der Tunnelluftströmung realitätsnah eingestellt wird.

Im normalen Betrieb kann eine Luftströmung im Tunnel durch meteorologische Druckunterschiede zwischen den Portalen oder durch thermische Effekte erzeugt sein. Dominierenden Einfluss auf die Tunnelluftströmung haben aber die Fahrzeuge, welche sich im Tunnel befinden. Je nach Fahrgeschwindigkeit bremsen oder beschleunigen sie die Tunnelluft. In Richtungsverkehrstunneln können unter der Kolbenwirkung der Fahrzeuge Strömungsgeschwindigkeiten von 6 - 8 m/s auftreten. In Gegenverkehrstunneln hingegen wird die Kolbenwirkung der sich entgegengesetzt bewegendes Fahrzeuge teilweise aufgehoben, sodass die resultierende Geschwindigkeit der Tunnelluft in der Regel nicht über 4 m/s steigt. Damit besteht ein grundsätzlicher Unterschied in der erreichbaren Tunnelluftgeschwindigkeit zwischen Richtungsverkehrs- und Gegenverkehrstunneln, welcher in den Brandversuchen bei der Einstellung der Randbedingungen berücksichtigt werden muss.

Da sich die zu Beginn eines Brandes herrschende Geschwindigkeit der Tunnelluftströmung besonders auf die Branderkennung auswirkt, ist darauf speziell bei Versuchen zur Funktionsprüfung der Brandmeldeanlage, wo der Verkehrseinfluss fehlt, zu achten. Im Versuch muss die für den betreffenden Tunnel typische Tunnelluftgeschwindigkeit mit der Lüftungsanlage eingestellt werden. Das Abklingen der Strömungsgeschwindigkeit aufgrund des unter realen Bedingungen nachlassenden Verkehrseinflusses, wenn die Fahrzeuge zum Stillstand kommen bzw. aus dem Tunnel ausgefahren sind, wird durch entsprechendes Aus- oder Umschalten der Lüftungsanlage simuliert. Hierfür kann vorab eine Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Strömungsgeschwindigkeit mit und ohne Verkehrseinfluss nützlich sein. Im späteren Verlauf des Versuchs wird sich die Tunnelluftströmung in Funktion verschiedener tunnelspezifischer Parameter neu einstellen. Die wesentlichen Parameter dabei sind:

-
- das Lüftungsregime
 - der Brandort im Tunnel (Querschnittsfläche)
 - die Längsneigung bzw. der Längsneigungsverlauf
 - die meteorologischen Randbedingungen.

Bei welchen Werten der Strömungsgeschwindigkeit Brandversuche durchgeführt werden sollen, hängt vom Tunnelprofil und von der Zielsetzung der Versuche ab. Bei der Zielsetzung ist zu unterscheiden zwischen der Funktionsprüfung der Branddetektion und übrigen Funktionsprüfungen, wobei auch die geplanten Szenarien maßgebend sind.

- Funktionsprüfung der Branddetektion

Die Branddetektion sollte grundsätzlich möglichst schnell erfolgen. Die RABT verlangen bei einem 5 MW Brand und einer Geschwindigkeit der Längsströmung (Mittelwert im freien Tunnelquerschnitt) von 6 m/s die Branderkennung innerhalb von 1 Minute nach Brandausbruch. Diese hohe Anforderung bezieht sich auf vergleichsweise ungünstige Bedingungen, welche aber in langen Richtungsverkehrstunneln (z. B. Rennsteigtunnel, Elbtunnel, Tunnel Berg Bock oder Engelberg Basistunnel) in der ersten Minute nach Ereigniseintritt typisch sind. Brandmeldesysteme, welche alleine auf erhöhte Temperatur ansprechen, werden dieser Anforderung nicht genügen können. Der Grund liegt darin, dass für eine zuverlässige Brandmeldung mit vertretbarer Fehlerquote eine signifikante Temperaturerhöhung nötig ist. Die entsprechende Ansprechschwelle liegt typischerweise bei Temperatur-Messwerten von ca. 90 ° C. Bei einer tieferen Ansprechschwelle würden erfahrungsgemäß im Normalbetrieb Störungen durch die Abwärme der Fahrzeuge und in der Folge häufige Fehlalarme auftreten. Die für eine sichere Detektion eines 5 MW-Brandes notwendige Temperatur von ca. 90 ° C an der Tunneldecke wird aber bei Strömungsgeschwindigkeiten von 3 m/s oder höher nicht erreicht. In Abbildung 7-1 und Abbildung 7-2 sind die berechneten Temperaturverteilungen für einen Gewölbe- und einen Rechteckquerschnitt bei einer Längsströmungsgeschwindigkeit von 6,0 m/s dargestellt.

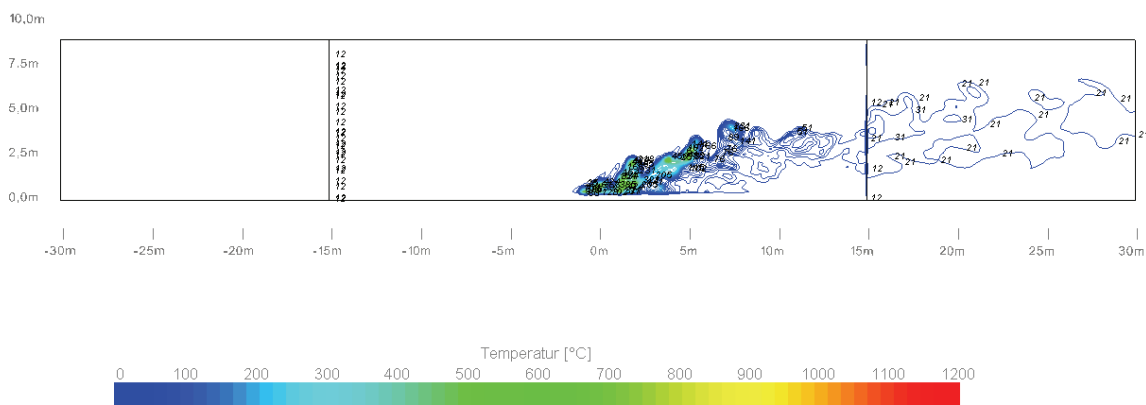


Abbildung 7-1: Berechnete Temperaturverteilung im Gewölbequerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 6,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ s}$, $\dot{Q} = 5 \text{ MW}$

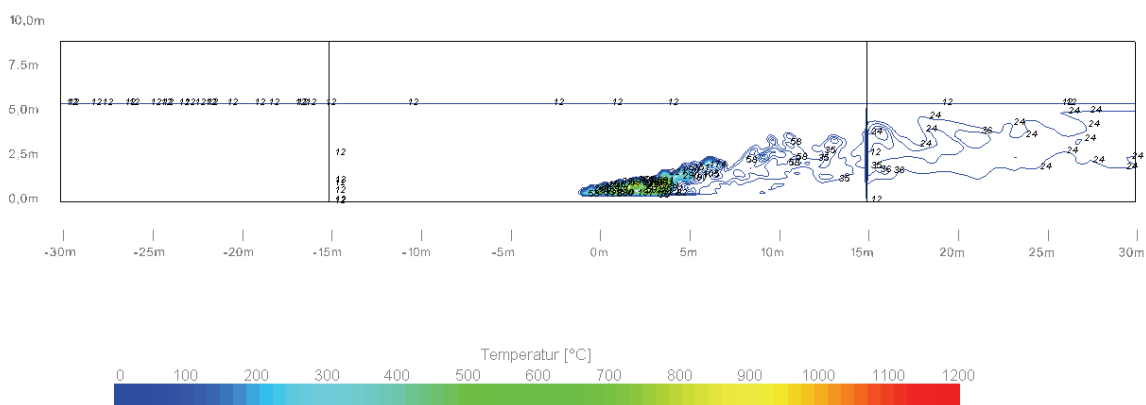


Abbildung 7-2: Berechnete Temperaturverteilung im Rechteckquerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 6,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ s}$, $\dot{Q} = 5 \text{ MW}$

Aus den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 7-3 bis Abbildung 7-5) zur Temperaturverteilung unter dem Einfluss der Längsströmung geht hervor, dass Temperaturen im Bereich von $90 \text{ }^\circ\text{C}$ an der Tunneldecke, ausgehend von einem 5 MW -Brand, bei Strömungsgeschwindigkeiten von 0 bis ca. $2,5 \text{ m/s}$ zu erwarten sind. Da die Ansprechschwelle von Liniensbrandmeldern nicht tiefer gesetzt werden kann, muss bei höheren Werten der Längsströmung ein solches Brandmeldesystem zwangsläufig versagen. Es macht somit auch keinen Sinn, für den Funktionstest eines Temperatursensorkabels bzw. eines vergleichbaren Systems im Tunnel einen Brandversuch bei 5 MW und bei Geschwindigkeiten der Längsströmung $> 2,5 \text{ m/s}$ durchzuführen.

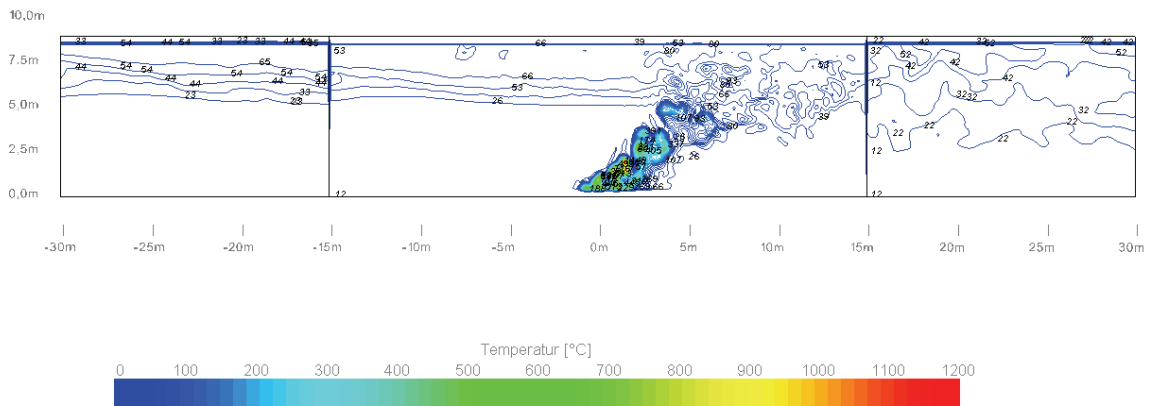


Abbildung 7-3: Berechnete Temperaturverteilung im Gewölbequerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 2,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ s}$, $\dot{Q} = 5 \text{ MW}$

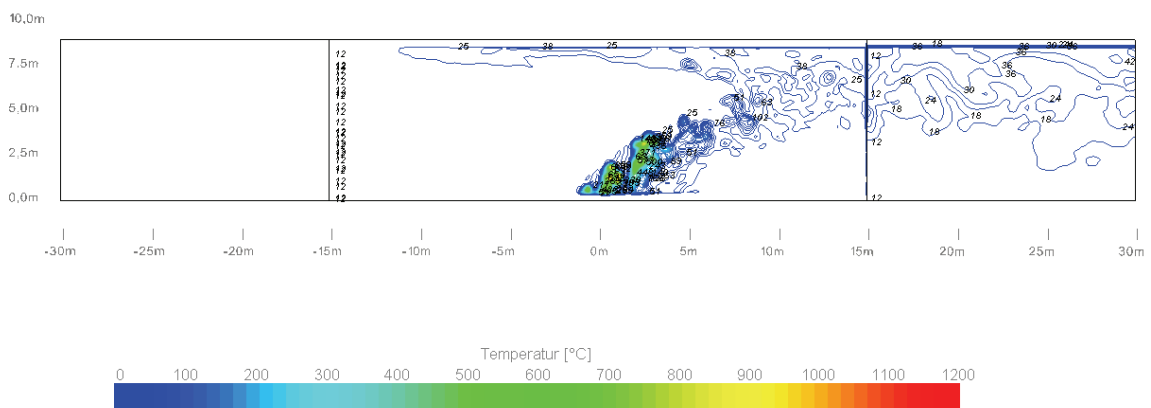


Abbildung 7-4: Berechnete Temperaturverteilung im Gewölbequerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 3,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ s}$, $\dot{Q} = 5 \text{ MW}$

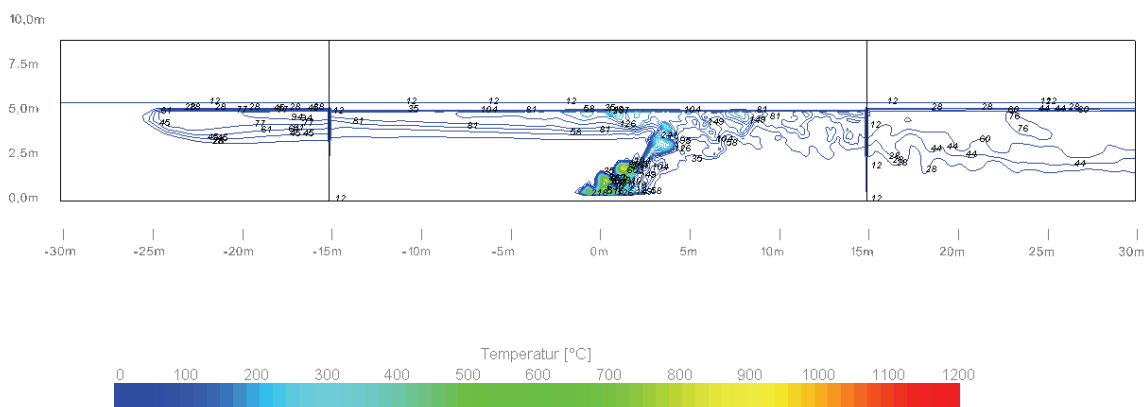


Abbildung 7-5: Berechnete Temperaturverteilung im Rechteckquerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 2,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ s}$, $\dot{Q} = 5 \text{ MW}$

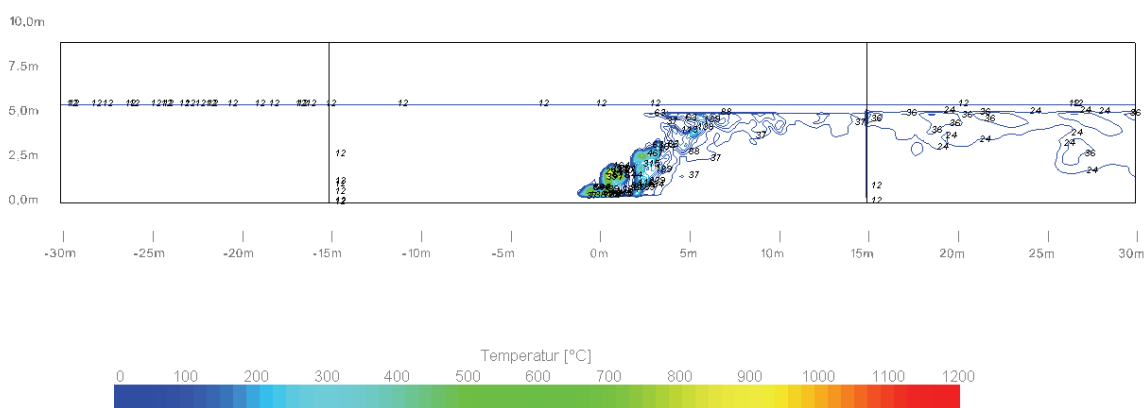


Abbildung 7-6: Berechnete Temperaturverteilung im Rechteckquerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 3,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ s}$, $\dot{Q} = 5 \text{ MW}$

Unter entsprechenden Bedingungen, wie sie die RABT nennen, kann nach dem derzeitigen Stand der Technik nur die Rauchdetektion in Kombination mit einer 24 h - Überwachung des Tunnels durch Operatoren mittels Video oder zukünftig mittels automatisierter Videoüberwachung zum Ziel führen. Für diese Systeme sind Strömungsgeschwindigkeiten von 3 m/s und größere gleichwertig, da in diesem Geschwindigkeitsbereich die Strömungsturbulenz schon nach kurzer Strecke zu einer Rauchverwirbelung im gesamten, freien Tunnelquerschnitt führt. Diese sollen bei den unter realen Bedingungen auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten geprüft werden.

- Übrige Funktionsprüfungen (Lüftungssteuerung usw.)

Tunnellüftungsanlagen werden in der Regel derart ausgelegt, dass im Brandfall ein Rauchabtrieb nach einer Seite möglich ist, d. h. mit andern Worten, dass unter Berücksichtigung der tunnelspezifischen Strömungswiderstände eine Geschwindigkeit der Längsströmung von ca. 3 m/s erreicht wird. Unter Versuchsbedingungen, im verkehrsfreien Tunnel, können dann abhängig von den herrschenden Randbedingungen höhere Strömungsgeschwindigkeiten auftreten.

Sämtliche sicherheitsrelevanten Schaltungen der Tunnellüftung und die daraus resultierenden Fluchtbedingungen können im Geschwindigkeitsbereich von 0 bis ca. 3 m/s getestet werden. Die Verhältnisse bzw. Fluchtbedingungen, welche sich bei größeren Tunnelluftgeschwindigkeiten einstellen würden, lassen sich analog der Verhältnisse bei größeren Brandleistungen oder alternativer Randbedingungen rechnerisch simulieren.

Fazit:

Für den Standardbrandversuch kann nicht ein Standardwert der einzustellenden Tunnelluftgeschwindigkeit genannt werden. Es können jedoch je nach Zielsetzung, welche die RABT und die ZTV-ING. nennen, bestimmte Werte bzw. Wertebereiche empfohlen werden.

Empfehlung:

- Überprüfung von Brandmeldesystemen

Für die Überprüfung von automatischen Brandmeldeeinrichtungen, die nur auf Temperatur ansprechen, empfiehlt sich die Einstellung einer Längsströmungsgeschwindigkeit (Mittelwert im freien Tunnelquerschnitt), abhängig vom Tunnelprofil. Die Empfehlung lautet: $u_T = 2.5$ m/s im Rechteckquerschnitt bzw. $u_T = 2.0$ m/s im Gewölbequerschnitt.

Die Anforderung der RABT an automatische Brandmeldeeinrichtungen bezieht sich nicht auf eine bestimmte Detektionstechnik, sondern auf die Funktion, welche auch durch Kombination verschiedener Techniken erfüllt werden kann. Deshalb soll ein Funktionstest des Brandmeldesystems bei real innerhalb der ersten Minute nach Ereigniseintritt auftretenden Werten der Strömungsgeschwindigkeit durchgeführt werden. Dabei erachten wir es als vertretbar, zwischen Tunneln, die für Richtungsverkehr und solchen, die für Gegenverkehr ausgelegt sind, zu unterscheiden. Die Empfehlung für die Einstellung der Längsströmungsgeschwindigkeit lautet: $u_T = 6.0$ m/s im Fall von Richtungsverkehrstunnel bzw. $u_T = 4.0$ m/s im Fall von Gegenverkehrstunnel.

- Allgemeine Funktionsprüfungen

Bei der Überprüfung der Lüftungsfunktionen oder des Zusammenwirkens der Lüftungssteuerung mit den übrigen sicherheitstechnischen Vorkehrungen sowie den Einsatzkräften ergibt sich der Bereich der Strömungsgeschwindigkeit aus der Lüftungsauslegung. Die einzustellenden Werte werden durch die zur Überprüfung vorgesehenen Szenarien bestimmt. Hier einen Standardwert vorzugeben wäre nicht zweckmäßig.

Die entsprechenden Einstellungen sind während eines Versuchs beizubehalten, bis das Lüftungsregime gezielt, entweder durch das Brandlüftungsprogramm oder manuell, geändert wird.

7.4 Versuchsaufbau

7.4.1 Brandquelle

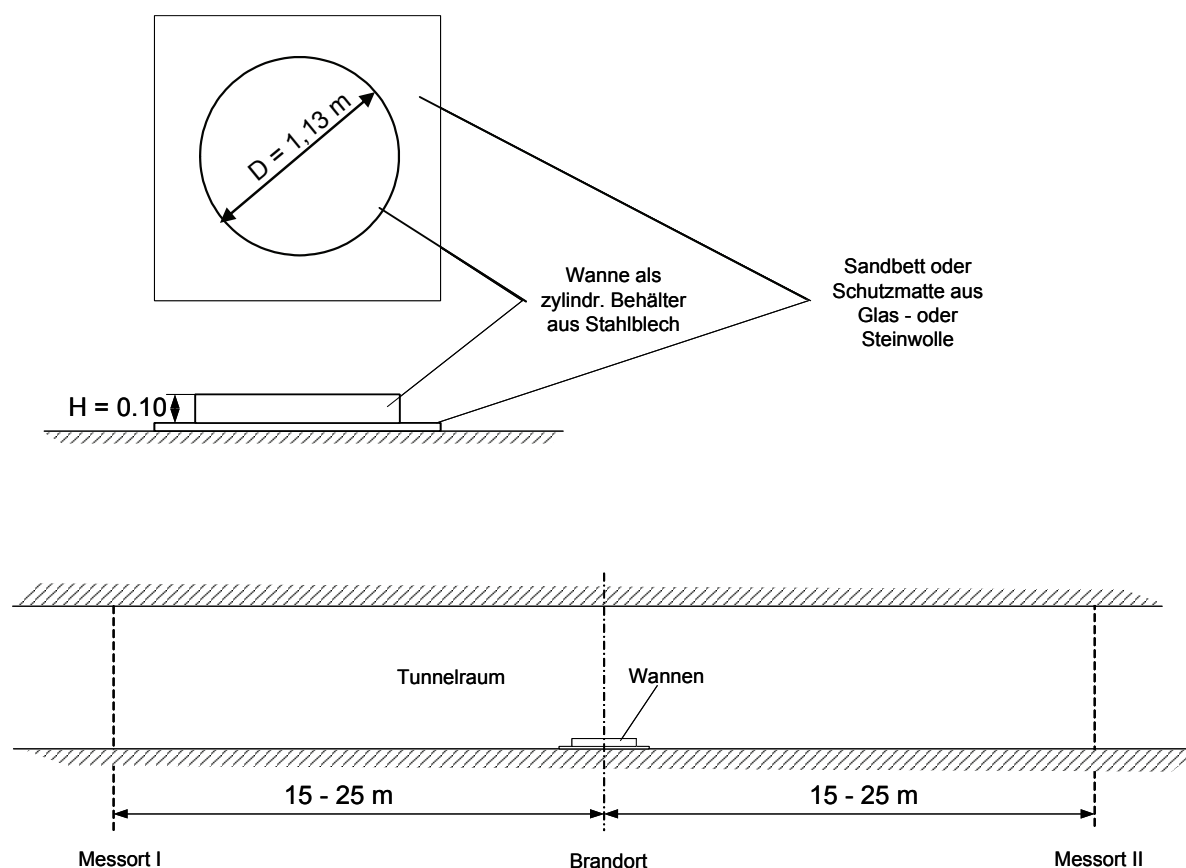


Abbildung 7-7: Brandquelle, bestehend aus 3 - 4 zylindrischen Stahlbehältern, je nach verwendetem Brandmittel

7.4.2 Messeinrichtungen zur Erfassung der Strömungsgeschwindigkeiten, Temperaturen und der Rauchschichtung – bzw. Rauchausbreitung

Die Brandversuche sind prinzipiell zu dokumentieren. Dabei sind nebst der Beschreibung des Tunnels, des Versuchsaufbaus und der Randbedingungen bei jedem Versuch Angaben über die bei der Durchführung des Versuchs herrschenden Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturen auf beiden Seiten des Brandorts zu machen. Die Anzahl der Messpunkte ist letztlich abhängig vom Versuchsziel. So genügen in einem Versuch zur Überprüfung der Funktion eines Brandmeldekabels zwei repräsentative Messpunkte für die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel. Die Temperatur hingegen sollte dabei an mehreren Stellen unter der Tunneldecke gemessen werden. Wenn es um die Überprüfung der Funktion der Lüftungsanlagen in bestimmten Brandszenarien geht, müssen höhere Anforderungen an die Messtechnik gestellt werden. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten sowie im Hinblick auf eine numerische Simulation (z. B. bei Brandleistungen, welche dem Bauwerk und der technischen Einrichtungen nicht zugemutet werden können, oder bei geänderten Randbedingungen), soll in einem vorgegebenen Abstand vom Brandort das Strömungsprofil wie das Temperaturprofil zumindest im Tunnellängsschnitt gemessen werden. Diese Messungen müssen auf beiden Seiten des Brandorts, auf der Anströmseite wie auf der Abströmseite, durchgeführt werden, da die Temperaturverteilung wie auch das Strömungsprofil auf den beiden Seiten sehr unterschiedlich sein können, vgl. mit Abbildung 7-8 und Abbildung 7-9.

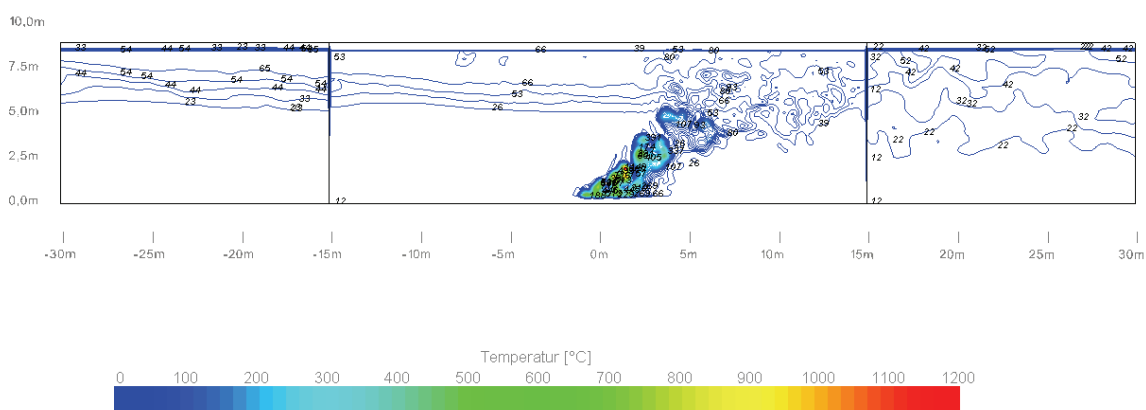


Abbildung 7-8: Berechnete Temperaturverteilung im Rechteckquerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 2,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ s}$, $\dot{Q} = 5 \text{ MW}$

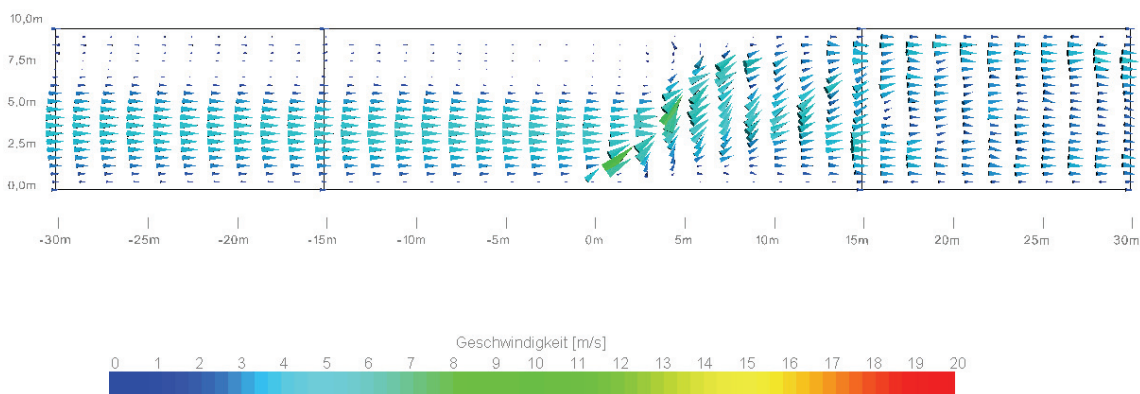


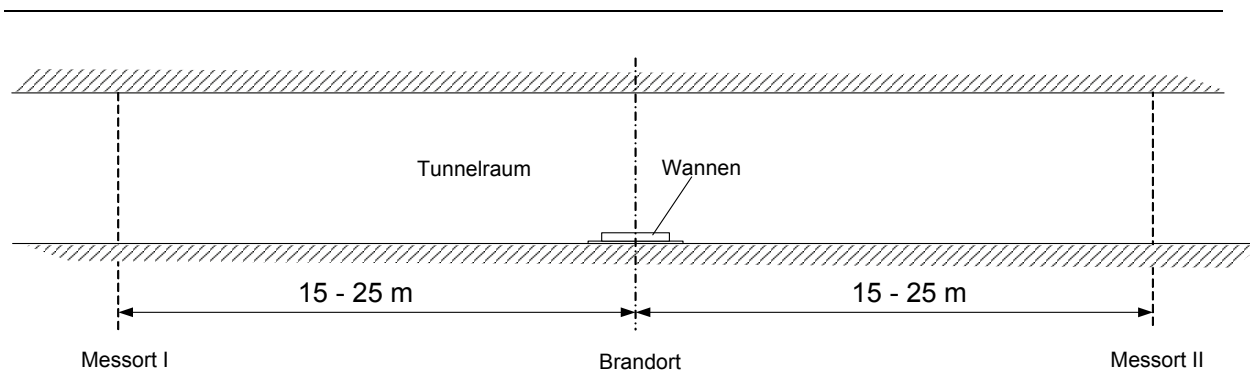
Abbildung 7-9: Berechnete Geschwindigkeitsverteilung im Rechteckquerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 2,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ s}$, $\dot{Q} = 5 \text{ MW}$

Im Standardbrandversuch wird für die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturen die folgende Anordnung der Messstellen in Bezug auf den Brandort vorgeschlagen. Grundlage für die Empfehlung sind berechnete Verteilungen der Temperatur und der Strömungsgeschwindigkeit in der Umgebung des Brandes bei einer nominellen Energiefreisetzungsrate von 5 MW (siehe Anhang E)

In Tunnellängsrichtung soll in der Symmetrieebene, in einem Bereich von 15 – 20 m hinter dem Brandort eine Traverse mit Anemometern und Temperatursensoren aufgestellt werden, siehe Abbildung 7-10. Da in diesem Abstand, je nach Strömungsverhältnissen Temperaturen deutlich über $100 \text{ }^\circ\text{C}$ auftreten können, sollten nur Messgeräte mit entsprechender Temperaturfestigkeit, z. B. Staurohranemometer mit integrierter Temperaturmessung, eingesetzt werden. Zudem soll an beiden Messstandorten, an der Tunnelwand die Temperatur an mindestens zwei Stellen (3.0 m und 4.5 m über der Fahrbahn) gemessen werden.

Die Messdatenerfassung mittels Datalogger und PC ist, unter Beachtung der Strömungsverhältnisse im Tunnel, nach Möglichkeit luvseitig des Brandorts, in einem Abstand von mindestens 30 m, staubgeschützt anzuordnen.

Für die Dokumentation der Rauchausbreitung in Bezug auf vorher gesetzte Distanz- und Höhenmarken kommen nebst der visuellen Beobachtung Aufnahmen mittels Videokameras in Frage.



Messstellen für:

Temperatur ■ T_n
 Strömung ○ S_n

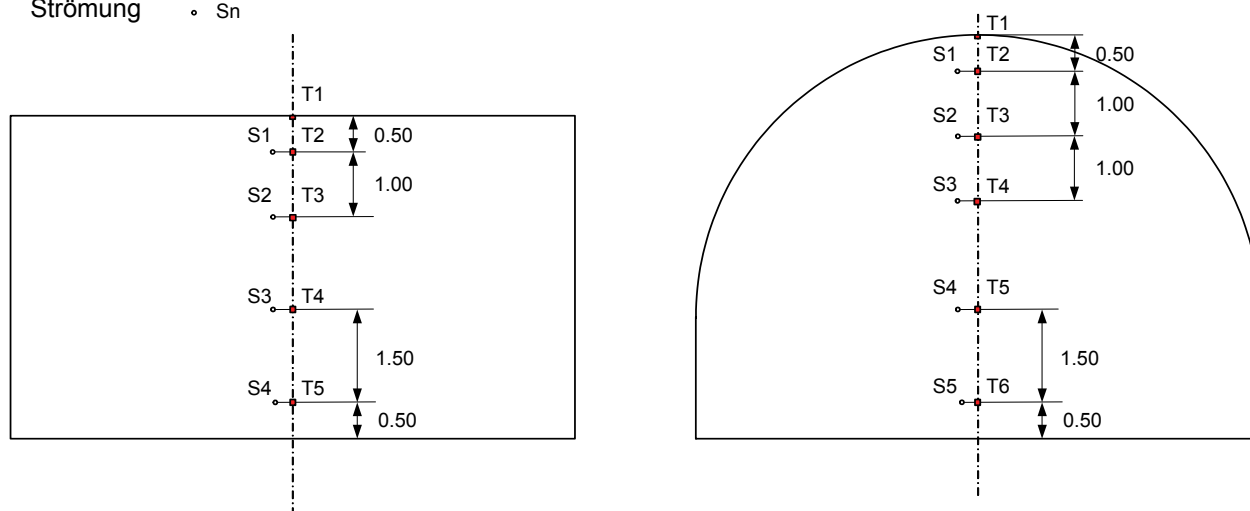


Abbildung 7-10: Anordnung der Messstellen in Bezug auf den Brandort

7.5 Schutzvorkehrungen

Bei der Durchführung von Brandversuchen dürfen am Tunnel und an den Einrichtungen keine übermäßige Verschmutzung und keine Schäden entstehen.

Dem Verschmutzungsaspekt kann im Versuch dadurch Rechnung getragen werden, dass die Russproduktion auf das Maß der Russproduktion eines Pkw-Brandes begrenzt wird. Dies wird bei einem Wannenbrand von ca. 5 MW Brandleistung durch die Verwendung von Heptan als Brandmittel erreicht. Im Fall der Branderzeugung durch Gasbrenner müssen für eine äquivalente Rauchentwicklung durch technische Maßnahmen Partikel in entsprechender Menge dem Plume beigemischt werden.

Um Schäden am Bauwerk und den technischen Einrichtungen zu vermeiden, ist darauf zu achten, dass die Temperatureinwirkungen gering bleiben. Dies wird dadurch erreicht, dass

die Tunneldecke über dem Brandort sowie Einrichtungen, die sich nicht vermeiden lassen, örtlich abgedeckt werden.

Maßgebend für die Bestimmung der notwendigen Schutzvorkehrungen ist ein Brandversuch mit einer Längsströmungsgeschwindigkeit von 0 m/s, da hierbei örtlich die höchsten Temperaturen zu erwarten sind. Nachfolgende Abbildung 7-11 und Abbildung 7-12 zeigen für zwei unterschiedliche Tunnelquerschnitte die berechneten Temperaturwerte bei einer Energiefreisetzungsrate von 5 MW und einer Längsströmungsgeschwindigkeit von 0 m/s.

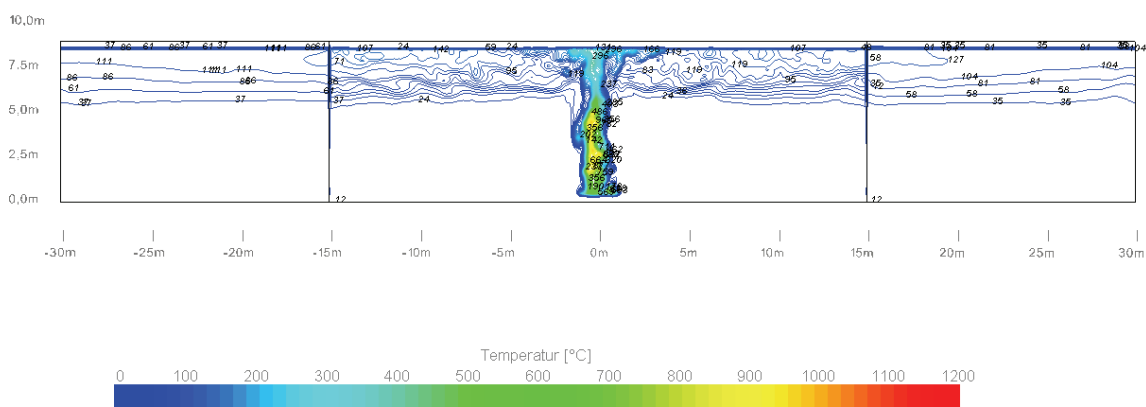


Abbildung 7-11: Berechnete Temperaturverteilung im Gewölbequerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 0,0$ m/s, $t = 360$ s, $\dot{Q} = 5$ MW

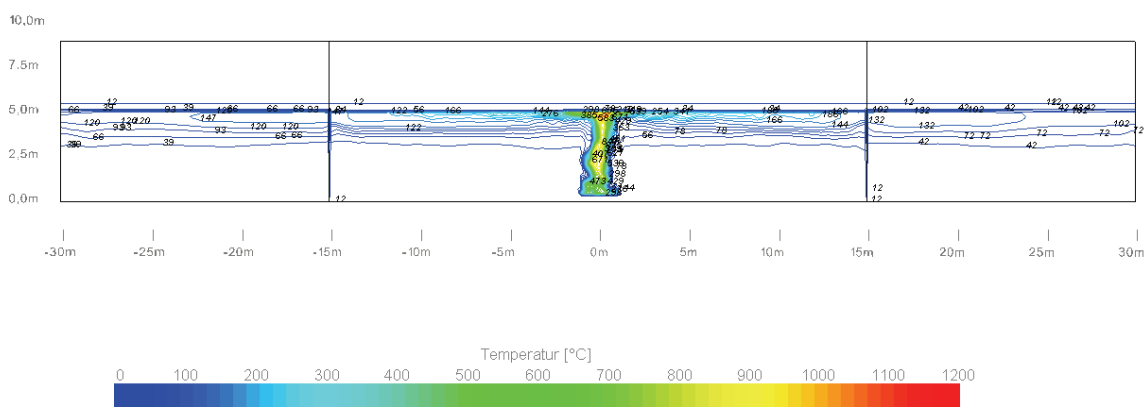


Abbildung 7-12: Berechnete Temperaturverteilung im Rechteckquerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 0,0$ m/s, $t = 360$ s, $\dot{Q} = 5$ MW

Wie aus Abbildung 7-11 und Abbildung 7-12 ersichtlich, sind direkt über dem Brandherd an der Tunneldecke Temperaturen von ca. 250 °C (im Gewölbequerschnitt) resp. 1000 °C (im Rechteckquerschnitt) und Strahlungsleistungen von 0,5 kW/m² zu erwarten.

Ist jedoch eine Längsströmung vorhanden, liegen die Temperaturen niedriger. In Abbildung 7-13 ist die Temperaturverteilung im Tunnelquerschnitt bei einer Längsströmungsgeschwindigkeit von 2,0 m/s dargestellt. Hierbei ist eine sehr gute Übereinstimmung mit den im Rahmen des EU FIRETUN ermittelten Werten (vgl. Abbildung 7-14) erkennbar.

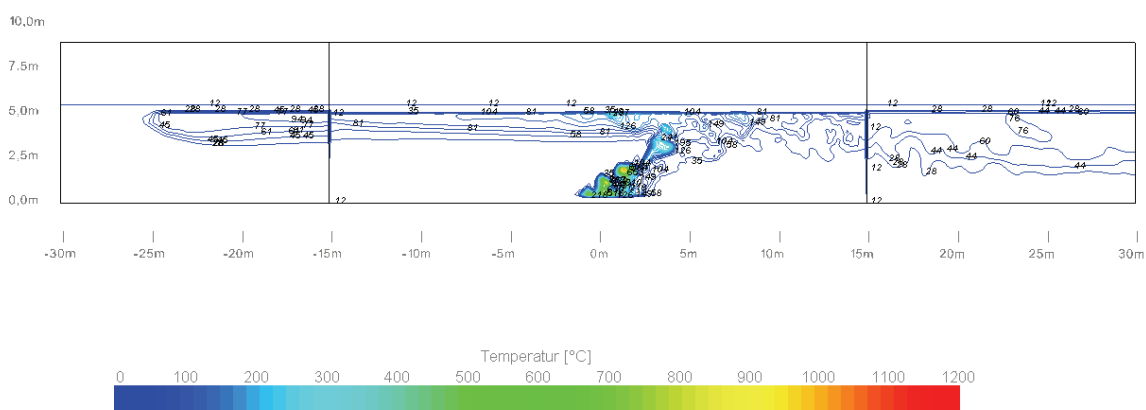


Abbildung 7-13: Berechnete Temperaturverteilung im Rechteckquerschnitt längs der Tunnelachse, $u = 2,0$ m/s, $t = 360$ s, $\dot{Q} = 5$ MW

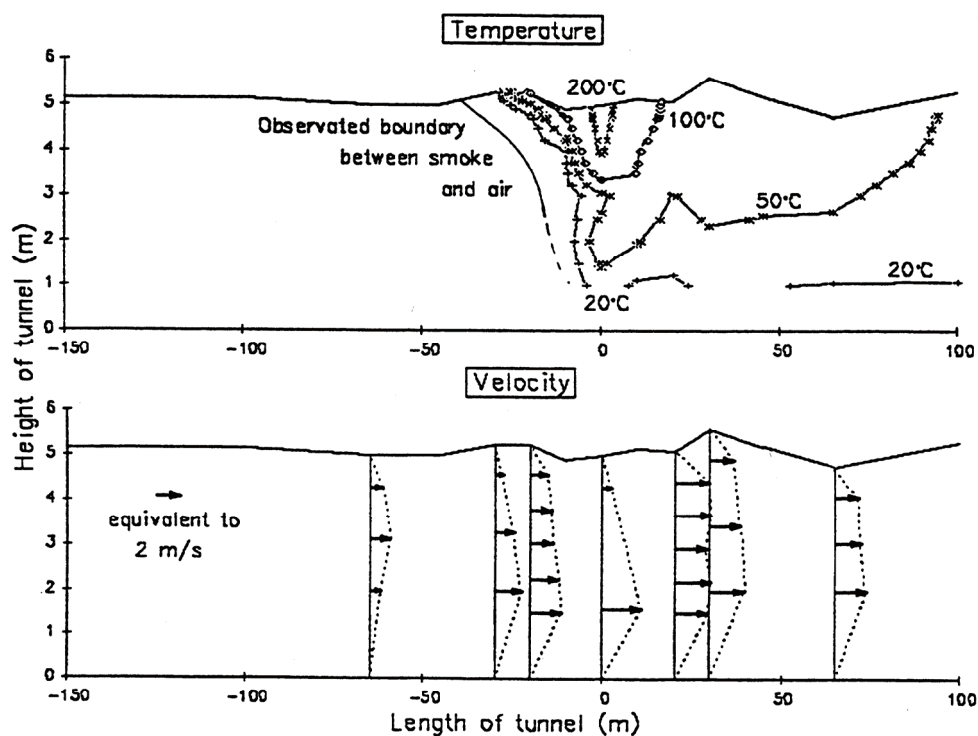


Abbildung 7-14: Isothermen, Verlauf der in Versuch H21, Teil 2, beobachteten Rauchgas/Luftgrenze und Luftgeschwindigkeiten, bei $v_0 = 1,5 \text{ m/s}$ und $E = 3,1 \text{ MW}$, für die stationäre Phase (60. Minute)

Bei mittiger Anordnung des Brandes im Tunnelquerschnitt bleiben die Temperaturen an den Wänden bis auf eine Höhe von 3 m über der Fahrbahn $< 100 \text{ °C}$. Die Tunnelwände brauchen daher nicht besonders geschützt zu werden. In Abbildung 7-15 und Abbildung 7-16 sind die Temperaturverteilungen quer zur Tunnelachse im Bereich der Brandstelle ($x = 0 \text{ m}$) und im Abstand von 10 m zur Brandstelle ($x = \pm 10 \text{ m}$) bei einer Längsströmungsgeschwindigkeit von 0 m/s getrennt für einen Gewölbe- und einen Rechteckquerschnitt dargestellt.

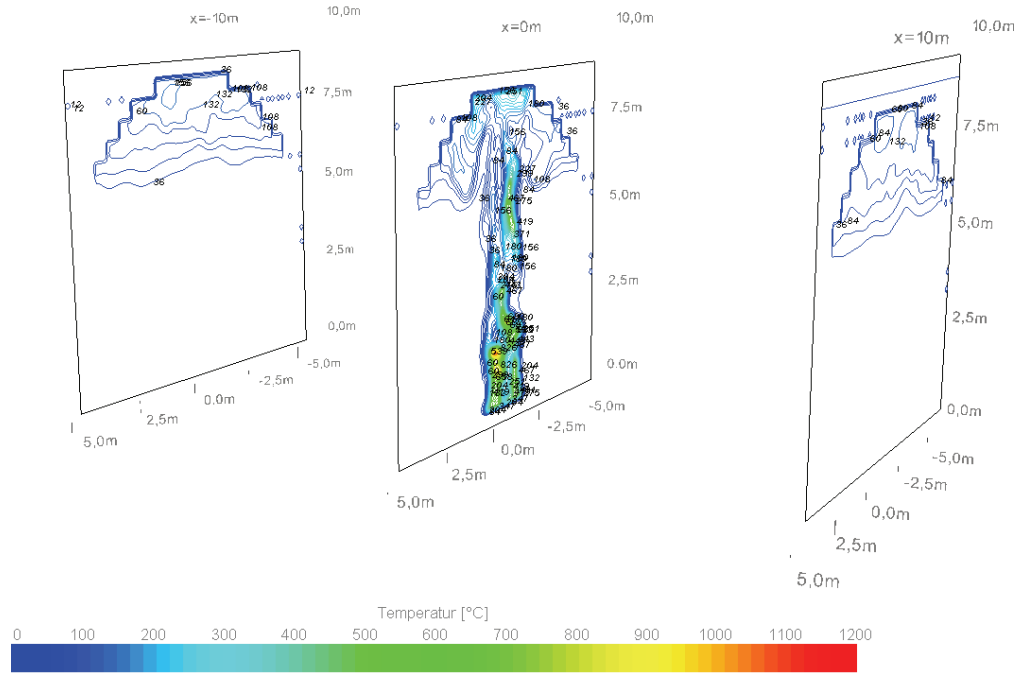


Abbildung 7-15: Berechnete Temperaturverteilung im Gewölbequerschnitt quer zur Tunnelachse, $u = 0,0\text{ m/s}$, $t = 360\text{ s}$, $\dot{Q} = 5\text{ MW}$

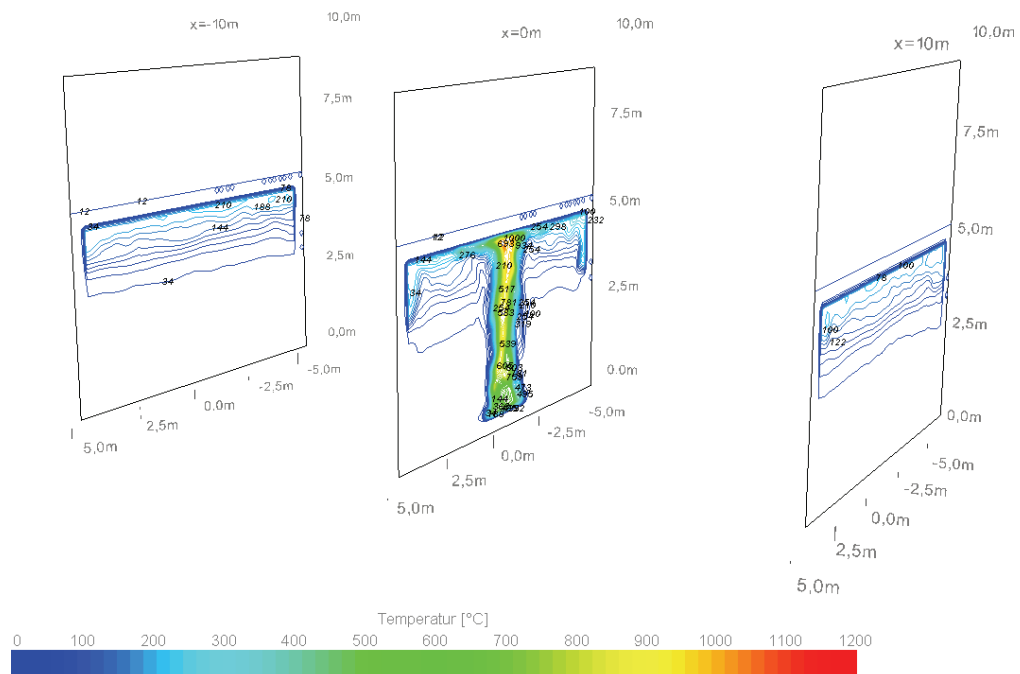


Abbildung 7-16: Berechnete Temperaturverteilung im Rechteckquerschnitt quer zur Tunnelachse, $u = 0,0\text{ m/s}$, $t = 360\text{ s}$, $\dot{Q} = 5\text{ MW}$

Da die Temperaturen mit zunehmendem Abstand vom Brandort rasch abnehmen, sind bei dem vorgeschlagenen Standardbrandversuch mit einer Brandleistung von max. 5 MW am Tunnelgewölbe bzw. an der Decke flächige Schutzvorkehrungen lediglich unmittelbar über dem Brandort auf einer Länge von 20 m nötig. Im Weiteren sind Leuchten, Funkkabel u. ä. symmetrisch zum Brandort, auf einer Länge von ca. 30 m nach beiden Seiten, mit einer isolierenden Abdeckung zu versehen.

Die bei Wannenbränden verwendeten Behälter dürfen, um Schäden an der Fahrbahn zu vermeiden, nicht direkt auf den Boden gestellt werden. Die Behälter sind auf einem Sandbett oder auf Matten aus Glas- oder Steinwolle aufzustellen. Die Dimensionierung der jeweiligen Schutzvorkehrungen ist neben den genannten Parametern Temperatur und Strahlungsleistung von spezifischen Materialkennwerten abhängig und muss daher für den Einzelfall erfolgen. In der Regel sind 20 cm dicke (kaschierte) Glaswollematten bzw. eine 20 cm starke Sandschicht zum Schutz der Fahrbahn sowie ebenfalls 20 cm dicke Glaswollematten zum Schutz der Einrichtungen an der Decke ausreichend.

Umfangreichere Maßnahmen zum Schutz des Tunnels und seiner Einrichtungen sind bei Brandleistungen über 5 MW angezeigt.

8 Fazit und Ausblick

Auf der Basis numerischer Berechnungen, die anhand von Daten aus verschiedenen Versuchsreihen des Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program (MTFVTP) verifiziert werden konnten, wurden Anforderungen an einen standardisierten Brandversuch abgeleitet.

Die numerischen Berechnungen erfolgten mit Hilfe des Fire Dynamics Simulators (FDS), der über das National Institute of Standards and Technology als Open Source – Rechenprogramm beziehbar ist. Grundlage des Rechenprogramms bilden die Gleichungen für die Massen-, Impuls-, Energie- und Stoffhaltung, die im dreidimensionalen Raum numerisch gelöst werden. Somit stehen nach dem Lösen der Erhaltungsgleichungen Geschwindigkeits-, Temperatur- und Konzentrationsfelder bereit.

Die vergleichende Gegenüberstellung der einen Brand charakterisierenden Größen Geschwindigkeit und Temperatur ergab eine überwiegend gute Übereinstimmung der Messwerte aus den Brandversuchen mit den Simulationsergebnissen. Die mittlere Abweichung bezogen auf die jeweiligen Wertebereiche variiert bei den Geschwindigkeiten zwischen 0,98 % und 27,15 %, bei den Temperaturen zwischen 0,12 % und 17,10 %

Bei Vorgabe exakter Anfangs- und Randbedingungen bezüglich der Geometrie, der Art des Brandgutes, den Temperaturen sowie den Ventilationsbedingungen lassen sich mit dem gewählten Rechenprogramm FDS Brandversuche realitätsnah abbilden und detaillierte Aussagen zur Rauch- und Temperatúrausbreitung als Funktion von Ort und Zeit geben.

Basierend auf den Berechnungen zu den Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen wurden unter den Aspekten der Funktionsüberprüfung der betriebstechnischen Einrichtungen und der Erfassung von Eingangsgrößen für Simulationsrechnungen Anforderungen zur Versuchsanordnung, Branddauer, Brandgut und Erfassung der relevanten Messgrößen im Längs- und Querschnitt sowie Anforderungen zu Schutzvorkehrungen abgeleitet.

Bei den Funktionstests stehen das Überprüfen der Detektion, der Lüftersteuerung und Lüftungskonzepte sowie das Aktivieren der Sicherheitseinrichtungen im Vordergrund. Die während der Versuche erfassten Größen können darüber hinaus als Eingangswerte für Simulationsrechnungen dienen, um beispielsweise Aufschluss über das Verhalten des Systems Tunnel bei höheren Brandleistungen zu erhalten oder eine Optimierung von Lüfterprogrammen unter Berücksichtigung von Fahrzeugen im Verkehrsraum durchführen zu können. Ferner können die so erfassten Daten als Basiswerte bei der Wirkungs- und Ausmaßabschätzung im Rahmen von quantitativen Risikoanalysen dienen.

Zur Durchführung von Brandversuchen werden aufgrund der gut definierbaren Branddaten und der einfachen Handhabung Wannenbrände empfohlen. Gasbrenner können jedoch ebenfalls zum Einsatz kommen, wenn die Energie- und Rauchfreisetzungsraten denen von Benzin- oder Heptanwannenbränden entsprechen.

Als Brandmittel können sowohl Benzin, Diesel oder Heptan verwendet werden. Zu beachten ist hierbei lediglich, dass über die bereitzustellende Brandfläche eine Brandleistung von 5 MW erreicht wird. Im Fall von Heptan sind hierzu 1,95 m², bei Verwendung von Benzin

3,0 m² und für Diesel 4,1 m² erforderlich. Der Rußentstehungsanteil entspricht jedoch beim Einsatz von Benzin oder Diesel dem eines realen Kfz-Brandes.

Damit aussagekräftige Ergebnisse erhalten werden, sollte die Branddauer mindestens 5 Minuten betragen. Bei Verwendung von n-Heptan sind hierzu 30.8 l/m² notwendig. Wird Benzin eingesetzt, so sind 20.2 l/m² notwendig.

Für die einzustellende Tunnelluftgeschwindigkeit während eines Brandversuchs kann kein einheitlicher Wert genannt werden. Je nach Zielsetzung, welche die RABT und die ZTV-ING nennen, können bestimmte Werte bzw. Wertebereiche, welche im Rahmen der Lüftungsauslegung des betreffenden Tunnels liegen, empfohlen werden.

Sollen temperaturabhängige Brandmeldesysteme überprüft werden, so sind bei einem Rechteckquerschnitt des Tunnels 2,5 m/s und bei einem Gewölbequerschnitt 2,0 m/s ausreichend.

Bei der allgemeinen Funktionsprüfung des Brandmeldesystems eines Tunnels, welches auch bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten eine zuverlässige Detektion eines Brandes gewährleisten muss, sollten die Funktionstests bei real innerhalb der ersten Minute nach Ereigniseintritt auftretenden Werten der Strömungsgeschwindigkeit durchgeführt werden. Differenziert nach der Verkehrsart werden für Richtungsverkehrstunnel 6,0 m/s und für Gegenverkehrstunnel 4,0 m/s empfohlen. Die entsprechenden Einstellungen sind während eines Versuchs beizubehalten, bis das Lüftungsregime gezielt, entweder durch das Brandlüftungsprogramm oder manuell, geändert wird.

Zur Erfassung der relevanten Größen soll in der Symmetrieebene, in einem Bereich von 15 – 20 m vor und nach dem Brandort eine Traverse mit Anemometern und Temperatursensoren aufgestellt werden. Aufgrund der möglichen Temperaturen sollten nur Messgeräte mit entsprechender Temperaturfestigkeit, z. B. Staurohranemometer mit integrierter Temperaturmessung, eingesetzt werden.

Da die Temperaturen mit zunehmendem Abstand vom Brandort rasch abnehmen, sind bei dem vorgeschlagenen Standardbrandversuch mit einer Brandleistung von max. 5 MW am Tunnelgewölbe bzw. an der Decke flächige Schutzvorkehrungen lediglich unmittelbar über dem Brandort auf einer Länge von 20 m nötig. Im Weiteren sind Leuchten, Funkkabel u. ä. symmetrisch zum Brandort, auf einer Länge von ca. 30 m nach beiden Seiten, mit einer isolierenden Abdeckung zu versehen.

Die bei Wannenbränden verwendeten Behälter dürfen, um Schäden an der Fahrbahn zu vermeiden, nicht direkt auf den Boden gestellt werden. Die Behälter sind auf einem Sandbett oder auf Matten aus Glas- oder Steinwolle aufzustellen.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Definition „eines“ Standardbrandversuchs nicht zweckmäßig wäre, da die Zielsetzungen sich zu sehr unterscheiden. Dagegen konnten, wie die Zusammenfassung zeigt, konkrete Grundlagen und Empfehlungen zur Festlegung standardisierter Brandversuche für die gemäß RABT und ZTV-ING vorgesehenen Funktionstests

erarbeitet werden. Deren Umsetzung in den Regelwerken ist jedoch nicht mehr Teil der vorliegenden Untersuchung.

Das für die Simulationsrechnungen verwendete Programm FDS bildet derzeit ein adäquates Instrument – nicht nur bezüglich der Simulation von Tunnelbränden unter realen Gegebenheiten und der resultierenden Strömungs- und Temperaturverhältnissen sowie Rauchkonzentrationen sondern auch in Bezug auf die benötigte Rechner- und Speicherkapazität. Dies bedeutet nicht, dass bekannte, käufliche CFD-Programme nicht ebenso verwendet werden können. Zu beachten bleibt aber insbesondere die weitere Entwicklung dieser Rechenprogramme.

9 Literaturverzeichnis

- Babrauskas, V. (1995) Burning Rates, in: *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2nd Ed., Society of Fire Protection Engineers, Quincy, MA, Section 3, Chapter 1.
- McGrattan und Hamins (2002) Numerical Simulation of the Howard Street Tunnel Fire, Baltimore, Maryland, July 2001, NISTIR 6902, National Institute of Standards and Technology
- Mayer, G.: "Brände in Straßentunneln: Abschätzung der Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer mittels numerischer Rauchausbreitungssimulation", *Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau*, Heft 47, 2006
- MTFVTP (1995) *Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program*, im Auftrag des Massachusetts Highway Department und der Federal Highway Administration, Bechtel / Parsons Brinckerhoff.
- RABT (2003) Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT), Ausgabe 2003, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- EU 499 FIRETUN (1998) *Brände in Verkehrstunneln, Bericht über Versuche im Masstab 1:1*, Studiengesellschaft Stahlanwendungen e. V., Düsseldorf.
- Schneider, Lebeda, Max (1994) *Zeitschrift für Forschung und Technik im Brandschutz*, vfdb 4/94, S. 138 u. f.
- Steinert, C. (1996) *Messung und Simulation von Fahrzeugbränden in Tunneln*, Papierflieger Verlag, Clausthal-Zellerfeld.
- Tewarson, A. (1995) Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires, in: *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2nd Ed., Society of Fire Protection Engineers, Quincy, MA, Section 3, Chapter 4.

Programmübersicht

Name (Entwickler)	Typ	Mathematisches Modell	Submodelle	Num. Methode	Ergebnisse / Aussagen	Computer- plattform	Verfügbarkeit
CFX (vormals FLOW3D) (ANSYS)	CFD- Modell	Erhaltungsgleichungen - 3 dimensional - kompressibel / inkompressibel - stationär / instationär	- Verbrennung - Wärmestrahlung - Turbulenz - Partikel (Wasser, Rauch) - Brandbekämpfung / Löscheinrichtung - Ventilatoren	FVM - strukturierte Gitter - unstrukturierte Gitter - nicht kartesische Gitter - Paralleles Rechnen	- Geschwindigkeitsverteilung - Druckverteilung - Temperaturverteilung - Konzentrationen - Ansprechen von Detektoren (Rauch, Temp.) - Wirkung der Lüftung - Wirkung von Lösch- einrichtungen	Windows NT Windows 2000 Unix	Kommerziell
Fire Dynamics Simulator (Kevin McGrattan, NIST, USA)	CFD- Modell	Erhaltungsgleichungen - 3 dimensional - stationär / instationär	- Verbrennung - Flammenausbreitung - Wärmestrahlung - Turbulenz (LES) - Partikel (Wasser, Rauch) - Brandbekämpfung - Sichtweiten - Detektoren - Ventilatoren - Windeinfluss	FVM - strukturierte Gitter - kartesische Gitter - adaptive Zeitschrittweitensteuerung - Paralleles Rechnen möglich	- Geschwindigkeitsverteilung - Druckverteilung - Temperaturverteilung - Konzentrationen - Sichtverhältnisse (Extinktion, Sichtweite) - Energiefreisetzung - Wärmeübertragung - Brandausbreitung - Ansprechen von Detektoren (Rauch, Temp., Sichttrübung) - Wirkung der Lüftung - Wirkung von Lösch- einrichtungen	- Windows 95/98 - Windows NT - Windows 2000 - Windows XP - Linux - Unix	Open Source (FORTRAN)

Name (Entwickler)	Typ	Mathematisches Modell	Submodelle	Num. Methode	Ergebnisse / Aussagen	Computer- plattform	Verfügbarkeit
FLUENT Version 6.2 (FLUENT)	CFD- Modell	Erhaltungsgleichungen - 3 dimensional - kompressibel / inkompressibel - stationär / instationär	- Verbrennung - Wärmestrahlung - Wärmeleitung - Turbulenz ($k\epsilon$, $k\omega$, RSM, DES, LES) - Mehrphasenströmung (Partikel, Freie Oberflächen, ...) - Chemisches Reaktionsmodell - Ventilatoren	FVM - unstrukturierte Gitter - kartesische, zylindrisch, gekrümmte Gitter - blockstrukturierte Gitter - dynamische Gittergenerierung - Paralleles Rechnen möglich	- Geschwindigkeitsverteilung - Druckverteilung - Temperaturverteilung - Konzentrationen - Wärmeübertragung - Wirkung der Lüftung - Wirkung von Lösch- einrichtungen	Windows NT Windows 2000 Windows XP Linux Unix	
JASMINE (BRE: Building Research Establishment, UK)	CFD- Modell	Erhaltungsgleichungen - 3 dimensional - stationär - instationär	- Verbrennung - Wärmestrahlung - Turbulenz ($k\epsilon$) - Partikel (Wasser, Rauch) - Betonabplatzungen - Sichtweiten - Ventilatoren - Windeinfluss	FVM - strukturierte Gitter - kartesische Gitter - Druckkorrekturmethode	- Geschwindigkeitsverteilung - Druckverteilung - Temperaturverteilung - Konzentrationen - Wärmeübertragung - Wirkung der Lüftung - Wirkung von Lösch- einrichtungen	Windows 95/98 Windows NT Windows 2000	

Name (Entwickler)	Typ	Mathematisches Modell	Submodelle	Num. Methode	Ergebnisse / Aussagen	Computer- plattform	Verfügbarkeit
PHOENICS (Prof. Brian Spalding, CHAM, UK)	CFD- Modell	Erhaltungsgleichungen - 3 dimensional - kompressibel / inkompressibel - stationär / instationär	- Verbrennung - Wärmestrahlung - Wärmeleitung - Turbulenz ($k\epsilon$) - Mehrphasenströmung (Partikel, Freie Oberflächen, ...) - Chemisches Reaktionsmodell	FVM - strukturierte Gitter - unstrukturierte Gitter - kartesische, zylindrisch, gekrümmte Gitter - blockstrukturierte Gitter - Paralleles Rechnen möglich	- Geschwindigkeitsverteilung - Druckverteilung - Temperaturverteilung - Konzentrationen - Wärmeübertragung - Brandausbreitung - Ansprechen von Detektoren (Rauch, Temp.) - Wirkung der Lüftung - Wirkung von Lösch- einrichtungen	Windows 95/98 Windows 95/98 Windows NT Linux UNIX	kommerziell
SMARTFIRE (FSEG University of Greenwich)	CFD	Erhaltungsgleichungen - 3 dimensional - stationär / instationär	- Verbrennung - Wärmestrahlung - Ventilatoren - Windeinfluss	FVM - strukturierte Gitter - unstrukturierte Gitter - kartesisches Gitter - Druckkorrekturmethode - Paralleles Rechnen möglich	- Geschwindigkeitsverteilung - Druckverteilung - Temperaturverteilung - Konzentrationen - Wärmeübertragung - Brandausbreitung - Ansprechen von Detektoren (Rauch, Temp.) - Wirkung der Lüftung	Windows 95/98 Windows NT Windows 2000	kommerziell

Name (Entwickler)	Typ	Mathematisches Modell	Submodelle	Num. Methode	Ergebnisse / Aussagen	Computer- plattform	Verfügbarkeit
SOLVENT (Innovative Research Inc. / Parsons Brinckerhoff)	CFD- Modell	Erhaltungsgleichungen - 3 dimensional - stationär / instationär	- Verbrennung - Wärmestrahlung - Turbulenz - Sichtweiten	FVM	- Geschwindigkeitsverteilung - Druckverteilung - Temperaturverteilung - Konzentrationen	Windows 95/98 Windows NT Windows 2000	Kommerziell
Star-CD (CD-adapco)	CFD- Modell	Erhaltungsgleichungen - 3 dimensional - kompressibel / inkompressibel - stationär / instationär	- Verbrennung - Wärmestrahlung - Wärmeleitung - Turbulenz ($k\omega$, LES, DES) - Mehrphasenströmung (Partikel, Freie Oberflächen, ...) - Chemisches Reaktionsmodell	FVM - strukturierte Gitter - unstrukturierte Gitter - kartesische, zylindrisch, gekrümmte Gitter - blockstrukturierte Gitter - Paralleles Rechnen möglich	- Geschwindigkeitsverteilung - Druckverteilung - Temperaturverteilung - Konzentrationen - Wärmeübertragung - Wirkung der Lüftung - Wirkung von Lösch- einrichtungen	Windows, Linux, Unix	Kommerziell

Name (Entwickler)	Typ	Mathematisches Modell	Submodelle	Num. Methode	Ergebnisse / Aussagen	Computer- plattform	Verfügbarkeit
Diana (TNO Building and construction research)		Massenerhaltung Energieerhaltung	- Wärmestrahlung	FEM - strukturierte Gitter - unstrukturierte Gitter		- Windows 95/98 - Windows NT - Windows 2000 - Linux - Unix	Kommerziell
CFAST - Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (NIST, USA)	Zonen Modell	Massenerhaltung Energieerhaltung	- Ideales Gasgesetz - Dichte – Temperatur- beziehungen	Löser gewöhnlicher DGL	- Geschwindigkeitsverteilung - Druckverteilung - Temperaturverteilung - Konzentrationen - Brandausbreitung - Ansprechen von Detektoren (Rauch, Temp., Sichttrübung) - Wirkung der Lüftung - Wirkung von Lösch- einrichtungen	- Windows 2000 - Windows XP	Open Source
CRISP (BRE: Building Research Establishment, UK)	Zonen- Modell	Massenerhaltung Energieerhaltung		Löser gewöhnlicher DGL Monte Carlo	- Geschwindigkeitsverteilung - Druckverteilung - Temperaturverteilung - Konzentrationen - Brandausbreitung - Ansprechen von Detektoren (Rauch, Temp., Sichttrübung) - Wirkung der Lüftung - Wirkung von Lösch- einrichtungen	Windows 95/98 Windows NT Windows 2000	-

Brandversuche mit Querlüftung

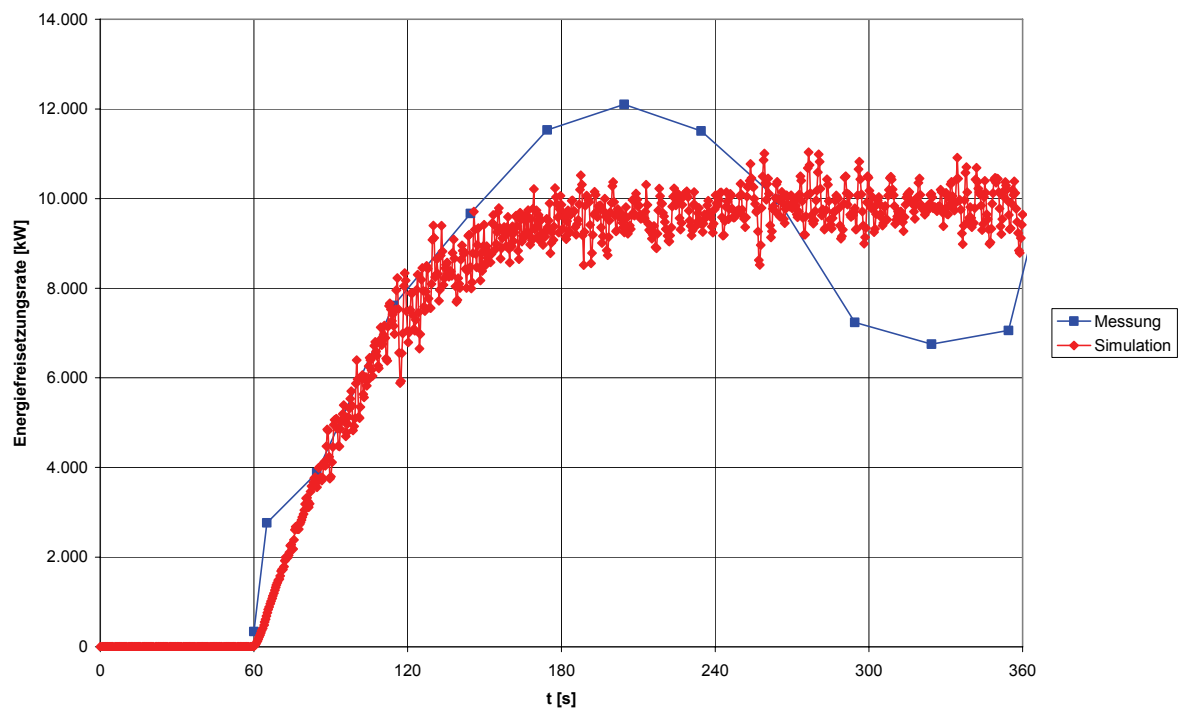
1 Brandversuch V101 CR	B2
1.1 Kenndaten Brandversuch V101 CR	B2
1.2 Energiefreisetzungsrate V101 CR	B2
1.3 Geschwindigkeiten V101 CR	B3
1.4 Temperaturen V101 CR	B6
2 Brandversuch V104	B11
2.1 Kenndaten Brandversuch V104	B11
2.2 Energiefreisetzungsrate V104	B11
2.3 Geschwindigkeiten V104	B12
2.4 Temperaturen V104	B16
3 Brandversuch V111	B20
3.1 Kenndaten Brandversuch V111	B20
3.2 Energiefreisetzungsrate V111	B20
3.3 Geschwindigkeiten V111	B21
3.4 Temperaturen V111	B25
4 Brandversuch V113 A	B29
4.1 Kenndaten Brandversuch V113 A	B29
4.2 Energiefreisetzungsrate V113 A	B29
4.3 Geschwindigkeiten V113 A	B30
4.4 Temperaturen V113 A	B34

1 Brandversuch V101 CR

1.1 Kenndaten Brandversuch V101 CR

Versuchs-Nr.	Brand-leistung	Brand-fläche	Strömungs-geschw. im Verkehrsraum	Aktivieren der Lüftung	Zuluft-menge	Abluft-menge	Temperatur	
							innen	außen
[-]	[MW]	[m ²]	[m/s]	[min]	[m ³ /s/n _{FS} /L]	[m ³ /s/n _{FS} /L]	[°C]	[°C]
101CR	10	4,5	0,74	2	0,101	0,093	21,6	-

1.2 Energiefreisetzungsrate V101 CR



1.3 Geschwindigkeiten V101 CR

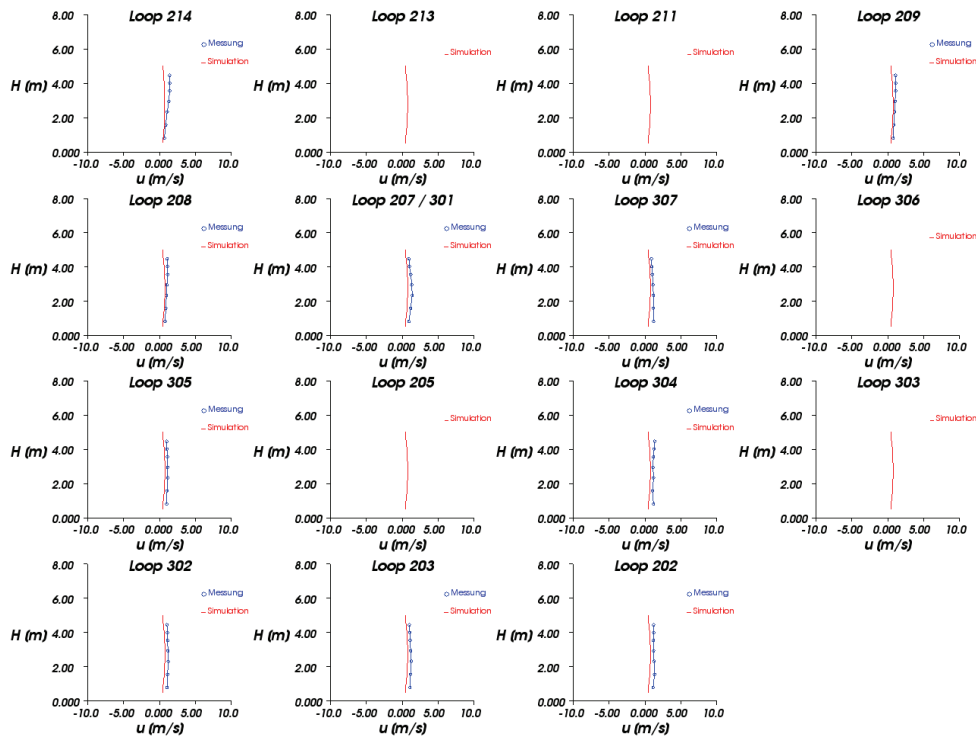


Abbildung 1-1: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach t = 60 sec

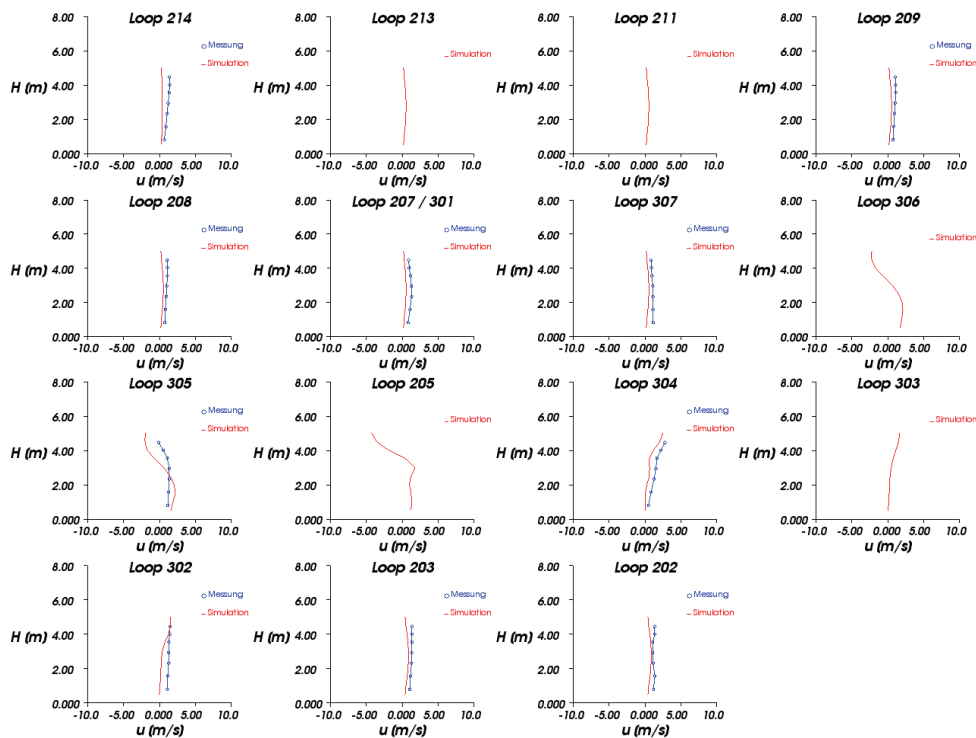


Abbildung 1-2: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach t = 120 sec

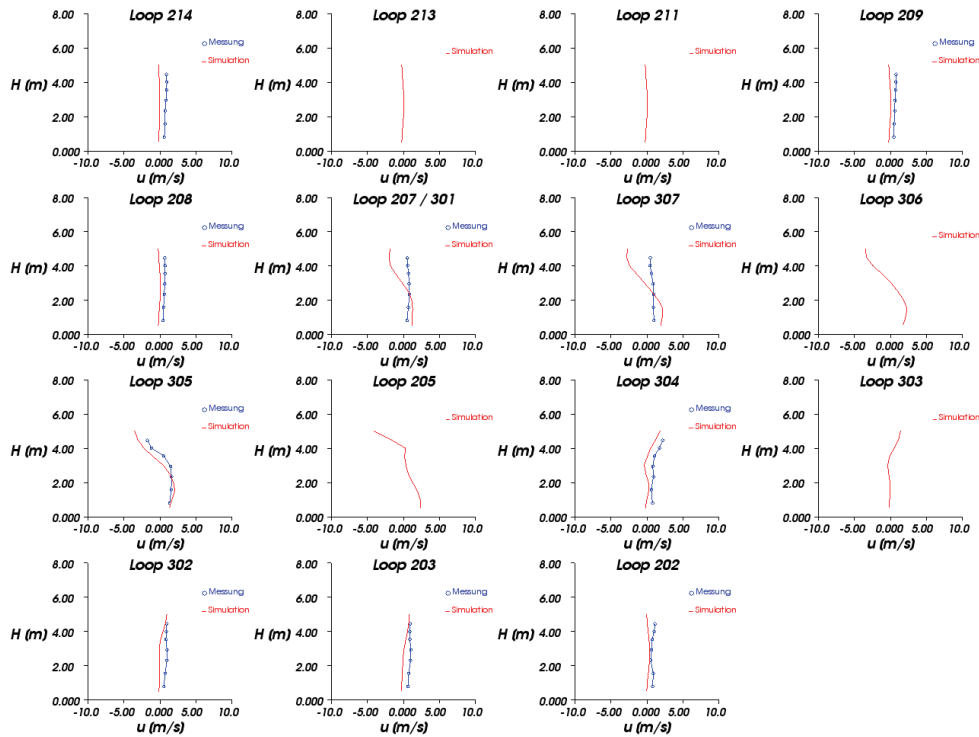


Abbildung 1-3: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach t = 180 sec

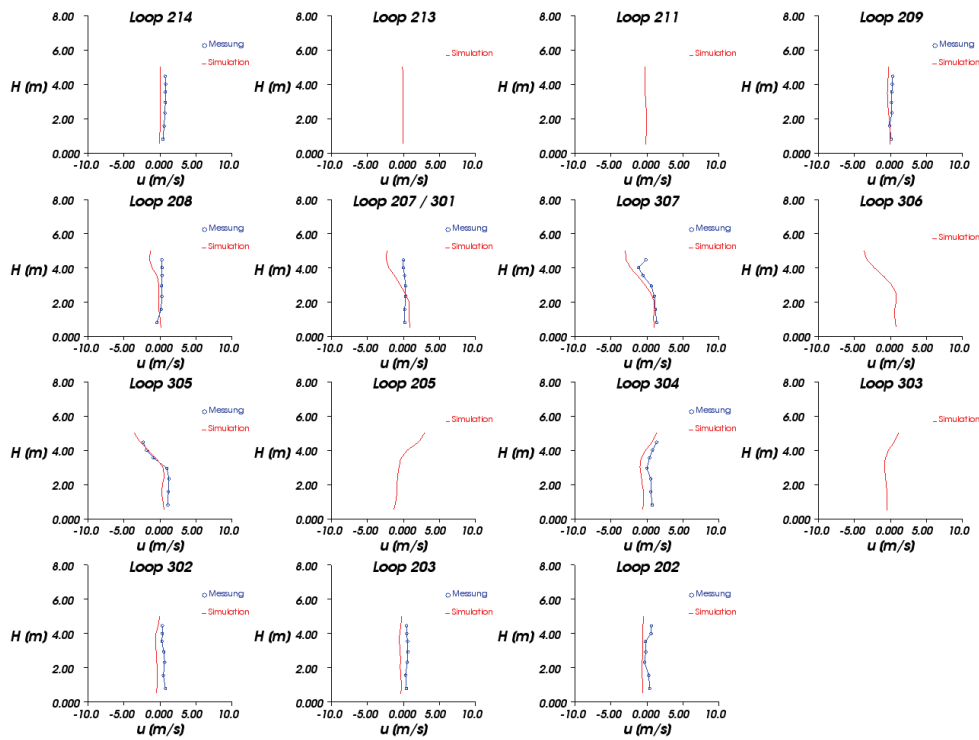


Abbildung 1-4: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach t = 240 sec

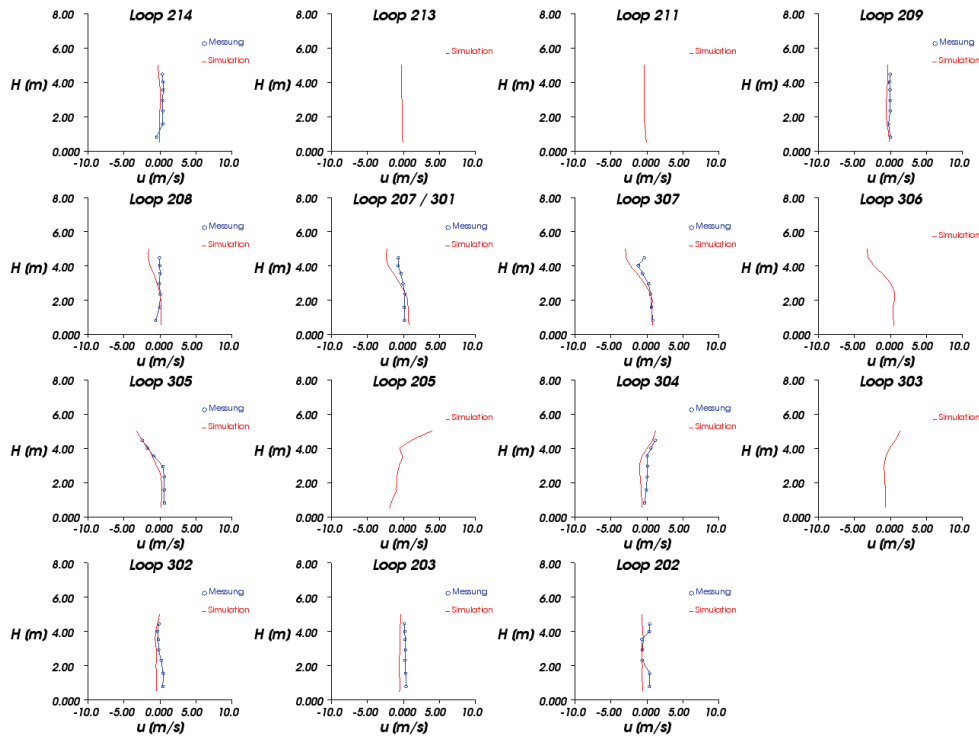


Abbildung 1-5: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach t = 300 sec

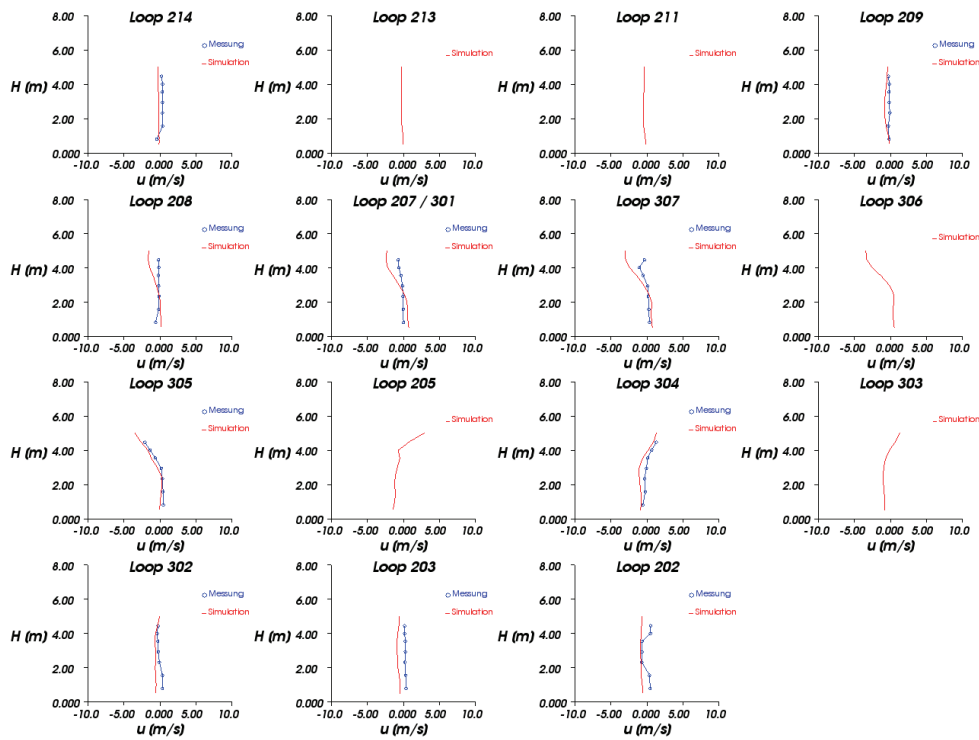


Abbildung 1-6: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach t = 360 sec

V101 Geschwindigkeiten t=60s

Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [m/s]	0,65	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
Mittelwert Messung [m/s]	1,14	0,98	0,99	1,18	1,10	1,08	1,17	1,14	1,14	1,23
Abweichung MIN [m/s]	0,15	0,17	0,20	0,34	0,29	0,37	0,38	0,41	0,39	0,44
Abweichung MAX [m/s]	0,84	0,55	0,54	0,66	0,70	0,49	0,81	0,57	0,59	0,66
Mittelwert Abweichung [m/s]	0,49	0,30	0,31	0,50	0,42	0,40	0,49	0,46	0,46	0,55
Mittlere Abweichung [%]	12,49	7,61	7,99	12,91	10,78	10,26	12,65	11,74	11,78	14,15
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	0,44									
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	11,24									

V101 Geschwindigkeiten t=360s

Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [m/s]	-0,19	-0,62	-0,47	-0,48	-0,46	-0,50	-0,63	-0,59	-0,72	-0,80
Mittelwert Messung m/s]	0,27	-0,18	-0,21	-0,21	-0,08	-0,16	0,00	-0,04	0,26	-0,12
Abweichung MIN [m/s]	0,00	0,04	0,01	0,02	0,02	0,10	0,27	0,07	0,79	0,13
Abweichung MAX [m/s]	0,63	0,72	1,42	1,69	2,58	0,59	1,01	0,95	1,16	1,29
Mittelwert Abweichung [m/s]	0,48	0,44	0,55	0,76	0,68	0,34	0,64	0,54	0,98	0,68
Mittlere Abweichung [%]	12,37	11,26	14,01	19,35	17,41	8,81	16,33	13,93	25,11	17,41
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	0,61									
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	15,60									

Tabelle 1-1: Abweichungen Geschwindigkeiten V101

1.4 Temperaturen V101 CR

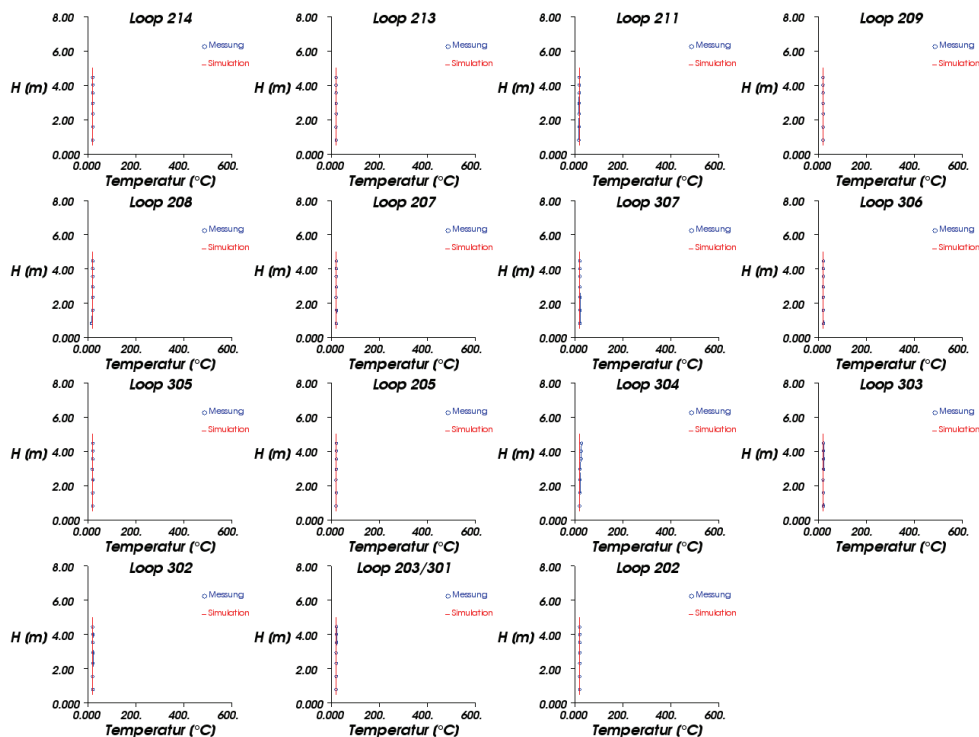


Abbildung 1-7: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 60 sec

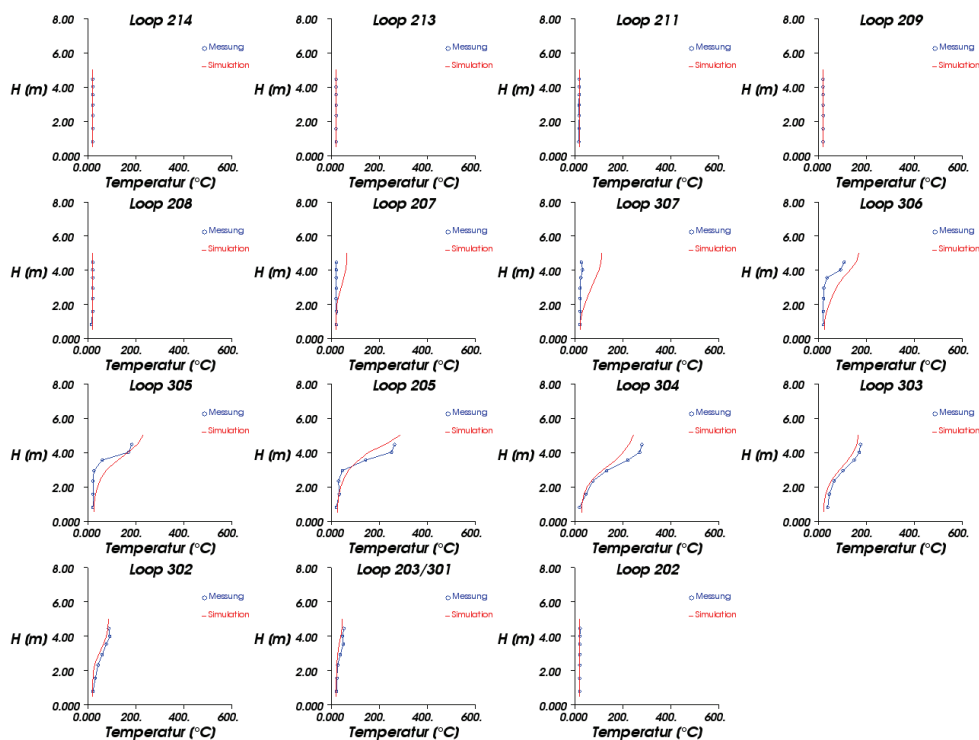


Abbildung 1-8: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 120 sec

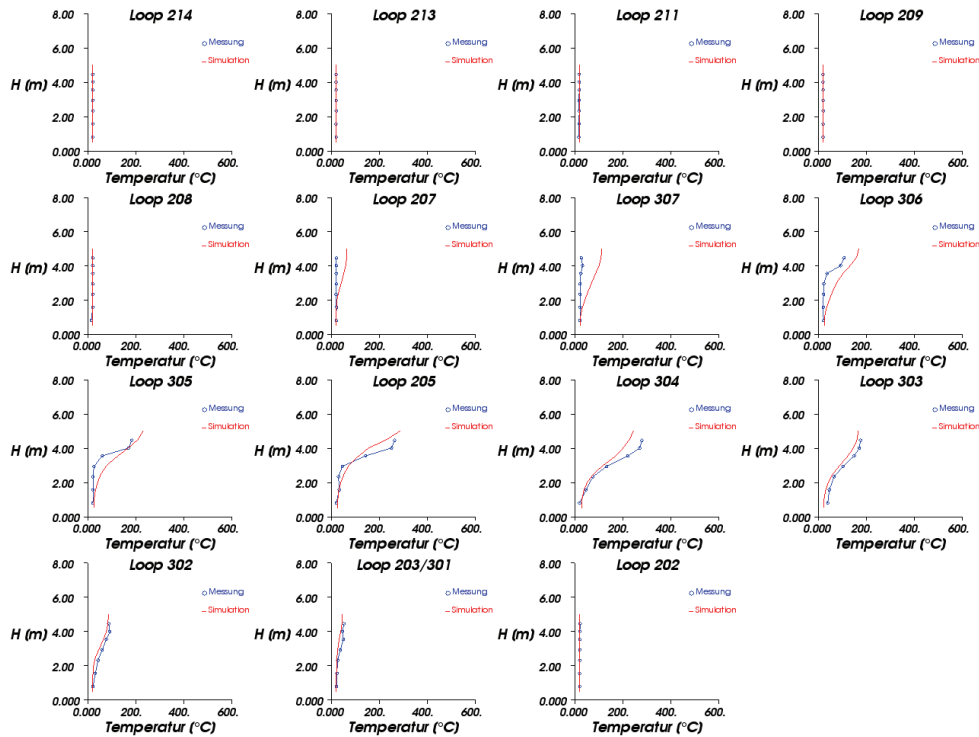


Abbildung 1-9: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 180 sec

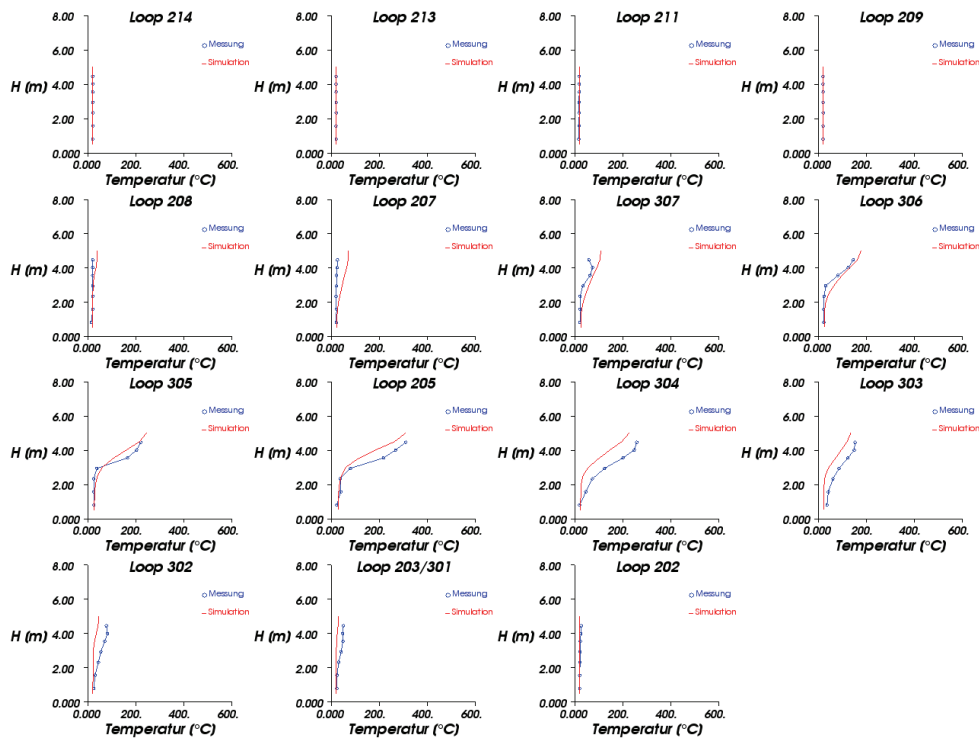


Abbildung 1-10: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 240 sec

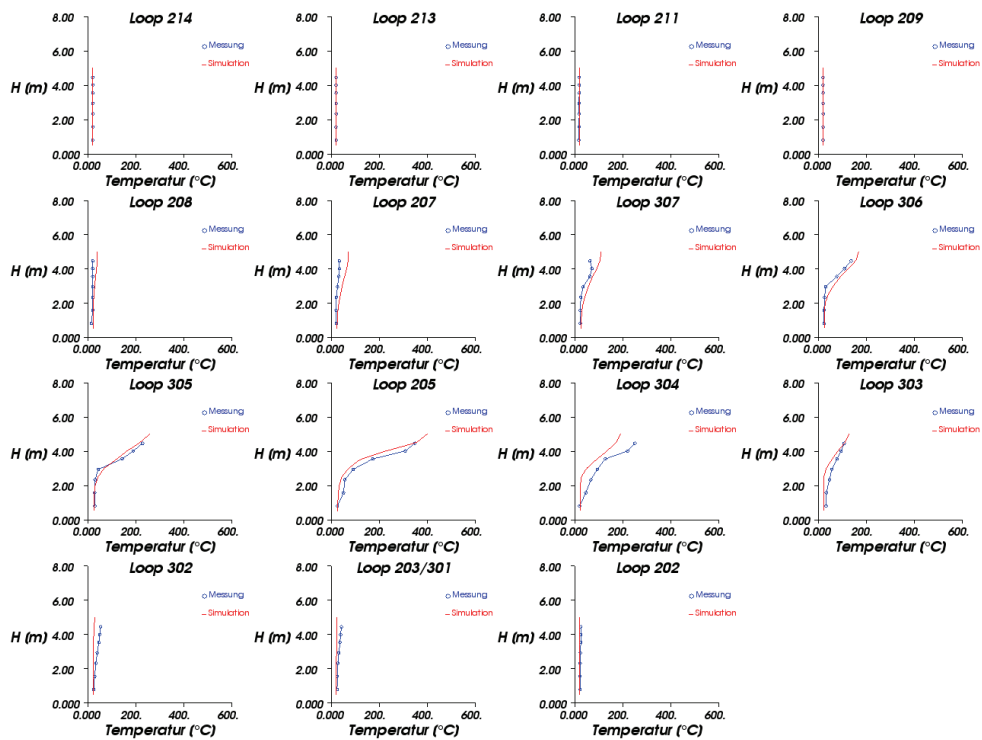


Abbildung 1-11: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 300 sec

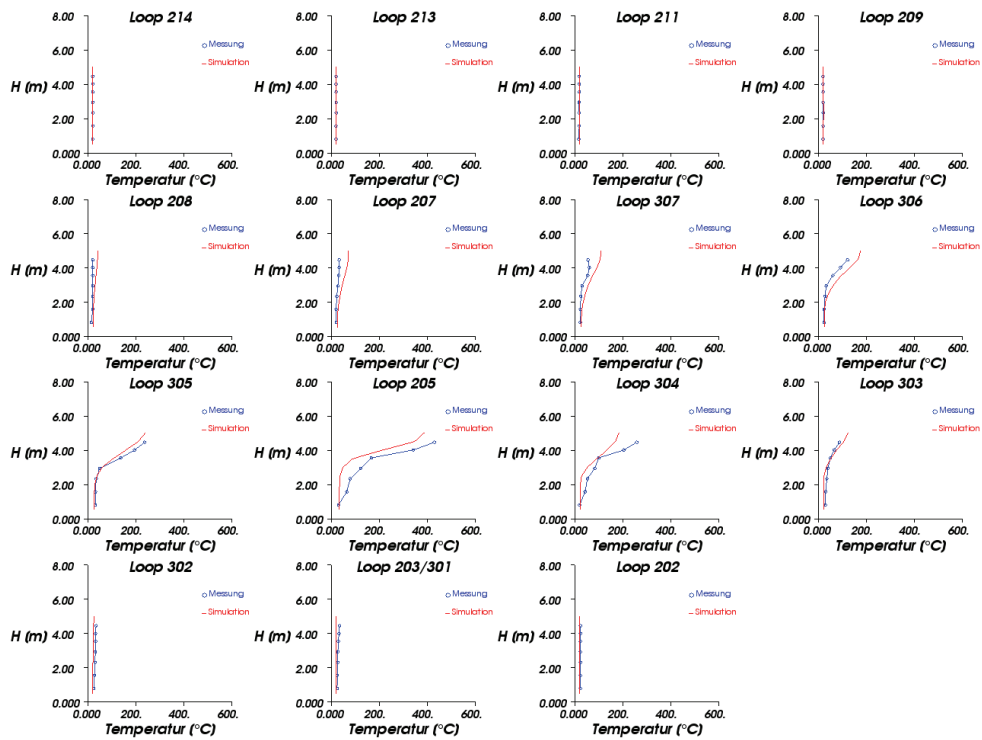


Abbildung 1-12: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 360 sec

V101 Temperaturen t=60s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	21,60	21,60	21,60	21,60	21,60	21,60	21,60	21,60	21,60	21,60	21,60	21,60	21,60	21,60	21,60
Mittelwert Messung [°C]	21,58	20,81	18,82	20,85	20,79	21,58	22,03	21,79	21,35	21,40	23,69	21,87	21,83	21,60	21,18
Abweichung MIN [°C]	0,01	0,41	2,30	0,26	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,04	0,18
Abweichung MAX [°C]	0,49	1,16	3,93	1,46	6,13	1,05	0,58	0,65	1,98	1,22	7,46	1,07	0,88	0,94	0,78
Mittelwert Abweichung [°C]	0,15	0,79	2,78	0,75	0,83	0,32	0,44	0,19	0,43	0,49	2,18	0,59	0,44	0,50	0,42
Mittlere Abweichung [%]	0,03	0,18	0,65	0,18	0,19	0,07	0,10	0,04	0,10	0,11	0,51	0,14	0,10	0,12	0,10
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	0,75														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	0,18														

V101 Temperaturen t=360s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	21,60	21,60	21,60	21,88	30,17	44,01	55,22	66,24	73,10	76,47	61,49	41,00	22,42	21,60	21,60
Mittelwert Messung [°C]	21,56	20,82	18,97	20,85	20,79	26,54	36,52	47,09	84,69	123,60	91,46	44,77	30,85	28,40	24,15
Abweichung MIN [°C]	0,00	0,41	2,23	0,75	3,03	4,14	3,59	1,09	0,20	2,07	0,41	0,14	3,29	3,58	2,16
Abweichung MAX [°C]	0,49	1,16	3,93	1,48	19,55	37,38	49,76	41,08	35,71	145,80	91,88	15,62	10,33	13,57	2,83
Mittelwert Abweichung [°C]	0,18	0,78	2,63	1,04	9,37	17,47	18,70	19,15	12,49	47,13	30,07	8,85	8,42	6,80	2,55
Mittlere Abweichung [%]	0,04	0,18	0,61	0,24	2,19	4,08	4,36	4,47	2,91	10,99	7,01	2,06	1,96	1,59	0,60
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	12,38														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	2,89														

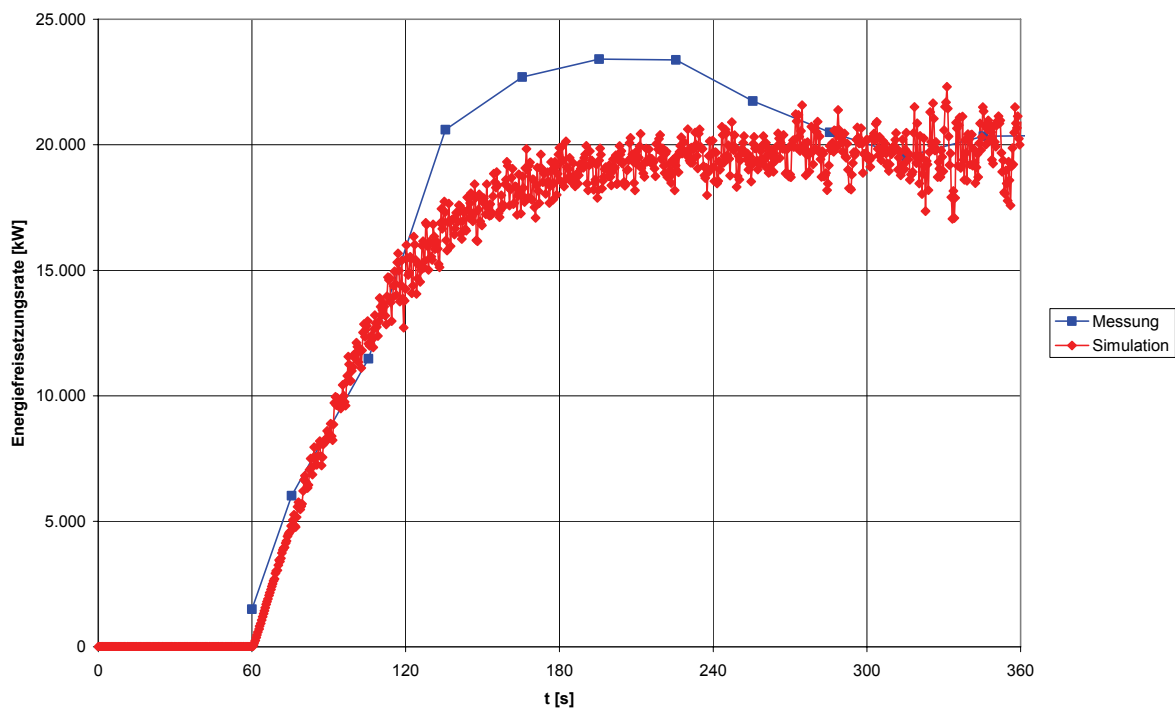
Tabelle 1-2: Abweichungen der Geschwindigkeiten V101

2 Brandversuch V104

2.1 Kenndaten Brandversuch V104

Versuchs-Nr.	Brand-leistung	Brand-fläche	Strömungs-geschw. im Verkehrsraum	Aktivieren der Lüftung	Zuluft-menge	Abluft-menge	Temperatur	
							innen	außen
[-]	[MW]	[m ²]	[m/s]	[min]	[m ³ /s/n _{FS} /L]	[m ³ /s/n _{FS} /L]	[°C]	[°C]
104	20	9,0	- 0,09	0	0,039	0,139	17,6	14

2.2 Energiefreisetzungsrate V104



2.3 Geschwindigkeiten V104

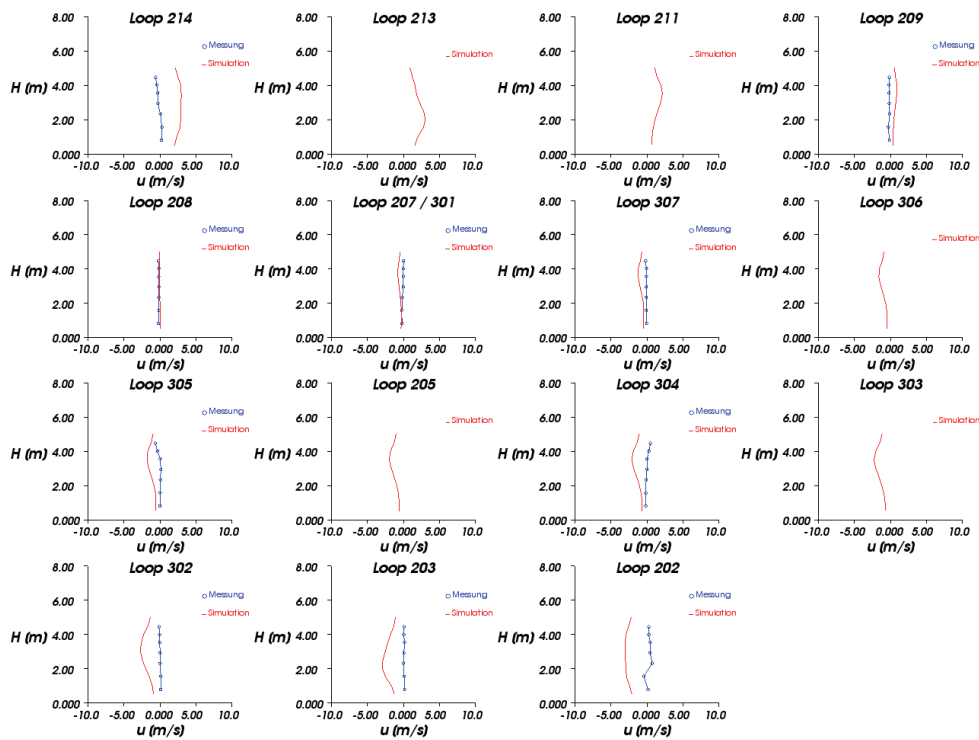


Abbildung 2-1: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach t = 60 sec

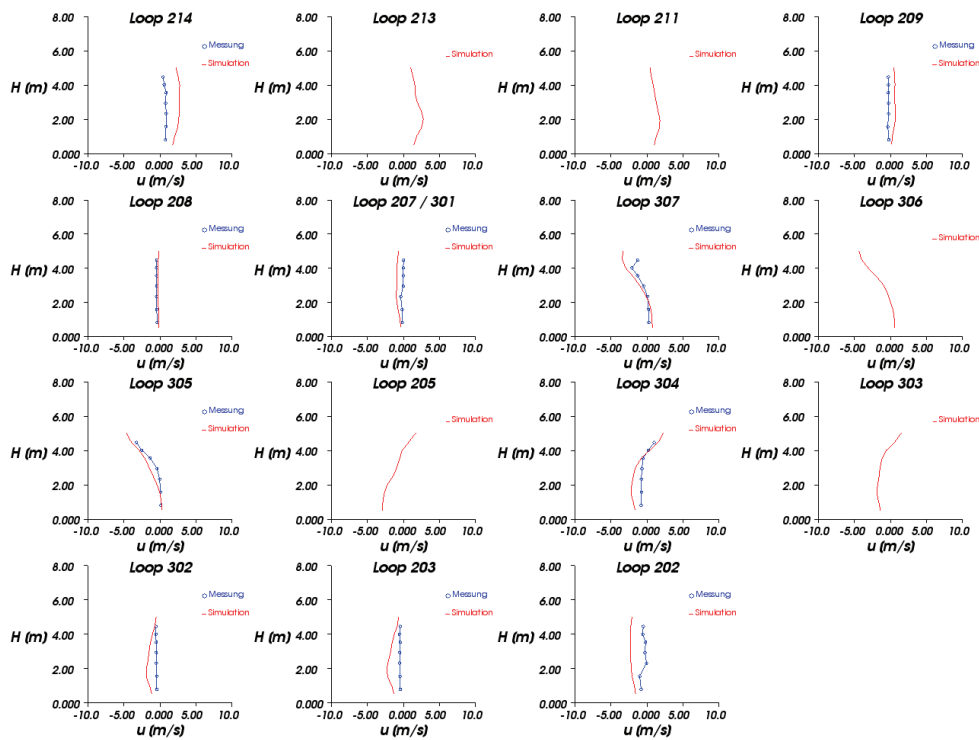


Abbildung 2-2: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach t = 120 sec

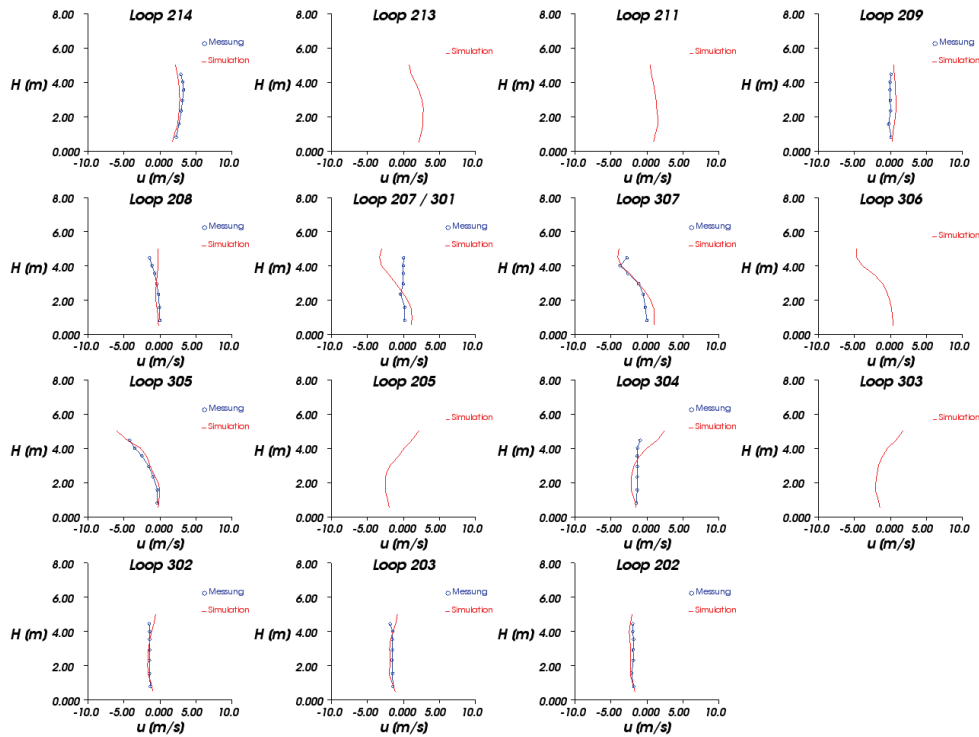


Abbildung 2-3: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 180$ sec

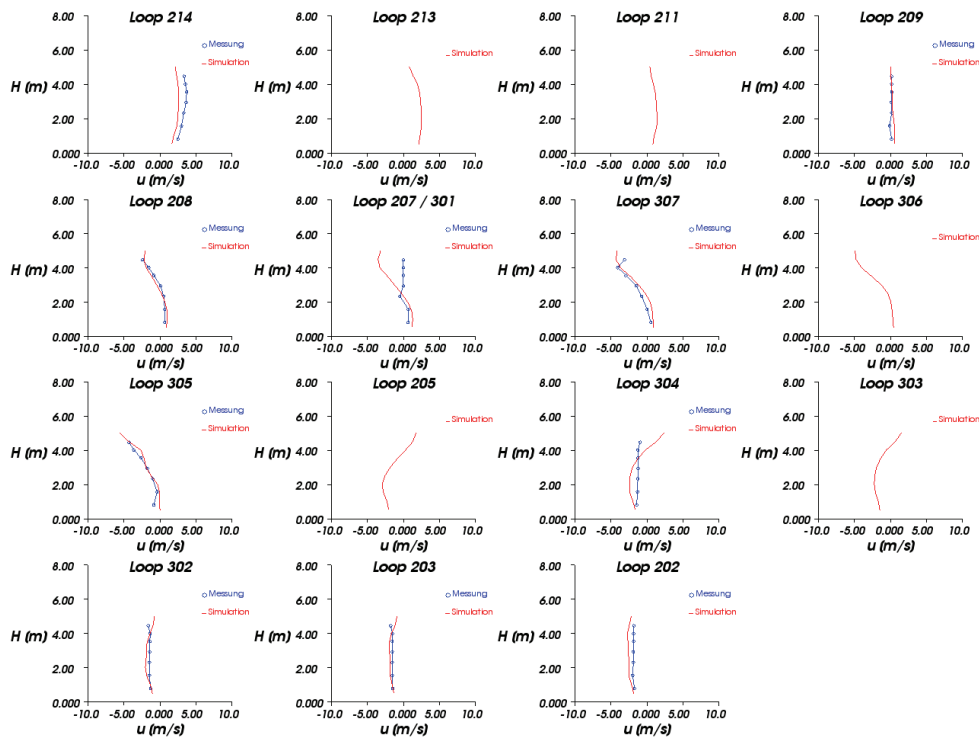


Abbildung 2-4: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 240$ sec

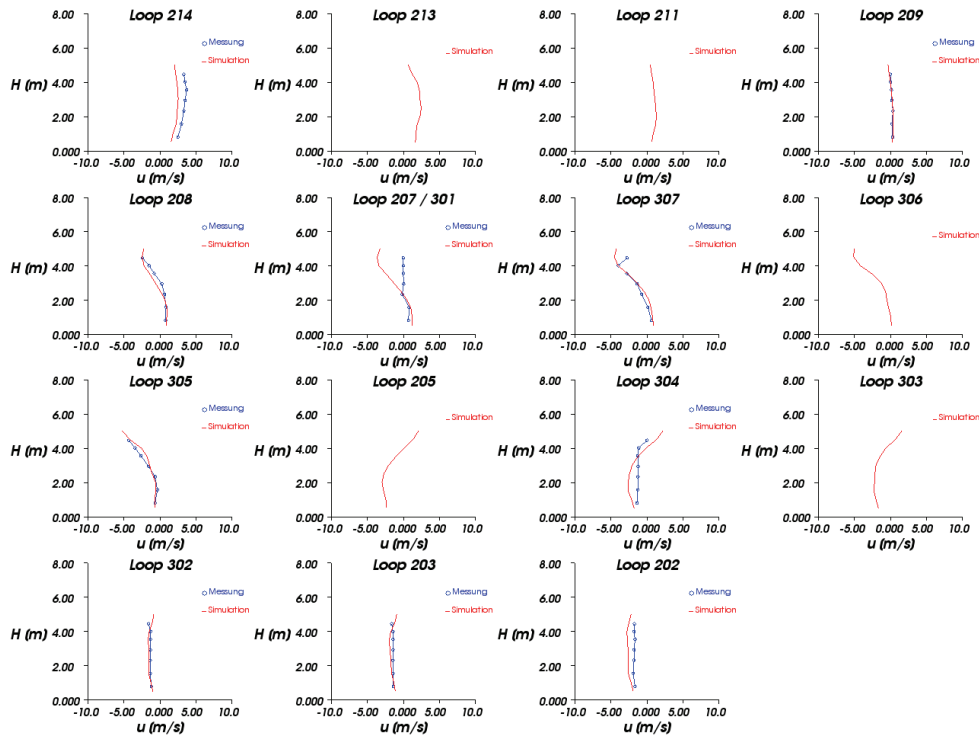


Abbildung 2-5: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 300$ sec

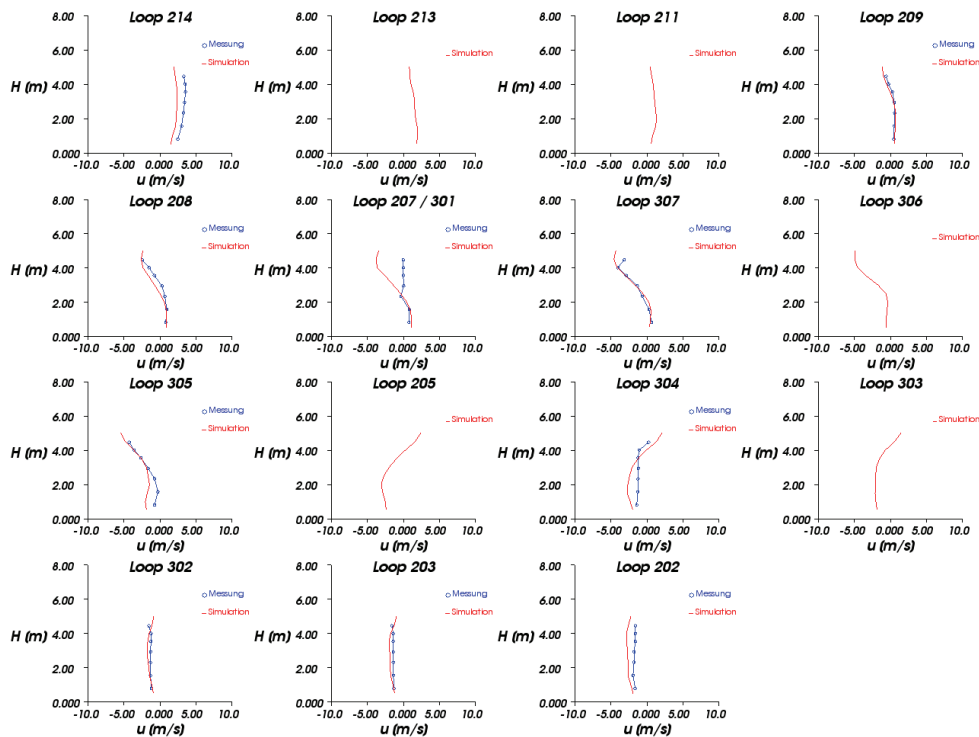


Abbildung 2-6: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 360$ sec

V104 Geschwindigkeiten t=60s

Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [m/s]	2,79	0,64	-0,01	-0,51	-0,79	-1,17	-1,39	-2,03	-2,27	-2,83
Mittelwert Messung [m/s]	-0,09	-0,19	-0,16	-0,10	-0,09	-0,03	0,00	0,03	0,09	0,25
Abweichung MIN [m/s]	2,00	0,53	0,13	0,05	0,34	0,56	0,48	1,08	1,44	2,38
Abweichung MAX [m/s]	3,31	1,10	0,22	0,75	1,14	1,86	2,15	2,70	2,95	3,65
Mittelwert Abweichung [m/s]	2,88	0,83	0,15	0,40	0,70	1,13	1,39	2,06	2,36	3,08
Mittlere Abweichung [%]	35,95	10,34	1,89	5,03	8,73	14,16	17,35	25,75	29,52	38,41
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	1,50									
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	18,71									

V104 Geschwindigkeiten t=360s

Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [m/s]	2,22	0,28	-0,47	-0,97	-1,36	-2,29	-1,71	-1,50	-1,75	-2,62
Mittelwert Messung [m/s]	3,22	0,33	0,00	0,19	-1,32	-1,64	-1,12	-1,28	-1,40	-1,73
Abweichung MIN [m/s]	0,84	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,02	0,46
Abweichung MAX [m/s]	1,22	0,34	0,96	3,78	1,39	1,41	1,46	0,48	0,59	1,24
Mittelwert Abweichung [m/s]	1,00	0,18	0,49	1,37	0,28	0,65	0,98	0,27	0,37	0,89
Mittlere Abweichung [%]	12,52	2,22	6,13	17,14	3,45	8,13	12,19	3,38	4,62	11,10
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	0,65									
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	8,09									

Tabelle 2-1: Abweichungen der Geschwindigkeiten V104

2.4 Temperaturen V104

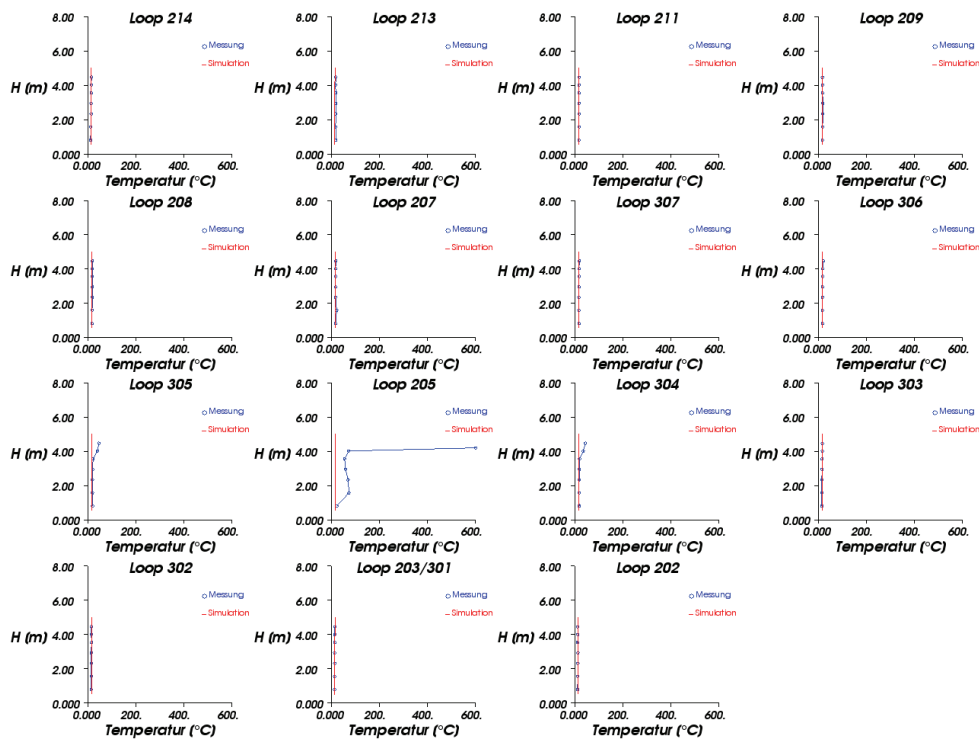


Abbildung 2-7: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 60 sec

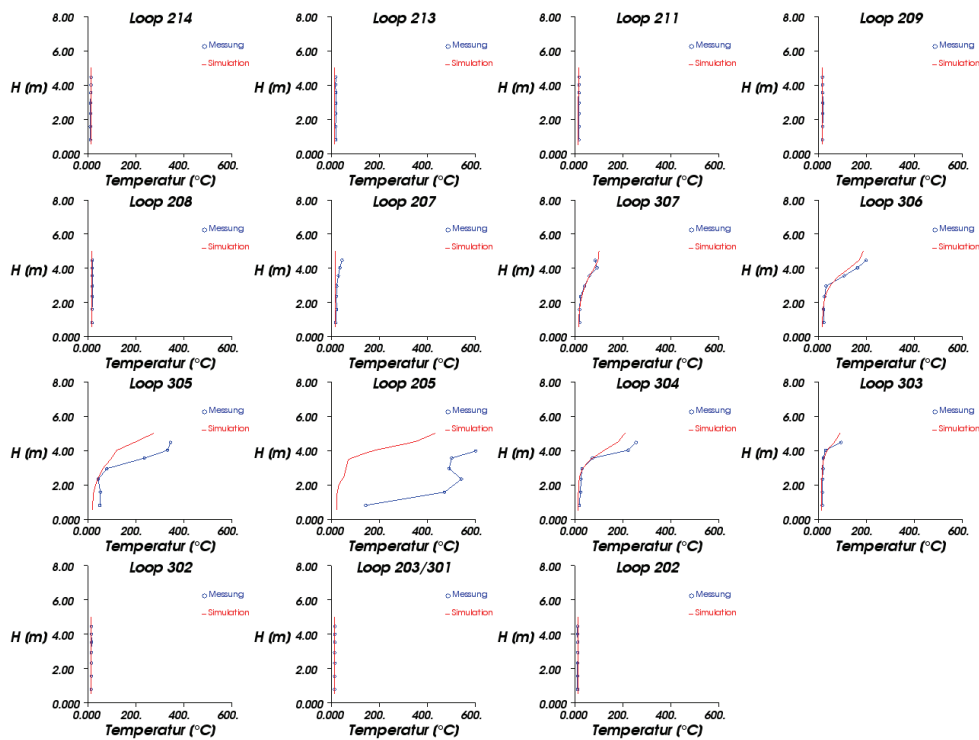


Abbildung 2-8: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 120 sec

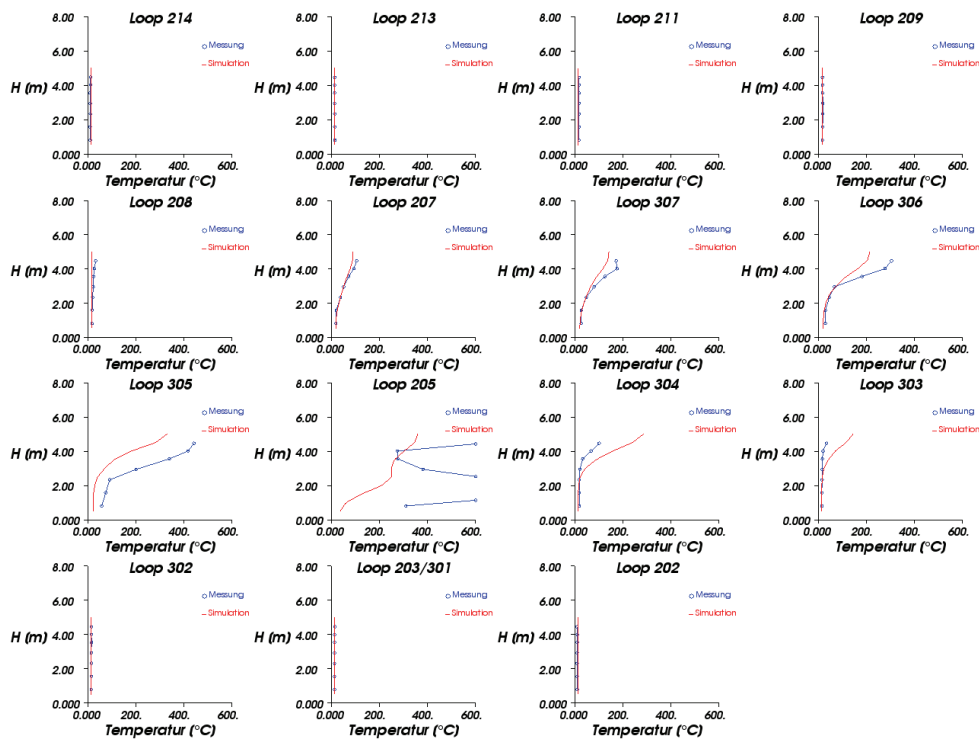


Abbildung 2-9: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 180 sec

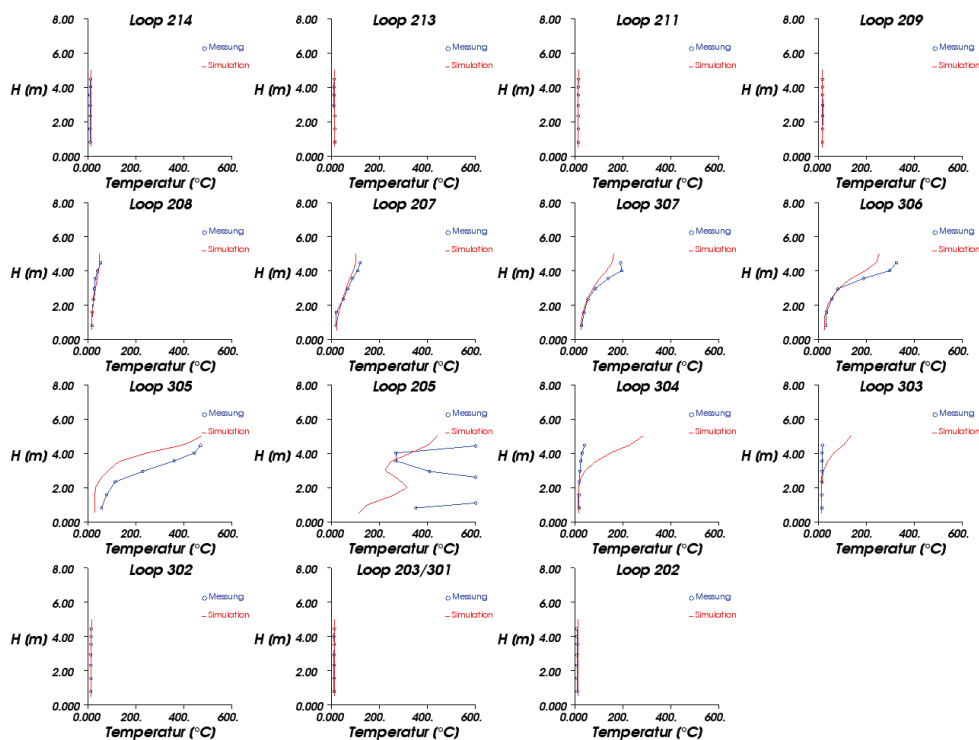


Abbildung 2-10: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 240 sec

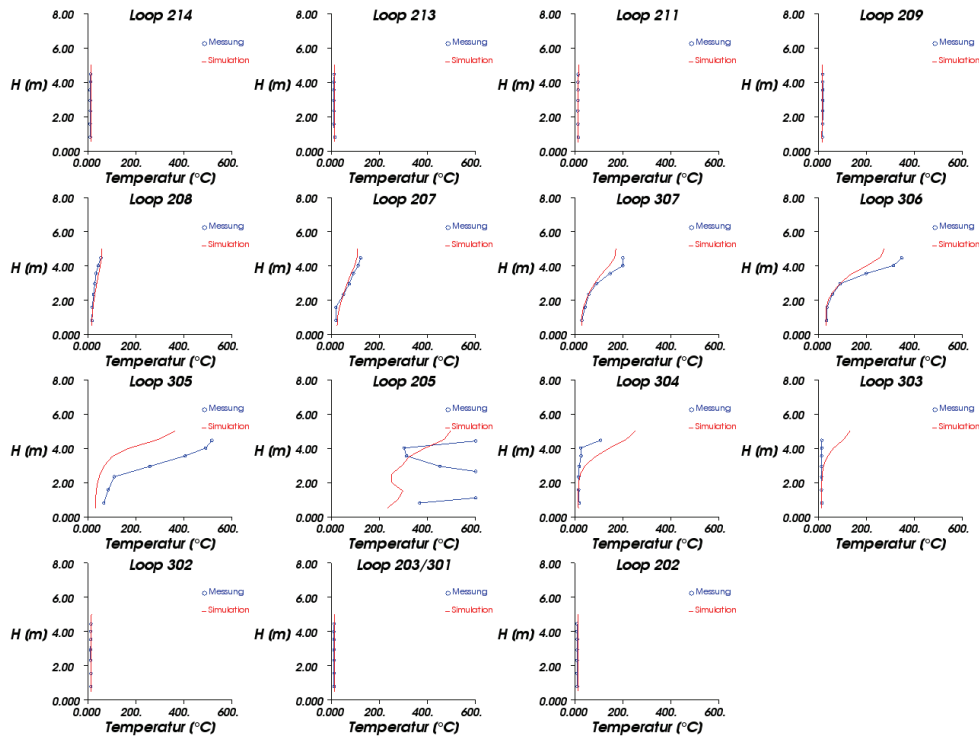


Abbildung 2-11: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 300 sec

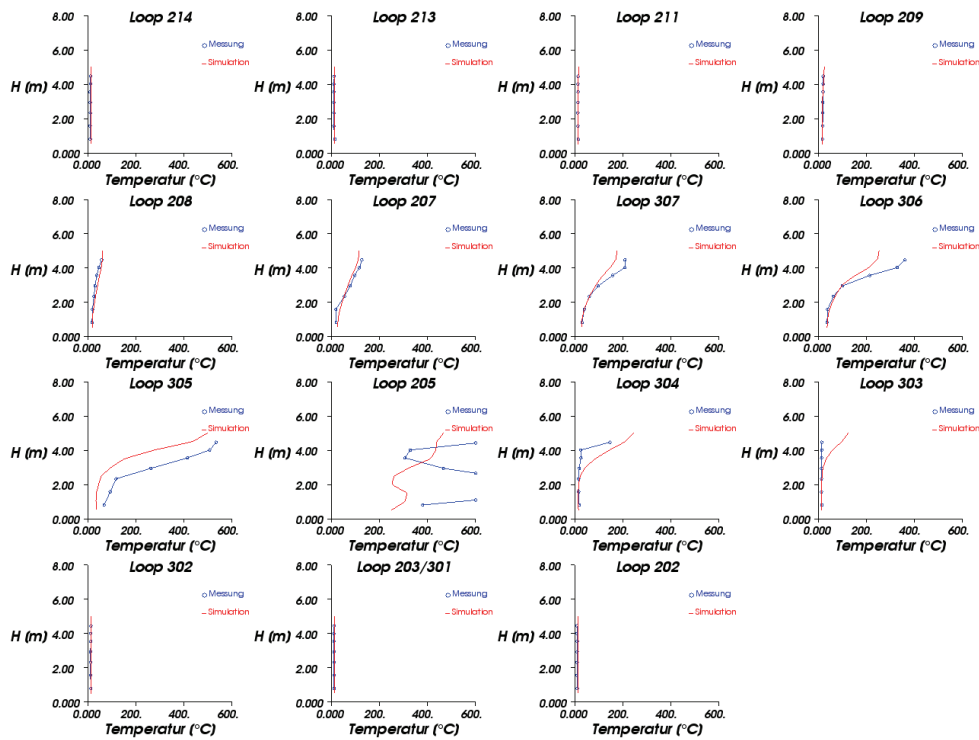


Abbildung 2-12: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 360 sec

V104 Temperaturen t=60s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	14,08	14,89	17,60	17,60	17,60	17,60	17,60	17,60	17,60	17,60	17,60	17,60	17,19	15,14	14,08
Mittelwert Messung [°C]	14,38	19,12	18,57	18,77	19,10	19,69	18,33	18,70	24,88	148,44	23,00	16,14	15,43	14,91	13,06
Abweichung MIN [°C]	0,02	3,11	0,76	0,30	0,76	0,91	0,23	0,53	2,31	6,30	0,84	0,04	0,87	0,00	0,21
Abweichung MAX [°C]	1,74	4,95	1,29	1,70	2,08	5,66	1,70	3,75	29,38	1354,45	26,71	2,36	2,81	0,89	1,89
Mittelwert Abweichung [°C]	1,16	4,23	0,97	1,17	1,50	2,09	0,73	1,10	7,28	130,84	5,40	1,52	1,77	0,34	1,01
Mittlere Abweichung [%]	0,12	0,42	0,10	0,12	0,15	0,21	0,07	0,11	0,73	13,06	0,54	0,15	0,18	0,03	0,10
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	10,74														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	1,07														

V104 Temperaturen t=360s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	14,09	14,97	15,39	18,23	38,17	64,42	83,23	106,97	102,68	336,43	59,44	29,54	15,10	14,93	14,10
Mittelwert Messung [°C]	11,10	12,03	14,24	19,57	31,23	66,77	101,55	135,60	249,67	435,92	28,48	14,63	12,76	12,09	10,38
Abweichung MIN [°C]	1,55	0,10	0,02	0,02	1,06	0,41	0,04	0,02	32,28	3,72	0,16	0,04	1,80	2,54	3,20
Abweichung MAX [°C]	4,22	3,81	1,60	3,41	11,83	17,09	60,88	117,44	295,02	272,43	118,61	79,84	2,82	3,69	4,29
Mittelwert Abweichung [°C]	3,00	3,02	1,16	2,11	6,94	10,20	18,43	33,93	146,99	118,73	32,30	14,96	2,34	2,84	3,72
Mittlere Abweichung [%]	0,30	0,30	0,12	0,21	0,69	1,02	1,84	3,39	14,67	11,85	3,22	1,49	0,23	0,28	0,37
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	26,71														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	2,67														

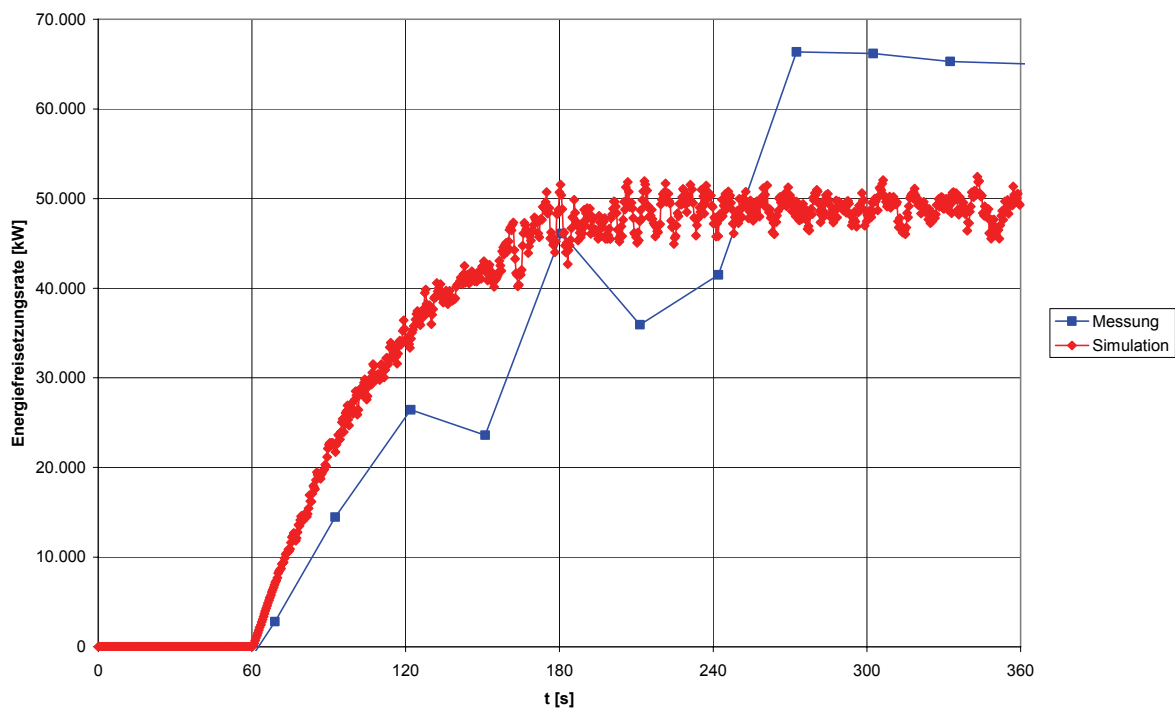
Tabelle 2-2: Abweichungen der Temperaturen V104

3 Brandversuch V111

3.1 Kenndaten Brandversuch V111

Versuchs-Nr.	Brand-leistung	Brand-fläche	Strömungs-geschw. im Verkehrsraum	Aktivieren der Lüftung	Zuluft-menge	Abluft-menge	Temperatur	
							innen	außen
[-]	[MW]	[m ²]	[m/s]	[min]	[m ³ /s/n _{FS} /L]	[m ³ /s/n _{FS} /L]	[°C]	[°C]
111	50	22,5	0,84	0	0,039	0,139	19,5	29

3.2 Energiefreisetzungsrate V111



3.3 Geschwindigkeiten V111

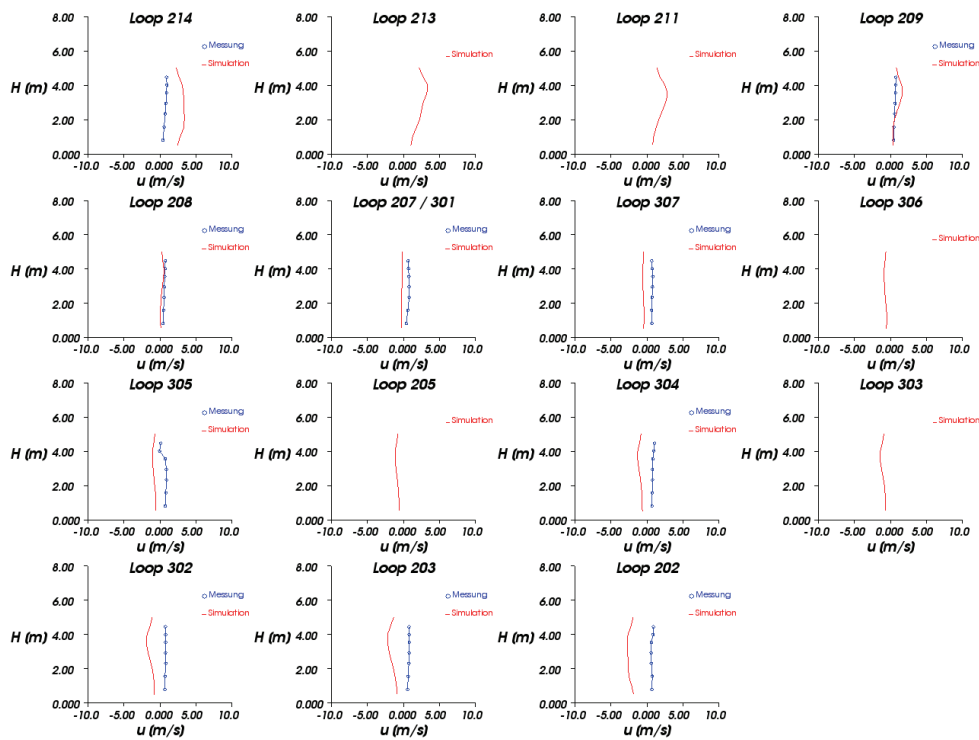


Abbildung 3-1: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 60$ sec

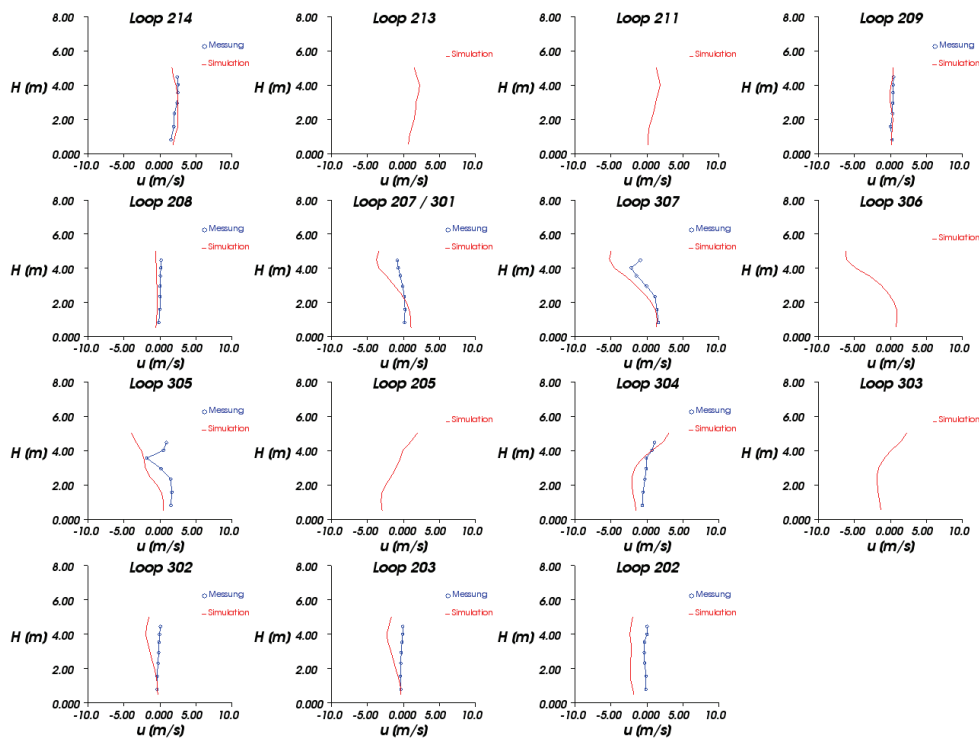


Abbildung 3-2: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 120$ sec

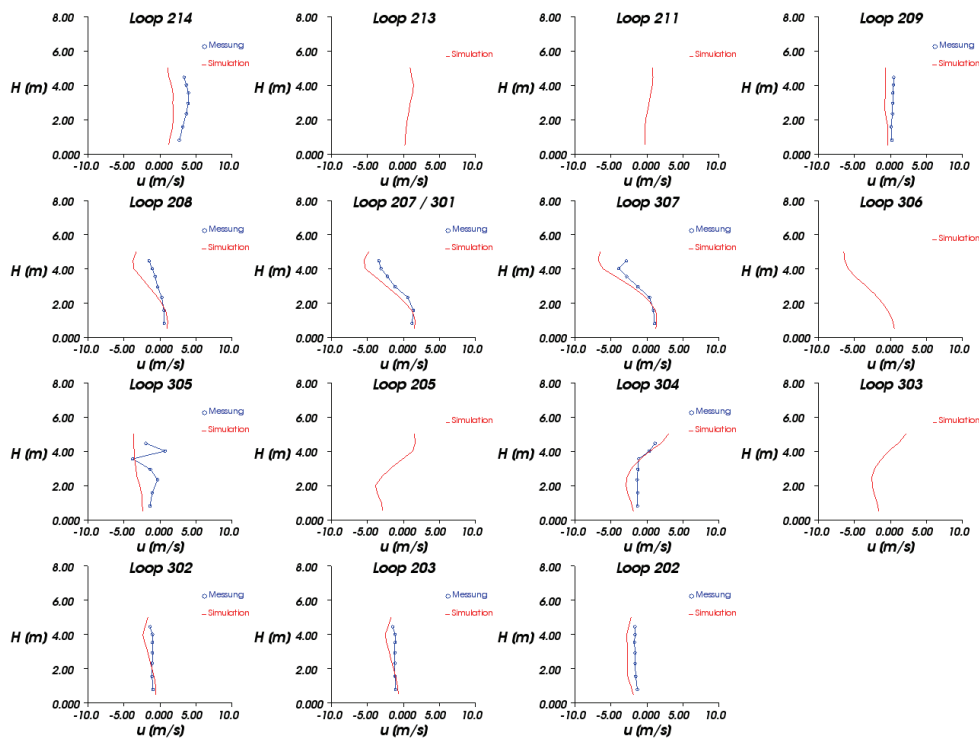


Abbildung 3-3: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 180$ sec

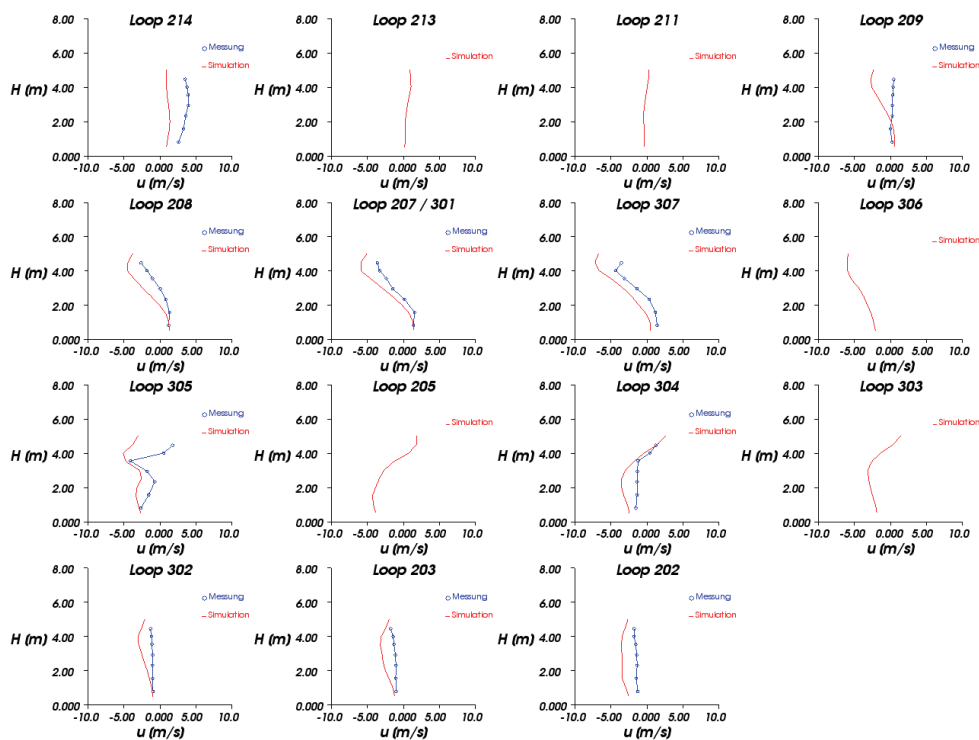


Abbildung 3-4: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 240$ sec

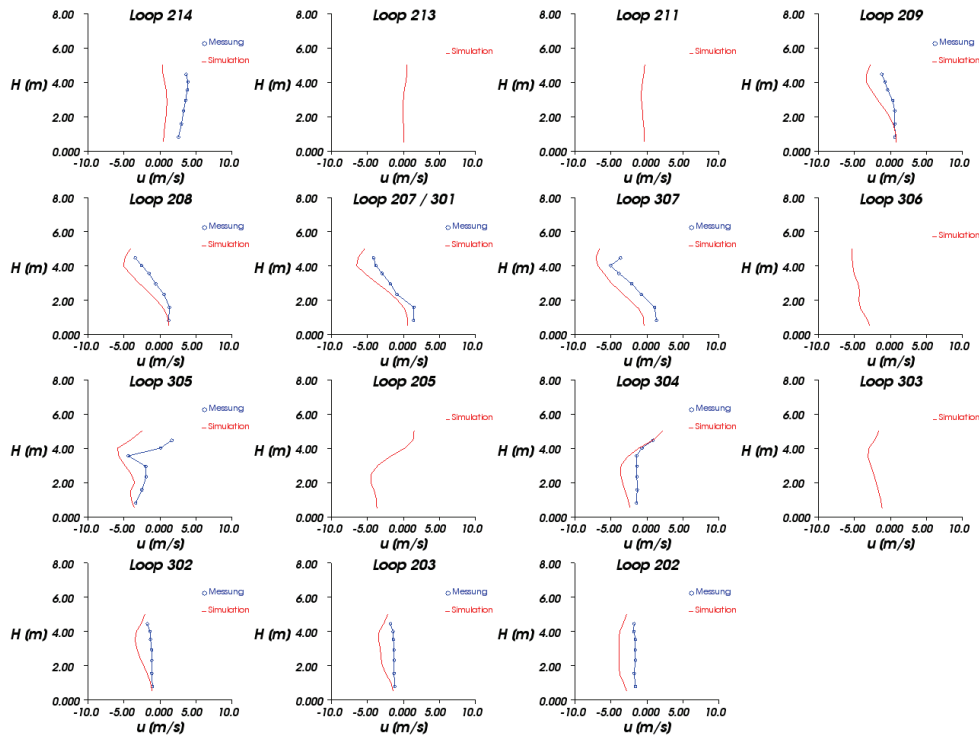


Abbildung 3-5: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 300$ sec

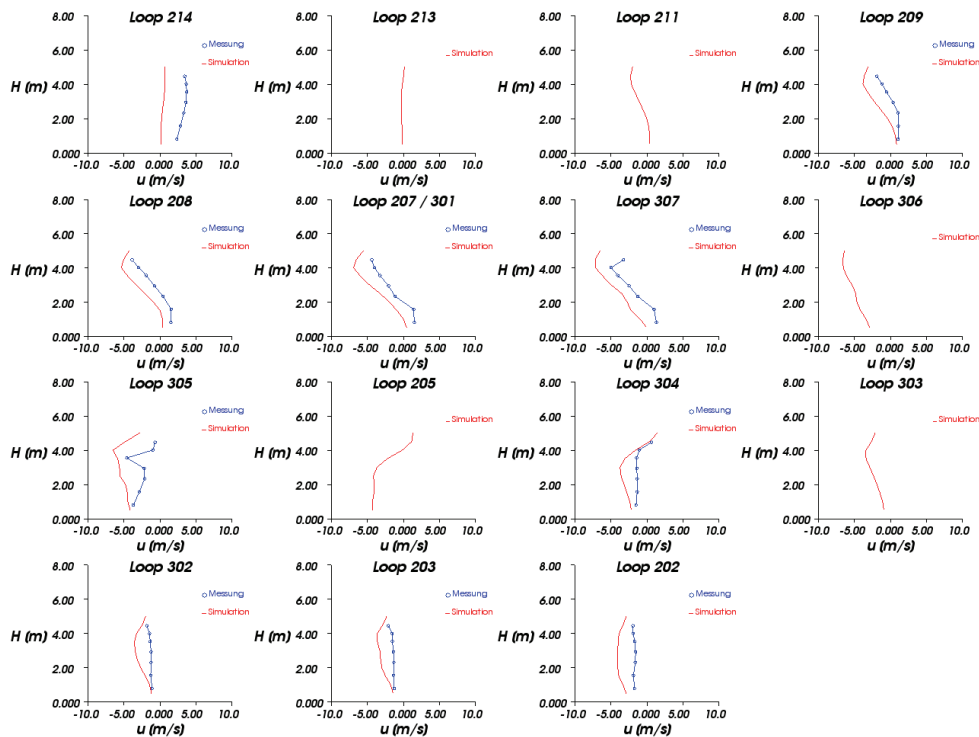


Abbildung 3-6: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 360$ sec

V111 Geschwindigkeiten t=60s													
Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202			
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62			
Mittelwert Simulation [m/s]	3,18	0,99	0,28	-0,23	-0,49	-0,82	-0,96	-1,35	-1,65	-2,52			
Mittelwert Messung [m/s]	0,75	0,61	0,59	0,69	0,72	0,67	0,81	0,76	0,74	0,70			
Abweichung MIN [m/s]	1,74	0,00	0,15	0,66	1,03	0,96	1,35	1,46	1,51	2,69			
Abweichung MAX [m/s]	2,73	0,97	0,46	1,04	1,38	1,83	2,21	2,67	3,01	3,48			
Mittelwert Abweichung [m/s]	2,43	0,43	0,32	0,92	1,21	1,49	1,77	2,11	2,39	3,22			
Mittlere Abweichung [%]	27,29	4,88	3,56	10,30	13,64	16,78	19,92	23,67	26,92	36,16			
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	1,63												
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	18,31												
V111 Geschwindigkeiten t=360s													
Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202			
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62			
Mittelwert Simulation [m/s]	0,41	-1,56	-2,43	-3,59	-4,14	-5,28	-2,69	-2,76	-2,97	-3,83			
Mittelwert Messung m/s]	3,26	0,26	-0,44	-1,34	-1,70	-2,56	-1,21	-1,30	-1,45	-1,73			
Abweichung MIN [m/s]	2,24	0,30	1,16	1,33	1,88	0,63	0,43	0,23	0,34	1,41			
Abweichung MAX [m/s]	3,10	2,66	2,62	2,91	3,92	5,49	2,31	2,20	2,08	2,45			
Mittelwert Abweichung [m/s]	2,86	1,82	1,99	2,25	2,44	2,72	1,48	1,46	1,53	2,10			
Mittlere Abweichung [%]	32,10	20,48	22,36	25,28	27,45	30,57	16,63	16,40	17,15	23,59			
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	2,06												
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	23,20												

Tabelle 3-1: Abweichungen der Geschwindigkeiten V111

Temperaturen V111

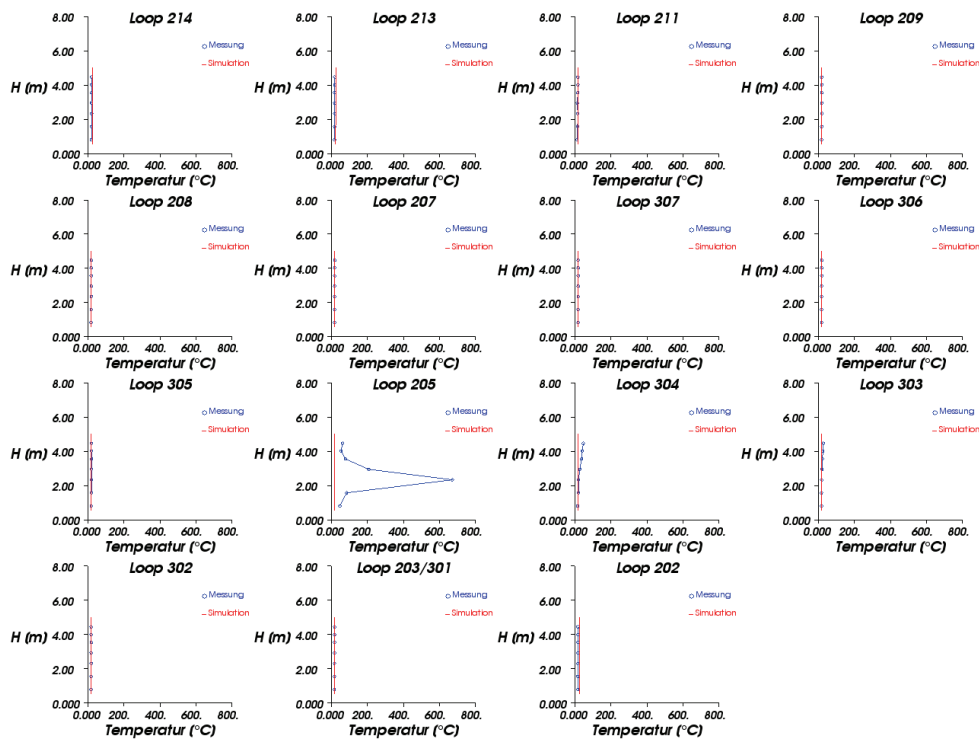


Abbildung 3-7: Temperaturen im Verkehrsraum nach $t = 60$ sec

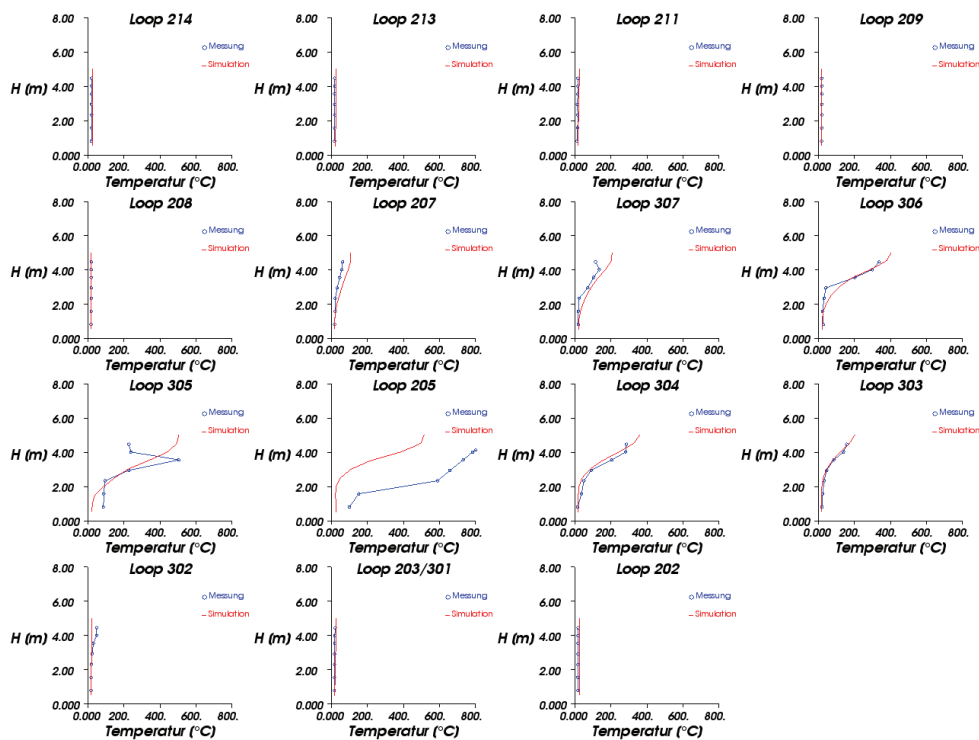


Abbildung 3-8: Temperaturen im Verkehrsraum nach $t = 120$ sec

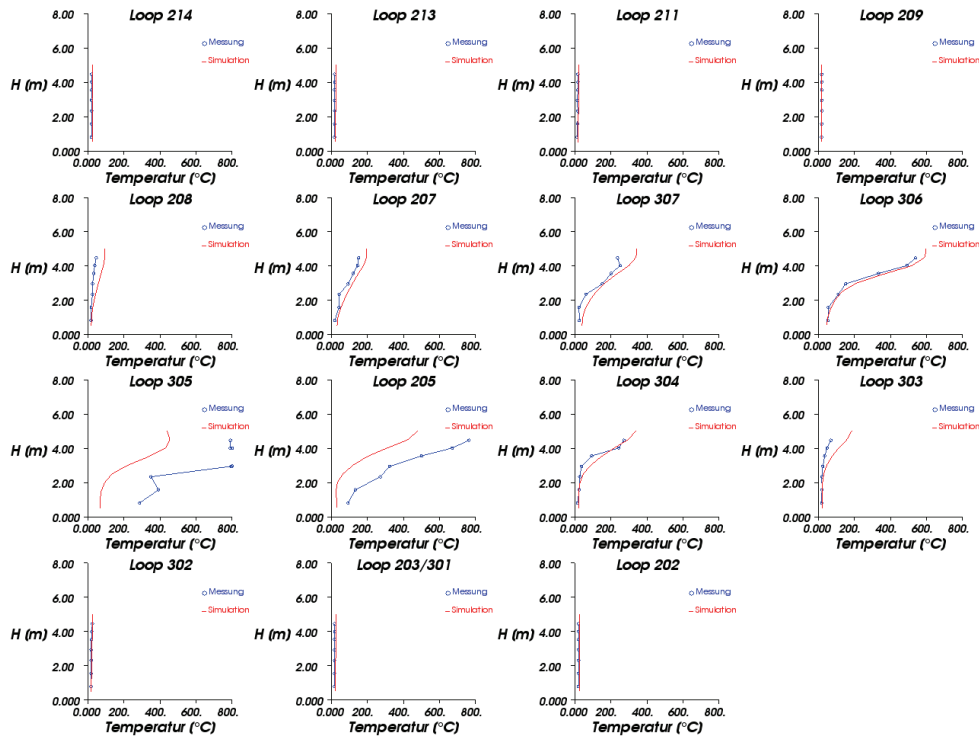


Abbildung 3-9: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 180 sec

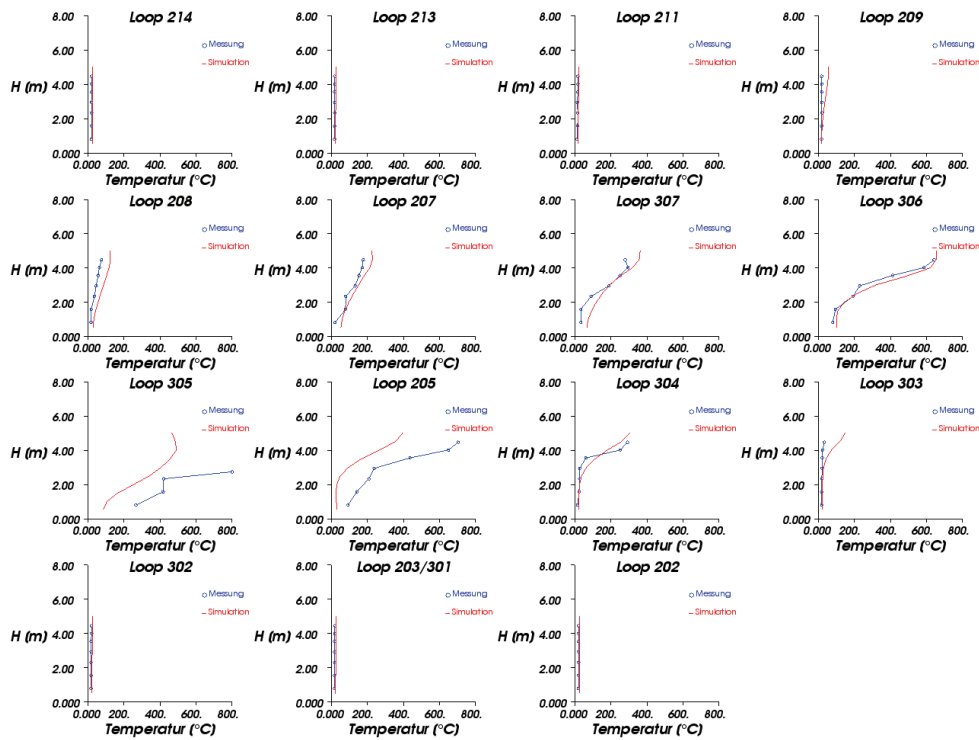


Abbildung 3-10: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 240 sec

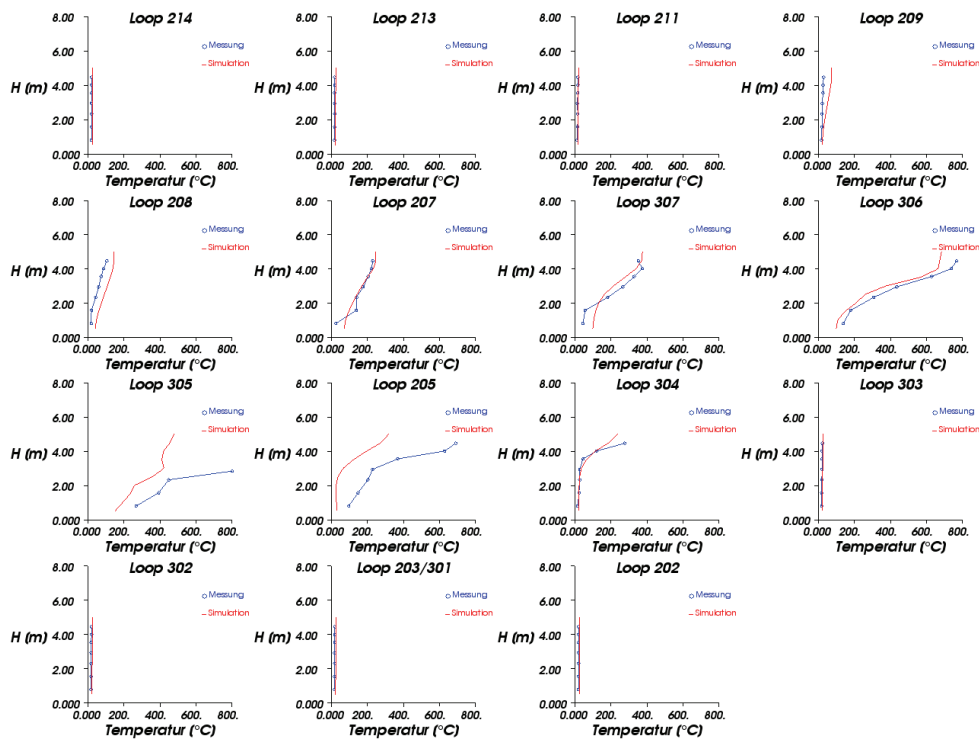


Abbildung 3-11: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 300 sec

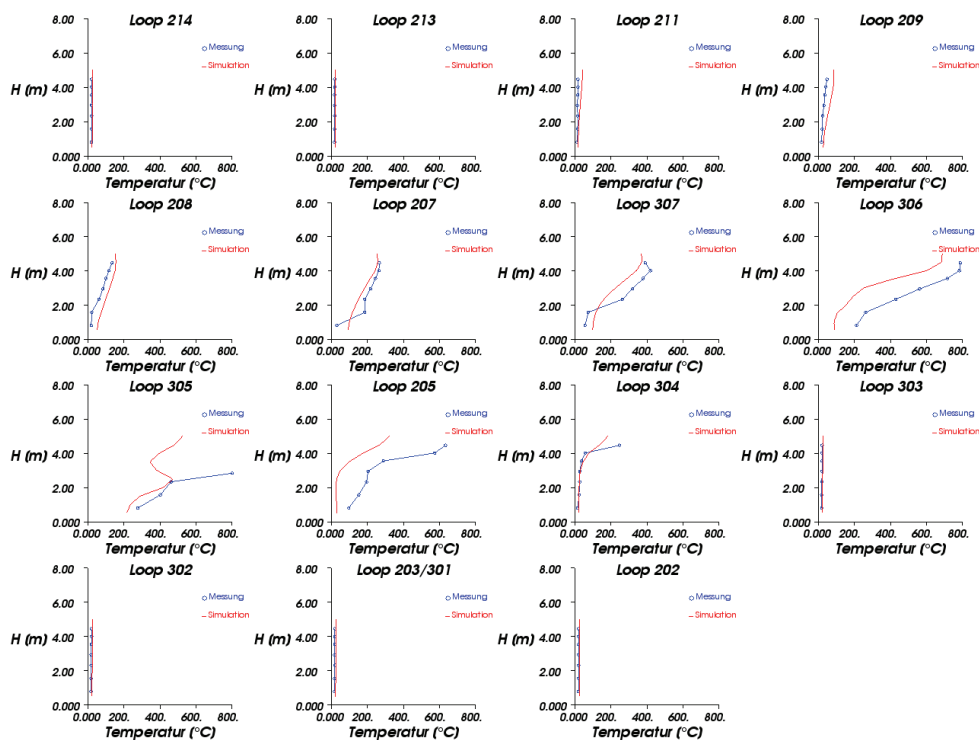


Abbildung 3-12: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 360 sec

V111 Temperaturen t=60s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	28,80	26,39	19,59	19,50	19,50	19,50	19,50	19,50	19,50	19,50	19,50	19,50	19,50	20,05	28,75
Mittelwert Messung [°C]	21,52	19,48	16,79	20,11	19,90	19,43	19,70	19,61	21,05	204,37	28,97	21,67	19,39	18,74	18,56
Abweichung MIN [°C]	6,59	4,68	1,44	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,07	28,90	0,09	0,00	0,00	0,69	9,73
Abweichung MAX [°C]	8,03	8,84	5,55	1,08	0,79	0,50	0,41	0,56	2,21	640,88	28,74	9,63	0,91	2,24	10,39
Mittelwert Abweichung [°C]	7,28	6,91	2,80	0,65	0,49	0,13	0,21	0,17	1,55	184,87	9,83	2,69	0,31	1,31	10,19
Mittlere Abweichung [%]	0,55	0,52	0,21	0,05	0,04	0,01	0,02	0,01	0,12	13,98	0,74	0,20	0,02	0,10	0,77
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	15,26														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	1,16														

V111 Temperaturen t=360s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	26,96	22,72	29,78	58,72	109,04	171,58	209,27	285,03	354,72	76,42	43,27	25,12	25,98	26,54	28,82
Mittelwert Messung [°C]	21,52	19,48	16,79	30,57	70,72	198,11	256,03	501,68	699,80	176,19	46,13	20,85	20,06	19,45	21,52
Abweichung MIN [°C]	3,76	1,98	5,45	11,20	20,66	0,38	3,36	109,82	120,77	32,53	0,02	3,53	4,67	6,22	6,83
Abweichung MAX [°C]	6,63	4,81	24,36	41,68	52,85	67,01	104,89	324,73	810,66	210,95	113,05	4,87	7,34	8,40	7,82
Mittelwert Abweichung [°C]	5,44	3,25	12,99	28,15	38,32	33,78	66,88	216,65	345,08	99,76	10,86	4,28	5,92	7,09	7,30
Mittlere Abweichung [%]	0,40	0,24	0,95	2,06	2,80	2,47	4,89	15,85	25,24	7,30	0,79	0,31	0,43	0,52	0,53
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	59,05														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	4,32														

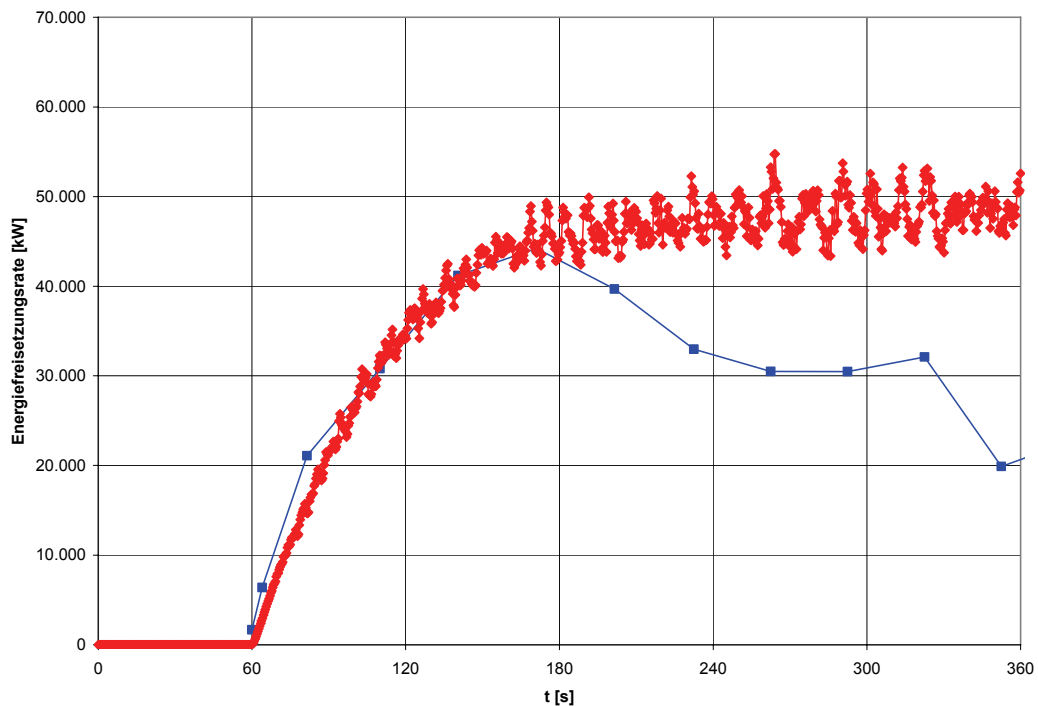
Tabelle 3-2: Abweichungen der Temperaturen V111

4 Brandversuch V113 A

4.1 Kenndaten Brandversuch V113 A

Versuchs-Nr.	Brandleistung	Brandfläche	Strömungsgeschw. im Verkehrsraum	Aktivieren der Lüftung	Zuluftmenge	Abluftmenge	Temperatur	
							innen	außen
[-]	[MW]	[m ²]	[m/s]	[min]	[m ³ /s/n _{FS} /L]	[m ³ /s/n _{FS} /L]	[°C]	[°C]
113A	50	22,5	- 0,67	0	0,155	0,155	15,1	-

4.2 Energiefreisetzungsrate V113 A



4.3 Geschwindigkeiten V113 A

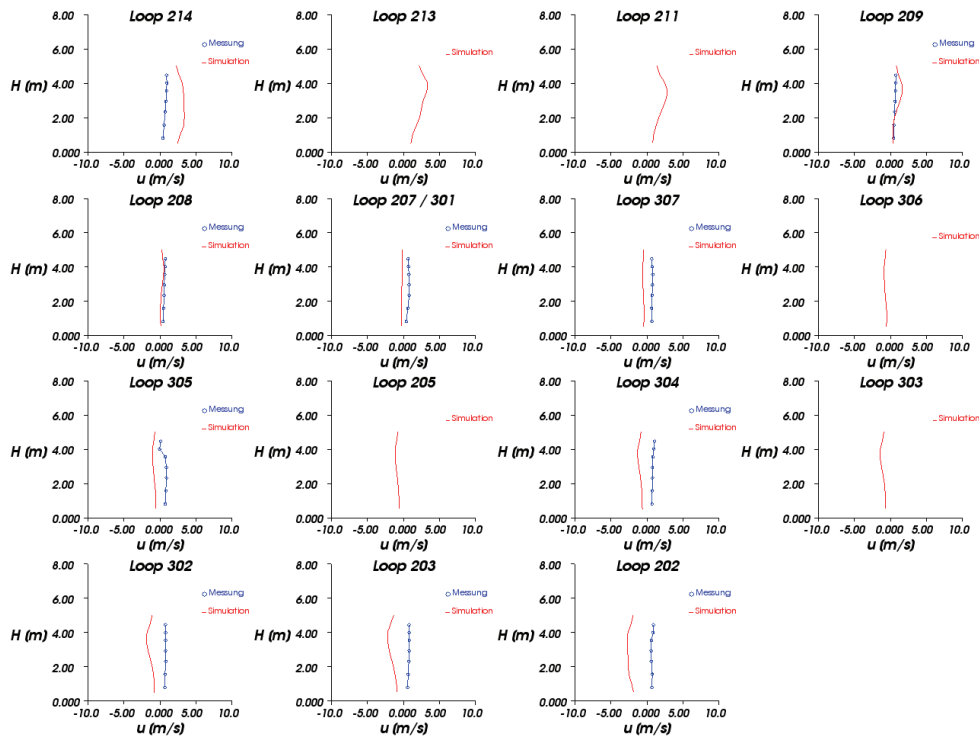


Abbildung 4-1: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 60$ sec

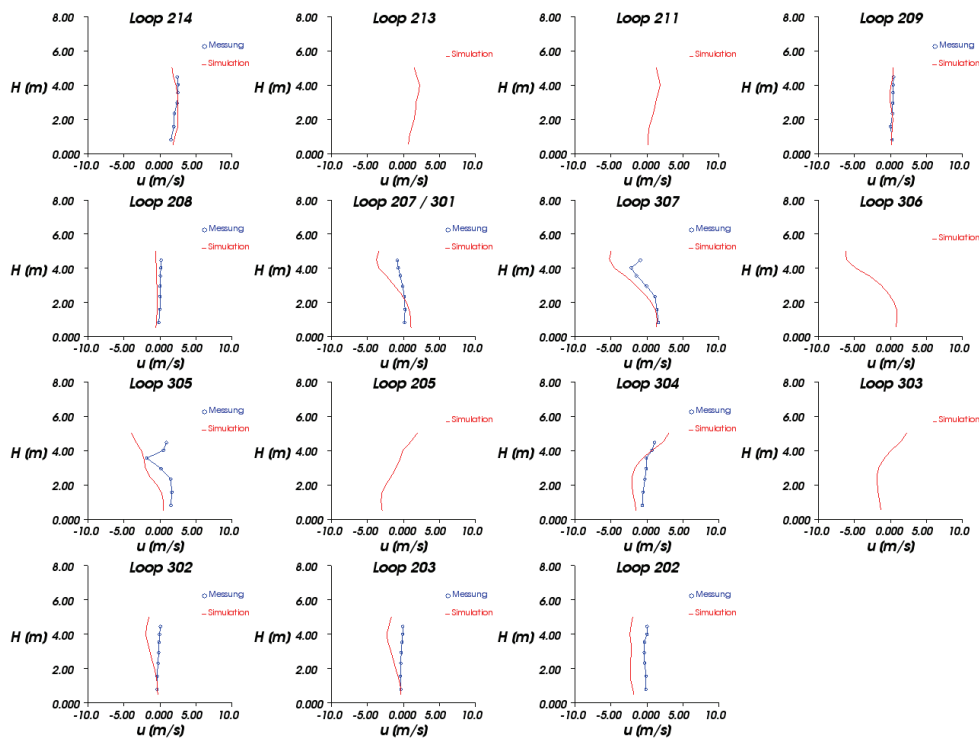


Abbildung 4-2: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 120$ sec

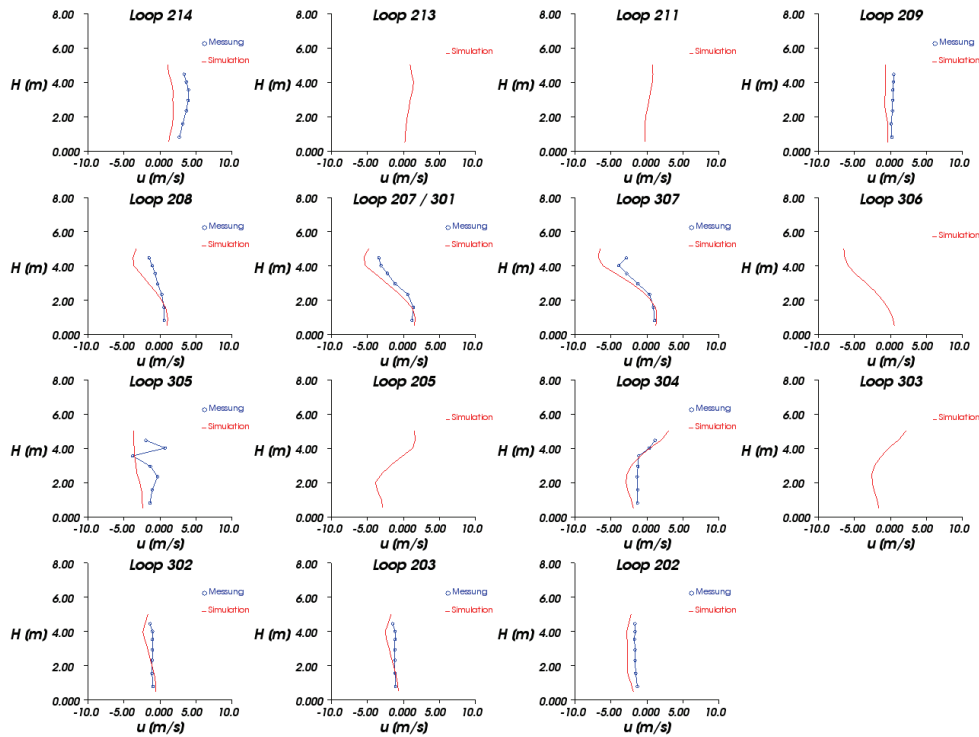


Abbildung 4-3: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 180$ sec

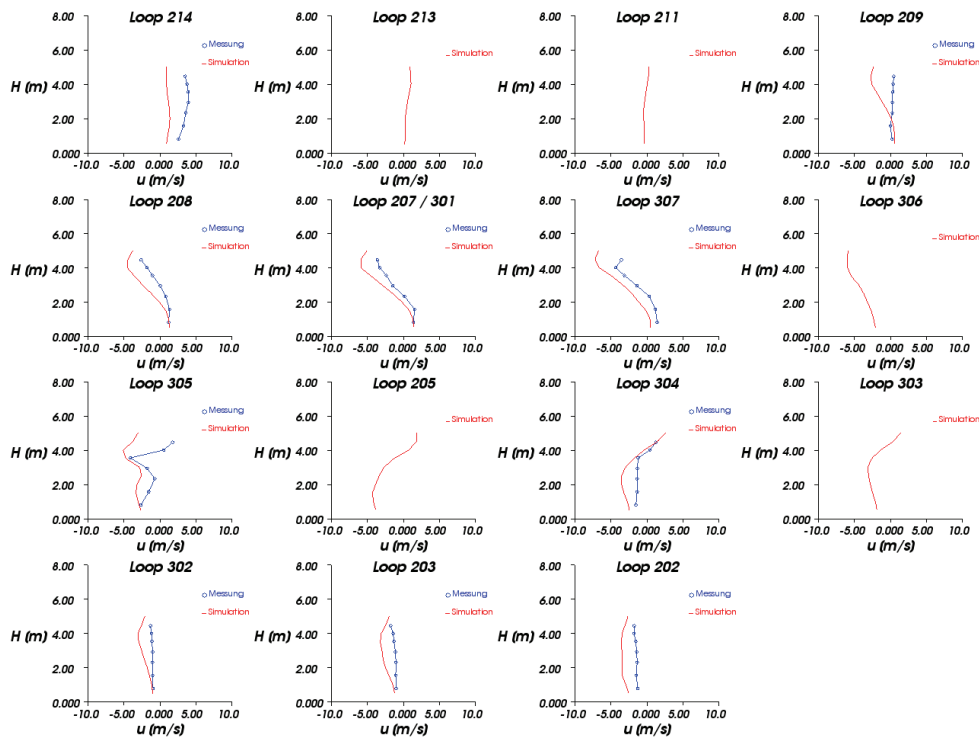


Abbildung 4-4: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 240$ sec

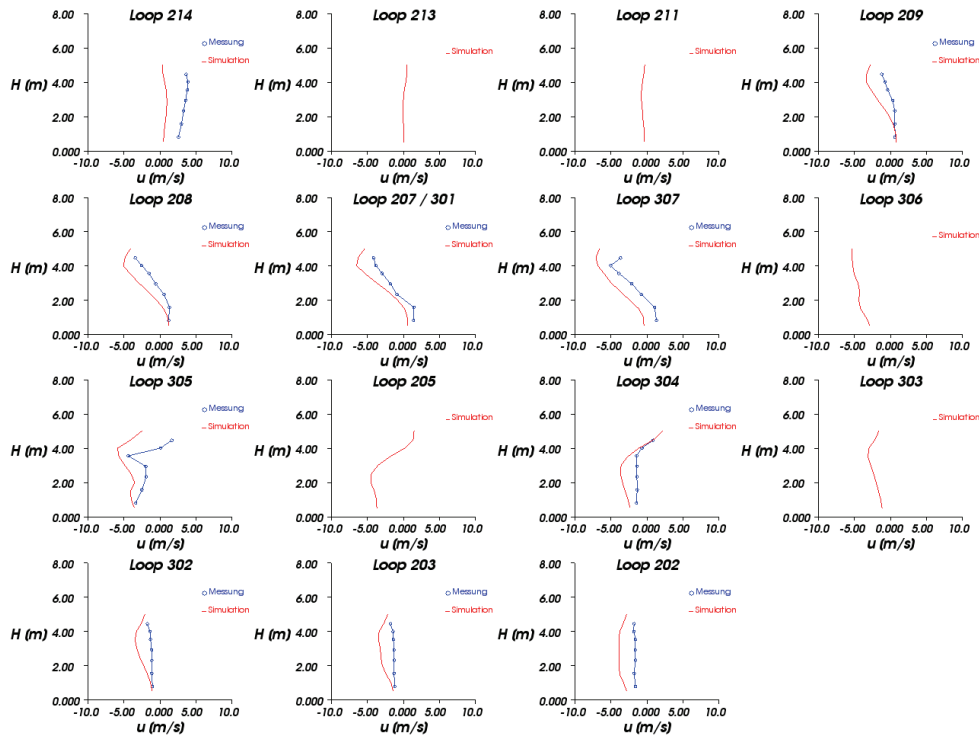


Abbildung 4-5: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 300$ sec

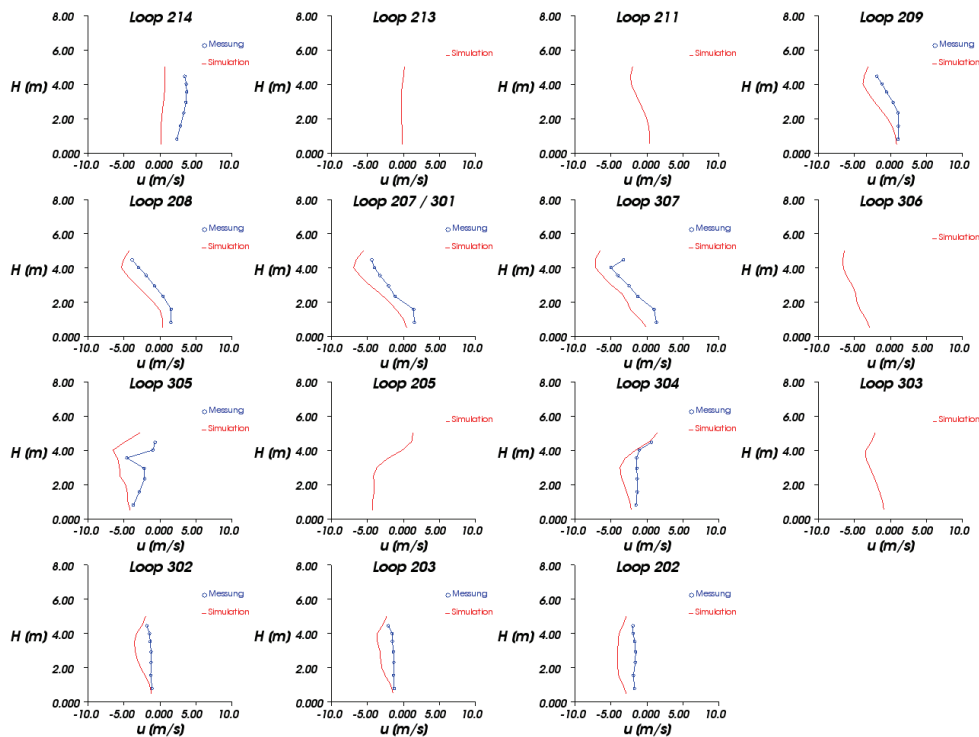


Abbildung 4-6: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 360$ sec

V113 A Geschwindigkeiten t=60s

Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [m/s]	0,61	-0,09	-0,37	-0,62	-0,79	-0,88	-0,94	-1,10	-1,34	-1,49
Mittelwert Messung [m/s]	0,74	-1,29	-1,28	-1,08	-0,86	-1,12	-0,87	-0,21	-0,18	0,44
Abweichung MIN [m/s]	0,01	1,13	0,67	0,01	0,00	0,04	0,00	0,44	0,74	1,60
Abweichung MAX [m/s]	0,31	1,31	1,01	0,93	0,21	1,16	0,48	1,12	1,45	2,13
Mittelwert Abweichung [m/s]	0,14	1,20	0,91	0,57	0,08	0,24	0,11	0,89	1,15	1,93
Mittlere Abweichung [%]	2,06	18,30	13,84	8,62	1,27	3,73	1,75	13,61	17,59	29,37
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	0,72									
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	11,01									

V113 A Geschwindigkeiten t=360s

Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [m/s]	-0,95	-1,43	-1,75	-2,04	-2,32	-1,69	-1,15	-0,91	-1,17	-1,24
Mittelwert Messung m/s]	0,00	-1,88	-1,98	-2,27	-2,51	-2,54	-1,00	-0,25	-0,26	0,19
Abweichung MIN [m/s]	0,31	0,00	0,01	0,00	0,01	0,03	0,00	0,19	0,55	1,14
Abweichung MAX [m/s]	1,13	0,94	0,73	1,19	3,22	2,32	1,68	1,63	1,18	1,54
Mittelwert Abweichung [m/s]	0,94	0,45	0,37	0,56	0,91	1,01	0,80	0,66	0,91	1,42
Mittlere Abweichung [%]	14,34	6,91	5,57	8,49	13,84	15,47	12,25	10,00	13,92	21,73
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	0,80									
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	12,25									

Tabelle 4-1: Abweichungen der Geschwindigkeiten V113A

4.4 Temperaturen V113 A

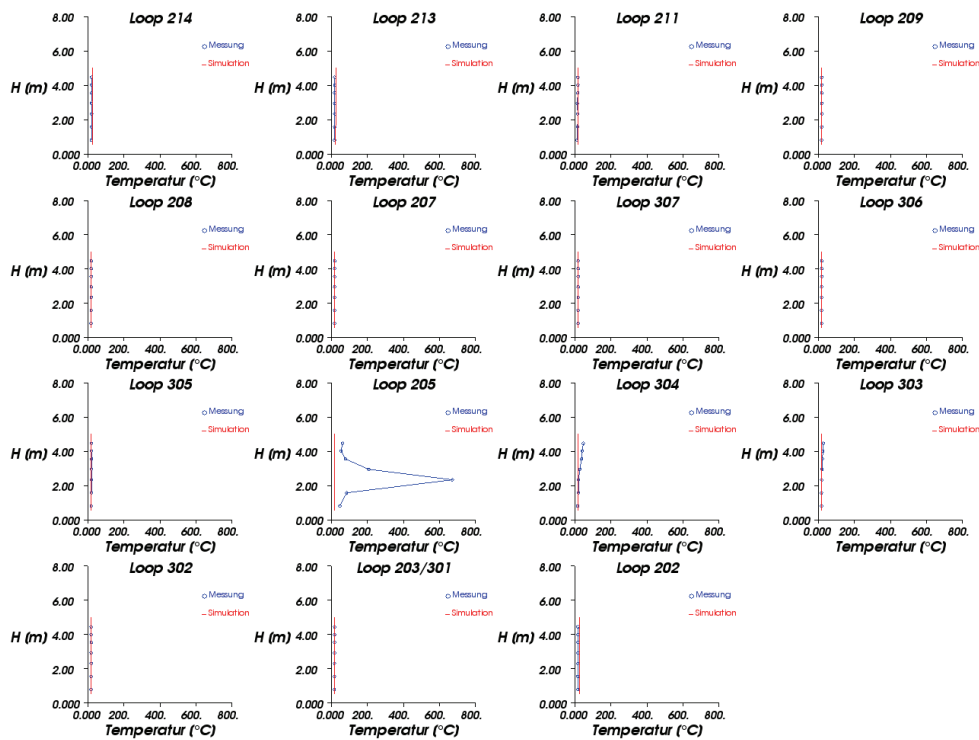


Abbildung 4-7: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 60 sec

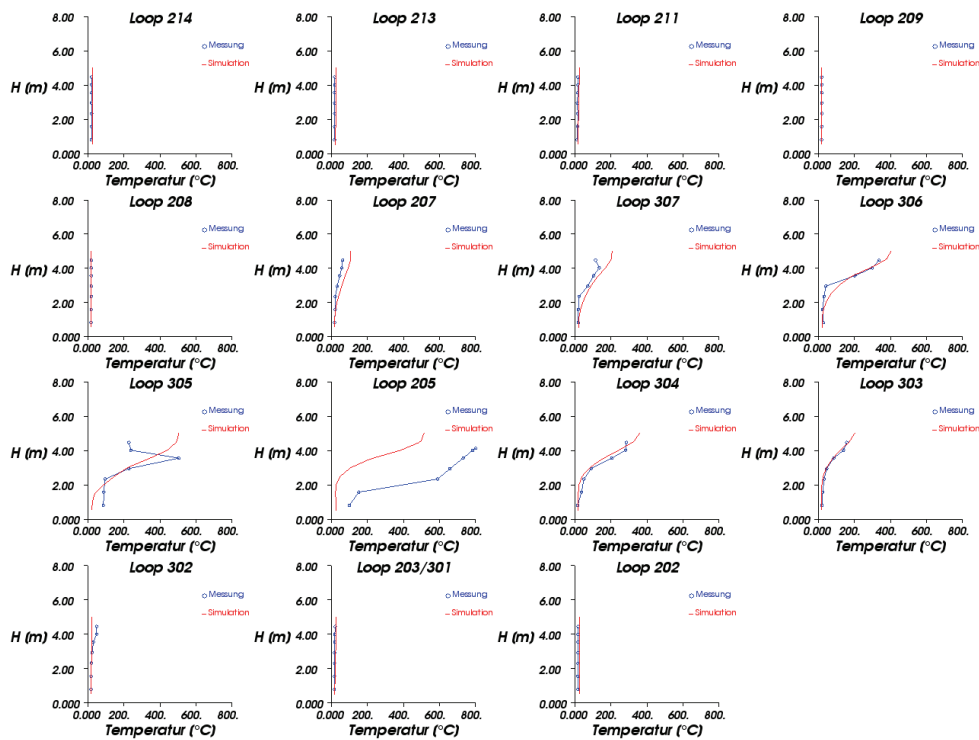


Abbildung 4-8: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 120 sec

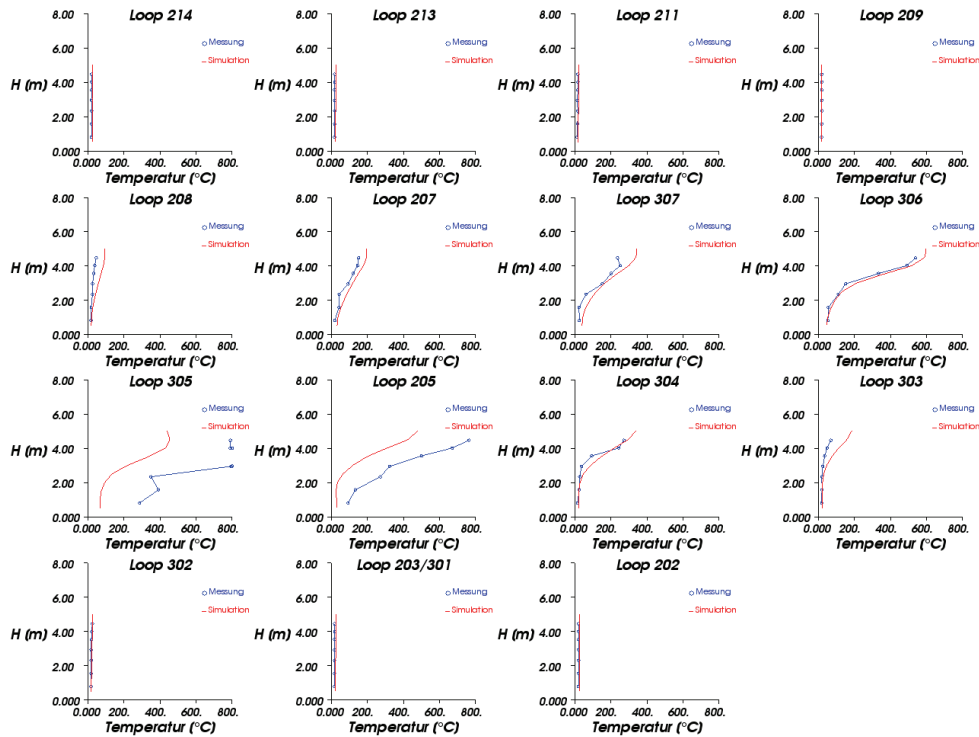


Abbildung 4-9: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 180 sec

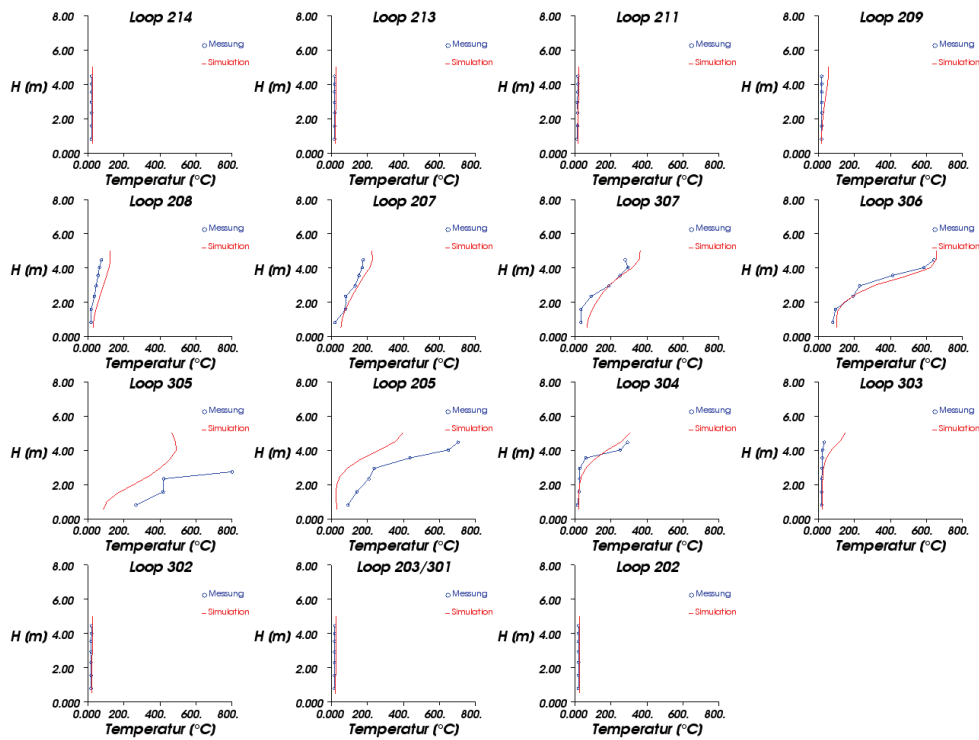


Abbildung 4-10: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 240 sec

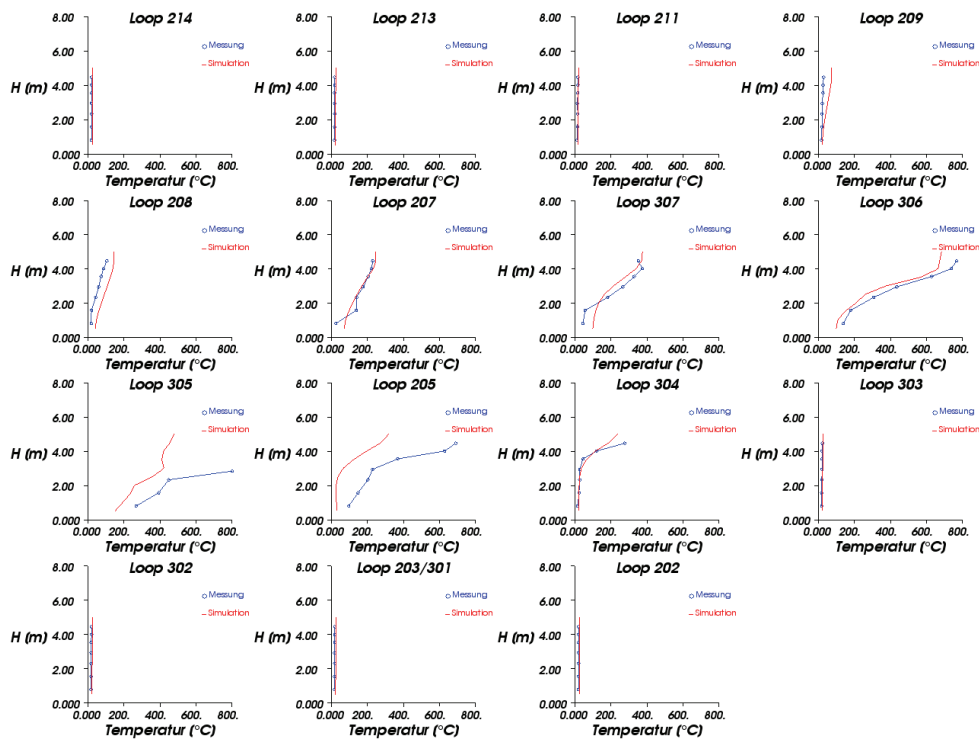


Abbildung 4-11: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 300 sec

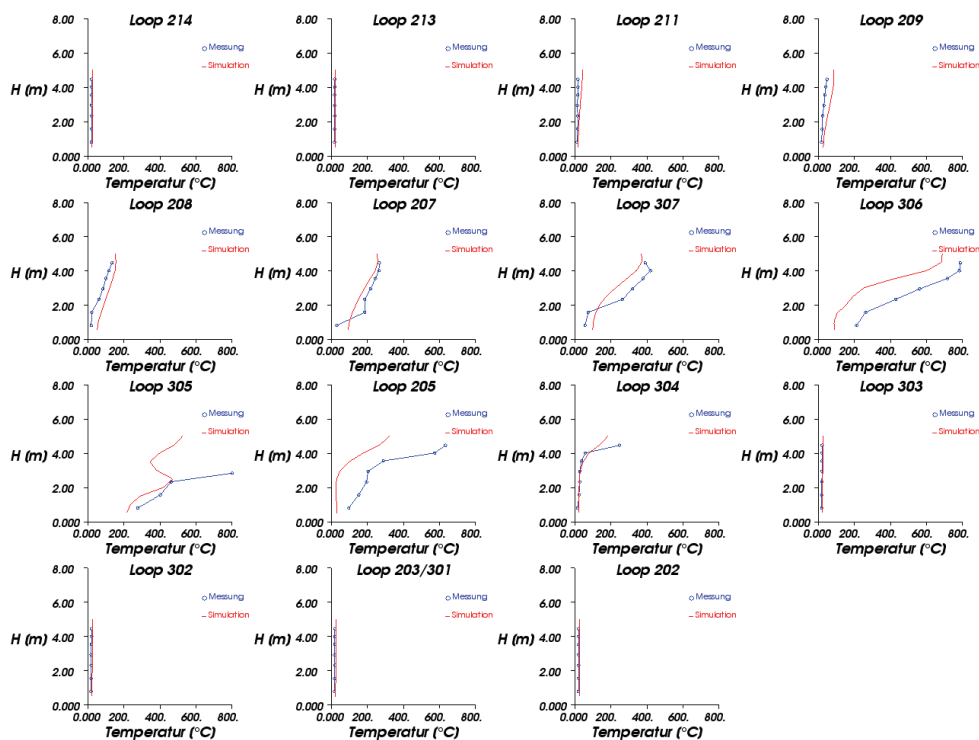


Abbildung 4-12: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 360 sec

V113 A Temperaturen t=60s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	15,10	15,10	15,10	15,10	15,10	15,10	15,10	15,10	15,10	15,10	15,10	15,10	15,10	15,10	15,10
Mittelwert Messung [°C]	15,06	15,06	15,11	15,55	15,48	15,08	15,29	15,92	23,20	25,78	15,00	14,98	14,92	14,12	15,08
Abweichung MIN [°C]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,02	2,62	0,37	0,00	0,00	0,00	0,55	0,00
Abweichung MAX [°C]	0,39	0,39	0,25	0,85	0,55	0,34	0,60	4,47	22,81	20,98	1,88	1,57	0,67	1,28	0,70
Mittelwert Abweichung [°C]	0,17	0,12	0,06	0,52	0,38	0,11	0,20	1,36	8,10	10,68	0,38	0,31	0,23	0,98	0,21
Mittlere Abweichung [%]	0,01	0,01	0,00	0,04	0,03	0,01	0,01	0,10	0,59	0,78	0,03	0,02	0,02	0,07	0,02
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	1,59														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	0,12														

V113 A Temperaturen t=360s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	15,10	15,10	17,87	30,21	62,44	119,07	161,83	280,52	366,13	265,65	112,51	61,62	15,26	15,10	15,10
Mittelwert Messung [°C]	15,06	15,37	20,55	30,15	64,92	161,81	252,00	406,85	853,97	279,67	35,64	14,98	14,92	14,12	15,09
Abweichung MIN [°C]	0,00	0,00	0,20	0,02	0,01	1,93	26,07	0,56	297,24	2,61	0,12	2,04	0,13	0,55	0,00
Abweichung MAX [°C]	0,39	0,44	3,78	4,64	22,52	57,22	146,10	192,89	891,21	121,64	226,45	176,23	1,04	1,28	0,70
Mittelwert Abweichung [°C]	0,17	0,27	2,68	2,56	4,67	42,73	90,16	126,99	487,84	45,43	78,22	46,64	0,34	0,98	0,21
Mittlere Abweichung [%]	0,01	0,02	0,20	0,19	0,34	3,13	6,59	9,29	35,68	3,32	5,72	3,41	0,02	0,07	0,02
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	61,99														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	4,53														

Tabelle 4-2: Abweichungen der Temperaturen V113A

Brandversuche mit Halbquerlüftung

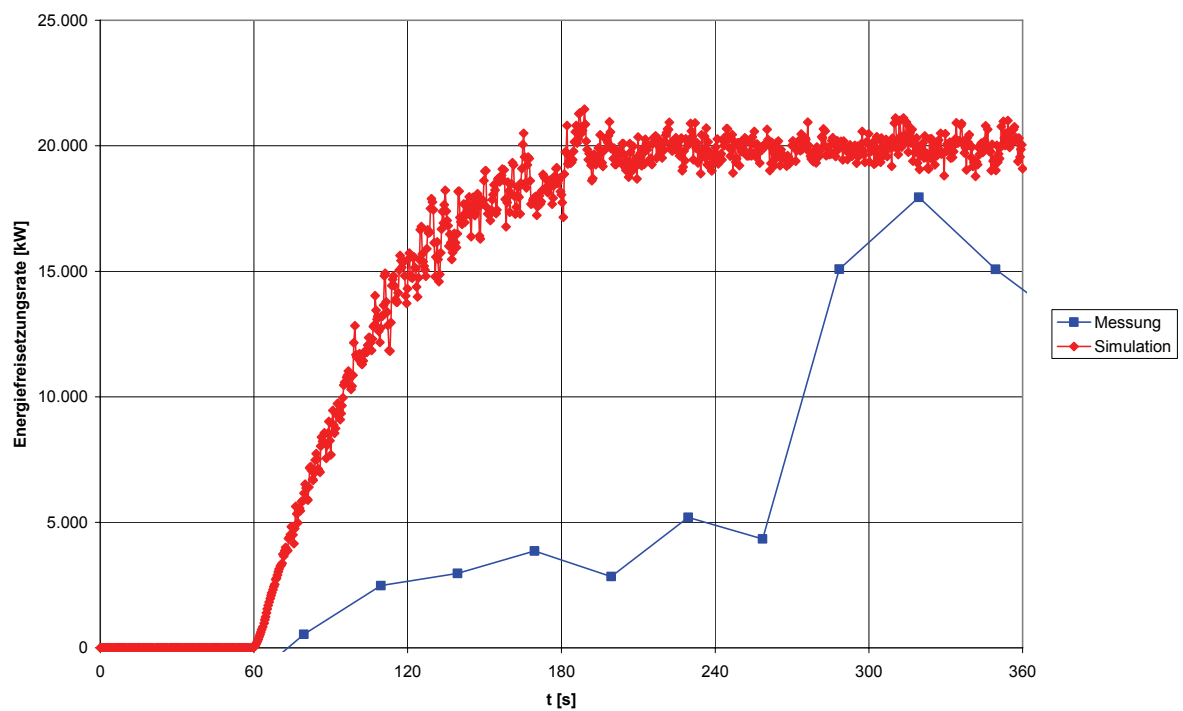
1 Brandversuch V202	C2
1.1 Kenndaten Brandversuch V202	C2
1.2 Energiefreisetzungsrate V202	C2
1.3 Geschwindigkeiten V202	C3
1.4 Temperaturen V202	C7
2 Brandversuch V203	C11
2.1 Kenndaten Brandversuch V203	C11
2.2 Energiefreisetzungsrate V203	C11
2.3 Geschwindigkeiten V203	C12
2.4 Temperaturen V203	C16
3 Brandversuch V214 A	C20
3.1 Kenndaten Brandversuch V214 A	C20
3.2 Energiefreisetzungsrate V214 A	C20
3.3 Geschwindigkeiten V214 A	C21
3.4 Temperaturen V214 A	C25
4 Brandversuch V215 A	C29
4.1 Kenndaten Brandversuch V215 A	C29
4.2 Energiefreisetzungsrate V215 A	C29
4.3 Geschwindigkeiten V215 A	C30
4.4 Temperaturen V215 A	C34

1 Brandversuch V202

1.1 Kenndaten Brandversuch V202

Versuchs-Nr.	Brand-leistung	Brand-fläche	Strömungs-geschw. im Verkehrsraum	Aktivieren der Lüftung	Abluft-menge	Temperatur	
						innen	außen
[-]	[MW]	[m ²]	[m/s]	[min]	[m ³ /s/n _{FS} /L]	[°C]	[°C]
202	20	9,0	0,75	2	0,124	11,7	16,7

1.2 Energiefreisetzungsrate V202



1.3 Geschwindigkeiten V202

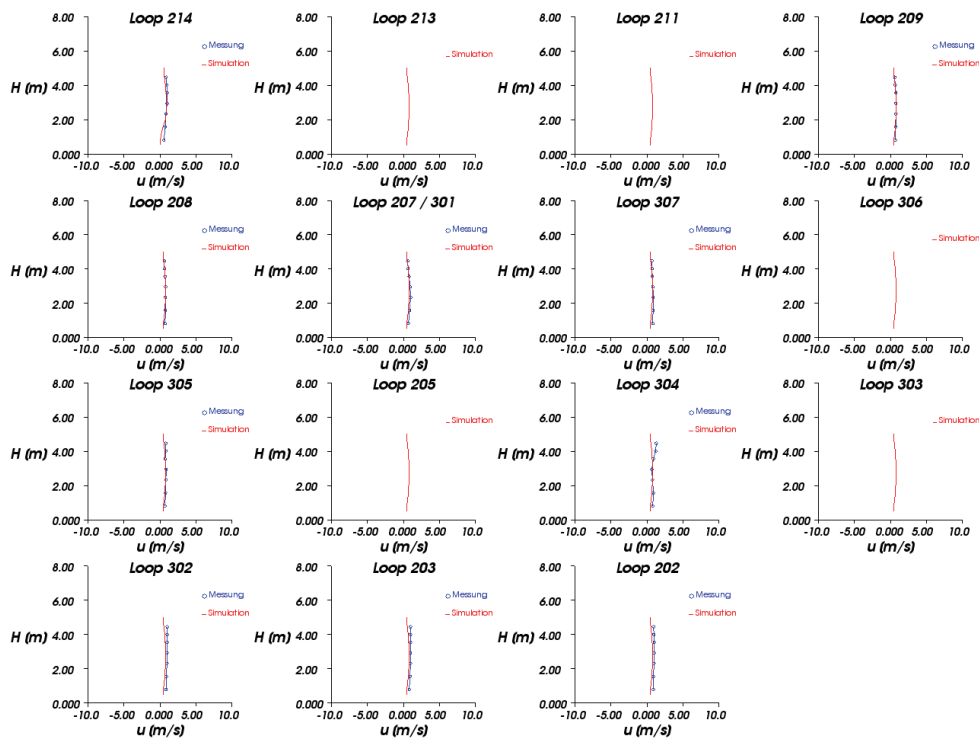


Abbildung 1-1: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach t = 60 sec

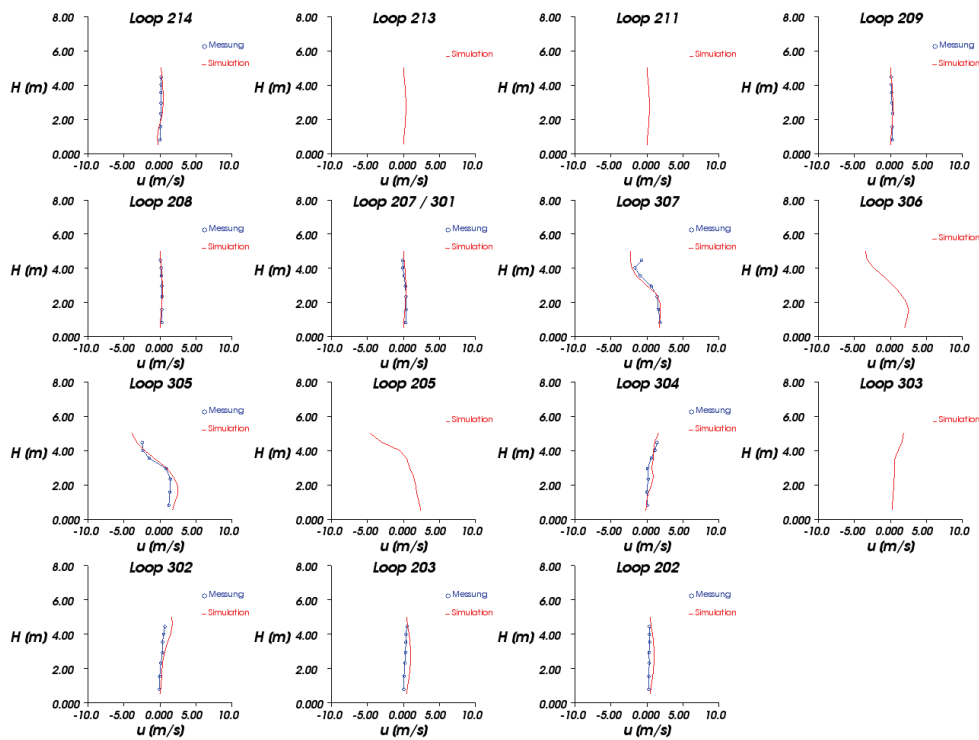


Abbildung 1-2: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach t = 120 sec

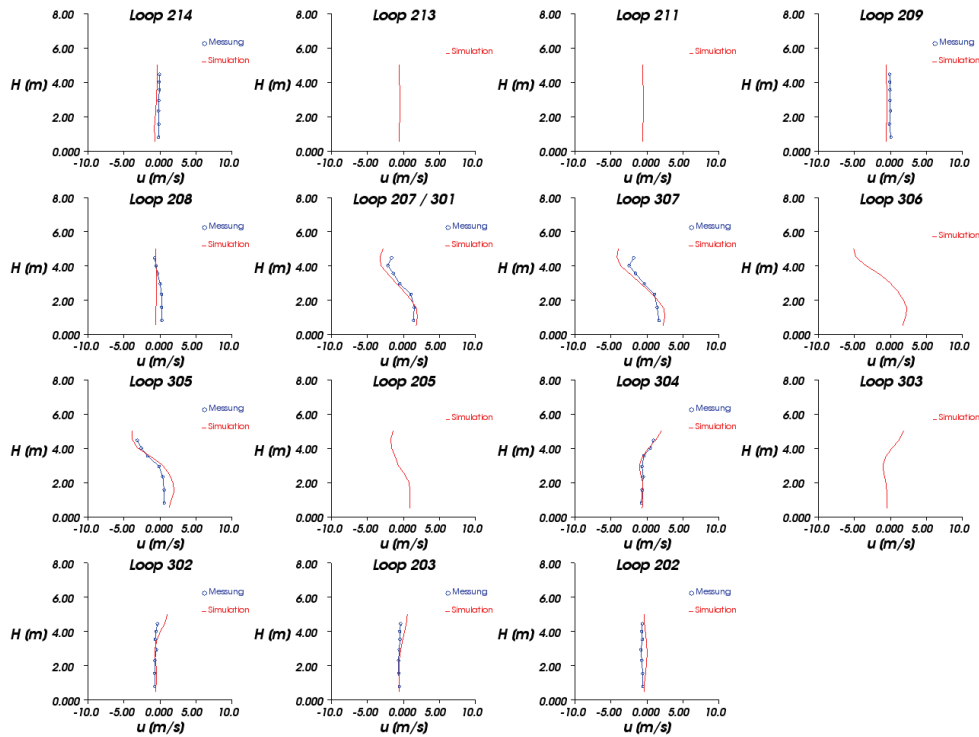


Abbildung 1-3: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 180$ sec

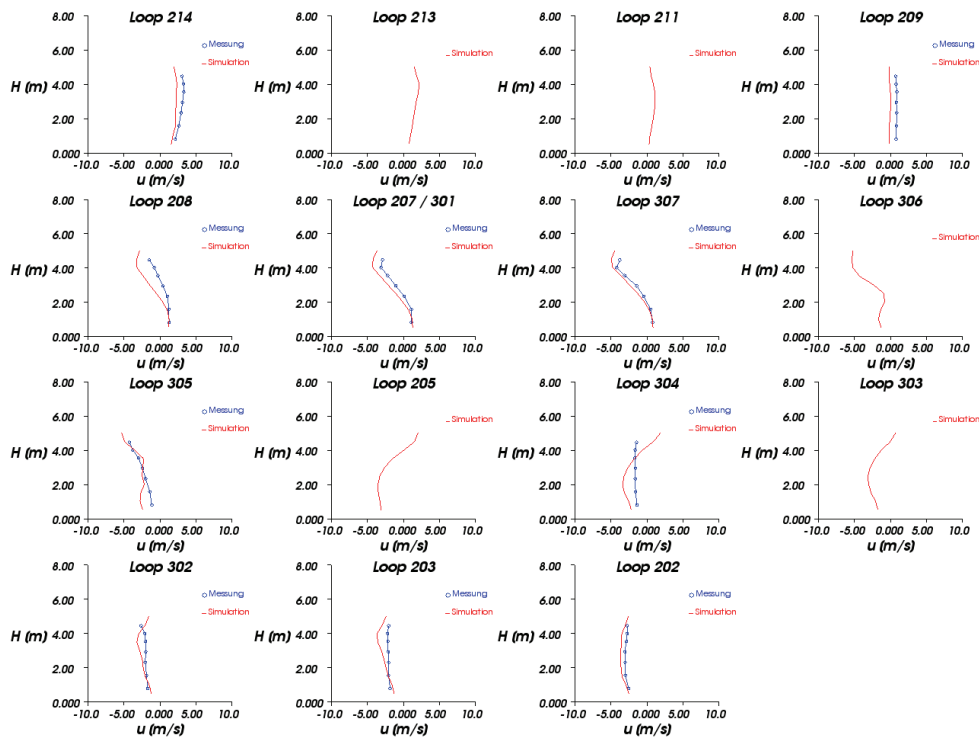


Abbildung 1-4: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 240$ sec

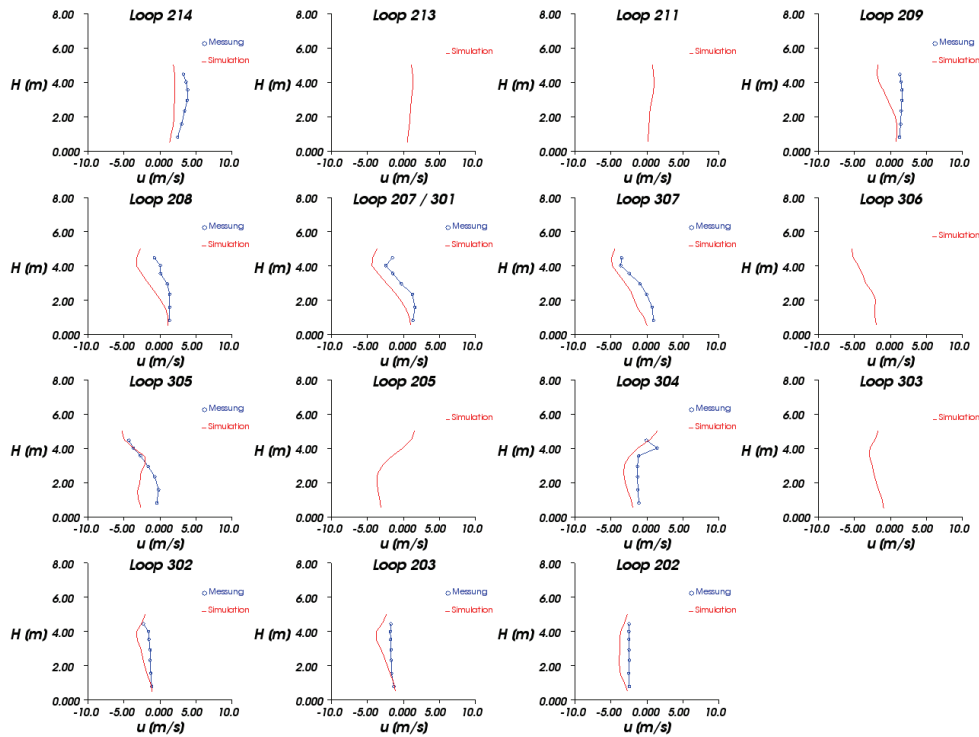


Abbildung 1-5: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach t = 300 sec

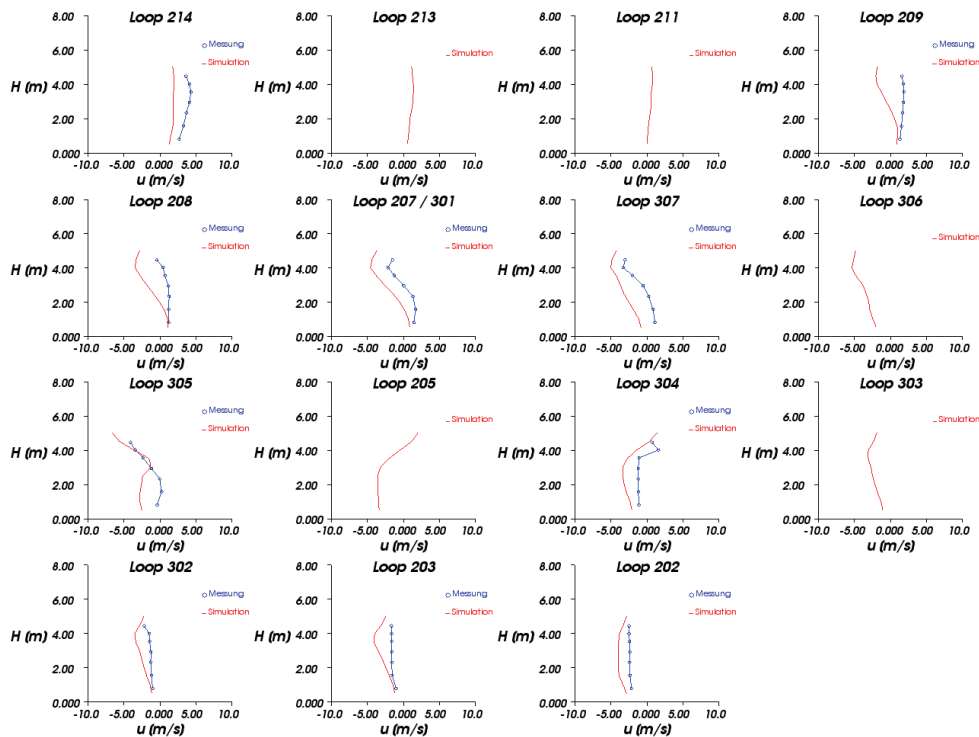


Abbildung 1-6: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach t = 360 sec

V202 Geschwindigkeiten t=60s

Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [m/s]	0,67	0,68	0,69	0,69	0,68	0,68	0,68	0,69	0,68	0,68
Mittelwert Messung [m/s]	0,85	0,73	0,73	0,82	0,81	0,79	0,90	0,96	0,95	0,96
Abweichung MIN [m/s]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,20	0,22	0,21
Abweichung MAX [m/s]	0,49	0,18	0,24	0,26	0,33	0,28	0,76	0,46	0,44	0,41
Mittelwert Abweichung [m/s]	0,19	0,04	0,05	0,14	0,12	0,11	0,23	0,27	0,26	0,28
Mittlere Abweichung [%]	2,23	0,52	0,63	1,69	1,46	1,32	2,71	3,24	3,14	3,33
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	0,17									
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	2,03									

V202 Geschwindigkeiten t=360s

Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [m/s]	1,83	-0,28	-1,19	-1,89	-3,19	-2,58	-2,55	-2,52	-2,90	-3,78
Mittelwert Messung m/s]	3,68	1,67	0,94	0,22	-0,63	-1,22	-0,70	-1,32	-1,53	-2,36
Abweichung MIN [m/s]	1,23	0,39	0,12	0,69	1,71	0,00	0,53	0,25	0,29	0,83
Abweichung MAX [m/s]	2,41	3,64	3,86	2,83	3,23	2,96	2,98	2,01	2,46	1,60
Mittelwert Abweichung [m/s]	1,86	1,95	2,13	2,11	2,56	1,56	1,85	1,20	1,37	1,41
Mittlere Abweichung [%]	22,20	23,29	25,46	25,25	30,66	18,65	22,08	14,30	16,37	16,91
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	1,80									
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	21,52									

Tabelle 1-1: Abweichungen der Geschwindigkeiten V202

1.4 Temperaturen V202

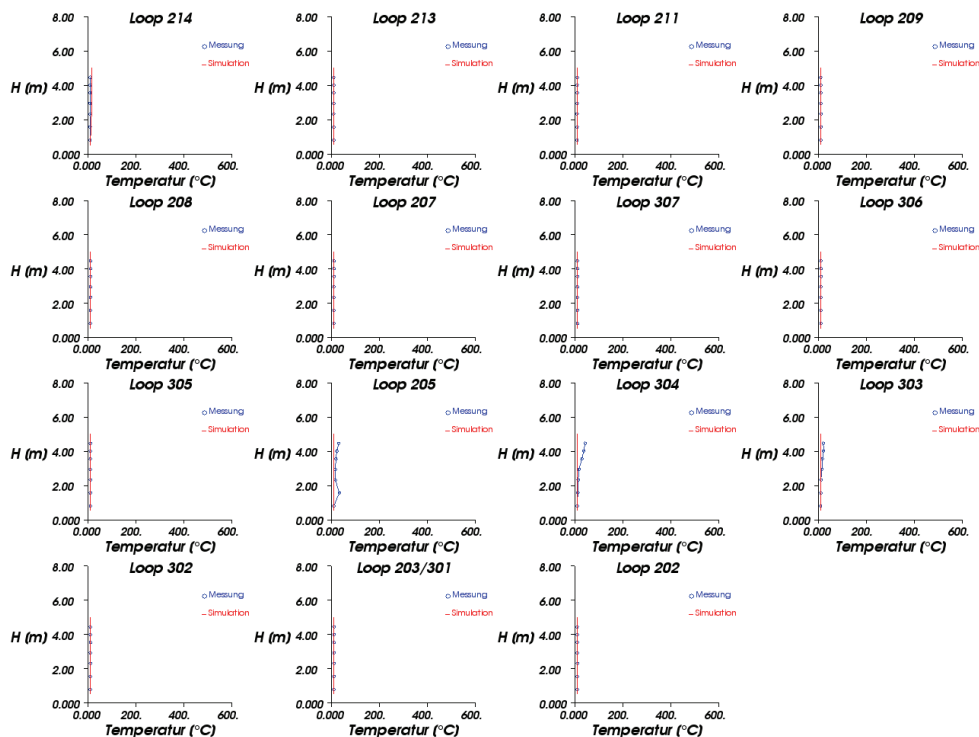


Abbildung 1-7: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 60 sec

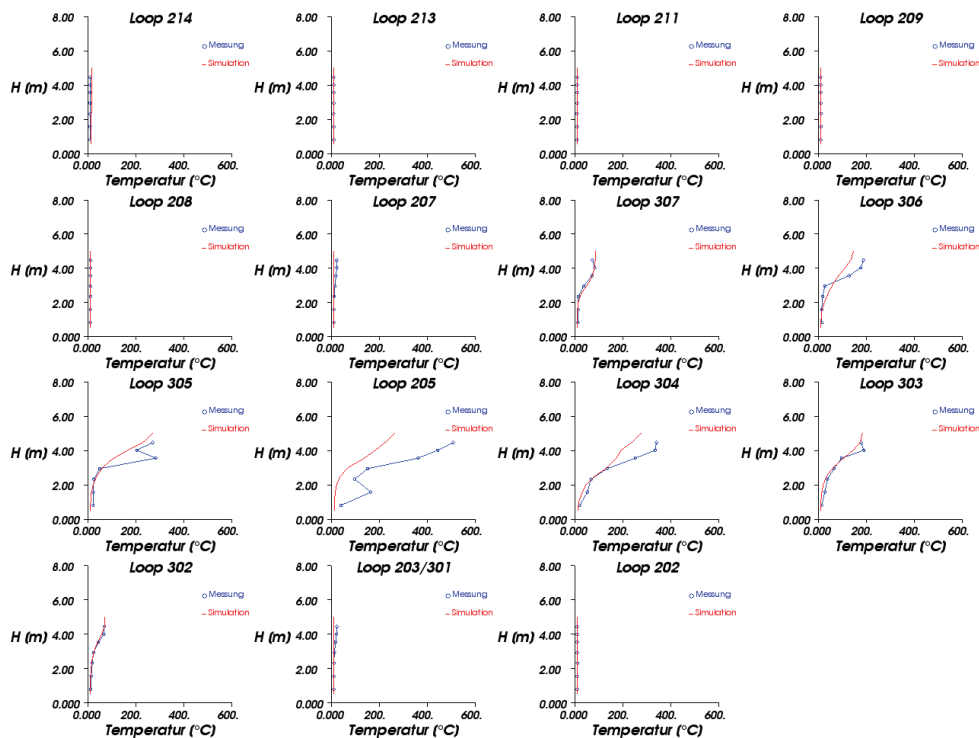


Abbildung 1-8: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 120 sec

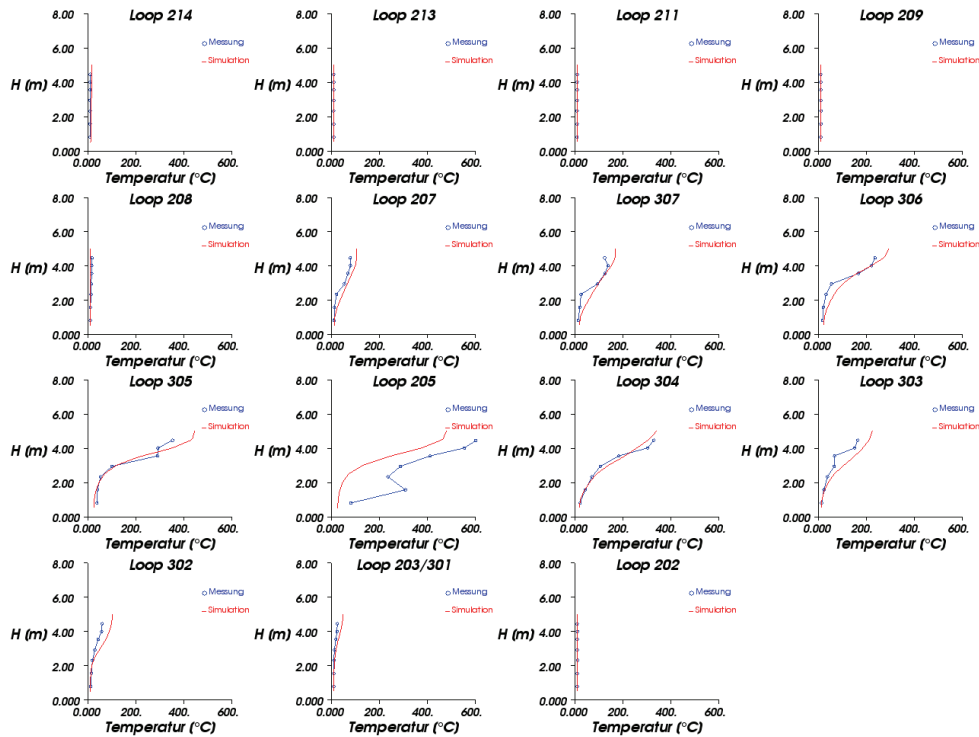


Abbildung 1-9: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 180 sec

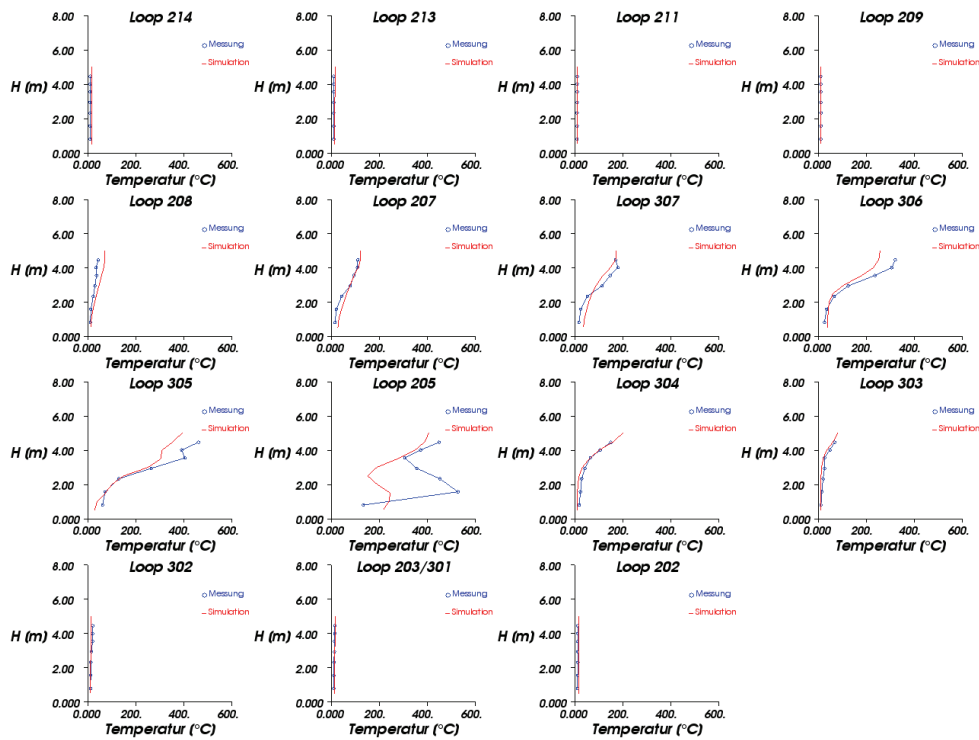


Abbildung 1-10: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 240 sec

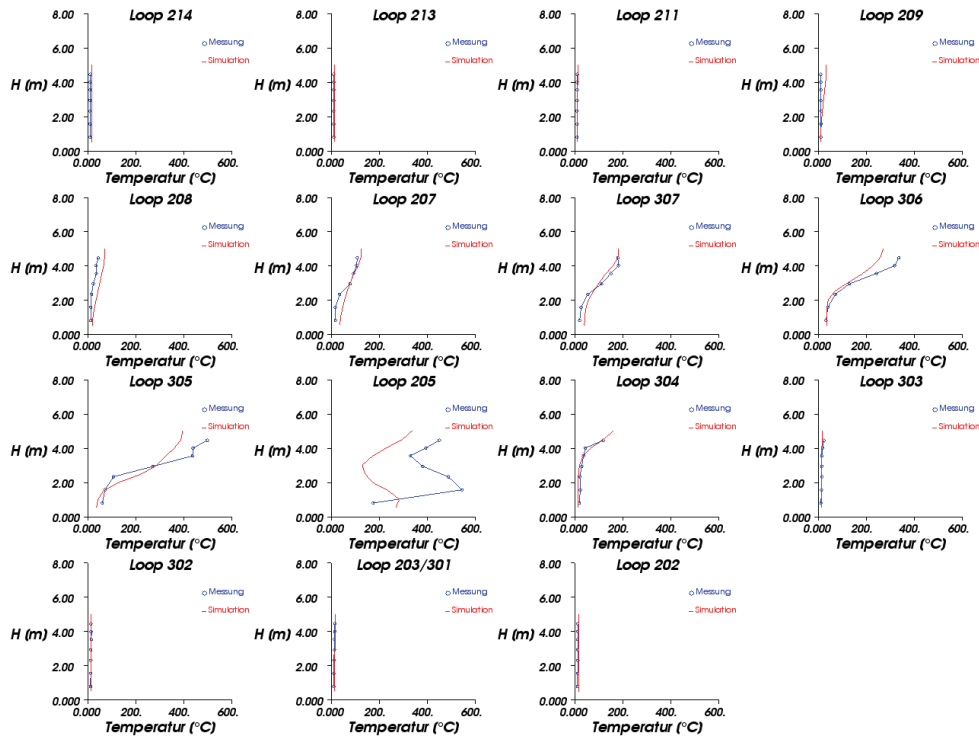


Abbildung 1-11: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 300 sec

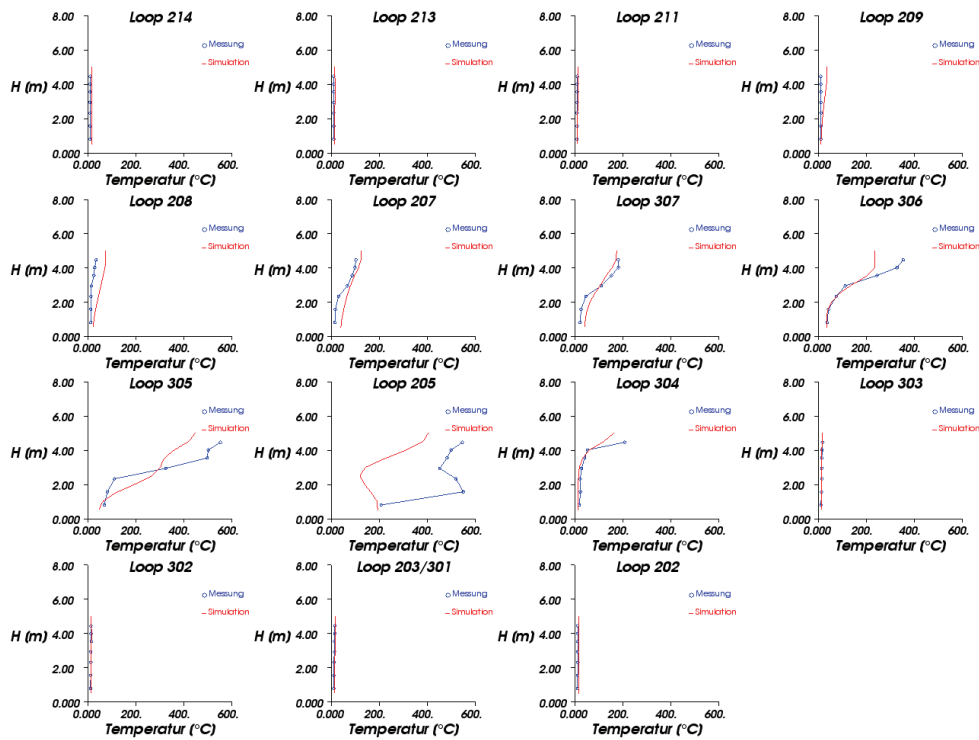


Abbildung 1-12: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 360 sec

V202 Temperaturen t=60s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	15,52	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70
Mittelwert Messung [°C]	10,51	11,04	10,71	11,48	11,92	11,62	11,88	11,59	11,65	22,29	21,63	15,00	11,52	11,83	11,26
Abweichung MIN [°C]	1,90	0,49	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,53	0,03	0,07	0,01	0,00	0,00
Abweichung MAX [°C]	6,38	0,95	1,22	0,75	0,57	0,32	0,50	0,31	0,24	22,26	32,04	10,54	0,84	0,45	0,75
Mittelwert Abweichung [°C]	5,01	0,66	0,99	0,24	0,25	0,15	0,19	0,13	0,09	10,60	9,99	3,73	0,24	0,22	0,46
Mittlere Abweichung [%]	0,83	0,11	0,16	0,04	0,04	0,02	0,03	0,02	0,01	1,76	1,66	0,62	0,04	0,04	0,08
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	2,2														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	3,6														

V202 Temperaturen t=360s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	16,55	15,61	12,98	23,69	50,20	77,04	96,46	121,55	243,46	196,80	30,79	15,27	15,36	15,68	16,61
Mittelwert Messung [°C]	10,51	11,04	10,71	11,48	19,04	53,92	91,33	144,39	304,84	382,56	42,66	15,01	13,61	12,78	12,88
Abweichung MIN [°C]	5,78	3,91	1,30	1,24	12,38	10,25	0,78	0,23	1,03	1,41	0,50	0,00	0,44	0,49	3,00
Abweichung MAX [°C]	6,42	5,01	3,63	26,19	42,68	35,05	30,25	116,66	172,05	260,92	92,27	2,71	2,34	4,16	4,14
Mittelwert Abweichung [°C]	6,04	4,57	2,27	12,21	31,16	23,12	19,89	27,09	75,32	188,46	12,41	0,77	1,75	2,90	3,73
Mittlere Abweichung [%]	1,10	0,83	0,41	2,21	5,65	4,19	3,61	4,91	13,66	34,18	2,25	0,14	0,32	0,53	0,68
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	27,45														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	4,89														

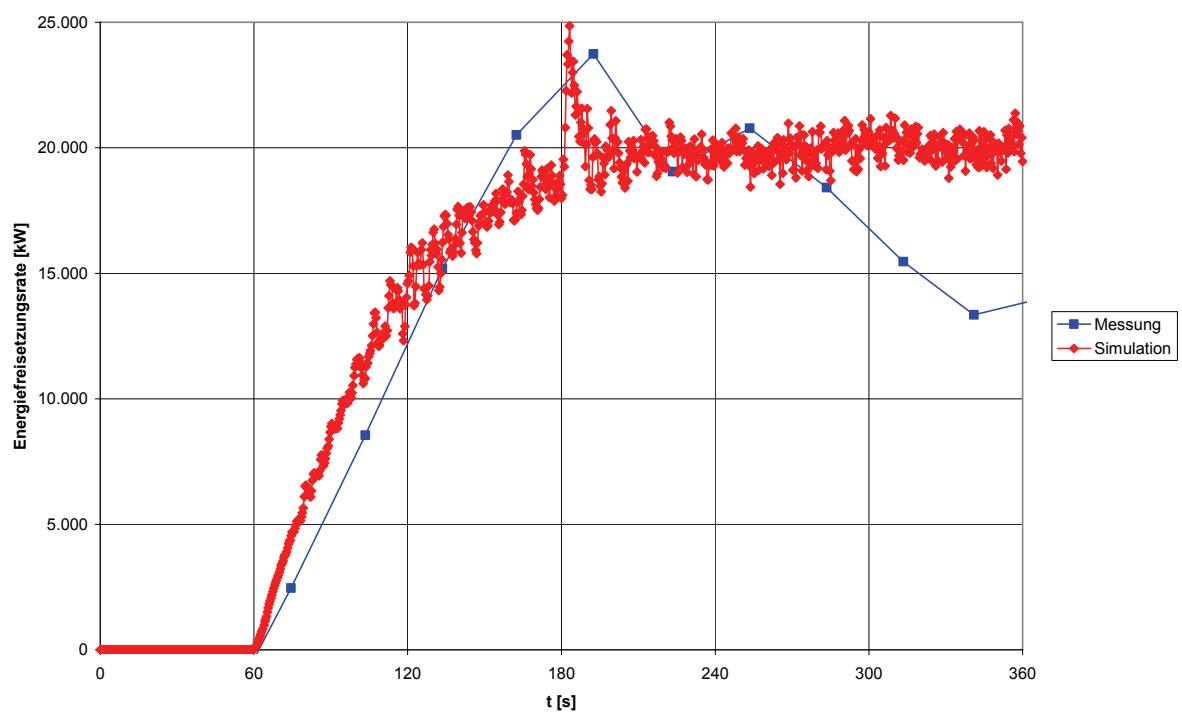
Tabelle 1-2: Abweichungen der Temperaturen V202

2 Brandversuch V203

2.1 Kenndaten Brandversuch V203

Versuchs-Nr.	Brand-leistung	Brand-fläche	Strömungs-geschw. im Verkehrsraum	Aktivieren der Lüftung	Abluft-menge	Temperatur	
						innen	außen
[-]	[MW]	[m ²]	[m/s]	[min]	[m ³ /s/n _{FS} /L]	[°C]	[°C]
203	20	9,0	0,00	2	0,108	14,2	11,7

2.2 Energiefreisetzungsrate V203



2.3 Geschwindigkeiten V203

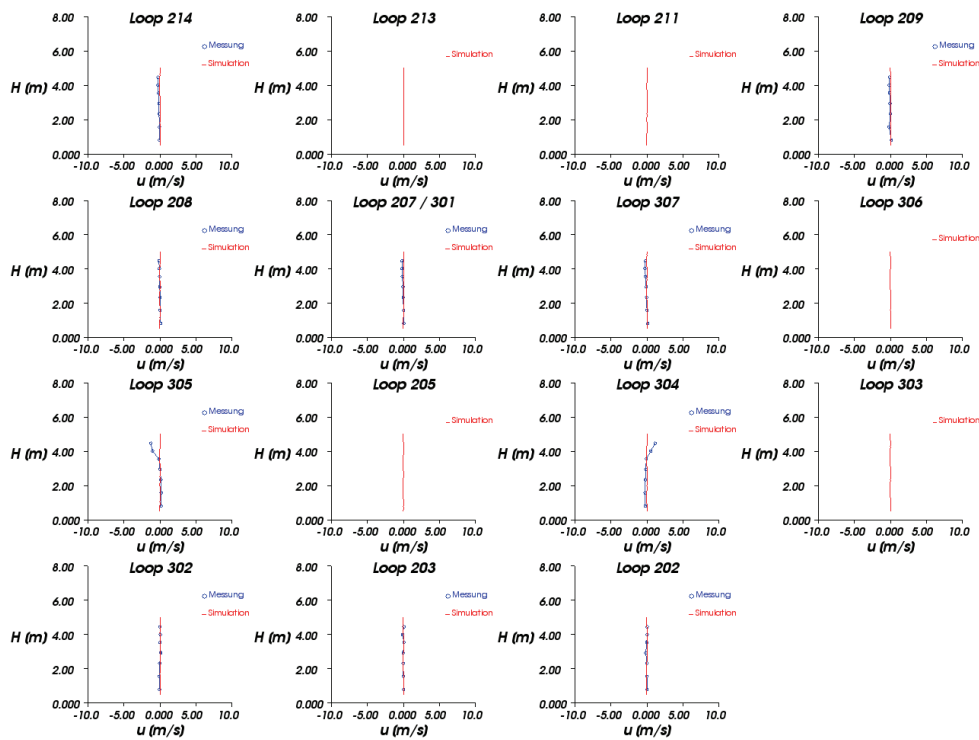


Abbildung 2-1: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 60$ sec

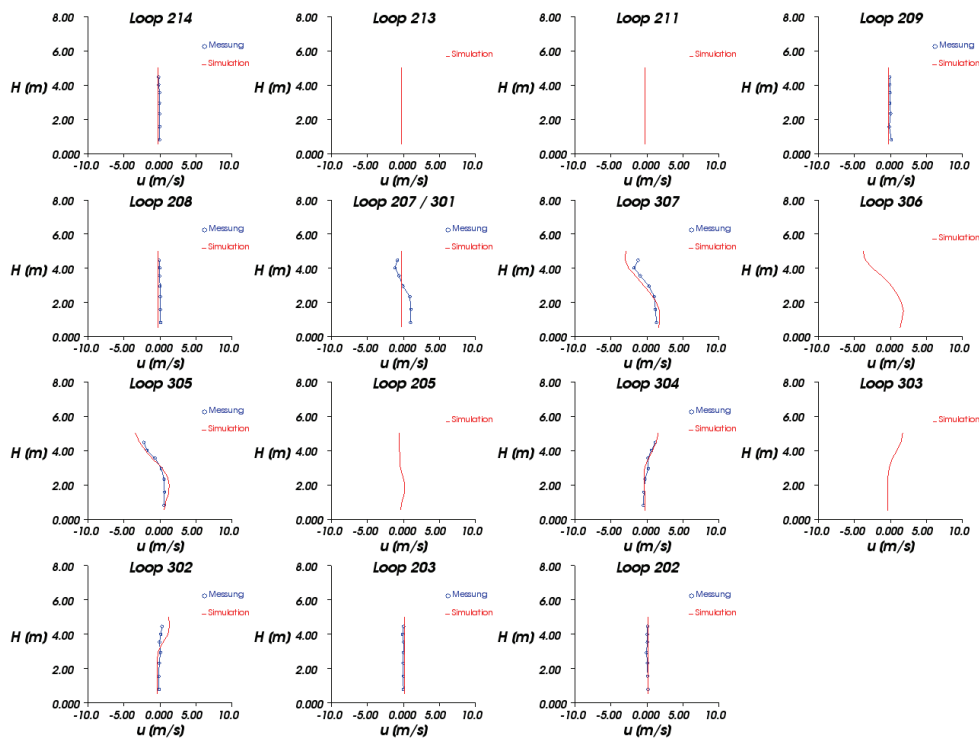


Abbildung 2-2: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 120$ sec

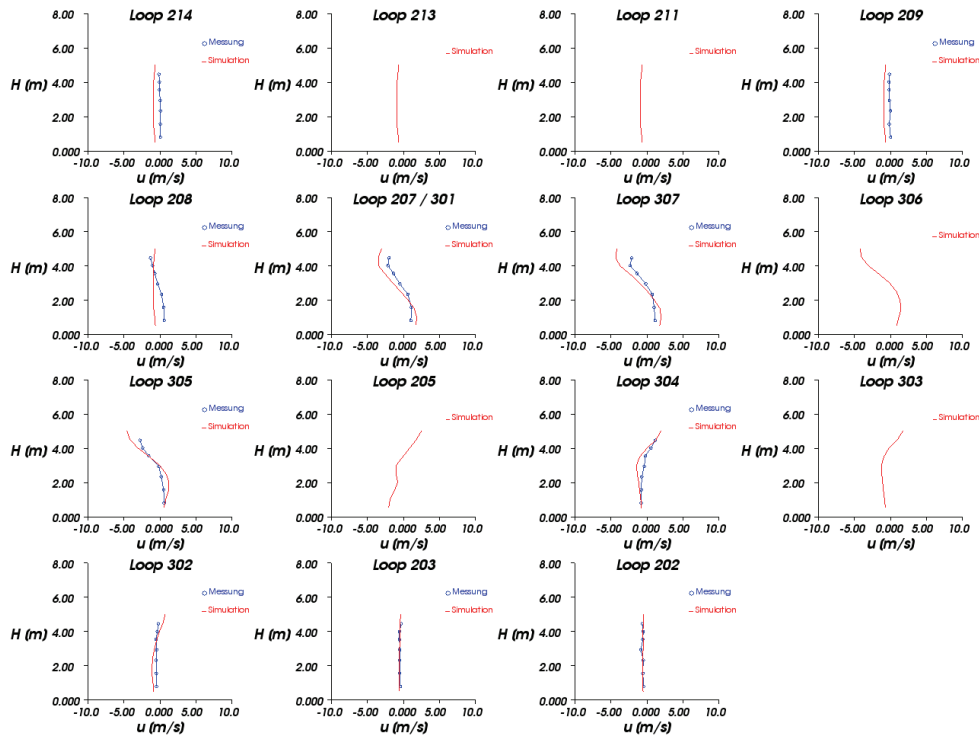


Abbildung 2-3: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 180$ sec

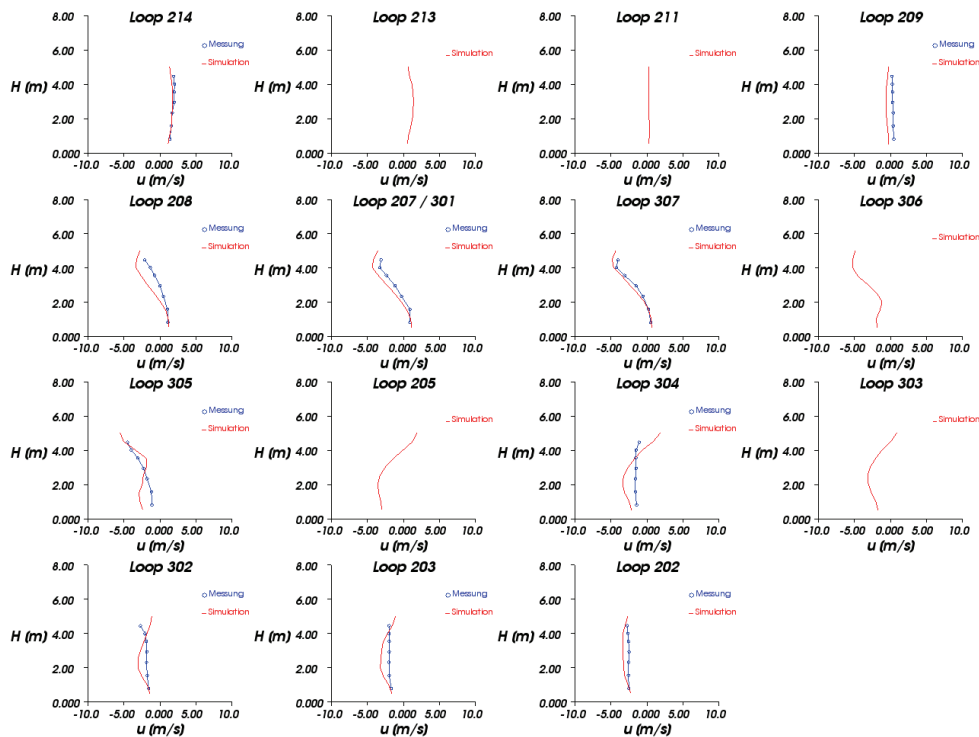


Abbildung 2-4: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 240$ sec

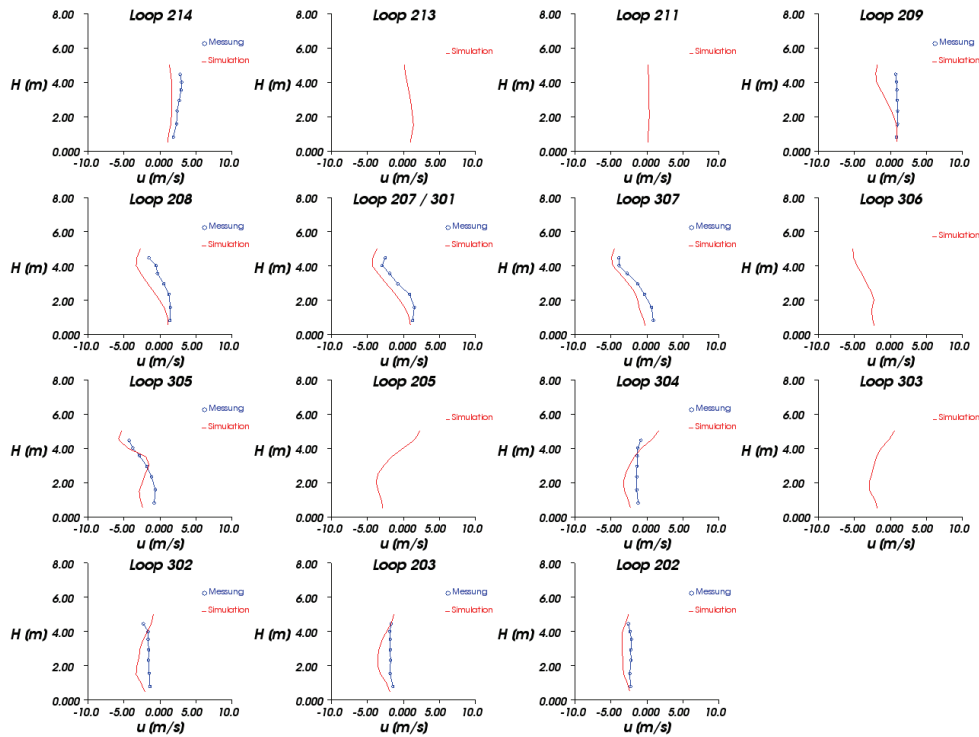


Abbildung 2-5: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 300$ sec

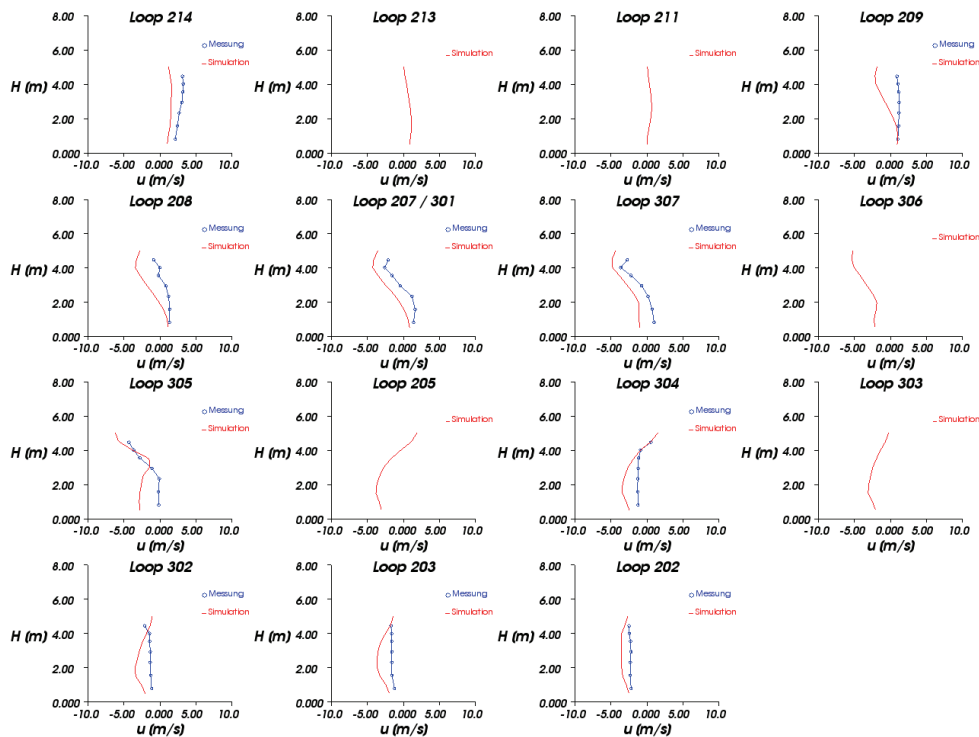


Abbildung 2-6: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 360$ sec

V203 Geschwindigkeiten t=60s

Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [m/s]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mittelwert Messung [m/s]	-0,14	-0,08	-0,01	-0,06	-0,08	-0,14	-0,01	0,00	-0,01	-0,02
Abweichung MIN [m/s]	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Abweichung MAX [m/s]	0,27	0,18	0,13	0,19	0,27	1,25	1,14	0,13	0,13	0,15
Mittelwert Abweichung [m/s]	0,14	0,09	0,04	0,08	0,11	0,31	0,28	0,06	0,03	0,04
Mittlere Abweichung [%]	1,87	1,18	0,59	1,07	1,44	4,15	3,75	0,74	0,37	0,50
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	0,12									
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	1,57									

V203 Geschwindigkeiten t=360s

Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [m/s]	1,47	-0,42	-1,22	-1,79	-2,51	-2,65	-2,38	-2,70	-3,06	-3,37
Mittelwert Messung [m/s]	2,79	1,12	0,70	-0,04	-0,77	-1,38	-1,06	-1,38	-1,57	-2,29
Abweichung MIN [m/s]	1,02	0,04	0,27	0,68	1,13	0,02	0,00	0,01	0,11	0,51
Abweichung MAX [m/s]	1,71	3,07	3,36	2,30	2,11	2,70	2,16	2,13	2,03	1,32
Mittelwert Abweichung [m/s]	1,33	1,54	1,92	1,75	1,74	1,56	1,31	1,38	1,49	1,08
Mittlere Abweichung [%]	17,63	20,47	25,51	23,31	23,11	20,70	17,45	18,42	19,83	14,33
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	1,51									
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	20,08									

Tabelle 2-1: Abweichungen der Geschwindigkeiten V203

2.4 Temperaturen V203

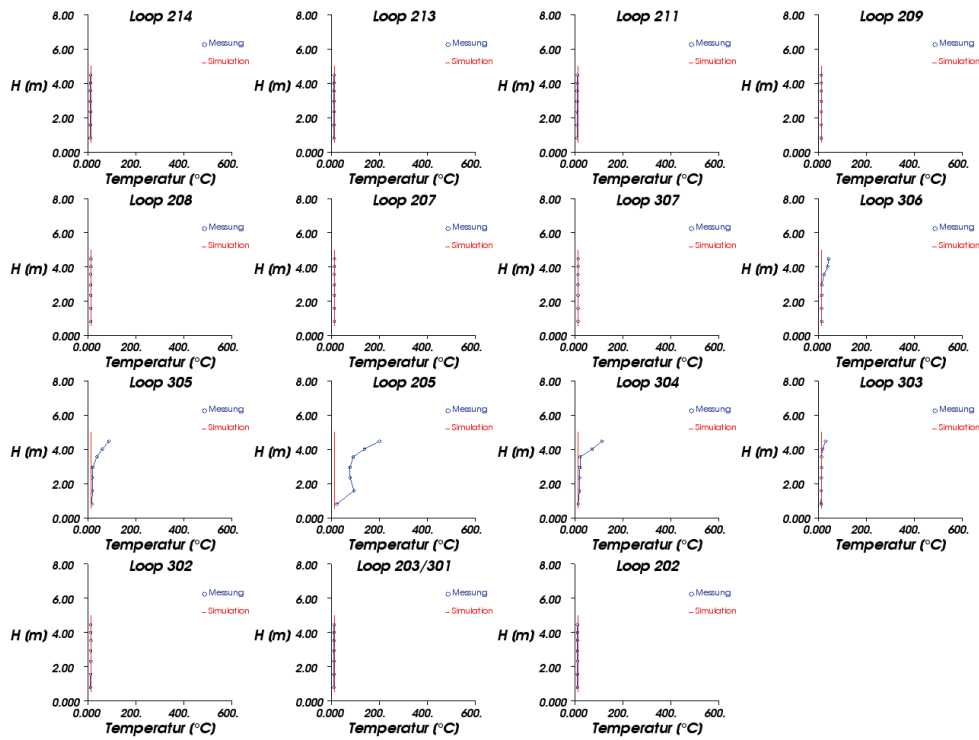


Abbildung 2-7: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 60 sec

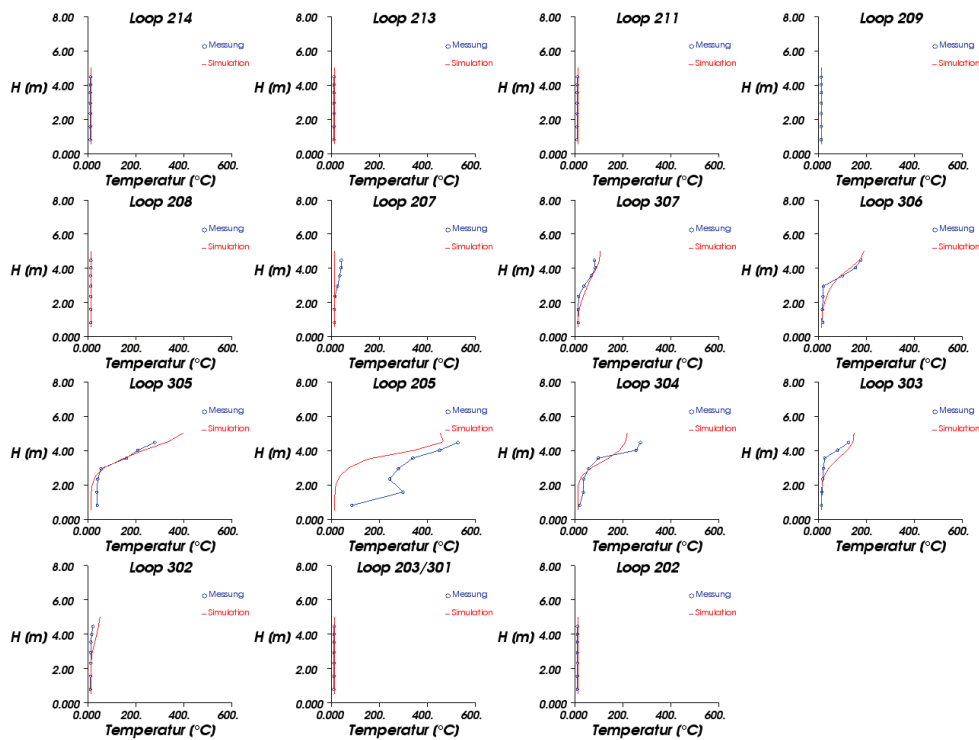


Abbildung 2-8: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 120 sec

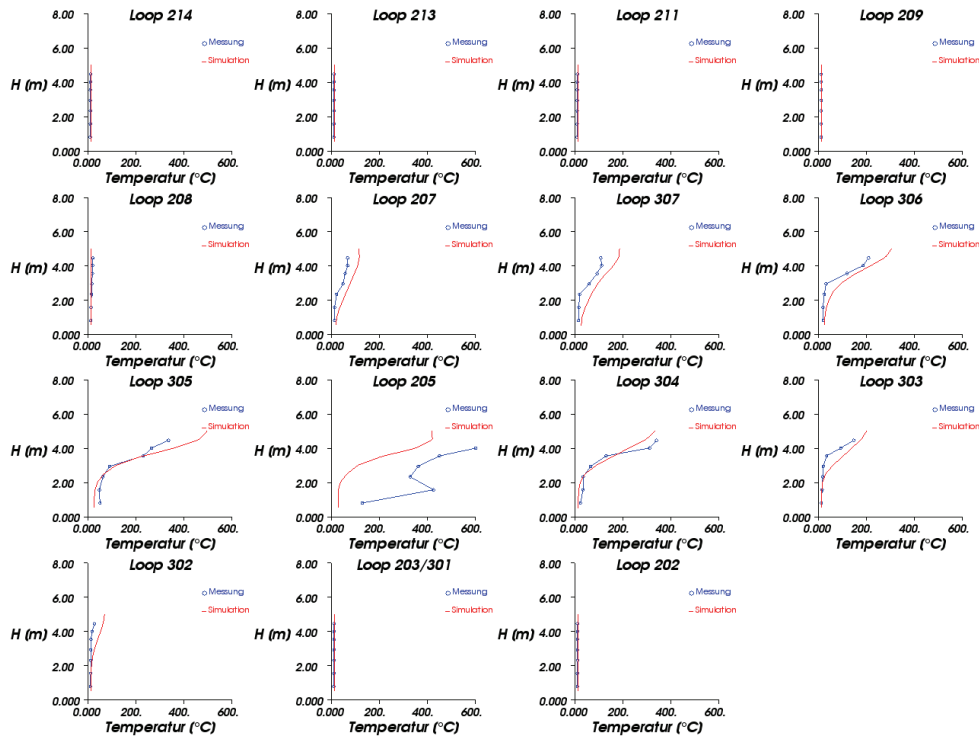


Abbildung 2-9: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 180 sec

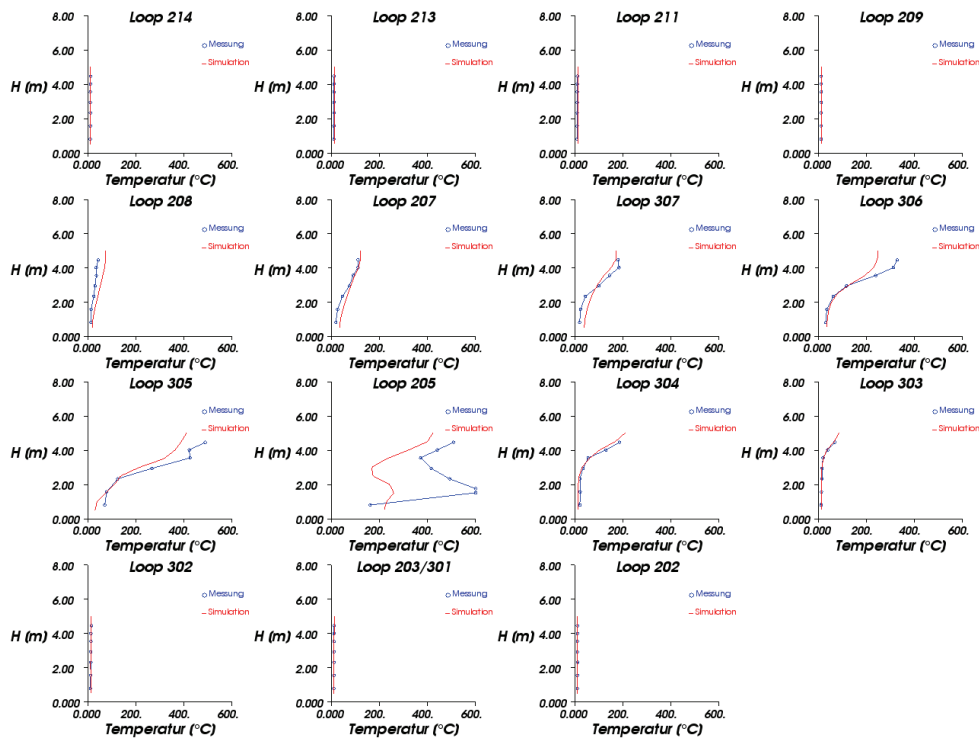


Abbildung 2-10: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 240 sec

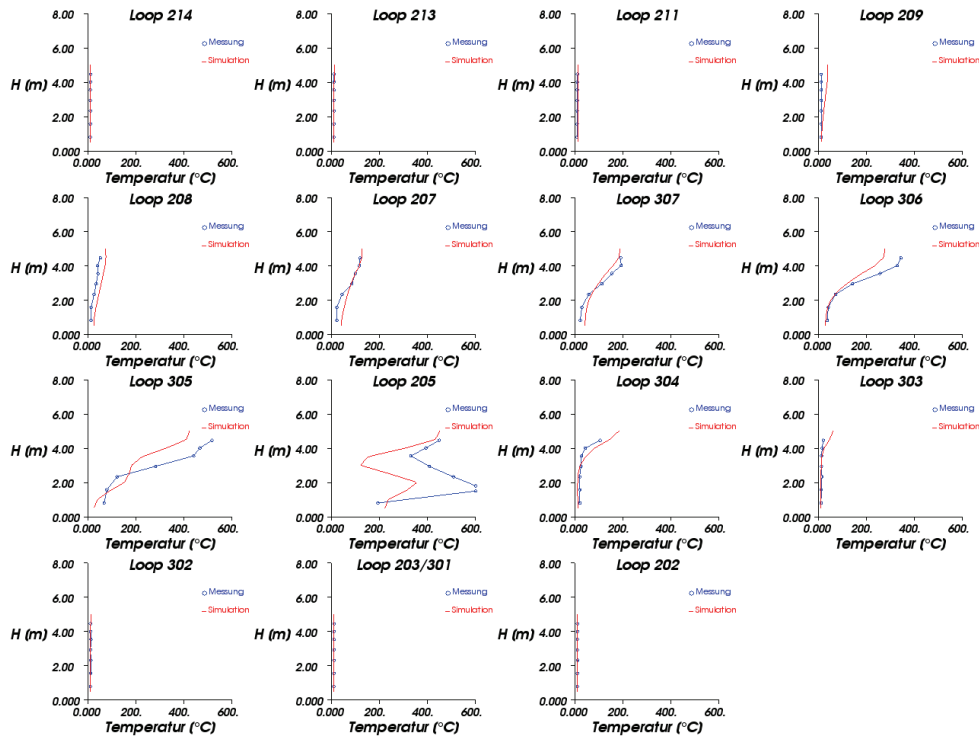


Abbildung 2-11: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 300 sec

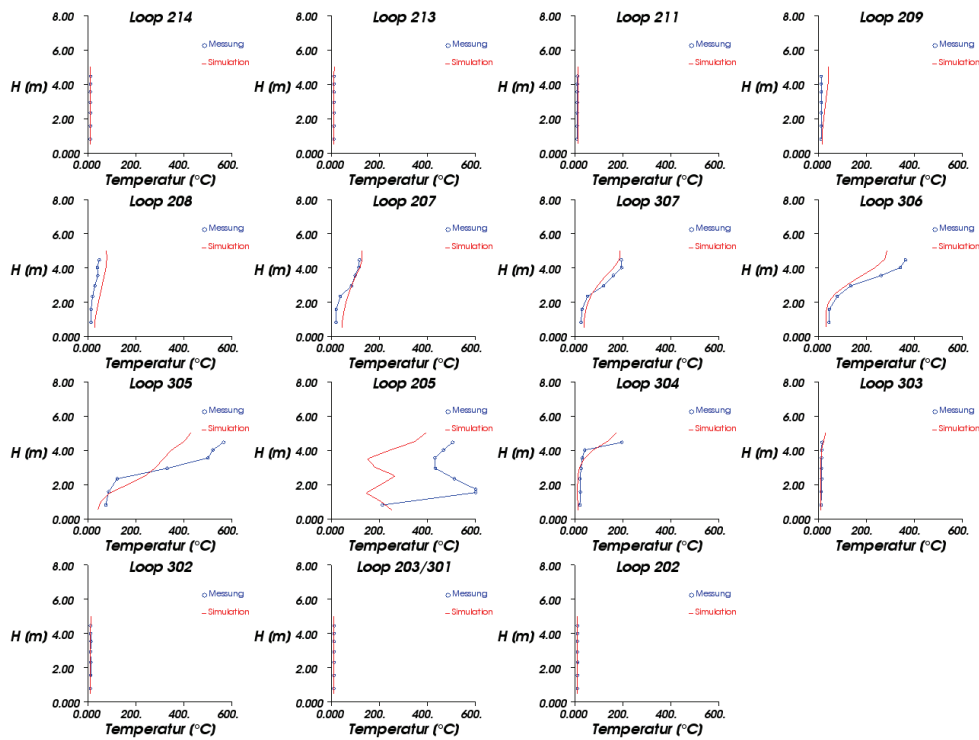


Abbildung 2-12: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 360 sec

V203 Temperaturen t=60s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	14,20	14,20	14,20	14,20	14,20	14,20	14,20	14,20	14,20	14,20	14,20	14,20	14,20	14,20	14,20
Mittelwert Messung [°C]	11,74	11,91	11,00	12,94	13,28	13,27	14,13	21,30	32,13	66,19	33,01	15,15	13,11	12,02	11,93
Abweichung MIN [°C]	2,05	2,11	2,35	1,09	0,58	0,25	0,01	0,01	4,12	6,88	0,71	0,03	0,34	1,70	1,52
Abweichung MAX [°C]	2,77	2,48	3,91	1,57	1,32	1,09	0,28	29,60	74,72	137,25	99,30	16,64	2,38	2,73	2,59
Mittelwert Abweichung [°C]	2,46	2,29	3,20	1,26	0,92	0,93	0,17	7,10	17,93	51,99	18,81	2,15	1,09	2,18	2,27
Mittlere Abweichung [%]	0,36	0,33	0,47	0,18	0,13	0,14	0,02	1,04	2,62	7,59	2,75	0,31	0,16	0,32	0,33
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	7,65														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	1,12														

V203 Temperaturen t=360s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	11,77	12,17	14,14	29,12	55,18	81,22	92,57	113,39	109,49	210,15	33,60	13,12	12,24	12,08	11,75
Mittelwert Messung [°C]	11,74	11,91	11,00	12,94	27,68	63,98	99,21	155,36	276,94	385,16	38,63	14,01	12,69	12,02	11,93
Abweichung MIN [°C]	0,00	0,00	2,34	3,67	16,45	0,87	0,62	11,45	47,59	0,74	0,12	0,01	0,00	0,01	0,00
Abweichung MAX [°C]	0,54	0,74	3,90	30,71	35,78	33,91	32,52	104,85	363,10	303,65	65,60	5,88	1,51	0,77	0,97
Mittelwert Abweichung [°C]	0,17	0,26	3,14	16,19	27,51	17,24	18,79	41,96	167,45	179,45	13,04	1,52	0,61	0,22	0,27
Mittlere Abweichung [%]	0,03	0,04	0,46	2,36	4,02	2,52	2,74	6,13	24,45	26,20	1,90	0,22	0,09	0,03	0,04
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	32,52														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	4,75														

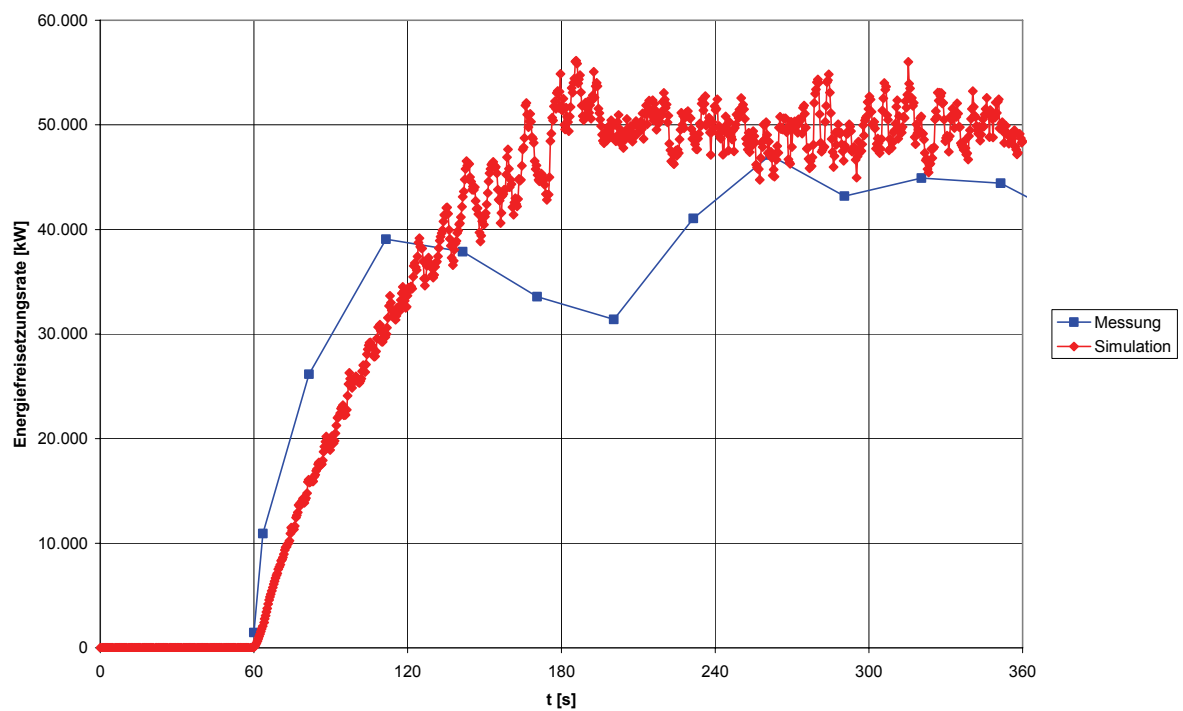
Tabelle 2-2: Abweichungen der Temperaturen V203

3 Brandversuch V214 A

3.1 Kenndaten Brandversuch V214 A

Versuchs-Nr.	Brand-leistung	Brand-fläche	Strömungs-geschw. im Verkehrsraum	Aktivieren der Lüftung	Abluft-menge	Temperatur	
						innen	außen
[-]	[MW]	[m ²]	[m/s]	[min]	[m ³ /s/n _{FS} /L]	[°C]	[°C]
214A	50	22,5	- 0,23	2	0,155	9,4	-

3.2 Energiefreisetzungsrate V214 A



3.3 Geschwindigkeiten V214 A

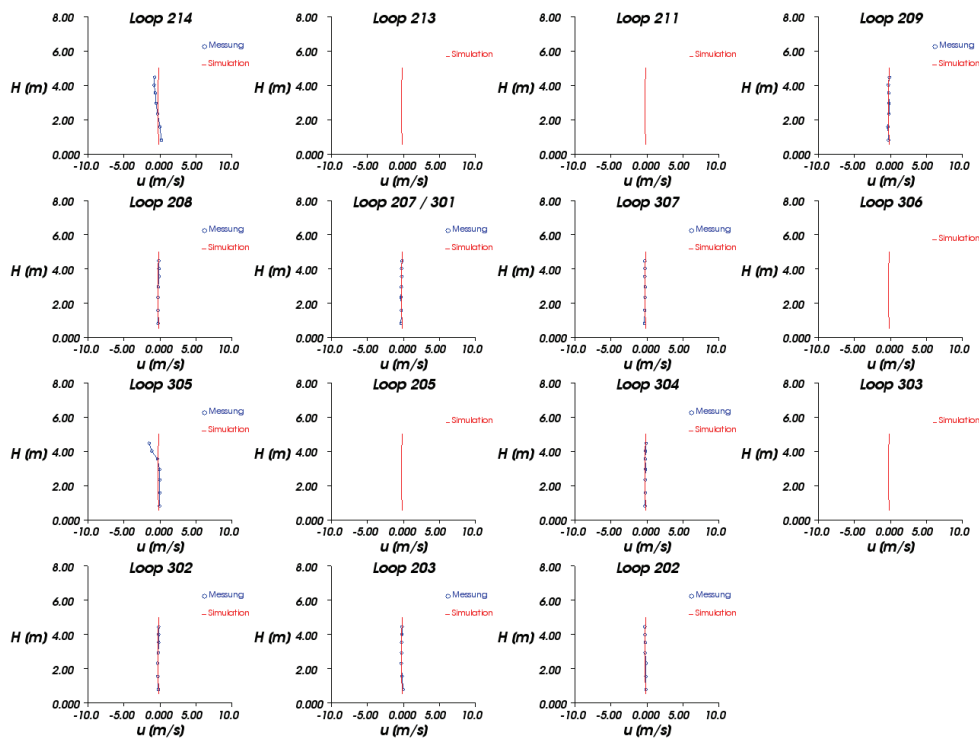


Abbildung 3-1: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 60$ sec

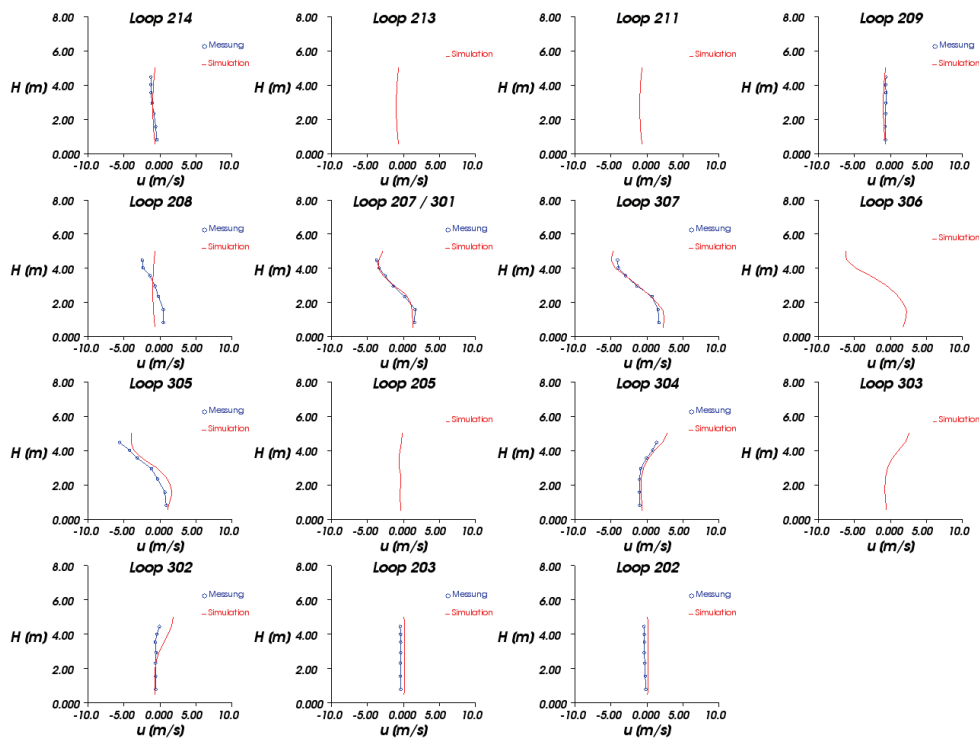


Abbildung 3-2: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 120$ sec

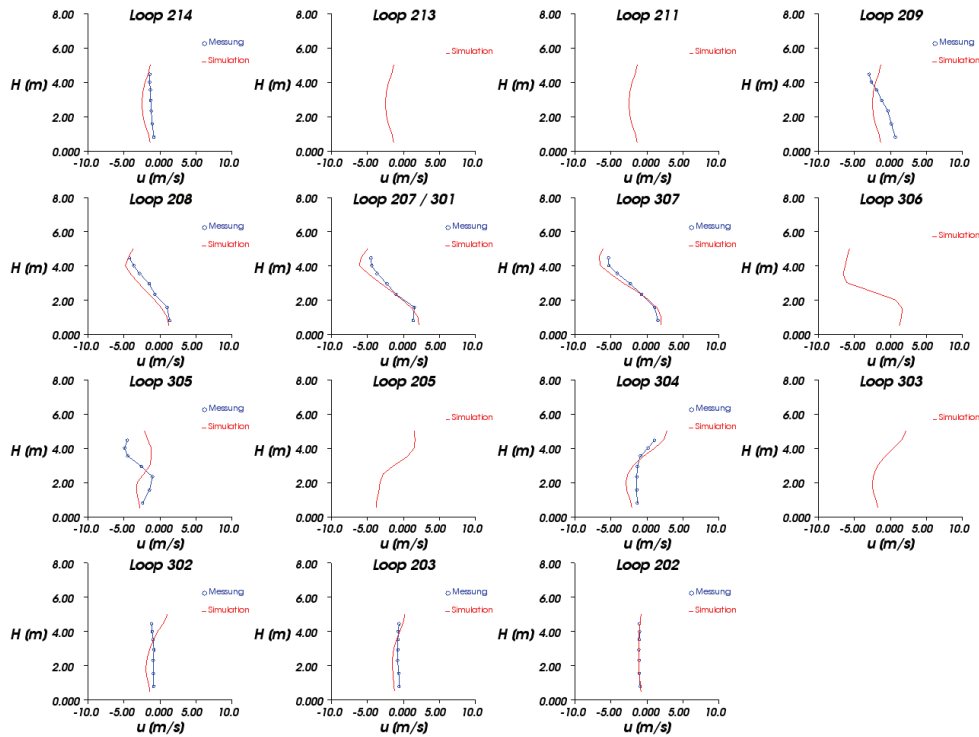


Abbildung 3-3: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 180$ sec

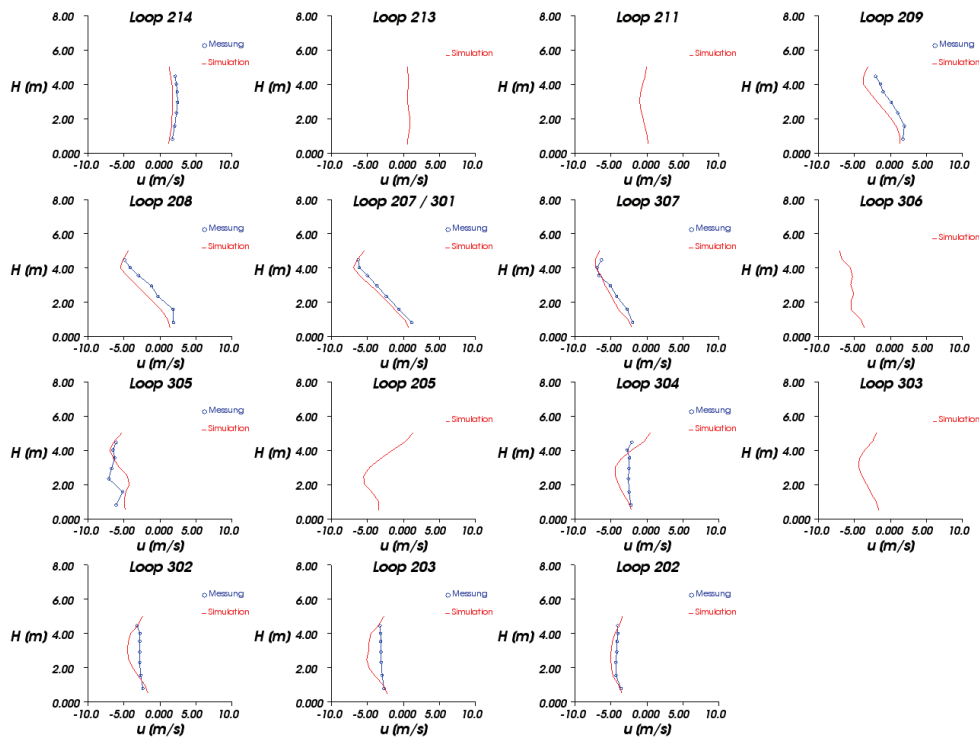


Abbildung 3-4: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 240$ sec

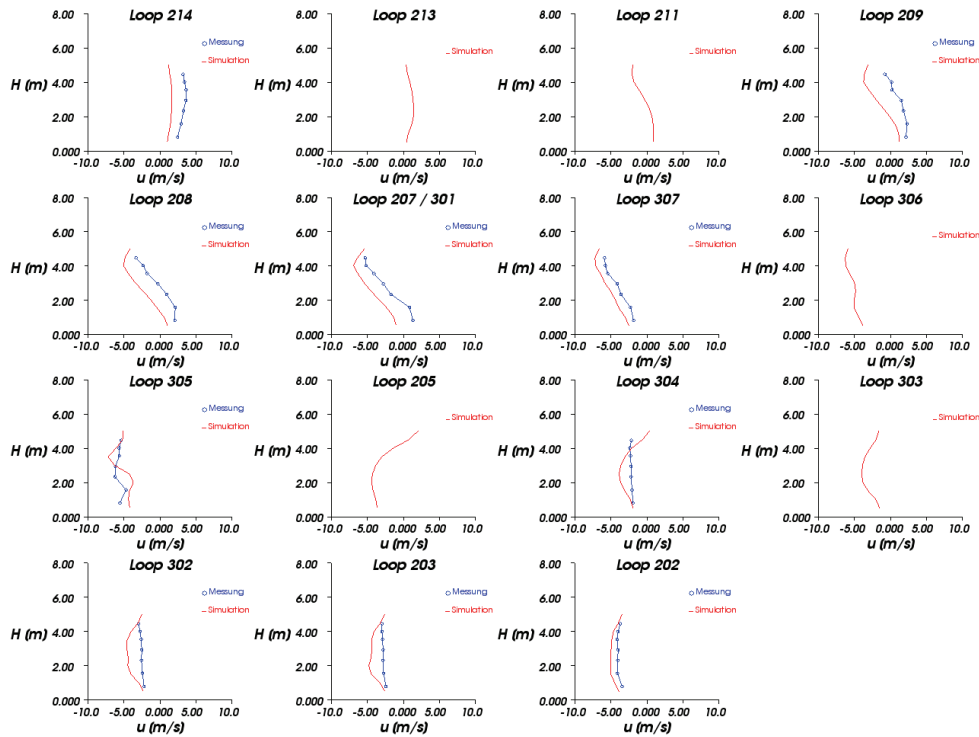


Abbildung 3-5: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 300$ sec

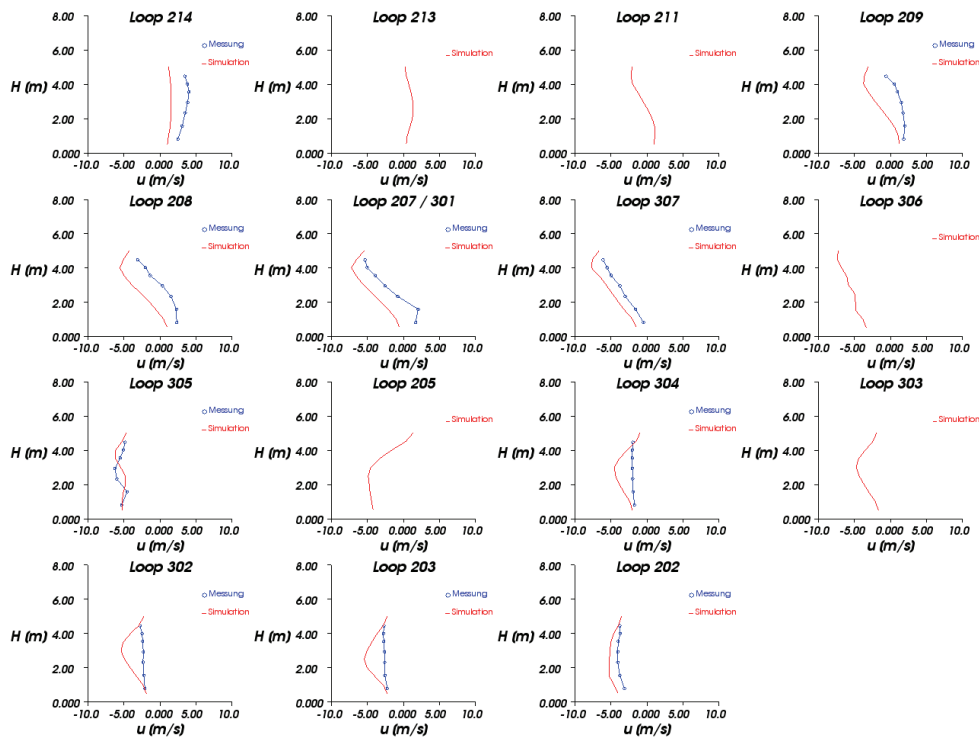


Abbildung 3-6: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 360$ sec

V214 A Geschwindigkeiten t=60s

Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [m/s]	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22
Mittelwert Messung [m/s]	-0,36	-0,25	-0,21	-0,28	-0,28	-0,31	-0,22	-0,23	-0,21	-0,19
Abweichung MIN [m/s]	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Abweichung MAX [m/s]	0,57	0,12	0,11	0,13	0,13	1,29	0,08	0,08	0,16	0,11
Mittelwert Abweichung [m/s]	0,31	0,04	0,05	0,06	0,05	0,33	0,02	0,04	0,04	0,05
Mittlere Abweichung [%]	3,04	0,43	0,50	0,58	0,51	3,20	0,24	0,42	0,37	0,51
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	0,10									
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	0,98									

V214 A Geschwindigkeiten t=360s

Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [m/s]	1,45	-1,40	-2,79	-4,39	-4,99	-5,35	-3,41	-4,08	-4,22	-4,91
Mittelwert Messung m/s]	3,47	1,35	0,43	-1,49	-3,34	-5,38	-1,94	-2,33	-2,59	-3,80
Abweichung MIN [m/s]	1,37	0,69	1,61	1,20	1,26	0,00	0,01	0,07	0,12	0,24
Abweichung MAX [m/s]	2,50	4,28	4,08	4,18	2,17	1,25	2,48	3,08	2,83	1,51
Mittelwert Abweichung [m/s]	2,03	2,75	3,22	2,91	1,65	0,62	1,48	1,75	1,63	1,11
Mittlere Abweichung [%]	19,80	26,87	31,49	28,42	16,14	6,03	14,47	17,11	15,93	10,82
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	1,91									
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	18,71									

Tabelle 3-1: Abweichungen der Geschwindigkeiten V214A

3.4 Temperaturen V214 A

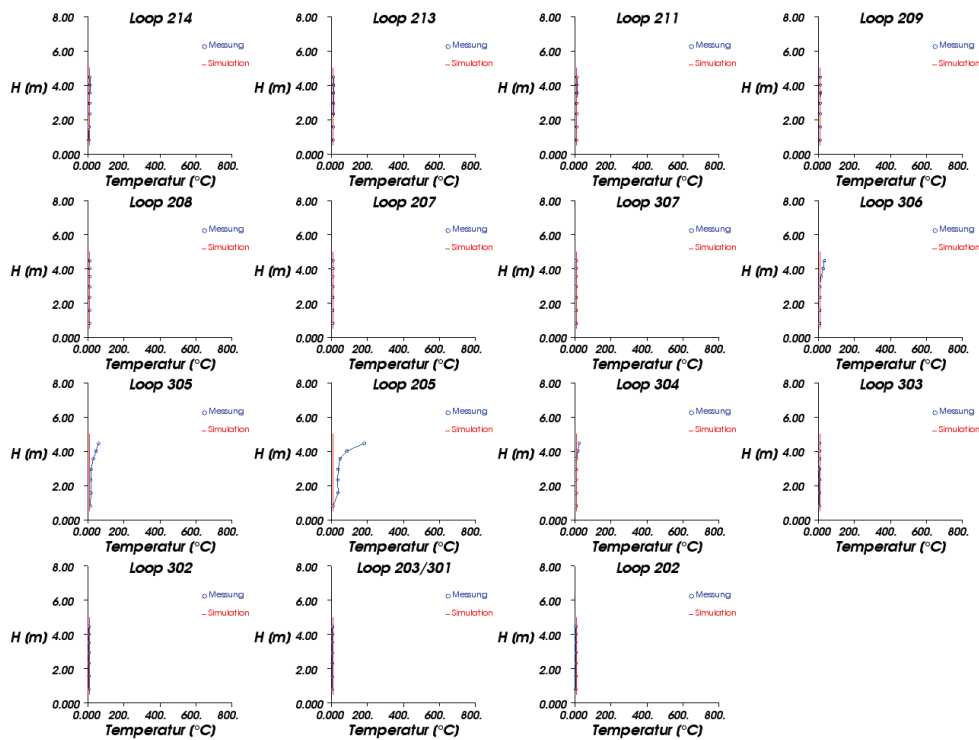


Abbildung 3-7: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 60 sec

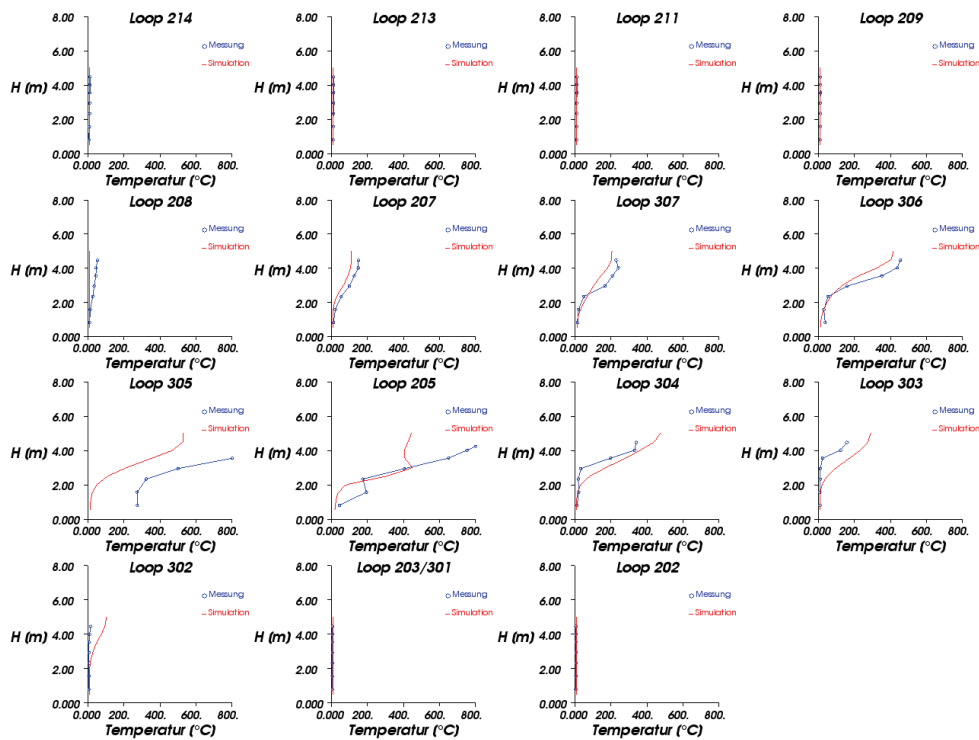


Abbildung 3-8: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 120 sec

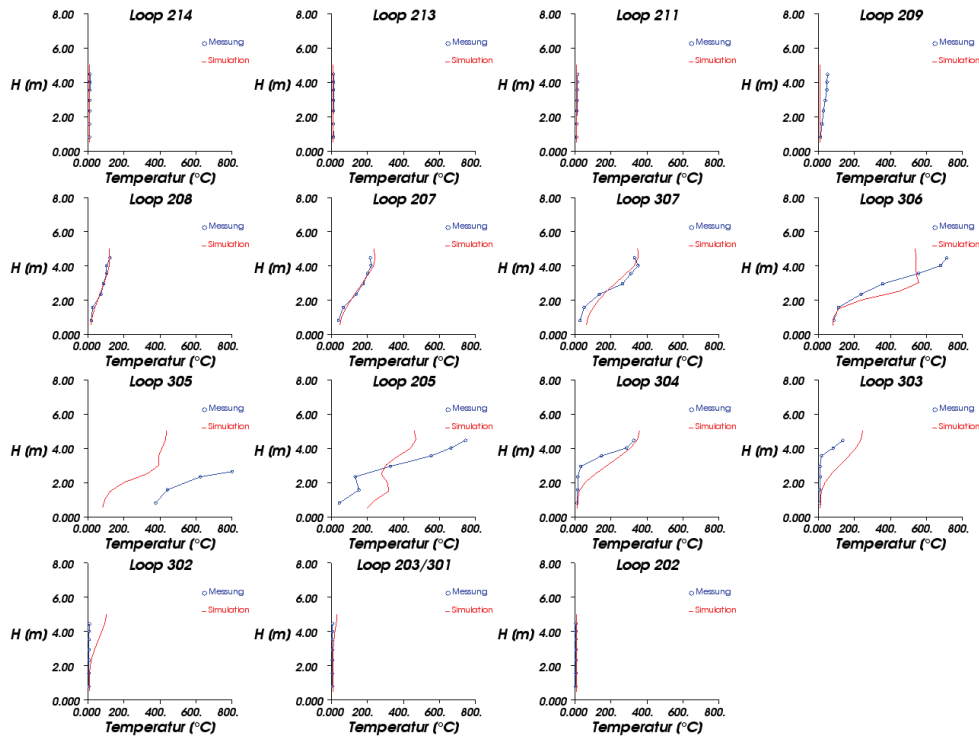


Abbildung 3-9: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 180 sec

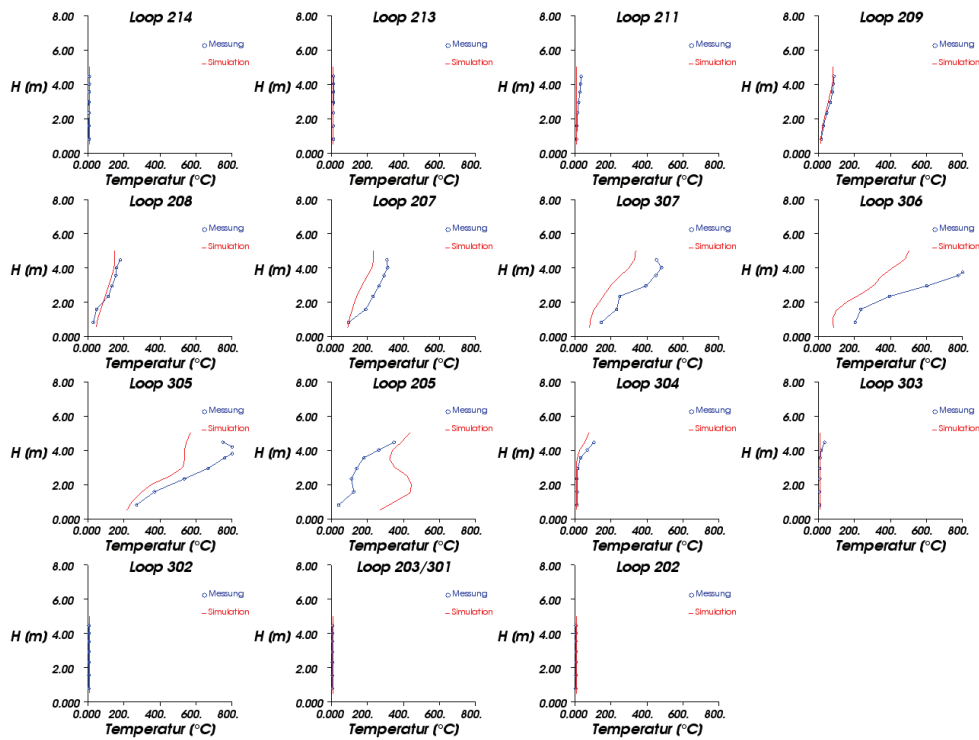


Abbildung 3-10: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 240 sec

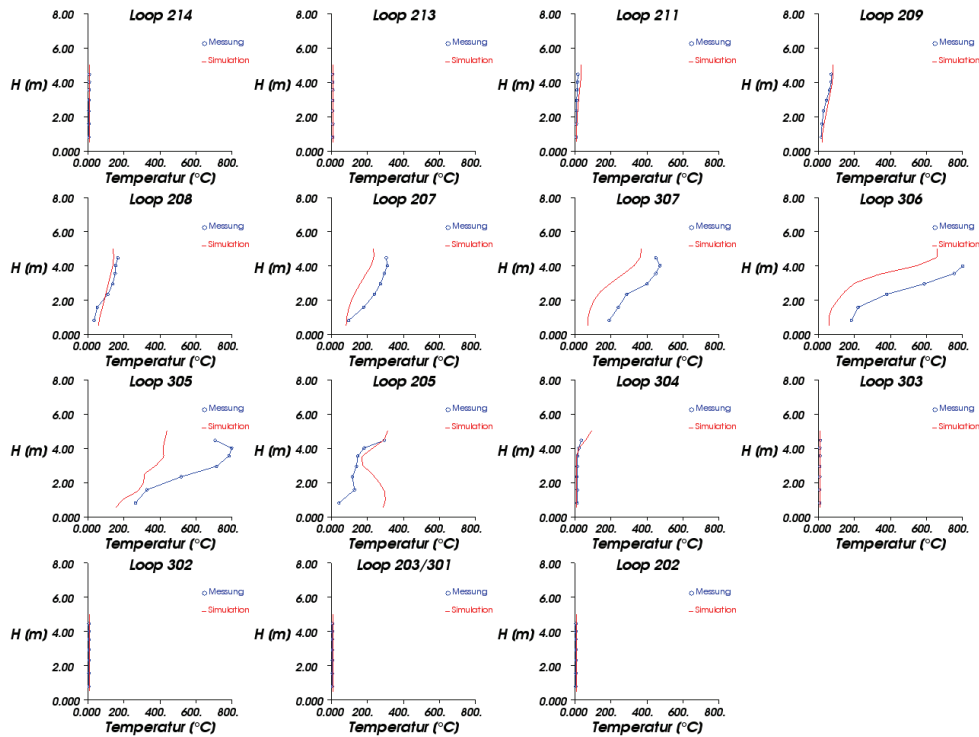


Abbildung 3-11: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 300 sec

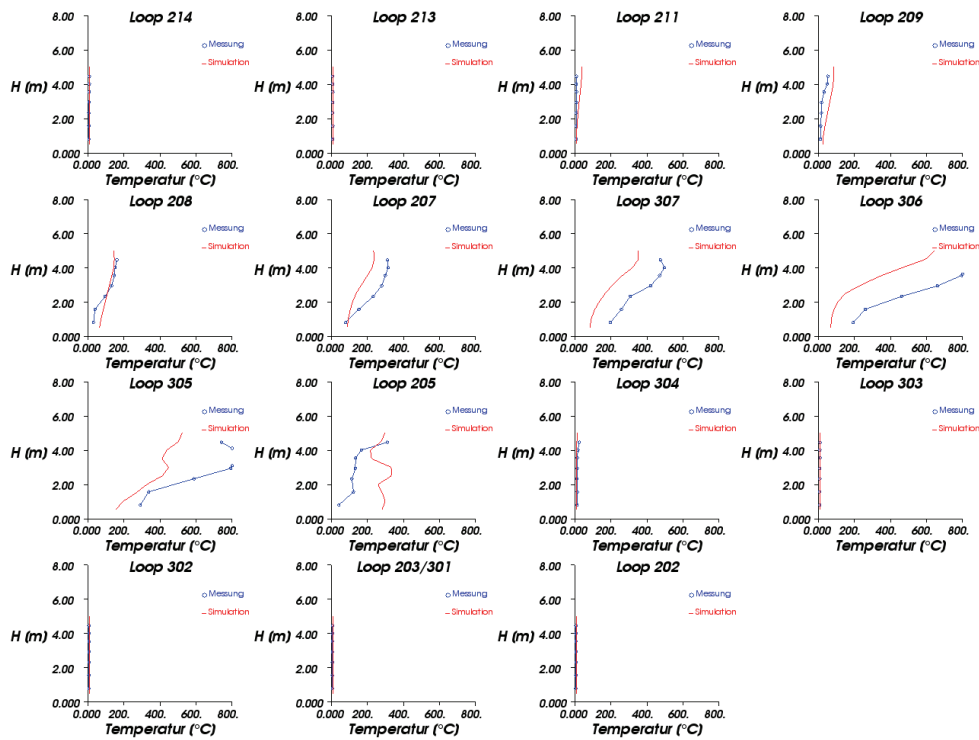


Abbildung 3-12: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 360 sec

V214 A Temperaturen t=60s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40
Mittelwert Messung [°C]	11,00	12,76	12,52	12,49	11,36	9,83	9,43	14,41	26,18	52,29	11,96	8,22	7,67	7,15	7,38
Abweichung MIN [°C]	0,05	2,26	2,53	2,68	1,43	0,21	0,00	0,00	5,99	1,48	0,02	0,02	1,35	1,65	1,29
Abweichung MAX [°C]	3,99	4,01	4,20	3,30	2,72	1,45	0,36	24,82	51,21	174,46	15,57	1,85	1,93	2,55	2,70
Mittelwert Abweichung [°C]	2,29	3,36	3,12	3,09	1,96	0,43	0,16	5,20	16,78	42,89	2,63	1,19	1,73	2,25	2,02
Mittlere Abweichung [%]	0,18	0,27	0,25	0,25	0,16	0,03	0,01	0,42	1,34	3,43	0,21	0,10	0,14	0,18	0,16
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	5,94														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	0,48														

V214 A Temperaturen t=360s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	9,40	9,40	23,08	58,13	111,92	155,90	196,01	233,77	367,01	277,99	10,02	9,55	9,42	9,40	9,40
Mittelwert Messung [°C]	7,94	9,14	9,36	25,51	102,80	232,85	362,19	542,41	525,70	345,28	15,31	9,83	7,72	7,15	7,42
Abweichung MIN [°C]	0,00	0,00	1,78	14,88	0,51	0,20	108,75	122,56	25,97	3,42	2,70	0,00	1,02	1,65	1,06
Abweichung MAX [°C]	2,70	1,12	29,09	45,51	46,24	115,86	215,05	443,44	288,16	236,95	13,30	1,98	2,35	2,55	2,70
Mittelwert Abweichung [°C]	1,53	0,39	13,72	32,62	20,22	77,57	166,18	308,64	158,69	118,02	5,29	0,52	1,70	2,25	1,98
Mittlere Abweichung [%]	0,12	0,03	1,10	2,61	1,62	6,21	13,31	24,72	12,71	9,45	0,42	0,04	0,14	0,18	0,16
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	60,62														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	4,85														

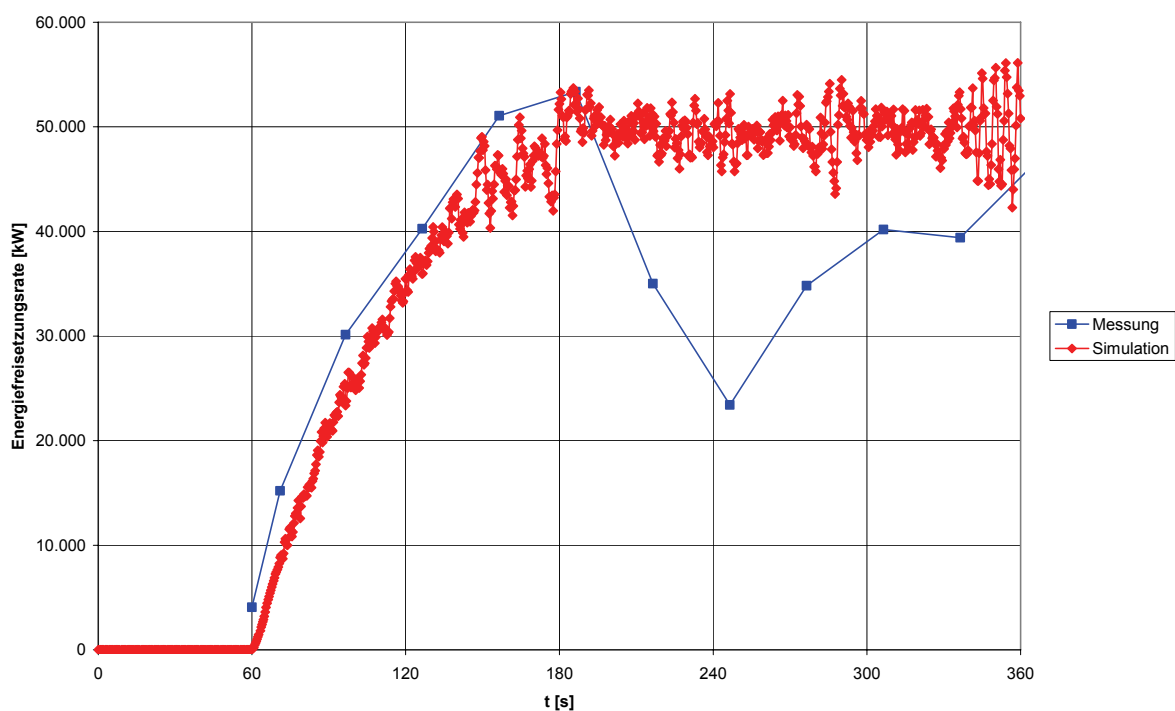
Tabelle 3-2: Abweichungen der Temperaturen V214A

4 Brandversuch V215 A

4.1 Kenndaten Brandversuch V215 A

Versuchs-Nr.	Brand-leistung	Brand-fläche	Strömungs-geschw. im Verkehrsraum	Aktivieren der Lüftung	Abluft-menge	Temperatur	
						innen	außen
[-]	[MW]	[m ²]	[m/s]	[min]	[m ³ /s/n _{FS} /L]	[°C]	[°C]
215A	50	22,5	- 1,35	2	0,124	8,5	8,9

4.2 Energiefreisetzungsrate V215 A



4.3 Geschwindigkeiten V215 A

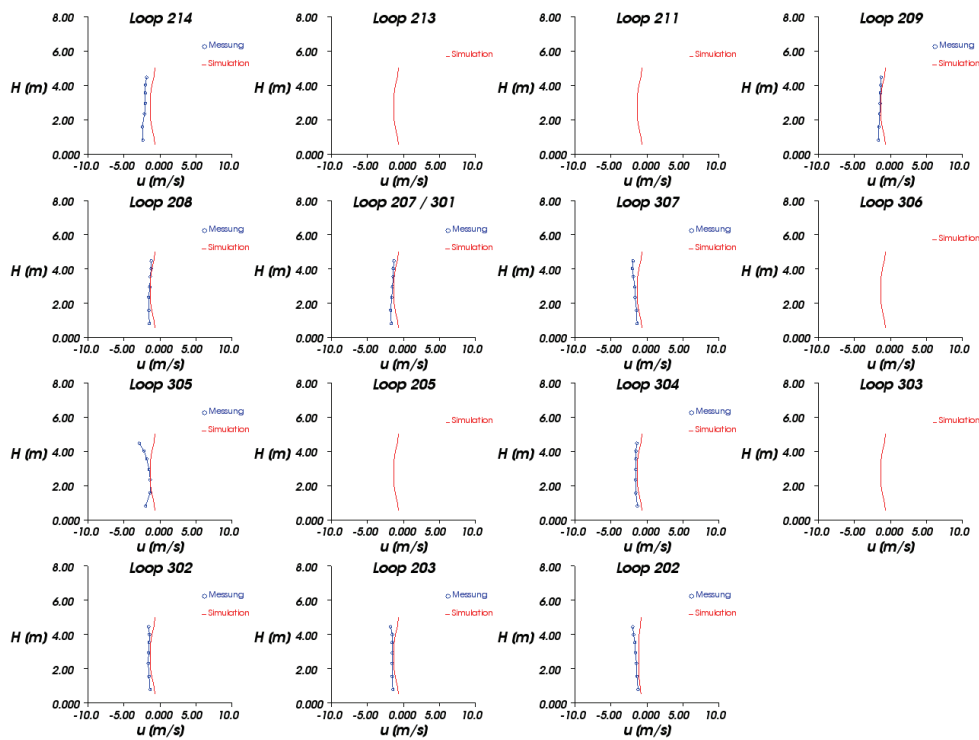


Abbildung 4-1: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 60$ sec

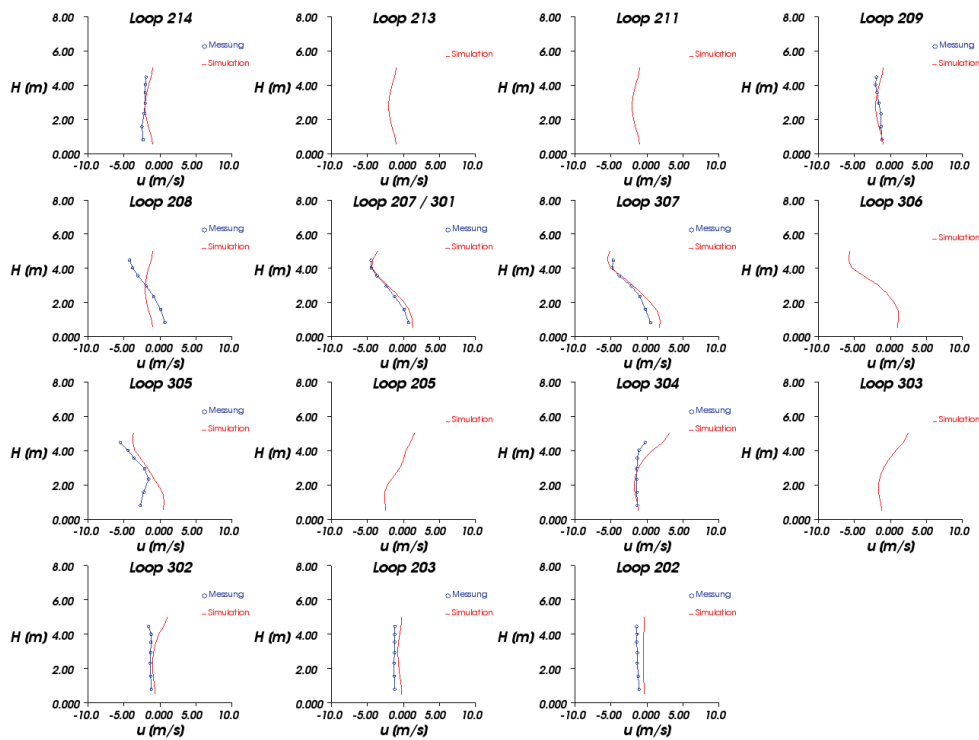


Abbildung 4-2: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 120$ sec

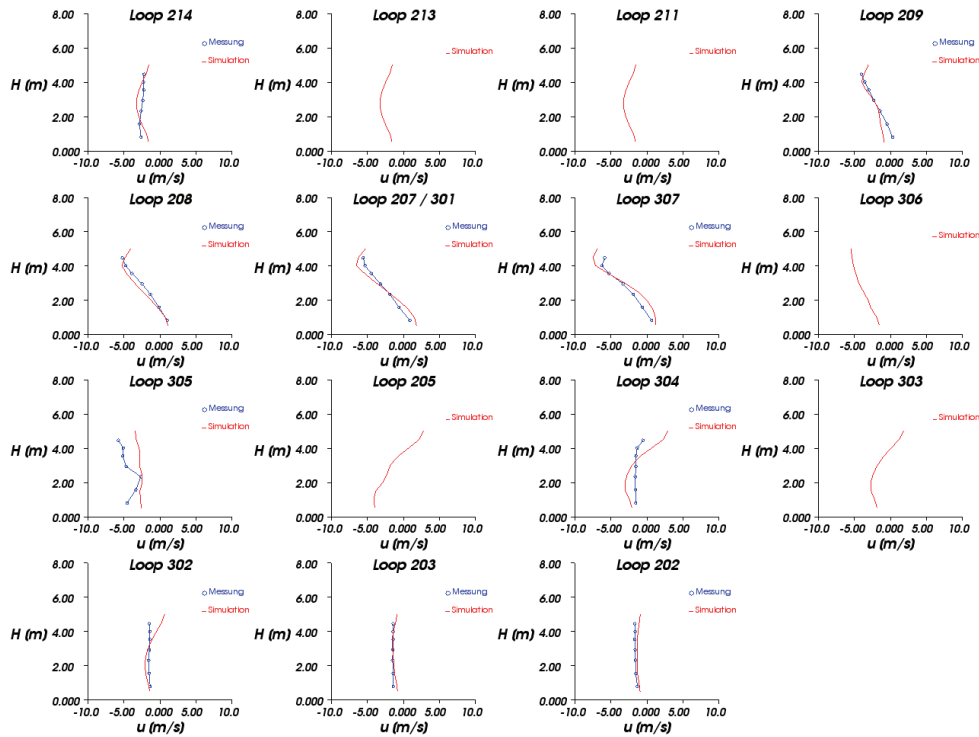


Abbildung 4-3: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 180$ sec

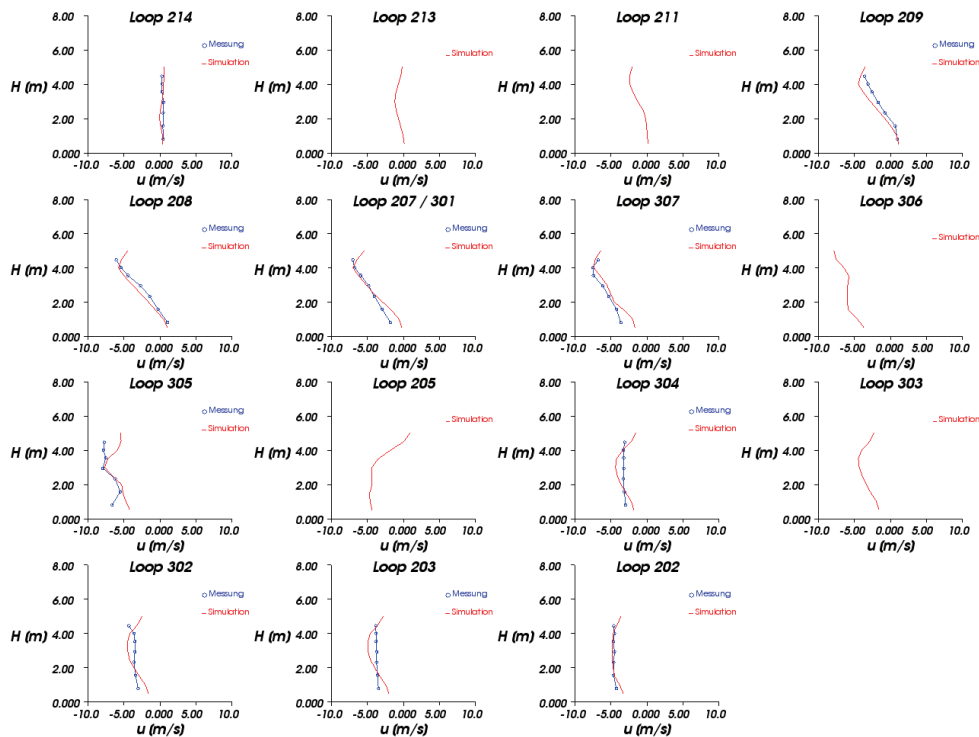


Abbildung 4-4: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 240$ sec

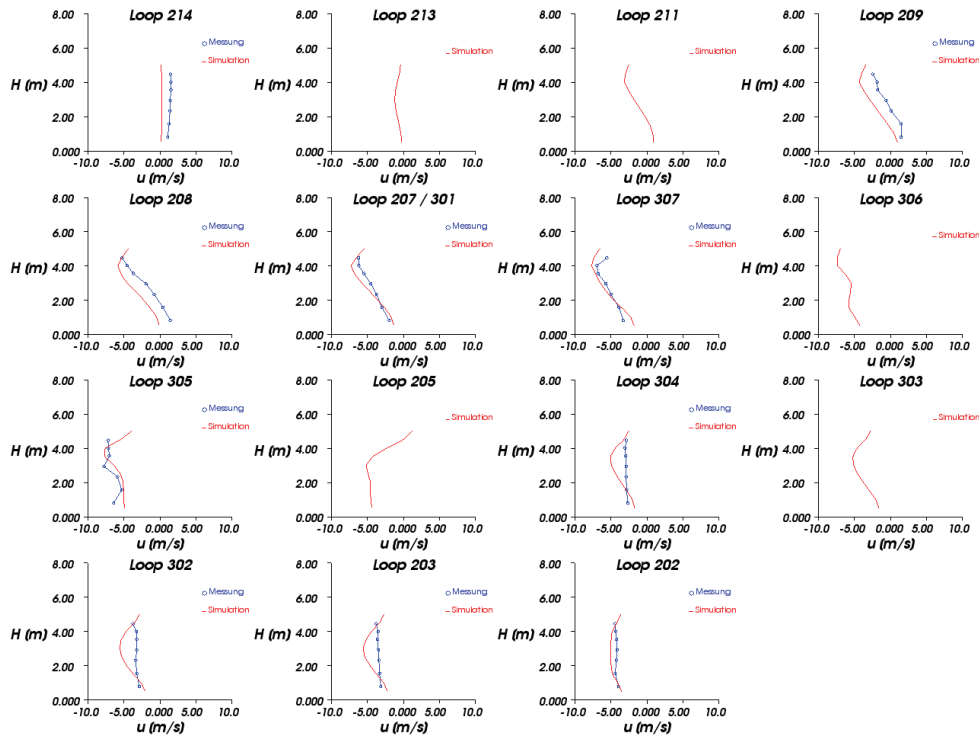


Abbildung 4-5: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 300$ sec

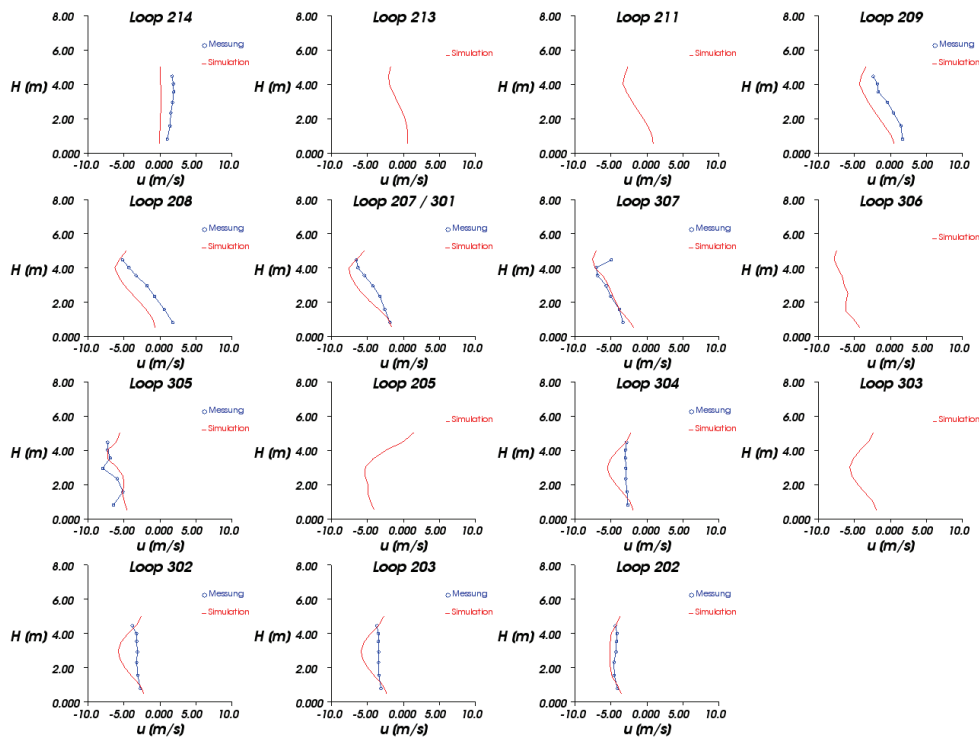


Abbildung 4-6: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 360$ sec

V215 A Geschwindigkeiten t=60s

Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [m/s]	-1,17	-1,17	-1,17	-1,17	-1,17	-1,17	-1,17	-1,17	-1,17	-1,07
Mittelwert Messung [m/s]	-2,15	-1,47	-1,41	-1,56	-1,67	-1,71	-1,50	-1,51	-1,55	-1,54
Abweichung MIN [m/s]	0,66	0,06	0,03	0,14	0,26	0,00	0,17	0,20	0,17	0,28
Abweichung MAX [m/s]	1,59	0,89	0,69	0,91	1,06	2,00	0,56	0,71	0,92	1,04
Mittelwert Abweichung [m/s]	0,98	0,30	0,24	0,39	0,50	0,54	0,33	0,34	0,38	0,47
Mittlere Abweichung [%]	9,96	3,04	2,48	3,98	5,10	5,53	3,37	3,48	3,86	4,77
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	0,45									
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	4,56									

V215 A Geschwindigkeiten t=360s

Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [m/s]	0,08	-2,36	-3,91	-5,39	-5,04	-5,81	-4,15	-4,57	-4,67	-4,84
Mittelwert Messung [m/s]	1,59	-0,12	-1,46	-4,02	-5,18	-6,52	-2,86	-3,15	-3,40	-4,33
Abweichung MIN [m/s]	1,06	1,37	0,43	0,03	0,01	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01
Abweichung MAX [m/s]	1,78	2,63	3,08	2,29	2,56	2,04	2,56	2,63	2,44	0,86
Mittelwert Abweichung [m/s]	1,51	2,24	2,46	1,37	0,50	0,76	1,36	1,45	1,33	0,53
Mittlere Abweichung [%]	15,35	22,78	25,00	13,92	5,06	7,78	13,83	14,80	13,58	5,39
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	1,35									
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	13,75									

Tabelle 4-1: Abweichungen der Geschwindigkeiten V215A

4.4 Temperaturen V215 A

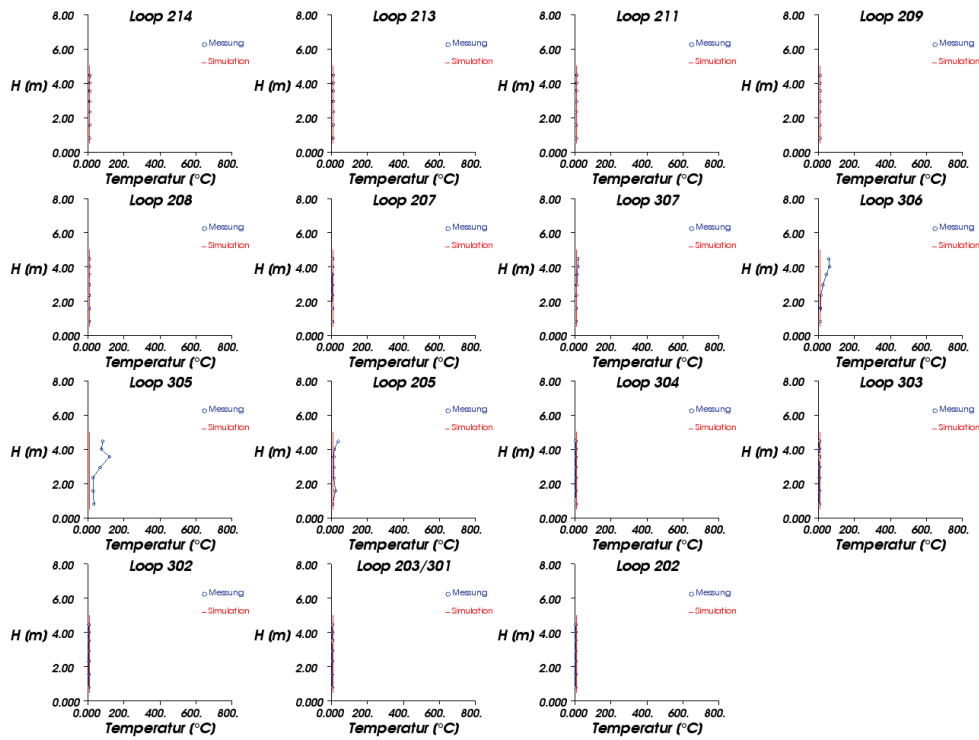


Abbildung 4-7: Temperaturen im Verkehrsraum nach $t = 60$ sec

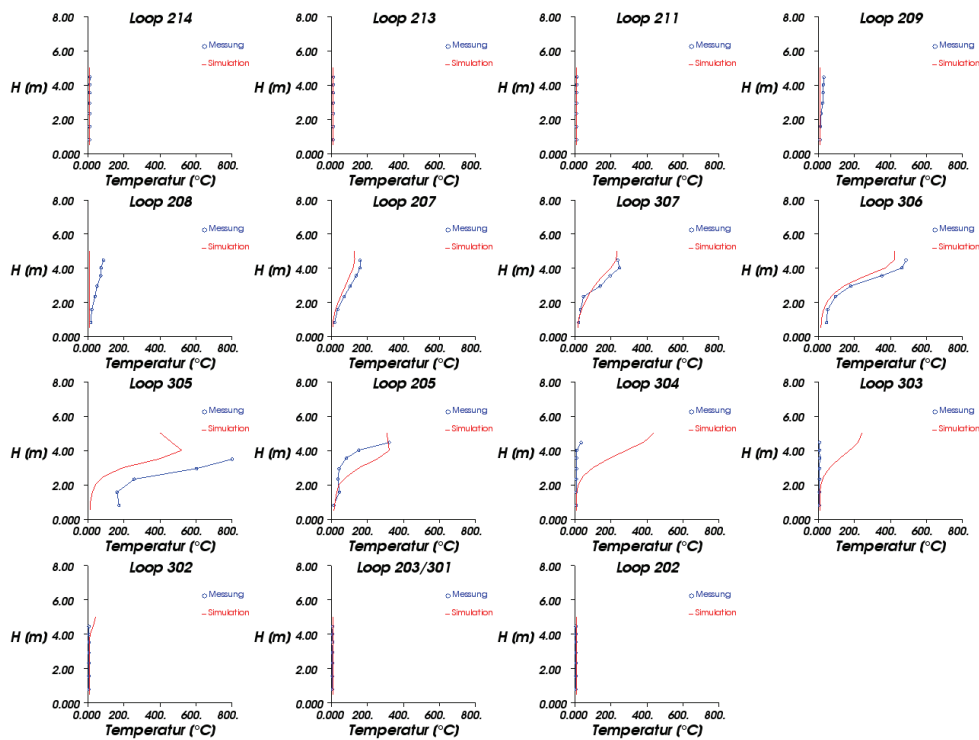


Abbildung 4-8: Temperaturen im Verkehrsraum nach $t = 120$ sec

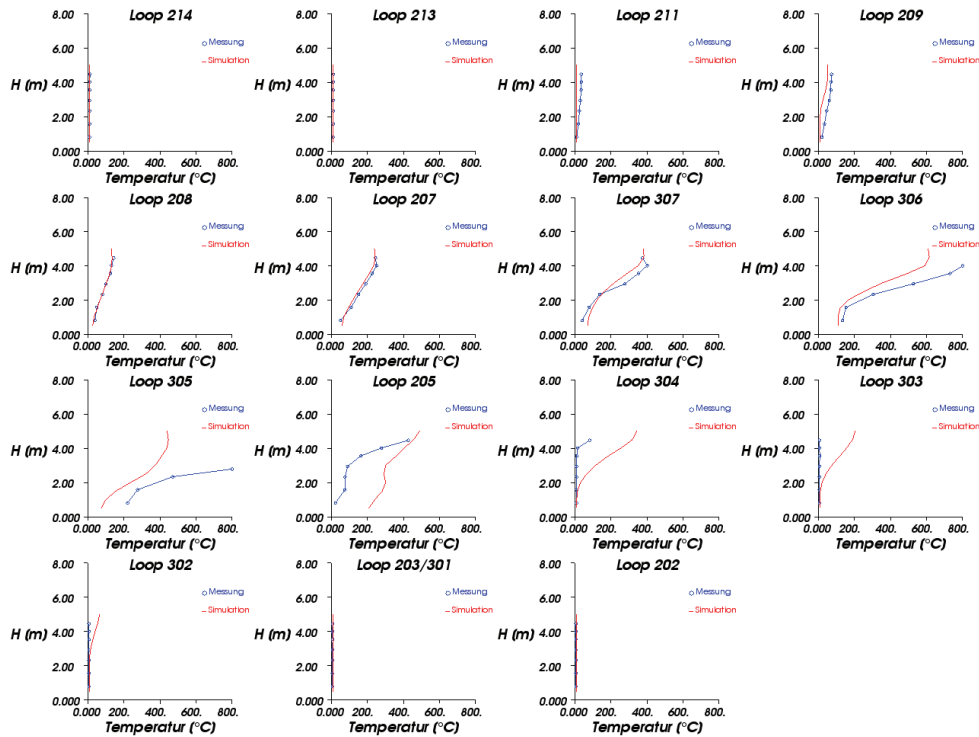


Abbildung 4-9: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 180 sec

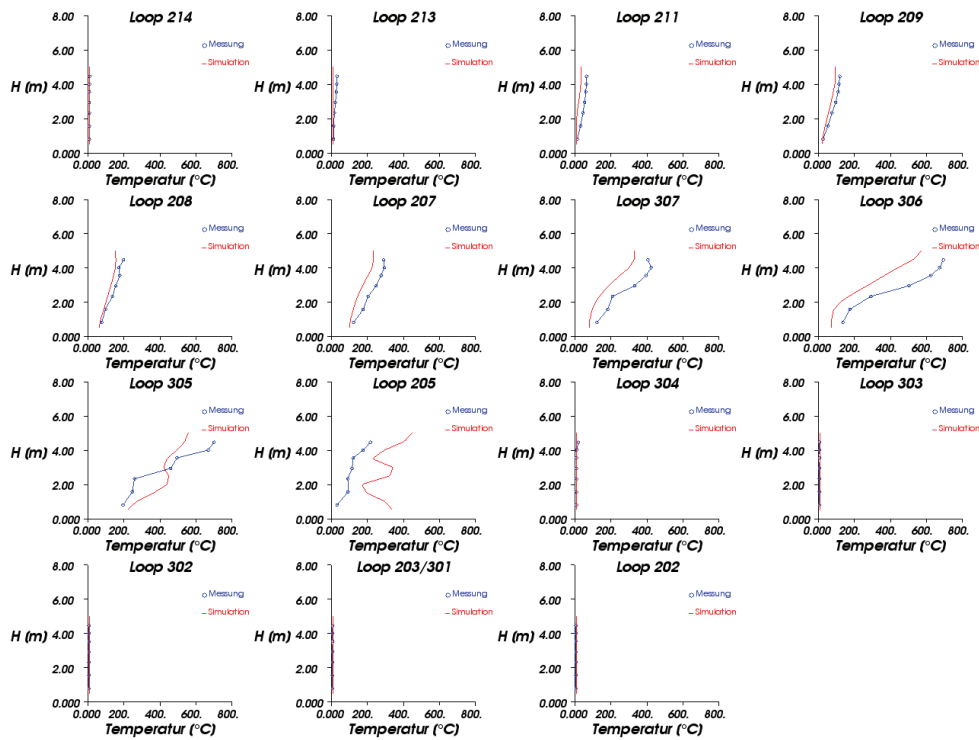


Abbildung 4-10: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 240 sec

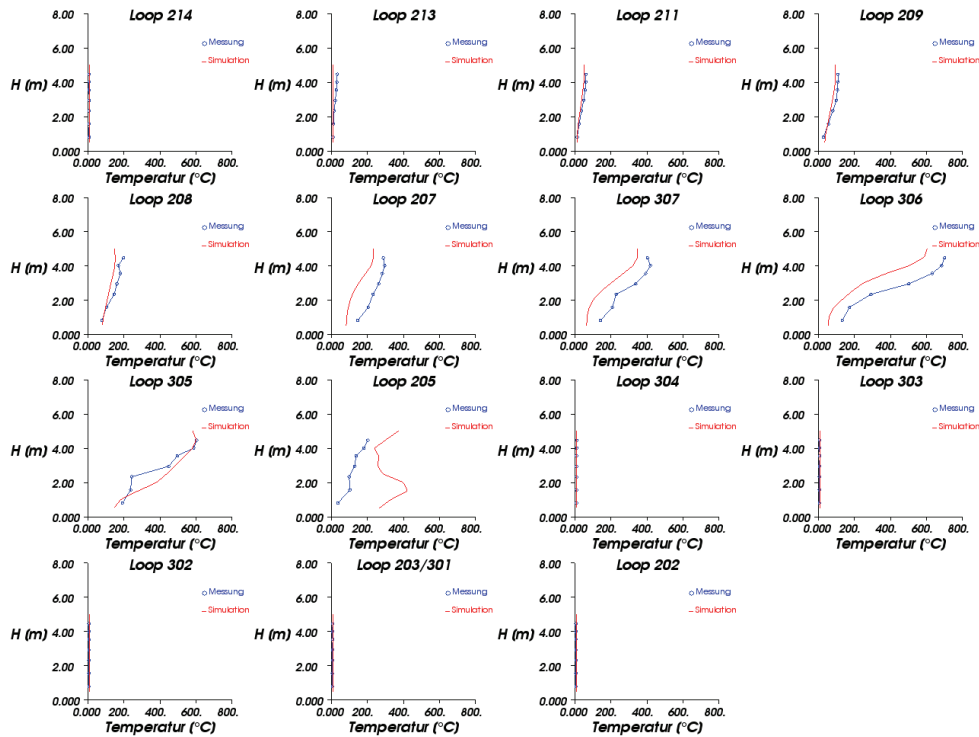


Abbildung 4-11: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 300 sec

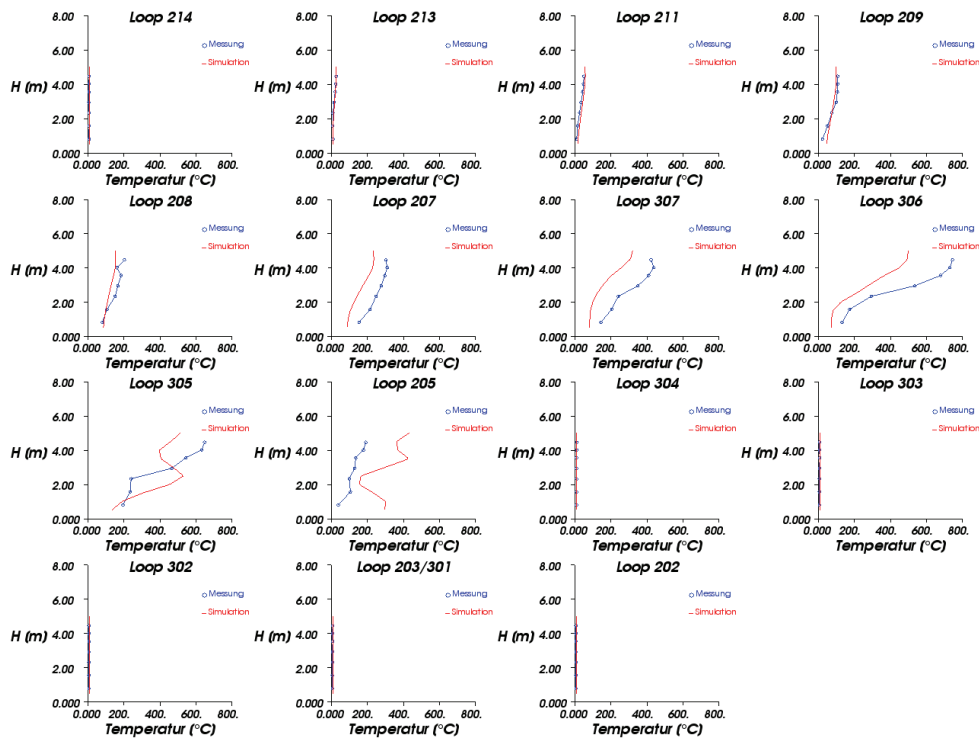


Abbildung 4-12: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 360 sec

V215 A Temperaturen t=60s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,89
Mittelwert Messung [°C]	11,65	11,81	10,66	10,16	9,44	8,54	12,46	29,43	59,62	18,31	7,86	7,72	7,29	7,77	7,41
Abweichung MIN [°C]	2,48	2,93	1,60	1,49	0,65	0,01	0,32	1,91	21,26	0,92	0,01	0,01	0,84	0,00	0,71
Abweichung MAX [°C]	4,38	3,90	4,30	2,12	1,69	0,83	10,02	54,17	111,33	31,12	1,37	1,29	1,60	1,66	1,71
Mittelwert Abweichung [°C]	3,15	3,31	2,16	1,66	0,94	0,17	3,96	20,93	51,12	9,81	0,69	0,86	1,21	0,77	1,48
Mittlere Abweichung [%]	0,28	0,29	0,19	0,15	0,08	0,02	0,35	1,84	4,50	0,86	0,06	0,08	0,11	0,07	0,13
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	6,82														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	0,6														

V215 A Temperaturen t=360s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	8,87	17,90	40,76	79,59	123,52	161,66	155,28	244,09	320,49	284,50	9,11	8,90	8,84	8,85	8,89
Mittelwert Messung [°C]	8,07	15,85	31,65	80,11	147,33	254,53	301,84	430,04	390,56	240,47	10,90	7,72	7,29	7,77	7,41
Abweichung MIN [°C]	0,13	0,05	7,46	0,29	0,09	62,44	61,11	60,11	0,71	0,23	0,51	0,02	1,19	0,01	0,71
Abweichung MAX [°C]	1,92	4,92	11,01	26,40	48,49	107,06	205,45	309,54	143,83	191,06	2,91	1,63	1,94	1,99	1,72
Mittelwert Abweichung [°C]	0,80	2,25	9,11	10,80	24,89	92,86	146,57	185,95	71,00	54,77	1,78	1,20	1,55	1,09	1,48
Mittlere Abweichung [%]	0,07	0,20	0,80	0,95	2,19	8,17	12,89	16,36	6,25	4,82	0,16	0,11	0,14	0,10	0,13
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	40,41														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	3,55														

Tabelle 4-2: Abweichungen der Temperaturen V215A

Brandversuche mit Längslüftung

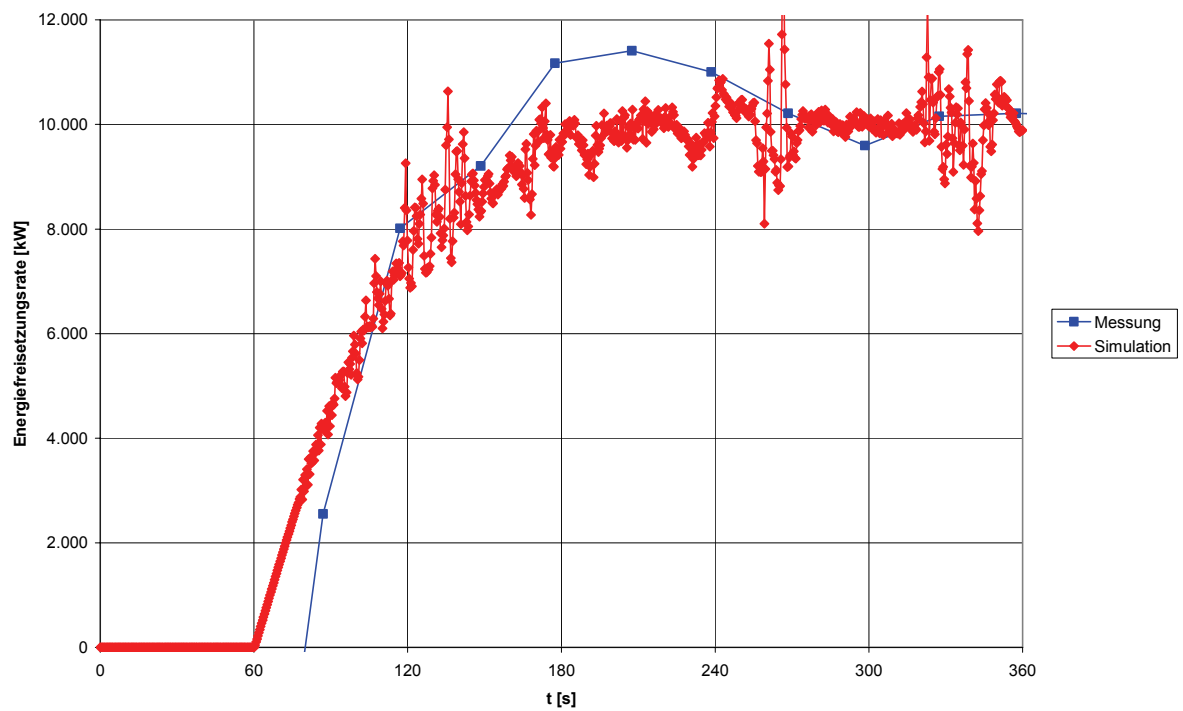
1 Brandversuch V605	D2
1.1 Kenndaten Brandversuch V605	D2
1.2 Energiefreisetzungsrates V605	D2
1.3 Geschwindigkeiten V605	D3
2 Brandversuch V607	D11
2.1 Kenndaten Brandversuch V607	D11
2.2 Energiefreisetzungsrates V607	D11
2.3 Geschwindigkeiten V607	D12
2.4 Temperaturen V607	D16
3 Brandversuch V610	D20
3.1 Kenndaten Brandversuch V610	D20
3.2 Energiefreisetzungsrates V610	D20
3.3 Geschwindigkeiten V610	D21
4 Brandversuch V621 A	D29
4.1 Kenndaten Brandversuch V621 A	D29
4.2 Energiefreisetzungsrates V621 A	D29
4.3 Geschwindigkeiten V621A	D30
4.4 Temperaturen V621A	D34
5 Schaltmatrizen der Strahlventilatoren	D38
5.1 Schaltmatrix V605	D38
5.2 Schaltmatrix V606A	D39
5.3 Schaltmatrix V607	D40
5.4 Schaltmatrix V610	D41
5.5 Schaltmatrix V621A	D42

1 Brandversuch V605

1.1 Kenndaten Brandversuch V605

Versuchs-Nr.	Brand-leistung	Brand-fläche	Strömungs-geschw. im Verkehrsraum	Aktivieren der Lüftung	Temperatur	
					innen	außen
[-]	[MW]	[m ²]	[m/s]	[min]	[°C]	[°C]
605	10	4,5	5,95	0	5,6	1

1.2 Energiefreisetzungsrate V605



1.3 Geschwindigkeiten V605

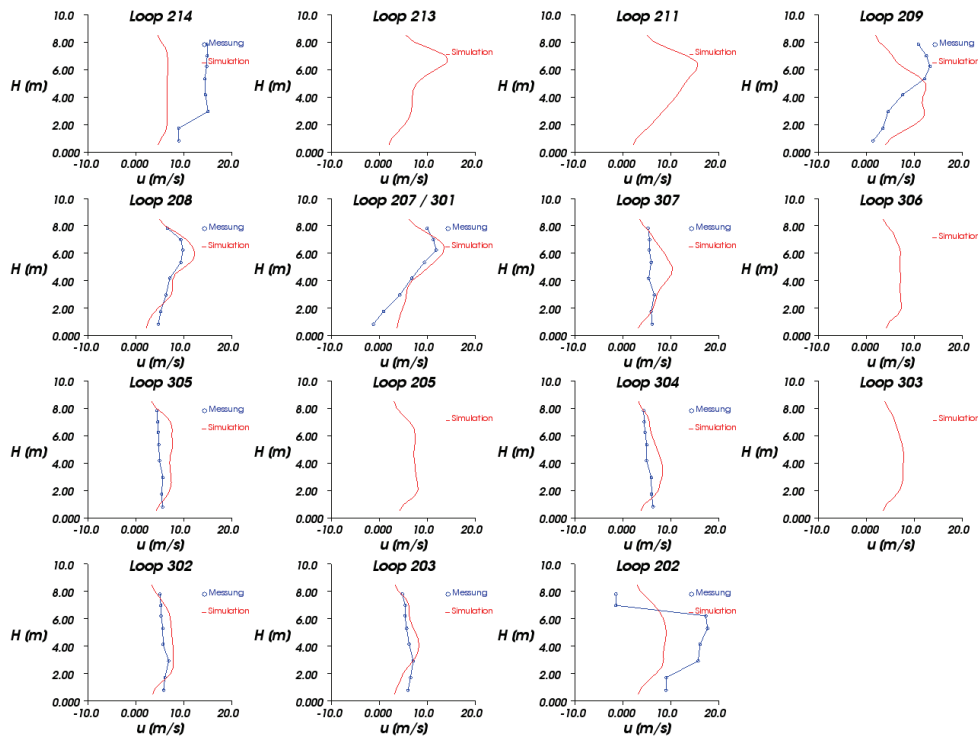


Abbildung 1-1: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach t = 60 sec

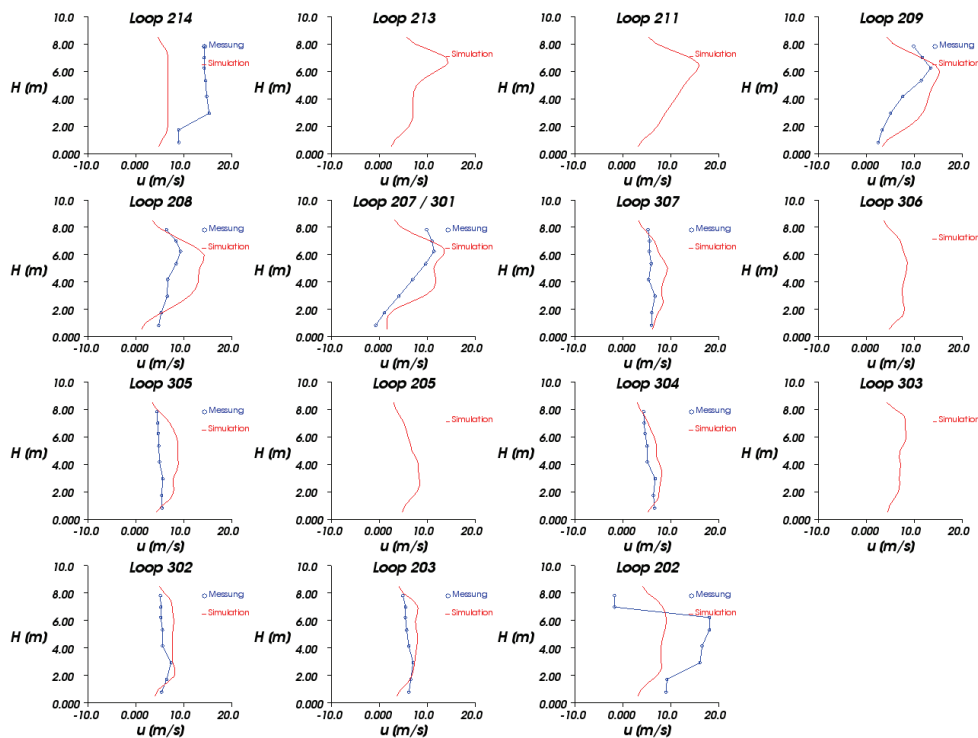


Abbildung 1-2: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach t = 120 sec

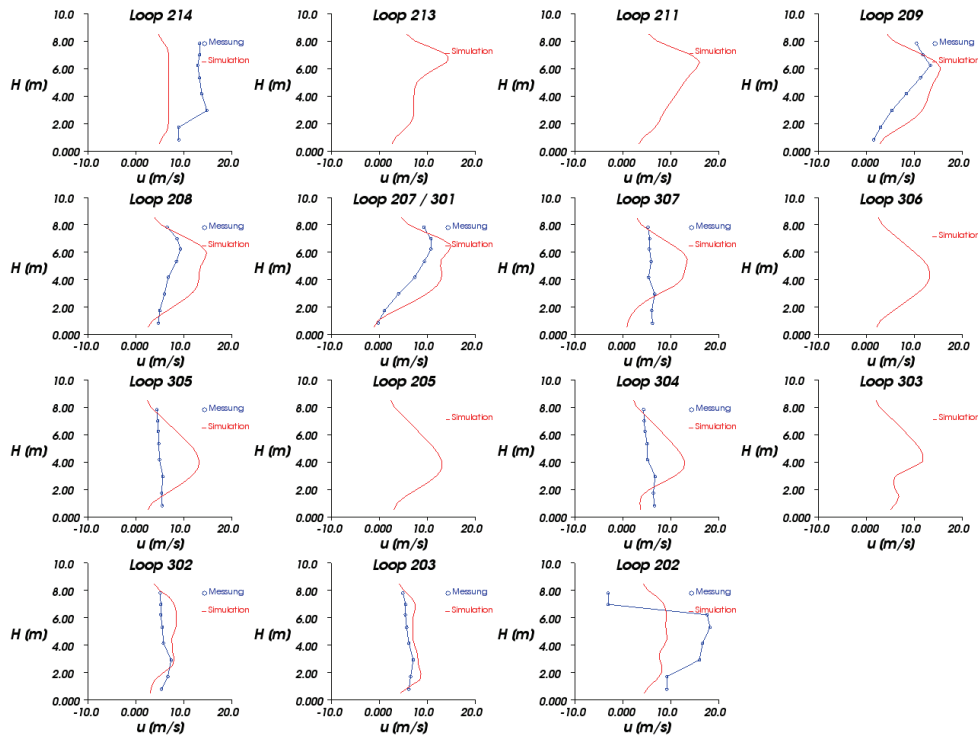


Abbildung 1-3: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 180$ sec

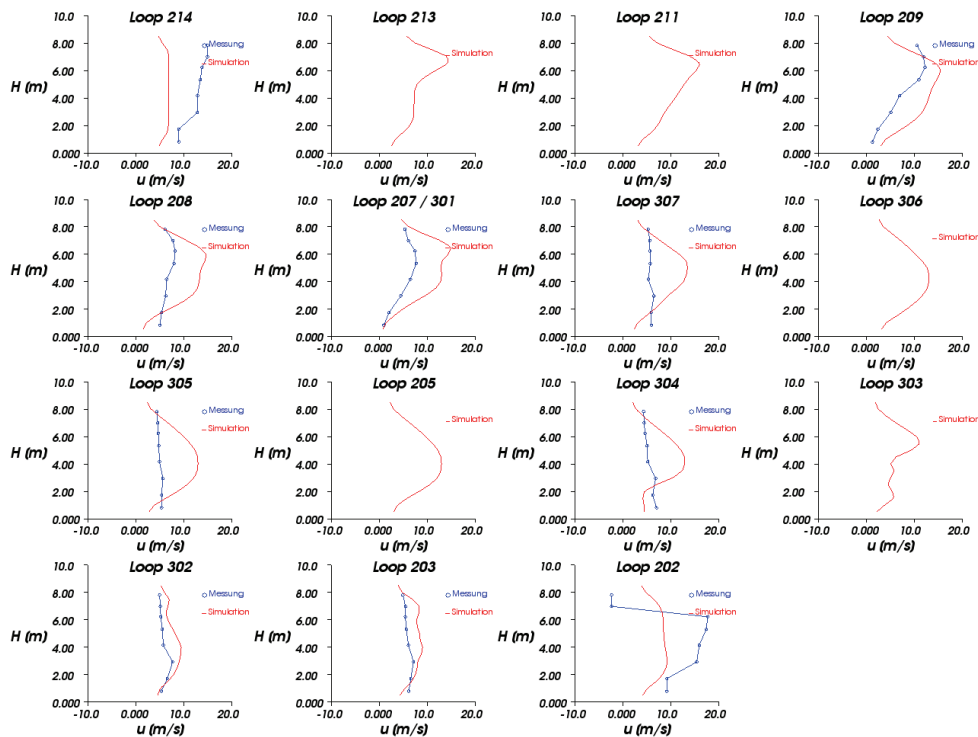


Abbildung 1-4: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 240$ sec

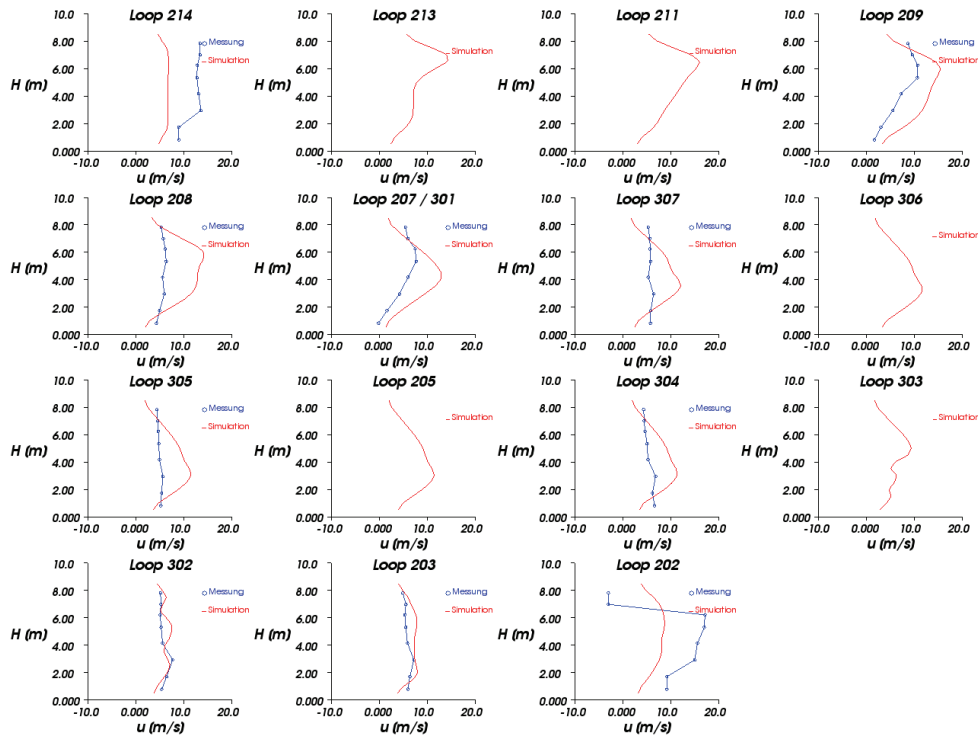


Abbildung 1-5: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 300$ sec

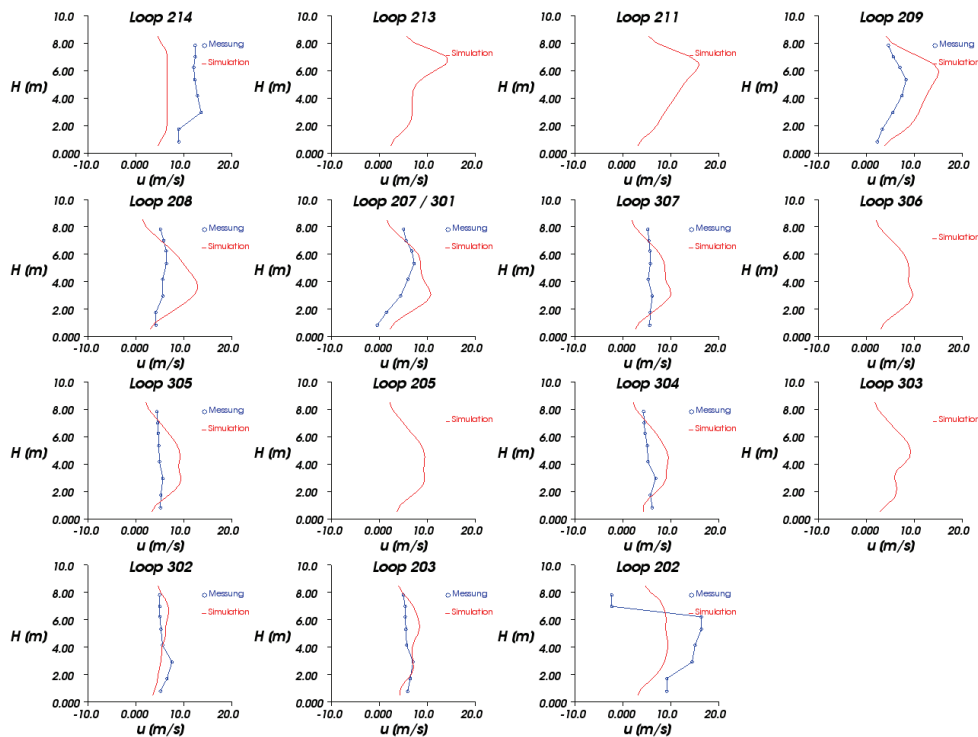


Abbildung 1-6: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 360$ sec

V605 Geschwindigkeiten t=60s

Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [m/s]	6,39	9,18	8,05	8,31	7,47	6,93	6,68	6,79	6,31	7,39
Mittelwert Messung [m/s]	13,40	8,07	7,35	6,55	5,81	5,02	5,23	5,78	6,01	11,71
Abweichung MIN [m/s]	2,60	0,16	0,04	0,05	0,01	0,07	0,05	0,05	0,03	0,38
Abweichung MAX [m/s]	9,18	7,77	2,61	5,08	4,63	2,92	3,07	2,01	2,55	9,08
Mittelwert Abweichung [m/s]	7,00	5,12	1,31	1,90	2,00	1,97	1,69	1,30	1,29	6,40
Mittlere Abweichung [%]	33,11	24,23	6,19	8,96	9,47	9,32	7,99	6,16	6,08	30,23
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	3,00									
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	14,17									

V605 Geschwindigkeiten t=360s

Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [m/s]	6,37	11,06	8,64	7,48	7,26	7,32	7,23	5,60	6,88	7,99
Mittelwert Messung m/s]	11,82	5,79	5,47	4,75	5,63	4,97	5,41	5,78	5,90	10,91
Abweichung MIN [m/s]	2,59	1,67	0,01	0,00	0,00	0,06	0,03	0,06	0,01	0,20
Abweichung MAX [m/s]	7,04	7,76	7,31	6,36	4,03	4,33	4,28	2,33	2,90	10,57
Mittelwert Abweichung [m/s]	5,45	5,27	3,61	3,06	2,30	2,58	2,20	1,40	1,33	6,00
Mittlere Abweichung [%]	25,76	24,89	17,05	14,48	10,89	12,21	10,38	6,60	6,28	28,38
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	3,32									
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	15,69									

Tabelle 1-1: Abweichungen der Geschwindigkeiten V605

Temperaturen

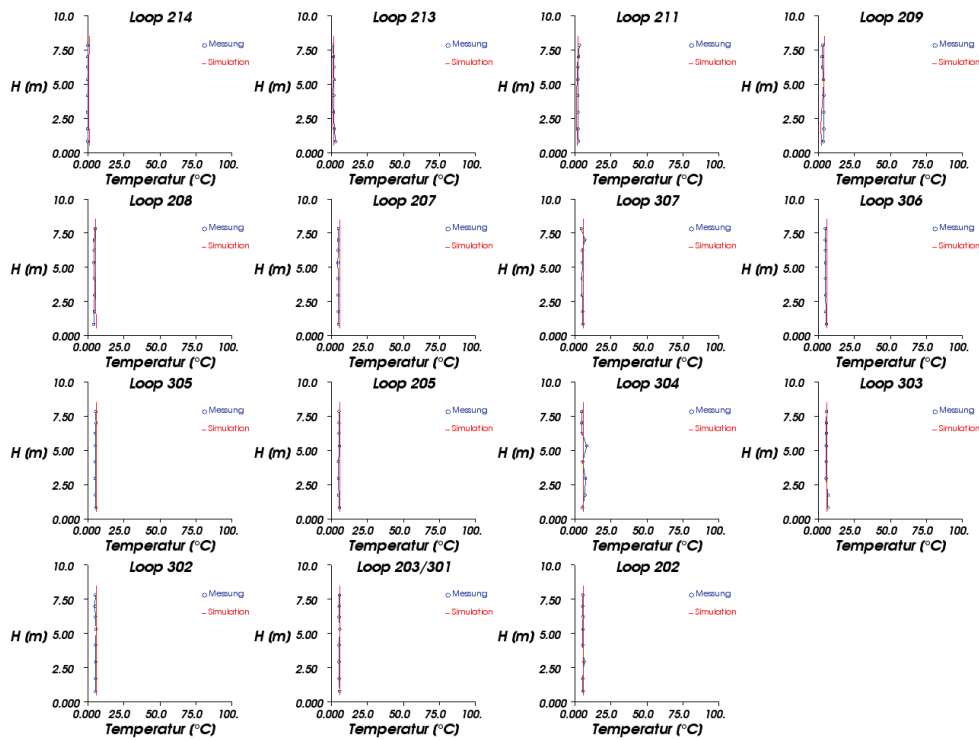


Abbildung 1-7: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 60 sec

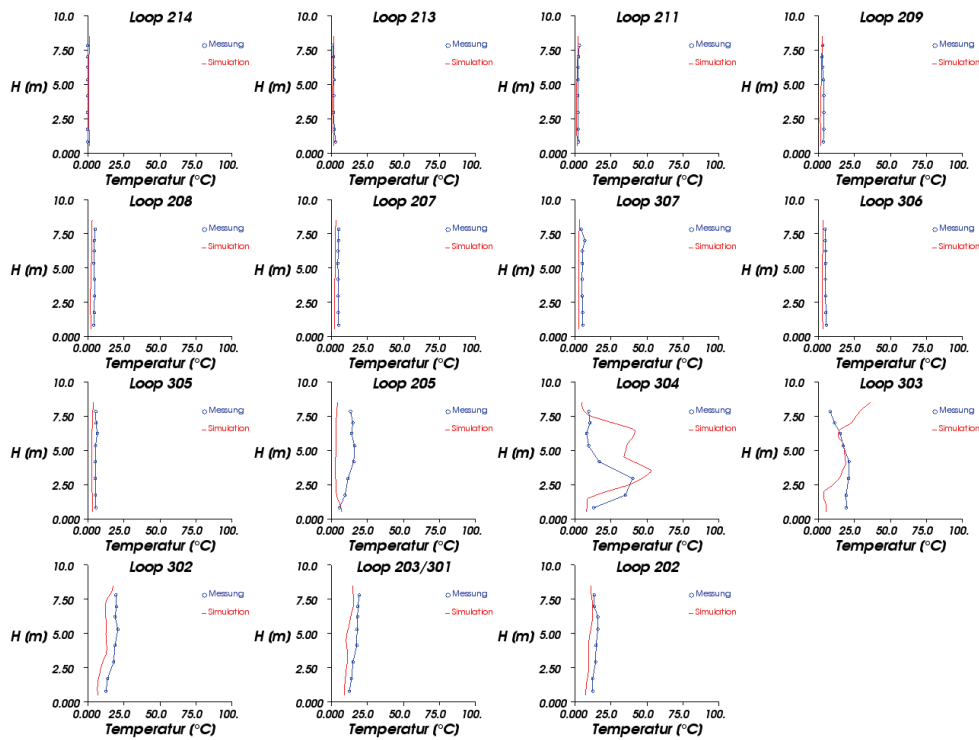


Abbildung 1-8: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 120 sec

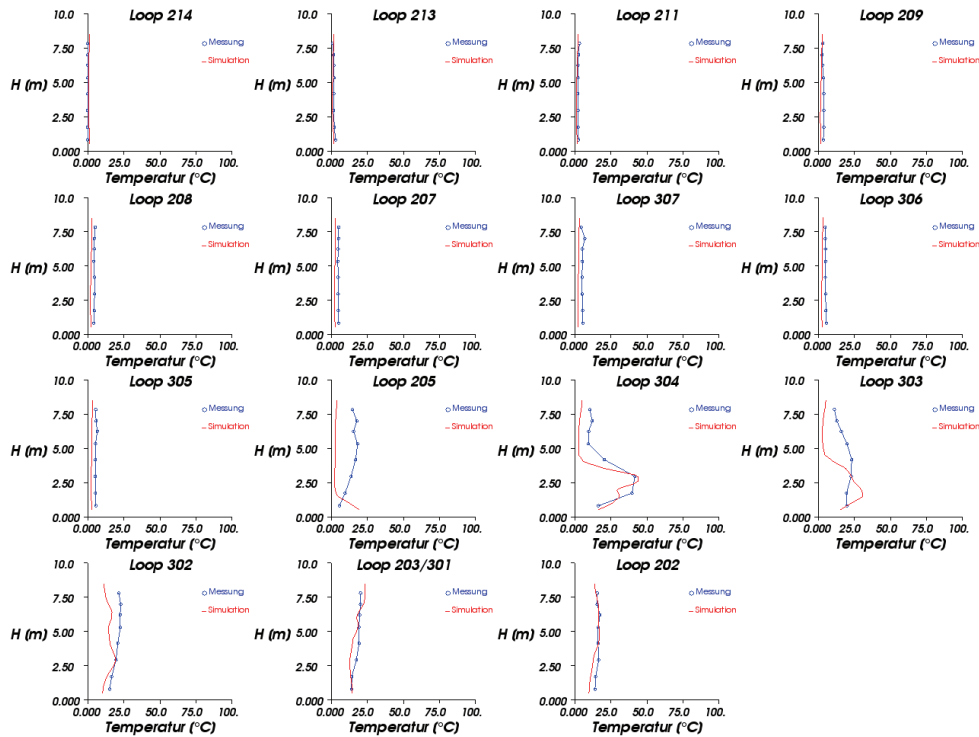


Abbildung 1-9: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 180 sec

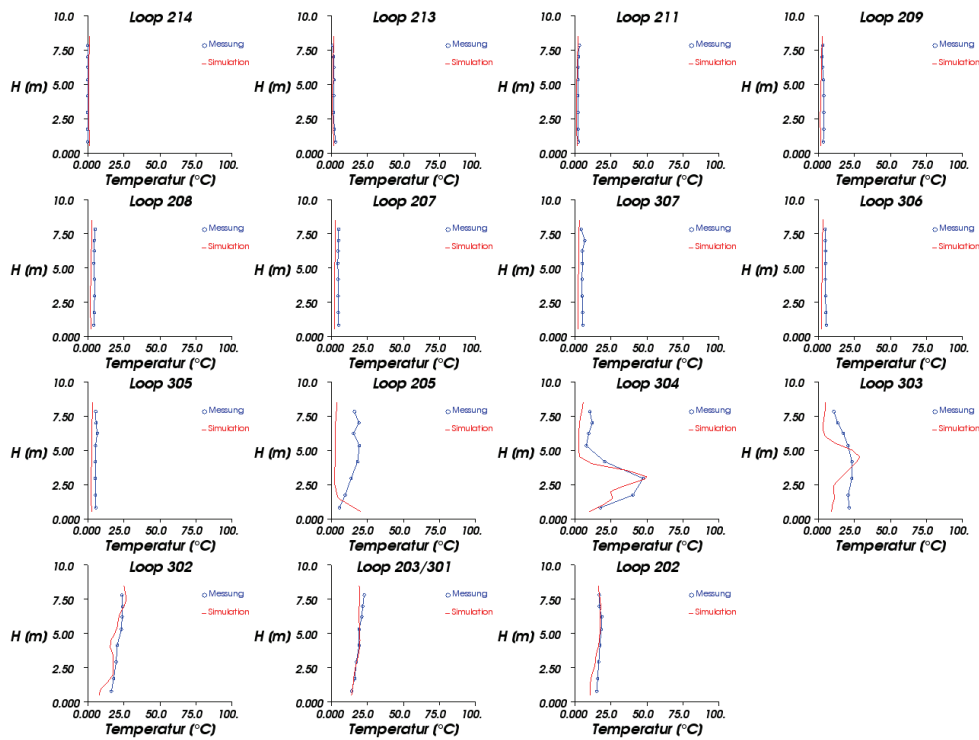


Abbildung 1-10: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 240 sec

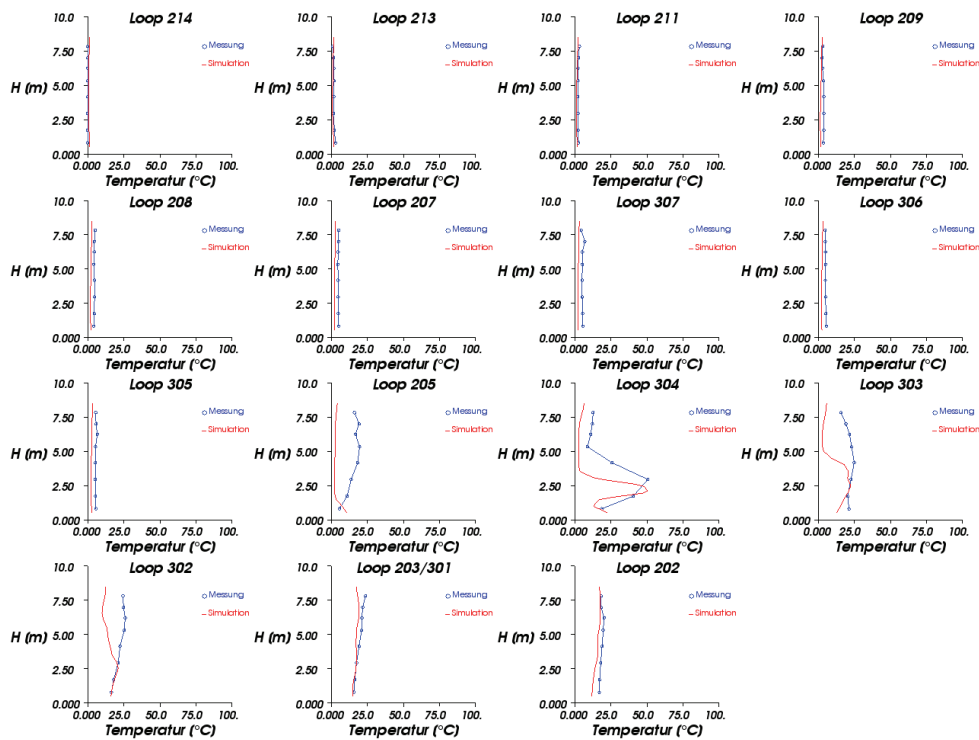


Abbildung 1-11: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 300 sec

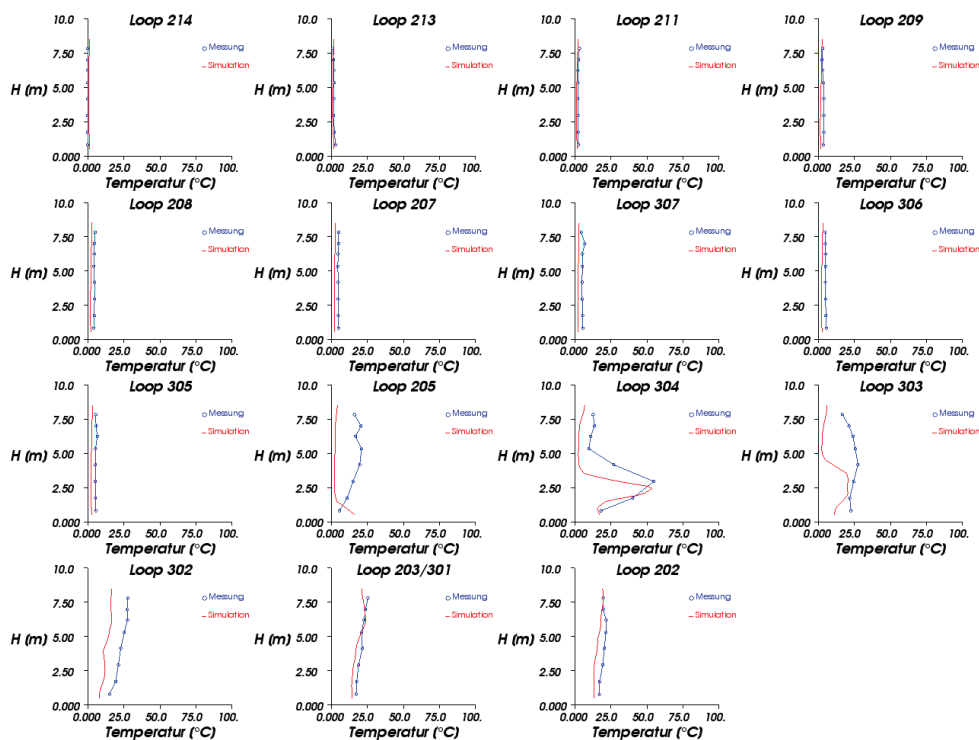


Abbildung 1-12: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 360 sec

V605 Temperaturen t=60s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	1,05	1,34	1,67	3,17	5,47	5,93	5,99	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Mittelwert Messung [°C]	0,00	1,96	2,45	3,58	4,64	4,94	5,52	5,16	5,44	5,38	6,37	5,90	5,54	5,66	5,82
Abweichung MIN [°C]	1,00	0,03	0,31	0,02	0,19	0,68	0,05	0,25	0,18	0,22	0,01	0,01	0,10	0,00	0,02
Abweichung MAX [°C]	1,35	1,08	1,19	1,89	1,59	1,22	1,37	1,15	0,73	0,94	2,36	0,82	0,90	0,47	0,57
Mittelwert Abweichung [°C]	1,05	0,70	0,78	1,06	0,83	0,99	0,60	0,84	0,56	0,62	0,96	0,41	0,46	0,34	0,30
Mittlere Abweichung [%]	1,91	1,28	1,42	1,94	1,52	1,80	1,09	1,54	1,02	1,13	1,75	0,75	0,84	0,63	0,54
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	0,7														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	1,28														

V605 Temperaturen t=360s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	1,04	1,25	1,51	1,97	2,29	2,46	2,53	2,59	2,62	3,67	20,35	15,40	18,25	18,03	16,93
Mittelwert Messung [°C]	0,00	1,96	2,45	3,58	4,64	4,94	5,52	5,16	7,53	14,51	25,66	23,81	23,29	20,82	19,81
Abweichung MIN [°C]	1,00	0,03	0,51	0,28	1,82	2,15	1,60	1,72	3,13	0,37	0,77	0,07	0,15	0,03	0,68
Abweichung MAX [°C]	1,28	1,29	1,32	2,42	2,86	2,78	4,21	3,14	5,73	15,56	36,16	18,84	9,78	6,88	4,51
Mittelwert Abweichung [°C]	1,04	0,77	0,94	1,61	2,34	2,49	2,99	2,57	4,91	11,39	12,75	8,46	5,18	3,04	2,88
Mittlere Abweichung [%]	1,89	1,40	1,71	2,94	4,28	4,54	5,46	4,69	8,96	20,81	23,29	15,46	9,46	5,55	5,26
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	4,22														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	7,72														

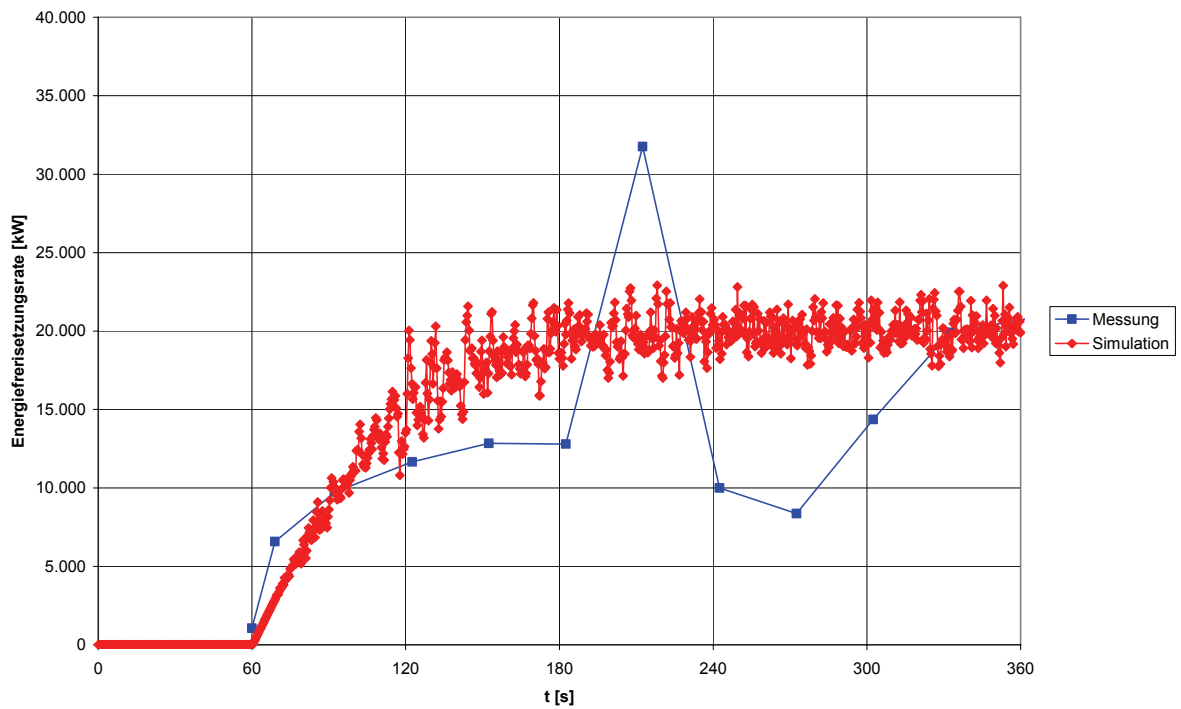
Tabelle 1-2: Abweichungen der Temperaturen V605

2 Brandversuch V607

2.1 Kenndaten Brandversuch V607

Versuchs-Nr.	Brand-leistung	Brand-fläche	Strömungs-geschw. im Verkehrsraum	Aktivieren der Lüftung	Temperatur	
					innen	außen
[-]	[MW]	[m ²]	[m/s]	[min]	[°C]	[°C]
607	20	9,0	3,15	0	7,8	3,3

2.2 Energiefreisetzungsrate V607



2.3 Geschwindigkeiten V607

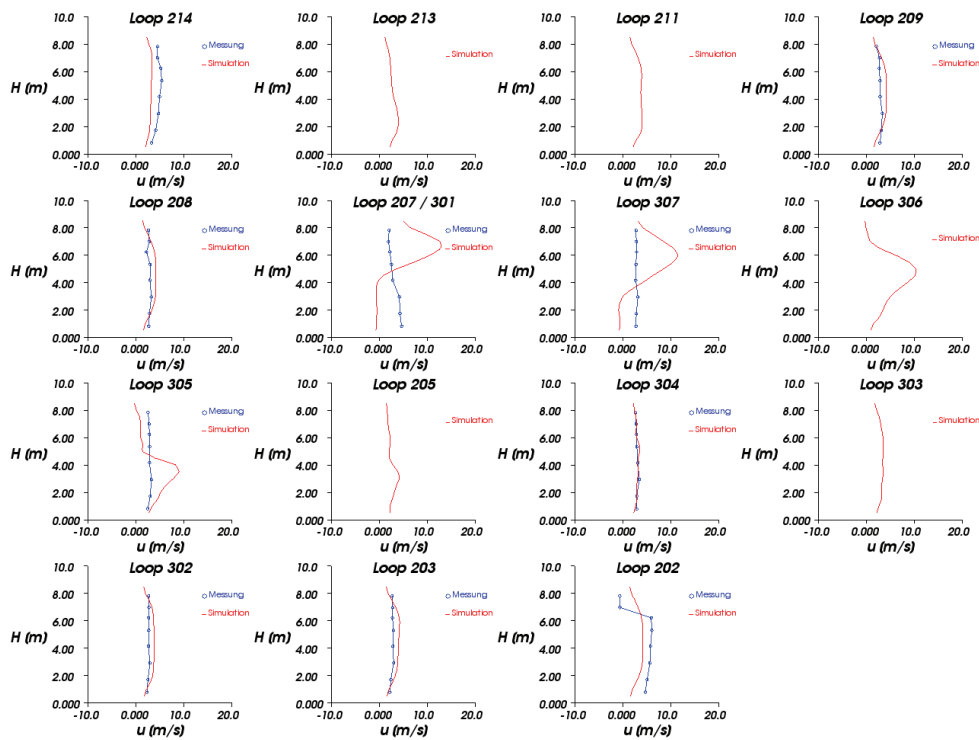


Abbildung 2-1: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach t = 60 sec

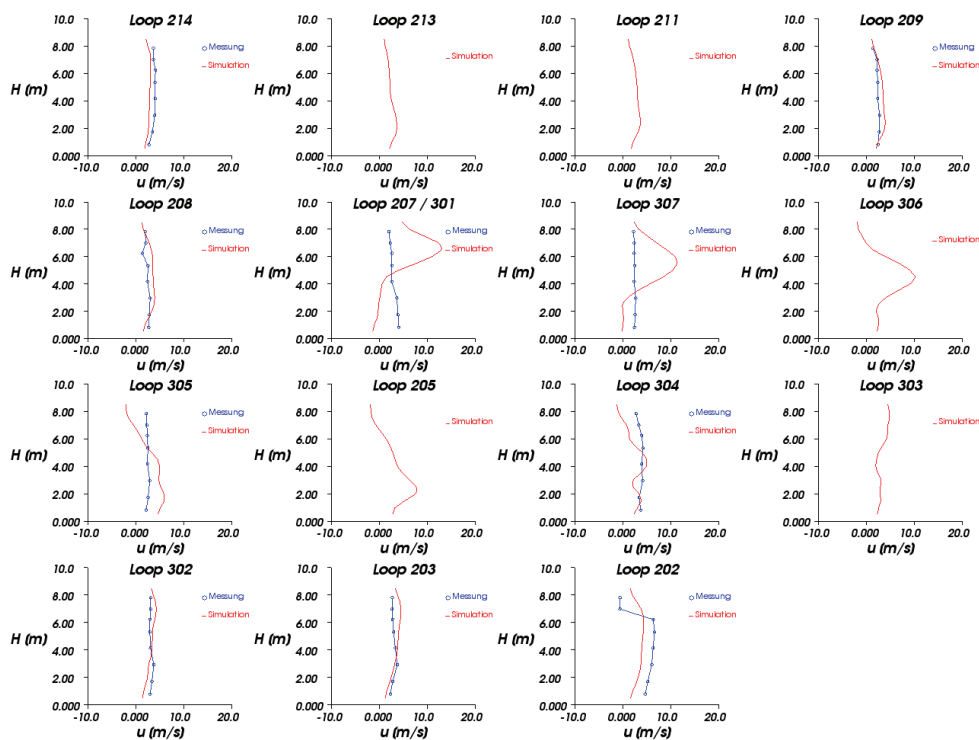


Abbildung 2-2: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach t = 120 sec

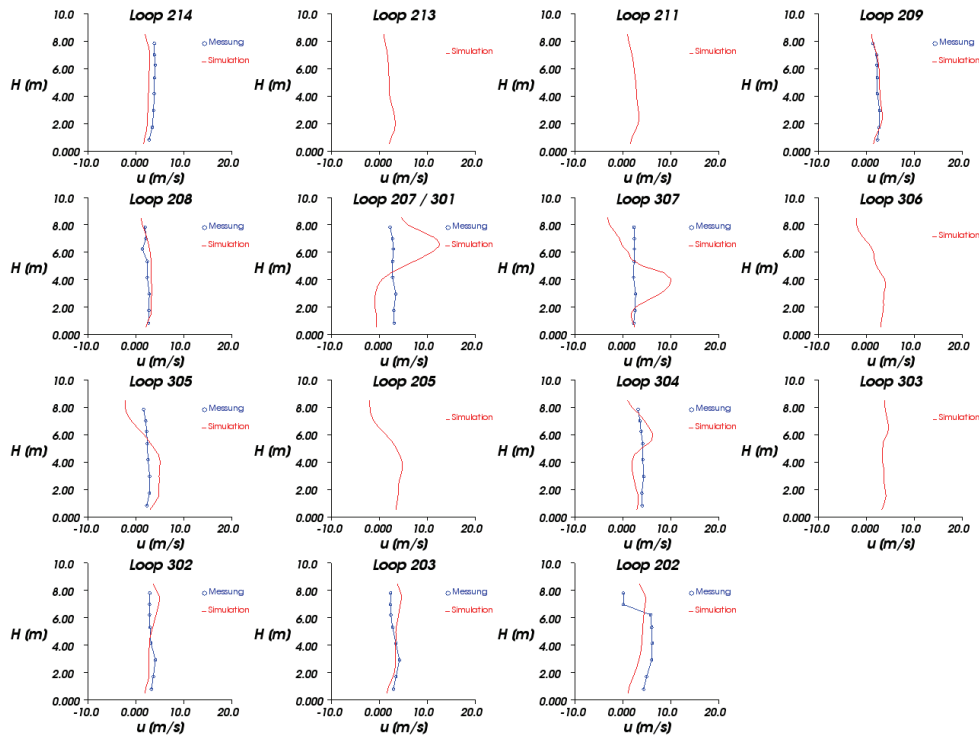


Abbildung 2-3: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 180$ sec

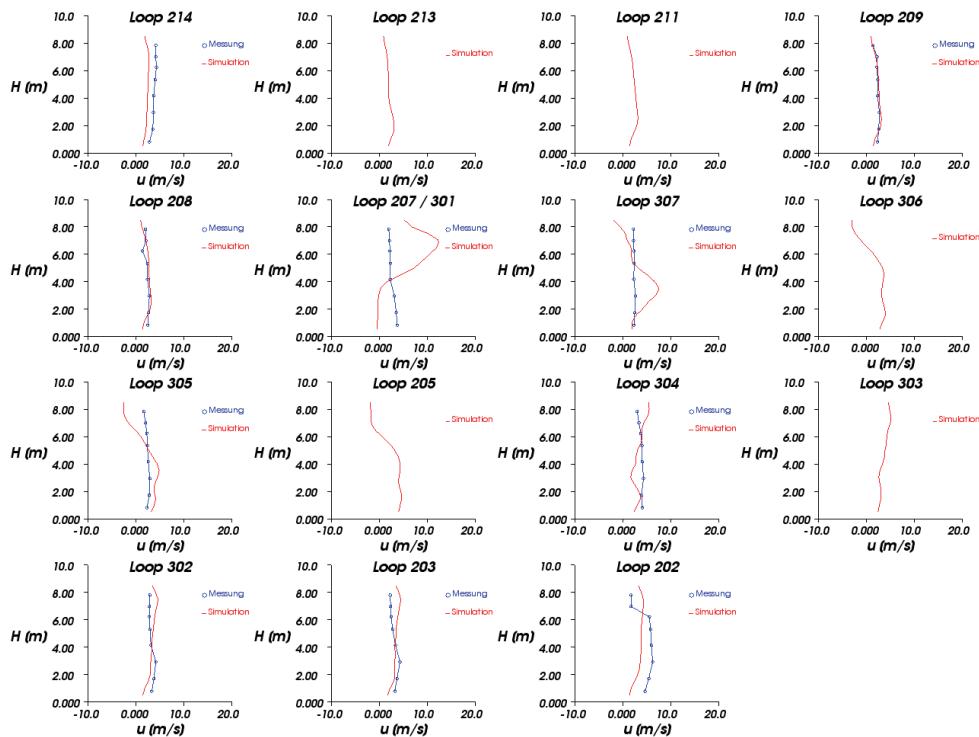


Abbildung 2-4: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 240$ sec

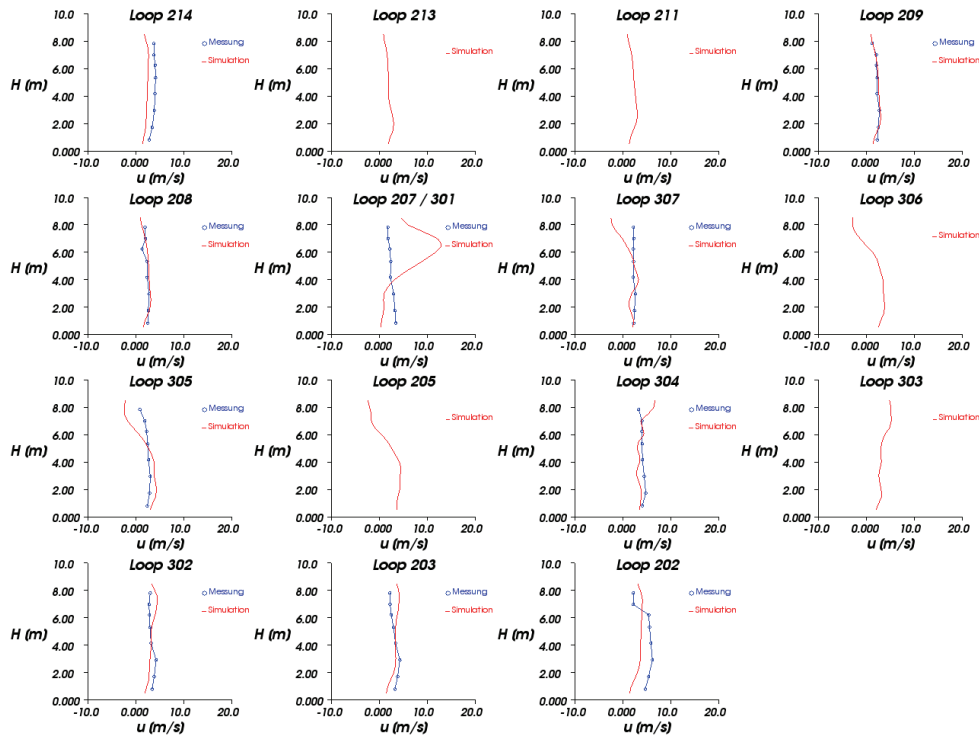


Abbildung 2-5: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach t = 300 sec

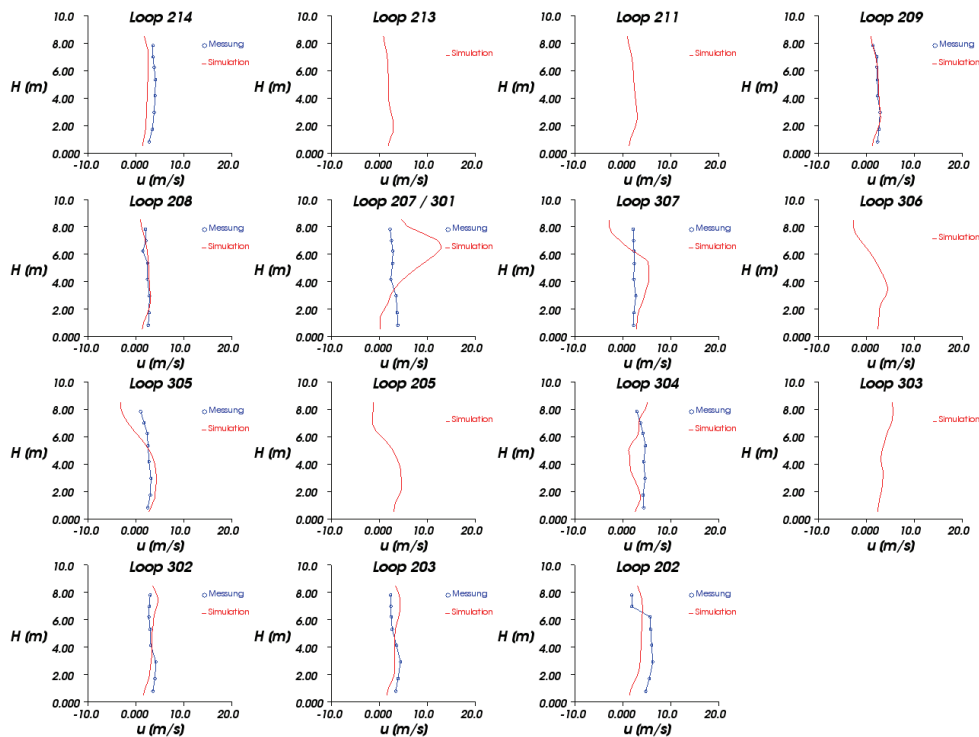


Abbildung 2-6: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach t = 360 sec

V605 Geschwindigkeiten t=60s													
Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202			
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62			
Mittelwert Simulation [m/s]	3,08	3,56	3,56	3,89	4,67	3,86	2,99	3,46	3,54	3,56			
Mittelwert Messung [m/s]	4,67	2,89	2,85	3,13	2,83	2,88	2,99	2,67	2,74	4,49			
Abweichung MIN [m/s]	1,03	0,02	0,01	0,13	0,06	0,03	0,01	0,02	0,02	0,12			
Abweichung MAX [m/s]	2,12	1,33	1,63	10,79	8,66	5,95	0,56	1,24	1,43	3,74			
Mittelwert Abweichung [m/s]	1,59	0,84	0,87	5,45	4,37	2,45	0,19	0,83	0,87	1,98			
Mittlere Abweichung [%]	22,20	11,71	12,21	76,16	61,06	34,25	2,64	11,54	12,10	27,65			
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	1,94												
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	27,15												
V605 Geschwindigkeiten t=360s													
Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202			
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62			
Mittelwert Simulation [m/s]	2,31	2,35	2,45	5,95	3,17	2,19	2,63	3,38	3,35	3,54			
Mittelwert Messung m/s]	3,71	2,37	2,38	2,99	2,36	2,54	4,24	3,35	3,28	5,08			
Abweichung MIN [m/s]	0,95	0,00	0,00	0,02	0,03	0,05	0,02	0,02	0,01	0,04			
Abweichung MAX [m/s]	1,65	0,93	1,08	10,25	4,76	3,89	3,41	1,77	1,96	3,20			
Mittelwert Abweichung [m/s]	1,40	0,22	0,38	4,70	2,14	1,51	1,74	0,95	1,10	2,18			
Mittlere Abweichung [%]	19,61	3,01	5,26	65,63	29,93	21,07	24,27	13,29	15,38	30,50			
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	1,63												
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	22,8												

Tabelle 2-1: Abweichungen der Geschwindigkeiten V607

2.4 Temperaturen V607

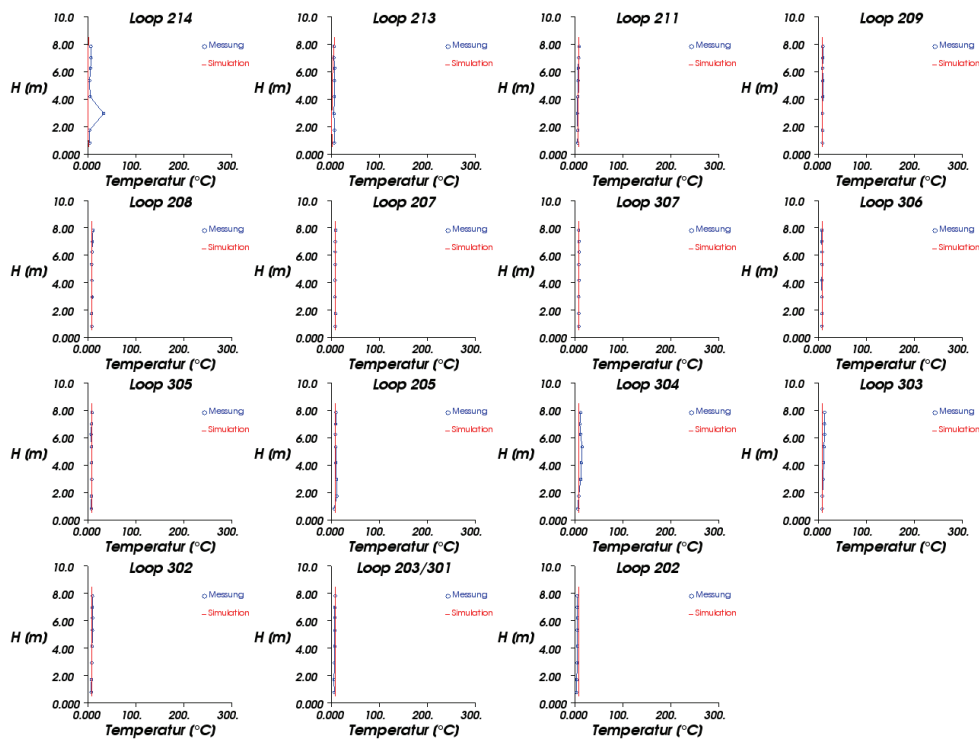


Abbildung 2-7: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 60 sec

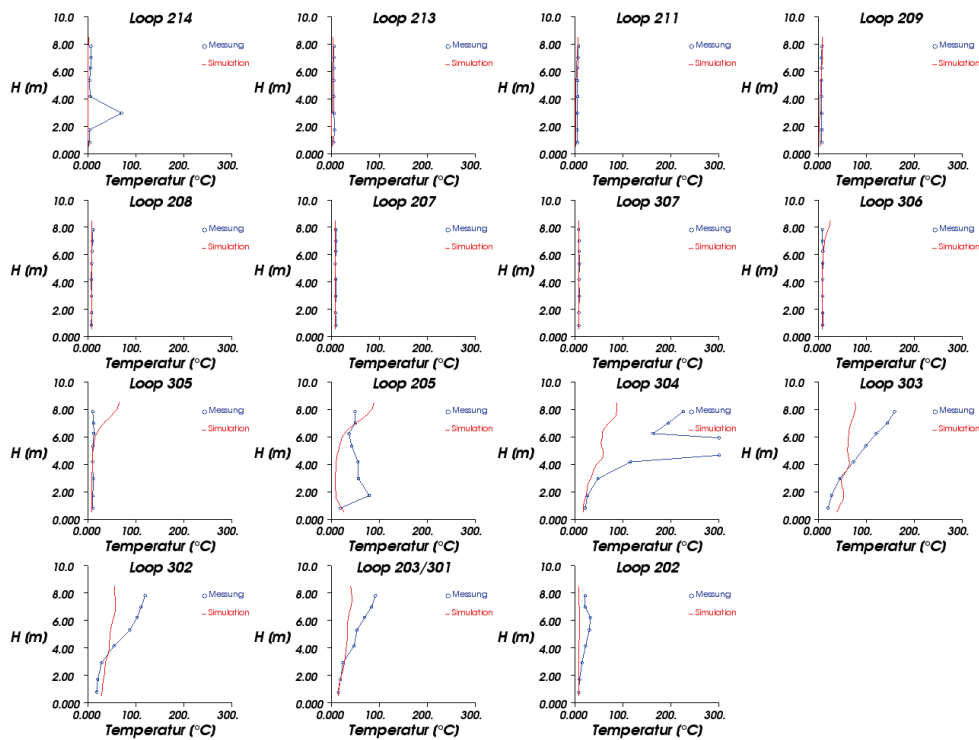


Abbildung 2-8: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 120 sec

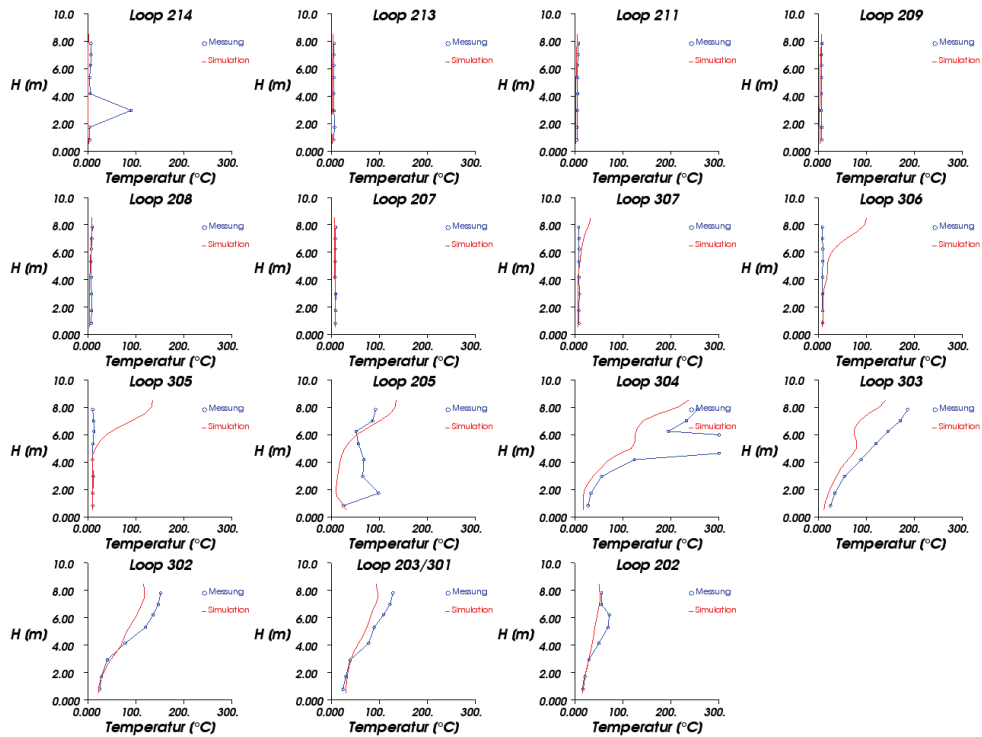


Abbildung 2-9: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 180 sec

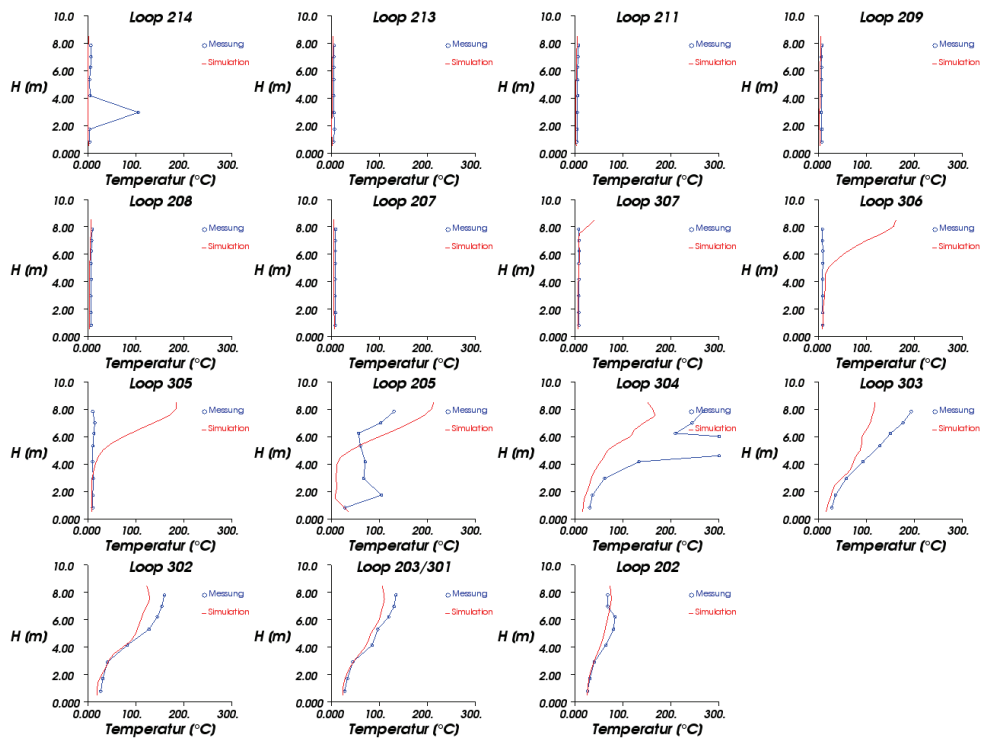


Abbildung 2-10: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 240 sec

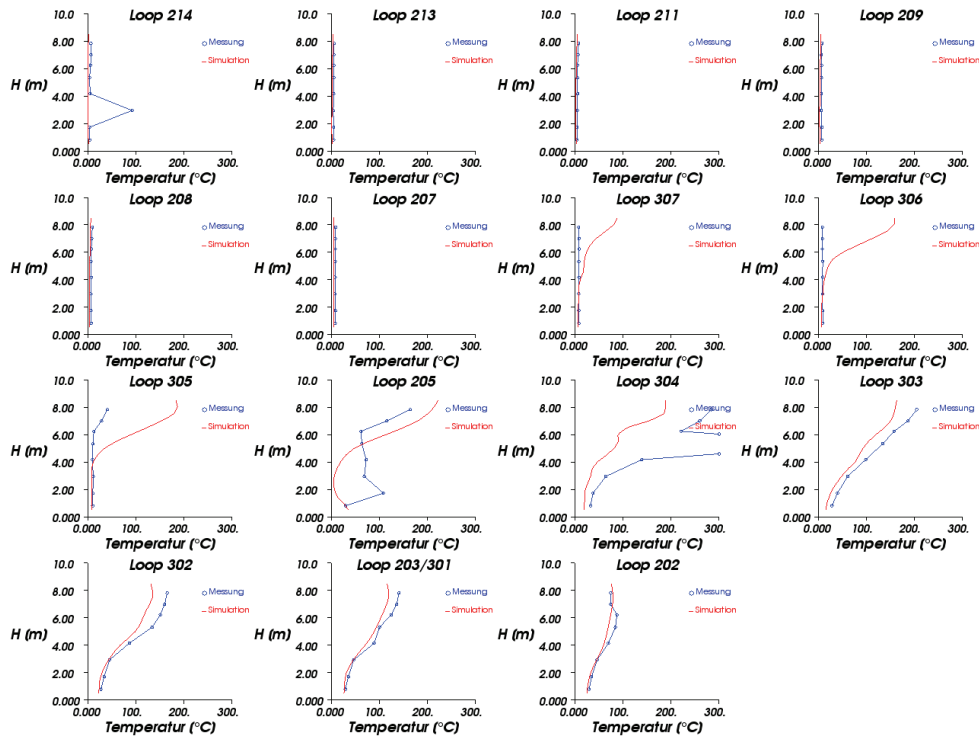


Abbildung 2-11: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 300 sec

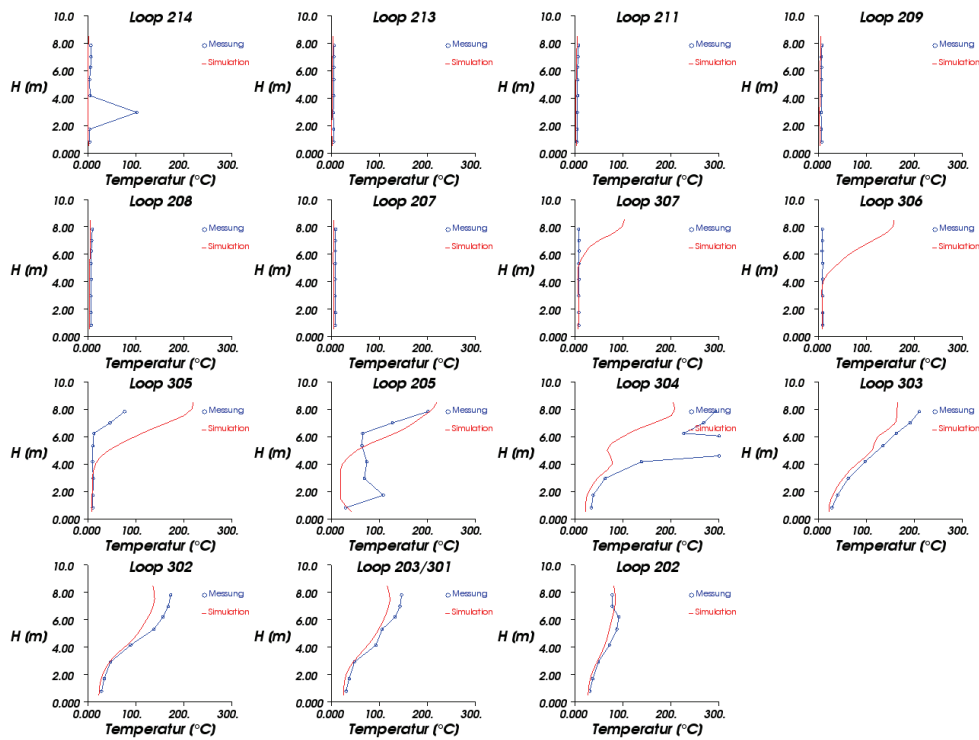


Abbildung 2-12: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 360 sec

V607 Temperaturen t=60s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	1,09	2,66	7,80	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
Mittelwert Messung [°C]	10,05	6,66	6,99	9,42	9,10	8,63	8,86	8,02	8,15	9,92	12,00	11,34	9,18	7,30	5,32
Abweichung MIN [°C]	2,72	0,03	0,03	0,00	0,01	0,02	0,00	0,49	0,04	0,01	0,02	0,01	0,01	0,33	2,82
Abweichung MAX [°C]	31,99	5,84	1,71	0,95	2,32	0,81	0,60	1,37	1,70	2,93	6,55	4,45	1,55	2,94	5,03
Mittelwert Abweichung [°C]	8,96	4,00	0,85	0,43	0,51	0,44	0,24	0,98	0,86	1,13	3,40	2,44	0,78	1,70	3,68
Mittlere Abweichung [%]	1,55	0,69	0,15	0,07	0,09	0,08	0,04	0,17	0,15	0,19	0,59	0,42	0,14	0,29	0,64
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	2,03														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	0,35														

V607 Temperaturen t=360s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	1,08	2,37	3,03	3,86	4,47	5,16	19,84	42,19	57,96	87,19	78,45	90,28	82,31	75,48	59,98
Mittelwert Messung [°C]	21,87	5,30	6,04	6,81	7,43	8,64	8,86	9,26	19,35	86,82	202,15	108,69	98,62	88,23	65,80
Abweichung MIN [°C]	2,77	2,02	1,62	1,74	2,32	2,77	0,03	0,15	0,01	1,11	9,47	6,01	1,82	2,45	0,18
Abweichung MAX [°C]	99,95	3,74	3,80	3,48	3,81	4,35	83,32	140,84	124,17	117,04	473,24	46,34	33,89	25,43	15,51
Mittelwert Abweichung [°C]	20,79	2,93	3,01	2,95	2,96	3,48	12,35	33,92	39,90	48,31	123,70	18,41	16,31	12,75	7,55
Mittlere Abweichung [%]	3,59	0,51	0,52	0,51	0,51	0,60	2,13	5,86	6,89	8,35	21,37	3,18	2,82	2,20	1,31
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	23,29														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	4,02														

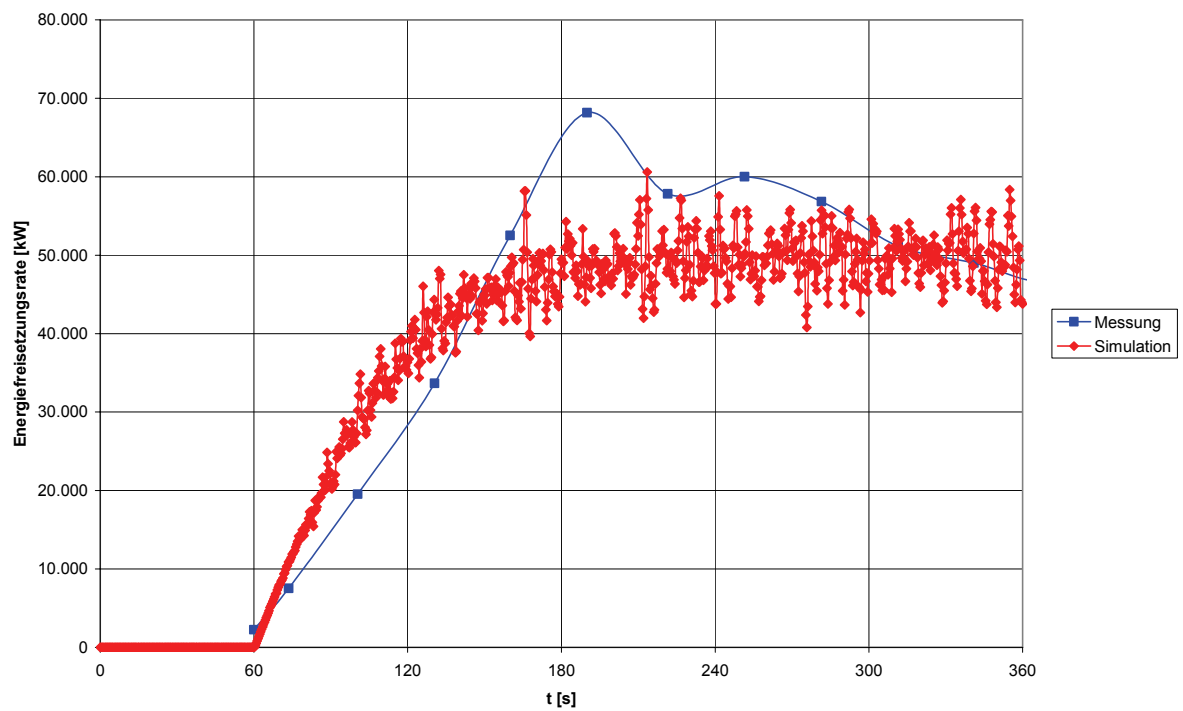
Tabelle 2-2: Abweichungen der Temperaturen V607

3 Brandversuch V610

3.1 Kenndaten Brandversuch V610

Versuchs-Nr.	Brand-leistung	Brand-fläche	Strömungs-geschw. im Verkehrsraum	Aktivieren der Lüftung	Temperatur	
					innen	außen
[-]	[MW]	[m ²]	[m/s]	[min]	[°C]	[°C]
610	50	22,5	4,34	0	7,5	4,4

3.2 Energiefreisetzungsrate V610



3.3 Geschwindigkeiten V610

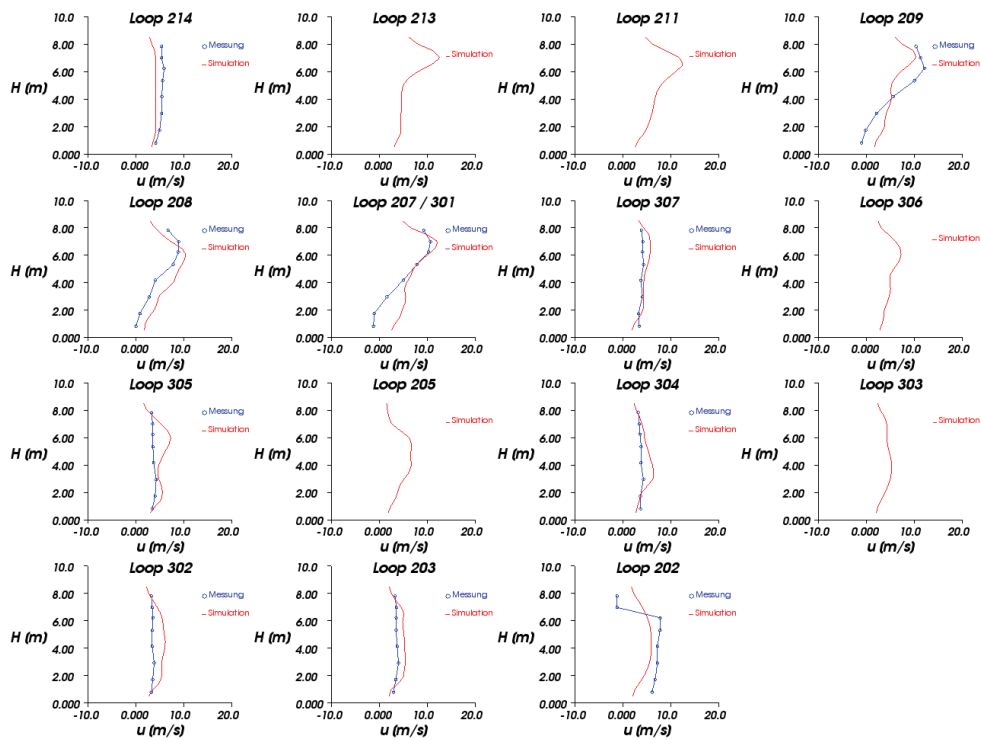


Abbildung 3-1: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 60$ sec

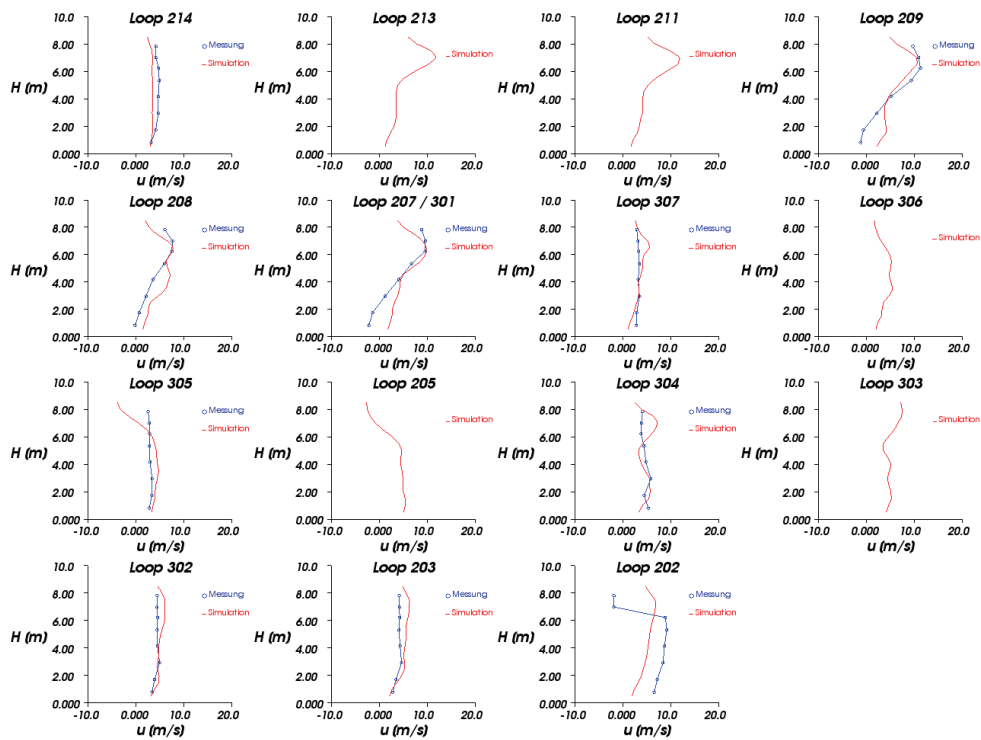


Abbildung 3-2: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 120$ sec

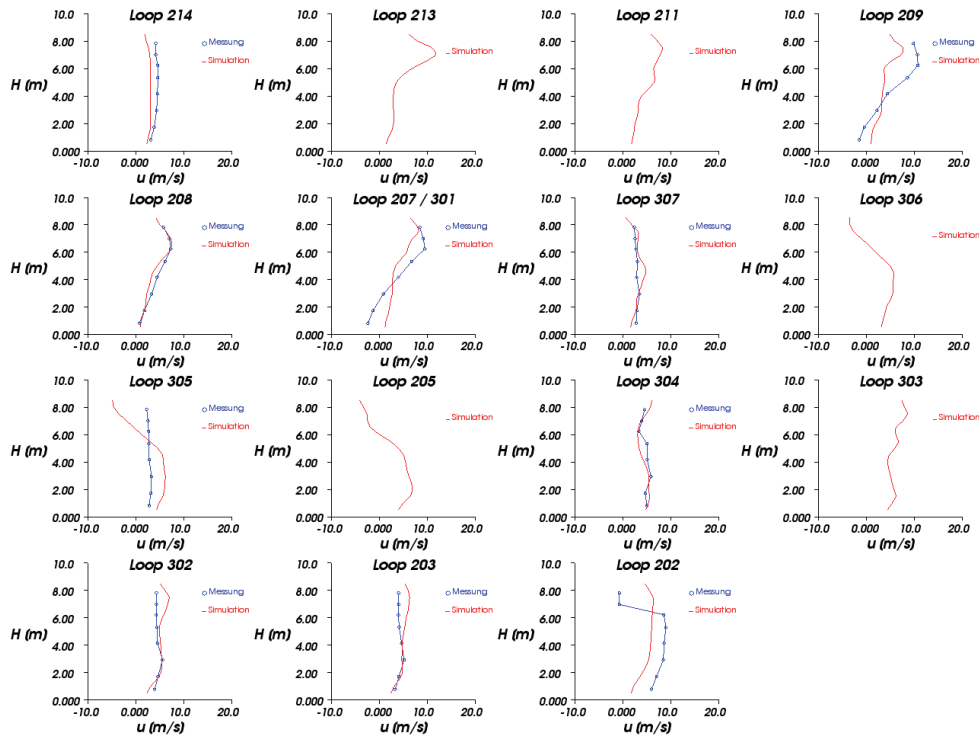


Abbildung 3-3: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 180$ sec

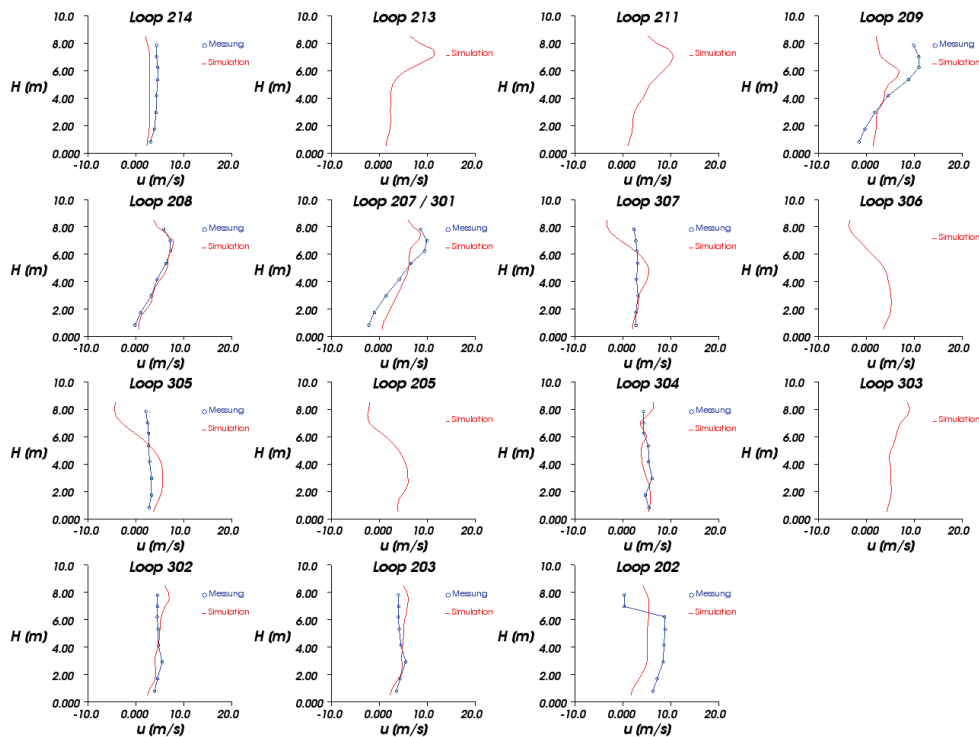


Abbildung 3-4: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 240$ sec

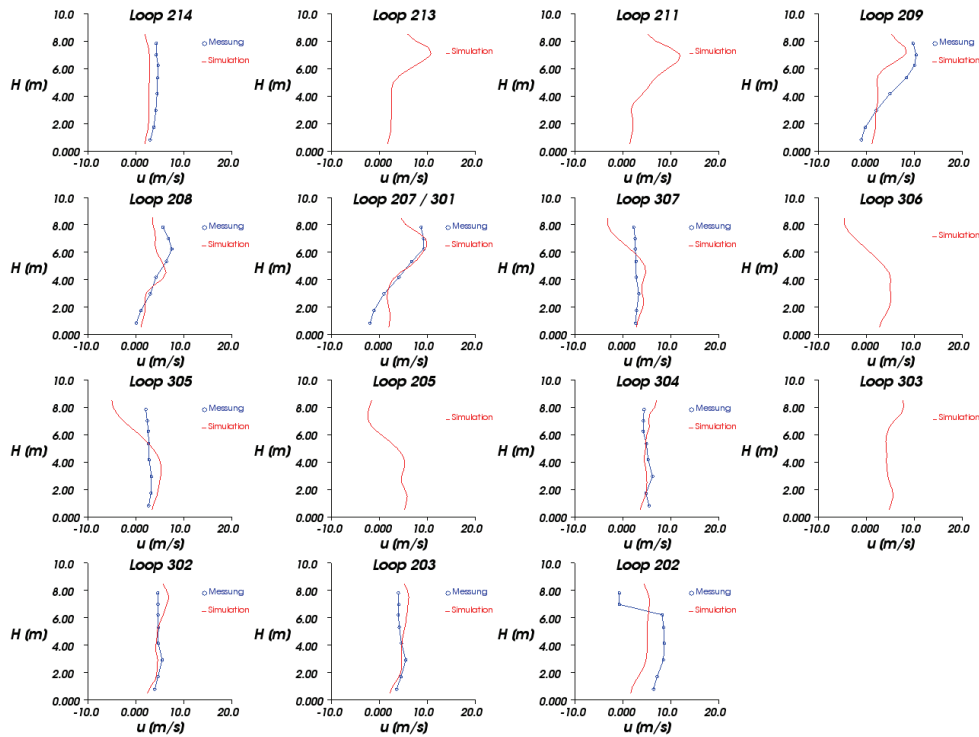


Abbildung 3-5: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 300$ sec

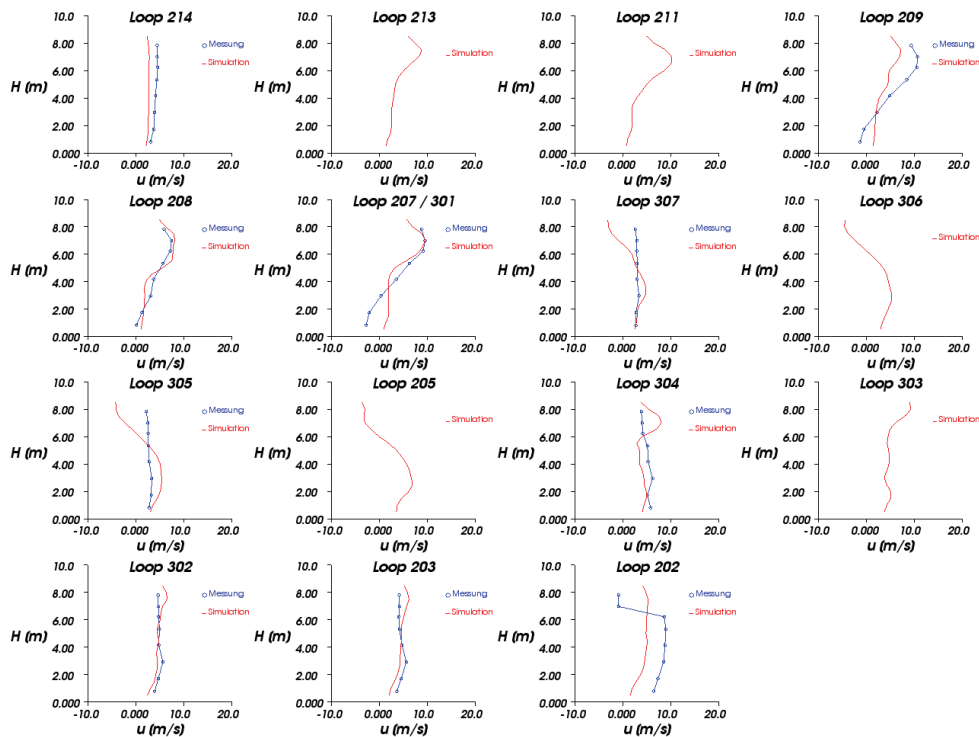


Abbildung 3-6: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 360$ sec

V610 Geschwindigkeiten t=60s

Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [m/s]	4,05	5,72	6,53	7,09	4,59	5,34	4,73	5,16	4,69	4,79
Mittelwert Messung [m/s]	5,31	6,01	4,90	4,98	3,89	3,73	3,73	3,48	3,56	5,71
Abweichung MIN [m/s]	0,62	0,07	0,16	0,01	0,07	0,05	0,00	0,00	0,03	0,08
Abweichung MAX [m/s]	1,82	4,48	3,96	5,57	1,56	3,73	2,38	2,72	1,59	5,18
Mittelwert Abweichung [m/s]	1,26	2,48	2,20	2,19	0,83	1,63	1,11	1,68	1,21	2,39
Mittlere Abweichung [%]	9,39	18,49	16,43	16,35	6,21	12,20	8,27	12,58	9,06	17,85
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	1,7									
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	12,68									

V610 Geschwindigkeiten t=360s

Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [m/s]	2,68	3,73	4,29	4,25	2,41	2,63	4,77	4,66	4,48	4,44
Mittelwert Messung m/s]	4,08	5,27	4,22	3,76	2,95	2,82	5,05	4,84	4,51	6,64
Abweichung MIN [m/s]	0,78	0,02	0,00	0,01	0,01	0,02	0,05	0,02	0,02	0,33
Abweichung MAX [m/s]	1,82	5,19	1,57	4,16	5,37	6,13	3,98	1,85	2,01	6,15
Mittelwert Abweichung [m/s]	1,40	2,61	0,89	1,69	1,43	2,28	1,76	0,71	0,97	4,08
Mittlere Abweichung [%]	10,46	19,48	6,67	12,60	10,66	17,05	13,16	5,31	7,21	30,43
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	1,78									
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	13,3									

Tabelle 3-1: Abweichungen der Geschwindigkeiten V610

Temperaturen V610

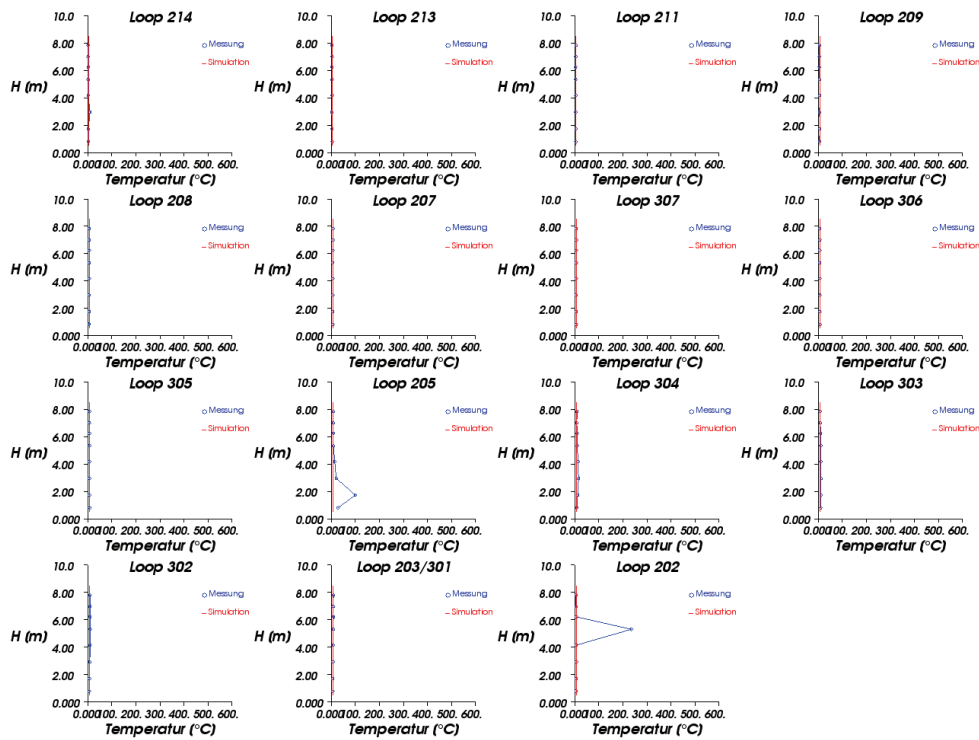


Abbildung 3-7: Temperaturen im Verkehrsraum nach $t = 60$ sec

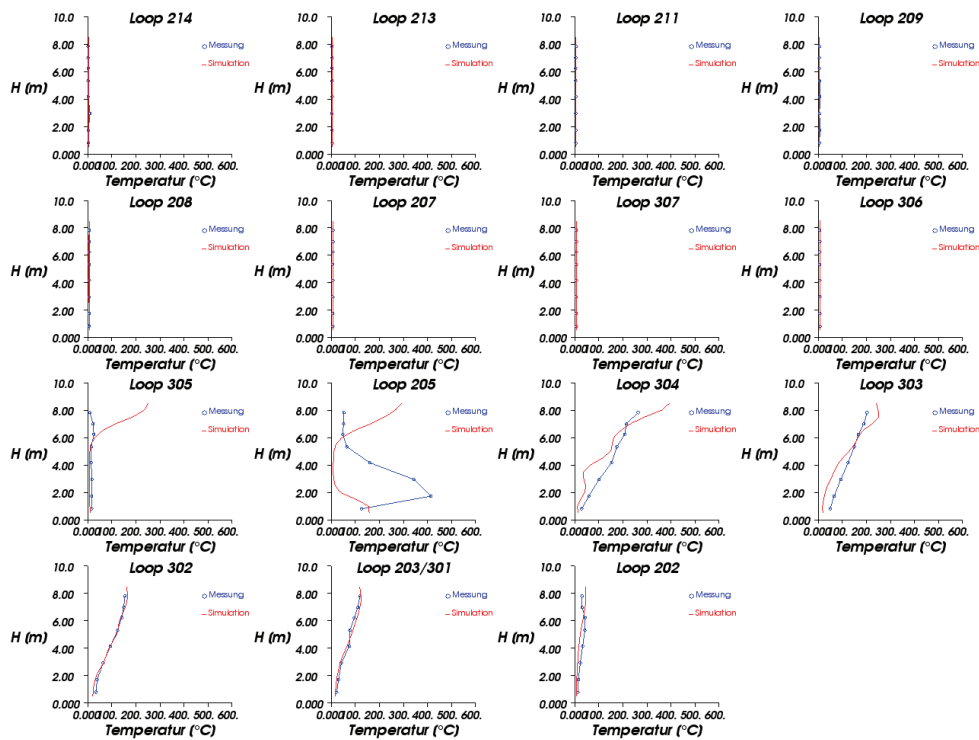


Abbildung 3-8: Temperaturen im Verkehrsraum nach $t = 120$ sec

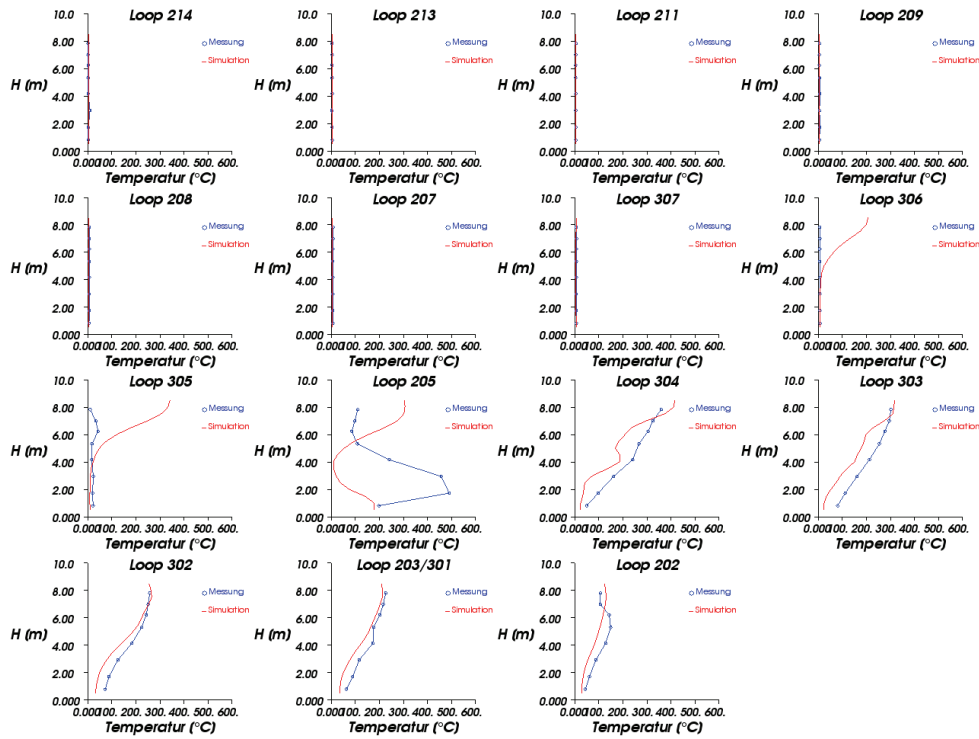


Abbildung 3-9: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 180 sec

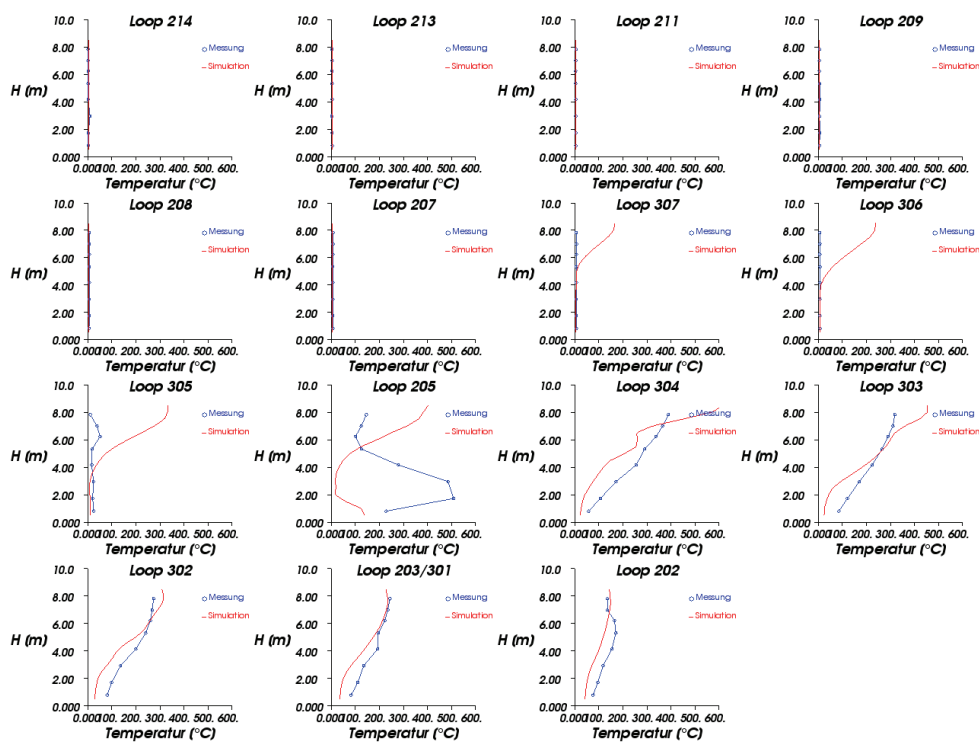


Abbildung 3-10: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 240 sec

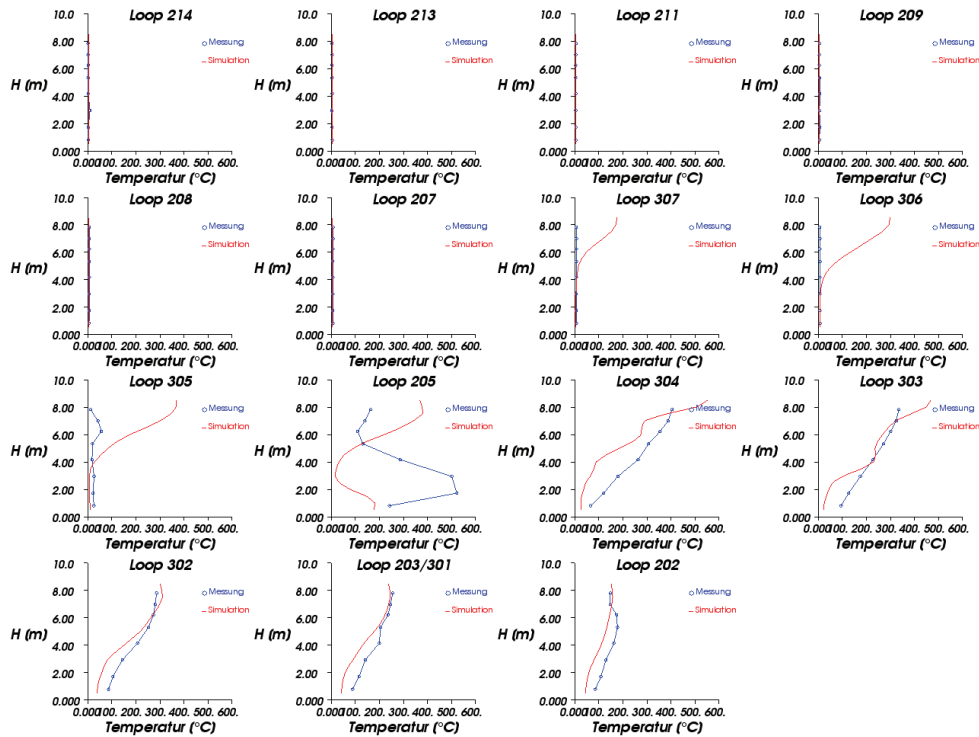


Abbildung 3-11: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 300 sec

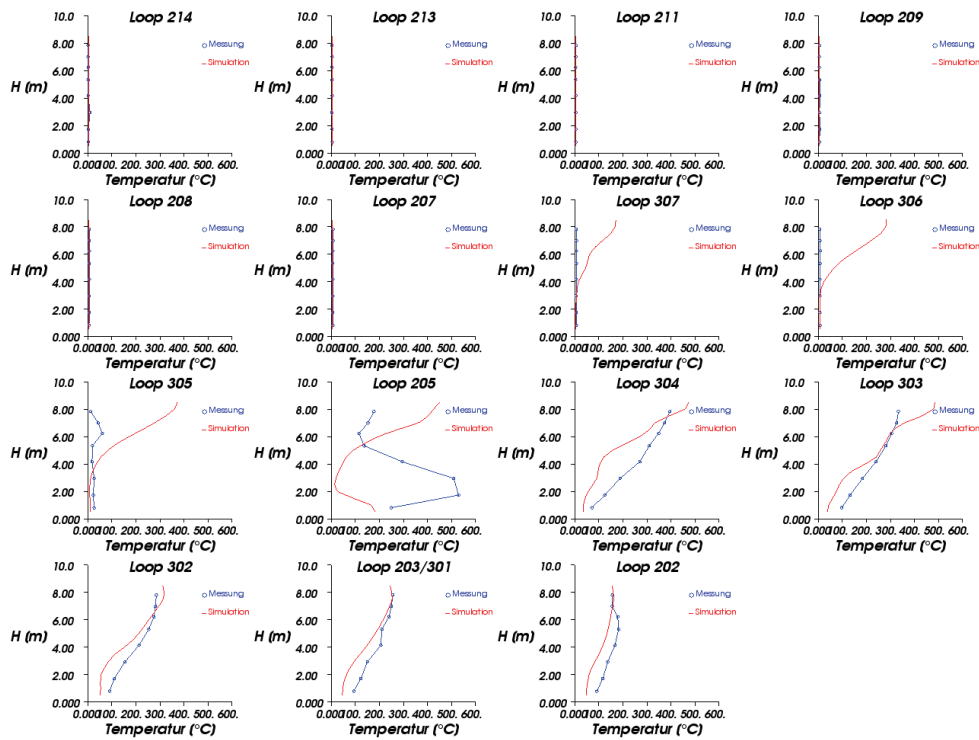


Abbildung 3-12: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 360 sec

V610 Temperaturen t=60s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	4,42	4,54	5,30	7,31	7,48	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50
Mittelwert Messung [°C]	3,75	4,03	4,84	6,15	7,02	7,31	7,28	7,49	7,84	27,44	12,36	10,83	9,57	8,33	40,27
Abweichung MIN [°C]	0,14	0,01	0,01	0,48	0,00	0,03	0,00	0,03	0,02	1,23	1,64	0,70	0,12	0,02	0,00
Abweichung MAX [°C]	5,70	1,45	1,35	2,08	1,31	1,14	0,96	0,82	0,90	92,79	8,83	4,54	3,14	2,34	223,36
Mittelwert Abweichung [°C]	2,18	0,54	0,57	1,16	0,47	0,39	0,36	0,38	0,34	19,94	4,86	3,33	2,07	1,10	33,68
Mittlere Abweichung [%]	0,41	0,10	0,11	0,22	0,09	0,07	0,07	0,07	0,06	3,77	0,92	0,63	0,39	0,21	6,37
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	4,76														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	0,9														

V610 Temperaturen t=360s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	2,68	4,09	4,78	3,73	4,29	4,25	2,41	2,45	2,63	2,94	4,77	4,96	4,66	4,48	4,44
Mittelwert Messung [°C]	3,75	4,03	4,84	6,15	7,02	7,31	7,28	7,86	29,11	296,41	255,13	233,70	204,76	189,05	151,06
Abweichung MIN [°C]	0,07	0,04	0,04	0,02	0,02	0,06	2,16	2,56	13,81	117,53	67,53	93,86	88,30	91,91	90,53
Abweichung MAX [°C]	7,45	4,81	5,72	5,02	5,48	6,56	9,44	11,00	60,37	523,54	389,28	324,34	278,83	250,44	177,53
Mittelwert Abweichung [°C]	1,60	1,79	3,10	2,97	3,09	3,56	4,86	5,40	26,49	293,47	250,36	228,74	200,10	184,58	146,62
Mittlere Abweichung [%]	0,30	0,34	0,59	0,56	0,58	0,67	0,92	1,02	5,01	55,48	47,33	43,25	37,83	34,90	27,72
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	90,45														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	17,1														

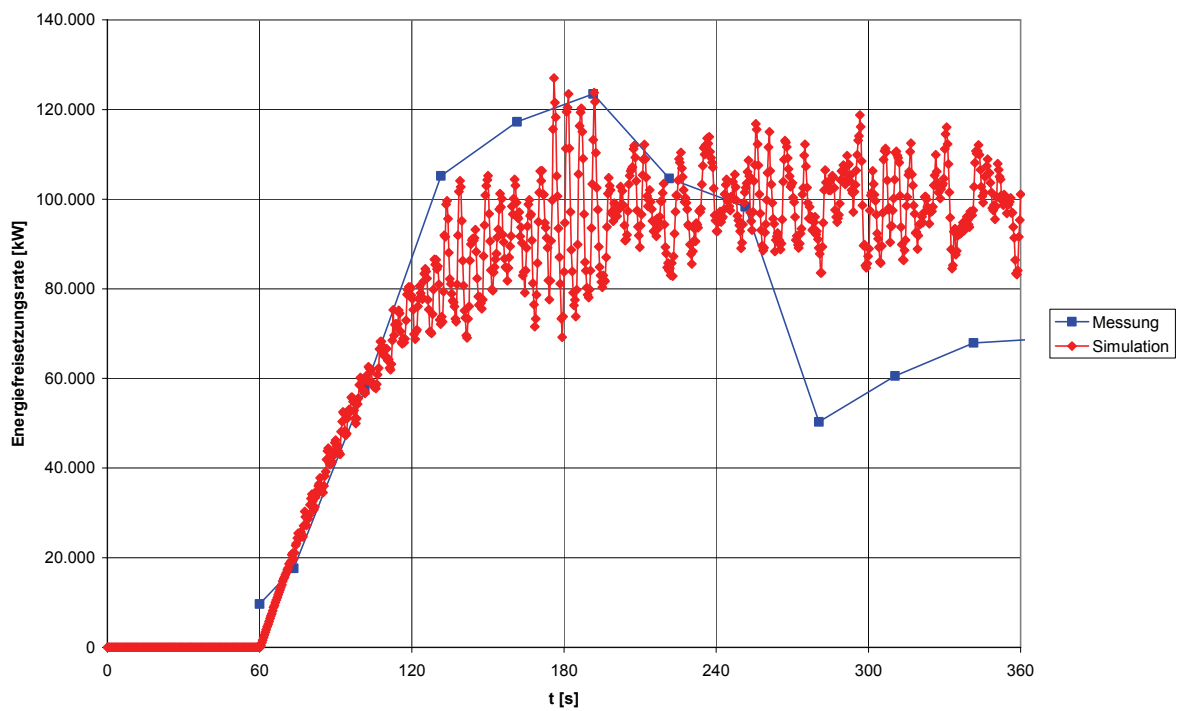
Tabelle 3-2: Abweichungen der Temperaturen V610

4 Brandversuch V621 A

4.1 Kenndaten Brandversuch V621 A

Versuchs-Nr.	Brand-leistung	Brand-fläche	Strömungs-geschw. im Verkehrsraum	Aktivieren der Lüftung	Temperatur	
					innen	außen
[-]	[MW]	[m ²]	[m/s]	[min]	[°C]	[°C]
621a	100	45,0	1,52	0	8,3	1,1

4.2 Energiefreisetzungsrate V621 A



4.3 Geschwindigkeiten V621A

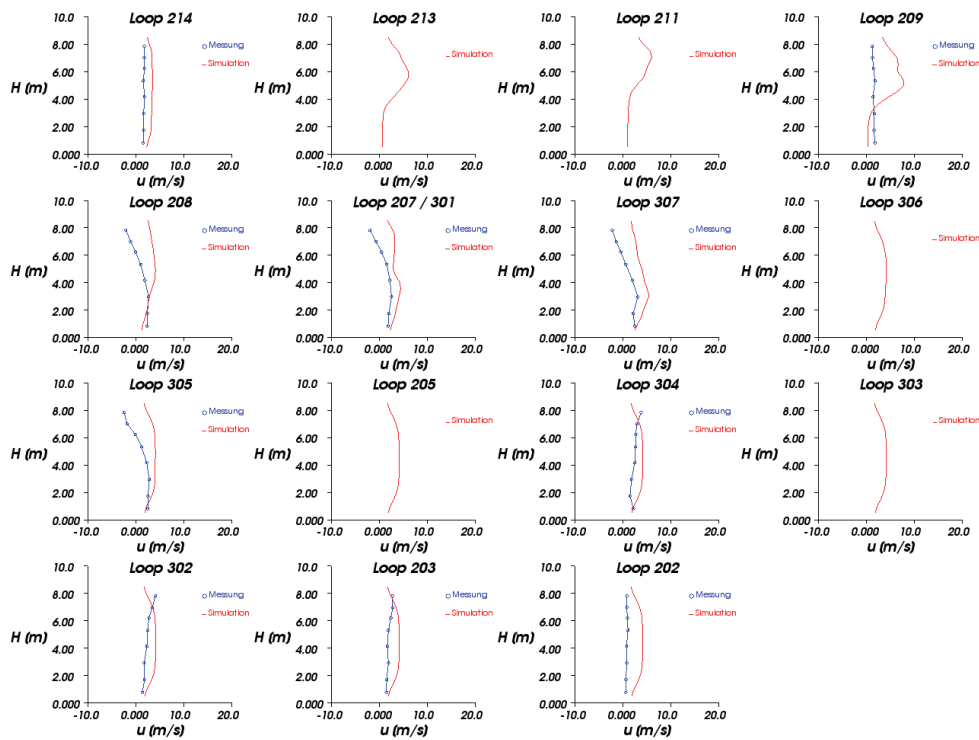


Abbildung 4-1: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 60$ sec

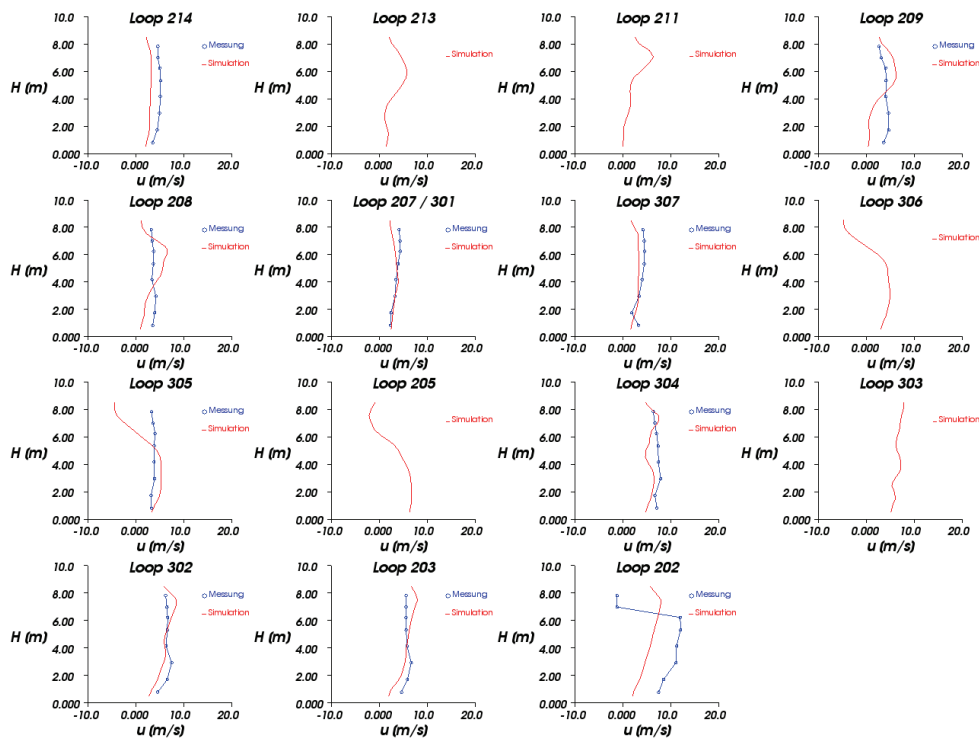


Abbildung 4-2: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 120$ sec

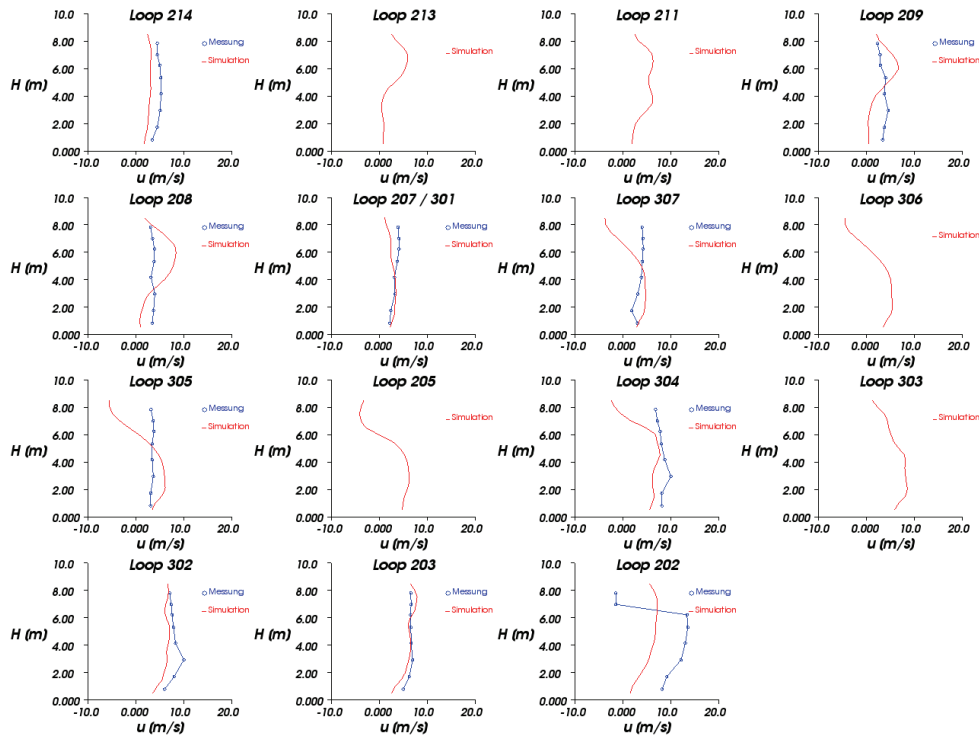


Abbildung 4-3: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach t = 180 sec

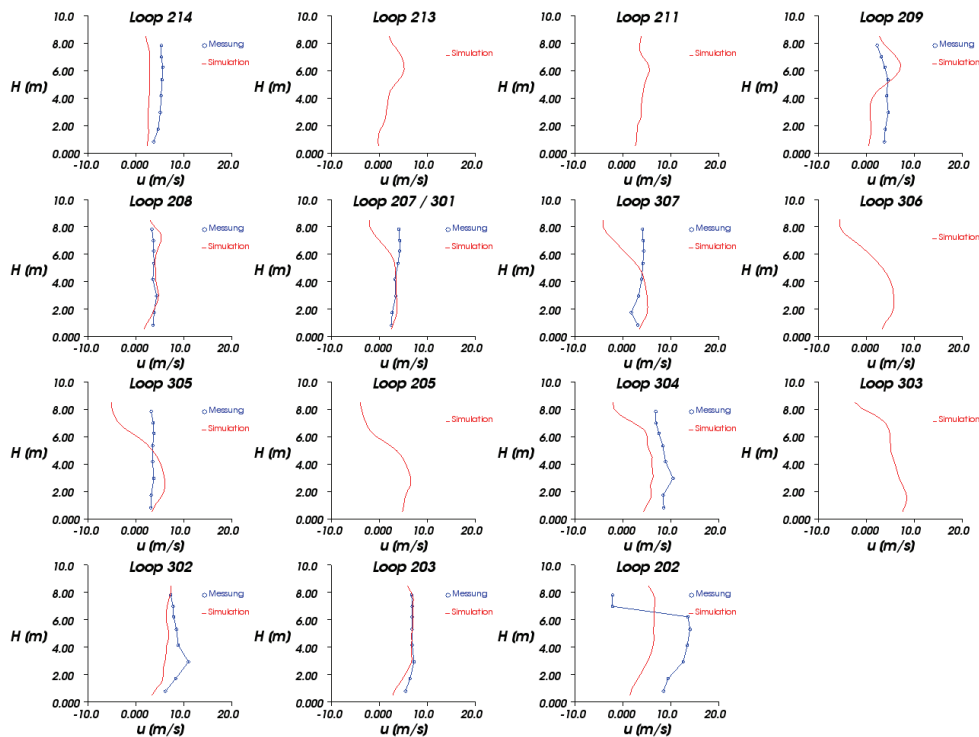


Abbildung 4-4: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach t = 240 sec

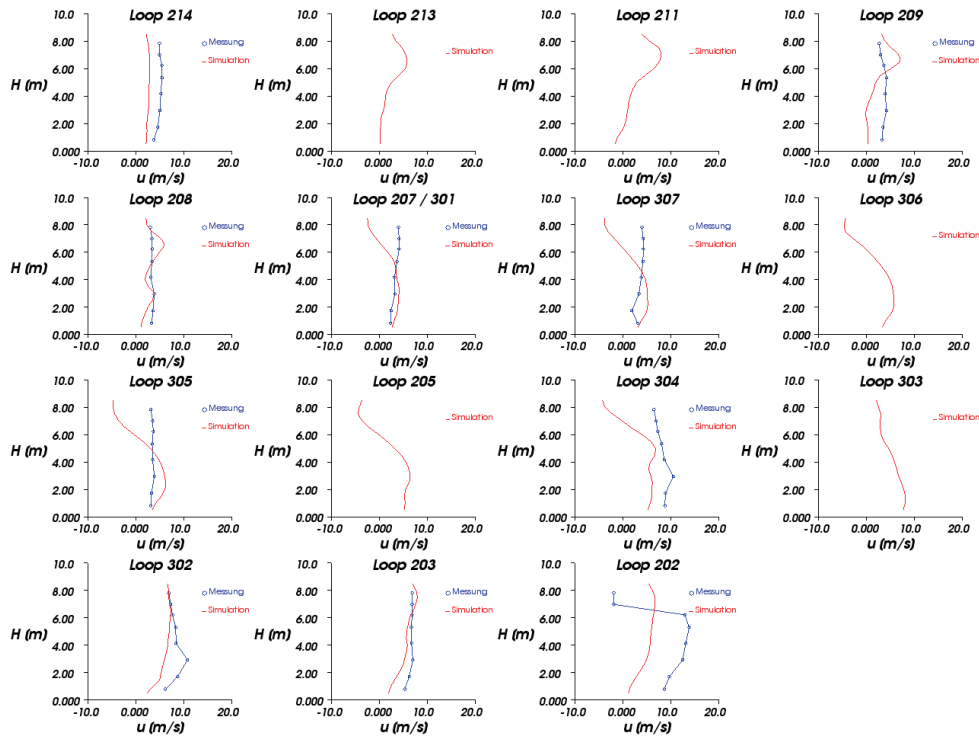


Abbildung 4-5: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 300$ sec

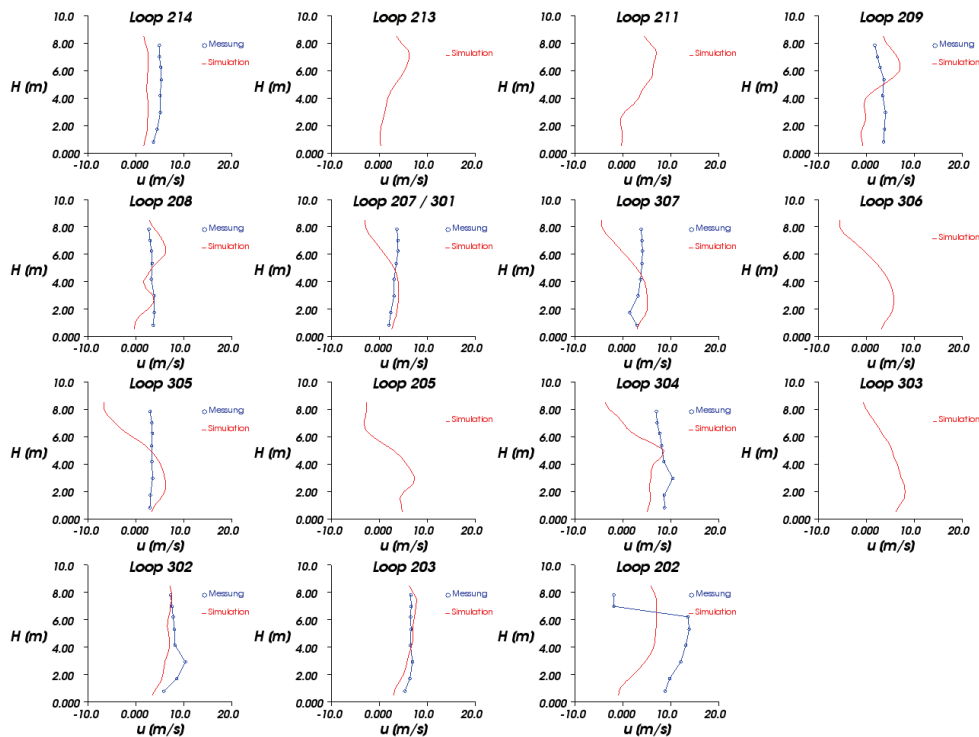


Abbildung 4-6: Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum nach $t = 360$ sec

V621A Geschwindigkeiten t=60s														
Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202				202
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62				833,62
Mittelwert Simulation [m/s]	3,27	3,94	3,15	3,40	3,82	3,63	3,66	3,66	3,66	3,66				3,66
Mittelwert Messung [m/s]	1,69	1,55	1,19	1,31	1,12	1,22	2,38	2,38	1,99	0,83				0,83
Abweichung MIN [m/s]	0,94	0,00	0,01	0,67	0,37	0,01	0,00	0,02	0,04	1,46				1,46
Abweichung MAX [m/s]	1,89	6,18	5,01	4,74	4,24	5,28	2,25	2,32	2,41	3,29				3,29
Mittelwert Abweichung [m/s]	1,58	3,17	2,15	2,09	2,70	2,44	1,41	1,48	1,69	2,82				2,82
Mittlere Abweichung [%]	9,81	19,71	13,38	13,03	16,79	15,16	8,76	9,20	10,49	17,58				17,58
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	2,15													
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	13,39													
V621A Geschwindigkeiten t=360s														
Loop	214	209	208	207	307	305	304	302	203	202				202
[m]	19,81	320,96	426,42	508,41	553,52	604,11	627,58	681,53	723,29	833,62				833,62
Mittelwert Simulation [m/s]	2,42	2,39	3,41	2,25	2,37	2,22	4,62	6,38	6,25	5,09				5,09
Mittelwert Messung m/s]	4,89	3,31	3,41	3,18	3,34	3,27	8,44	8,21	6,49	9,63				9,63
Abweichung MIN [m/s]	1,83	0,03	0,00	0,01	0,04	0,06	0,04	0,03	0,02	0,27				0,27
Abweichung MAX [m/s]	2,93	4,85	3,85	6,31	7,87	9,32	9,27	4,23	2,21	9,56				9,56
Mittelwert Abweichung [m/s]	2,48	3,52	1,70	1,98	2,91	3,35	3,84	1,84	0,95	7,21				7,21
Mittlere Abweichung [%]	15,42	21,88	10,61	12,35	18,13	20,83	23,92	11,48	5,91	44,89				44,89
Mittelwert Abweichung Ges. [m/s]	2,98													
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	18,54													

Tabelle 4-1: Abweichungen der Geschwindigkeiten V621A

4.4 Temperaturen V621A

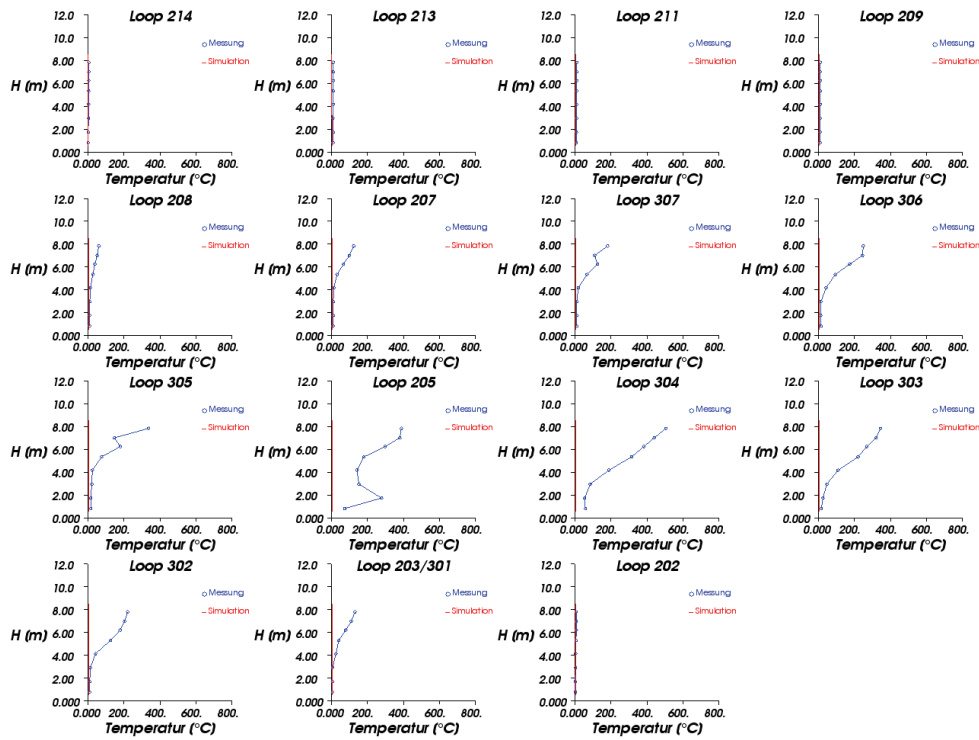


Abbildung 4-7: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 60 sec

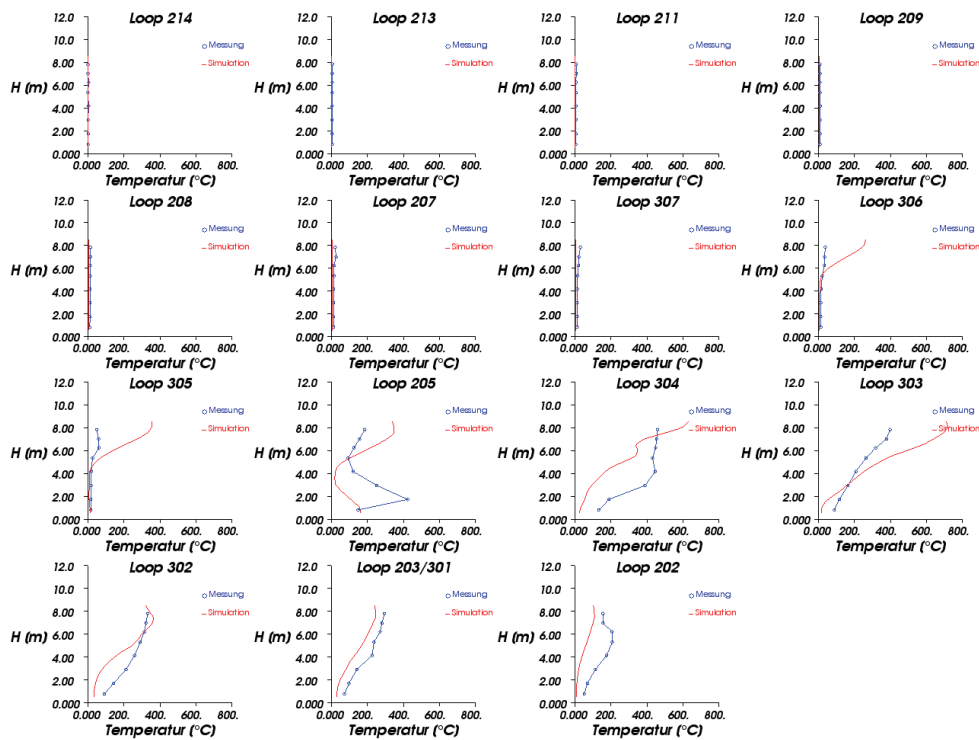


Abbildung 4-8: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 120 sec

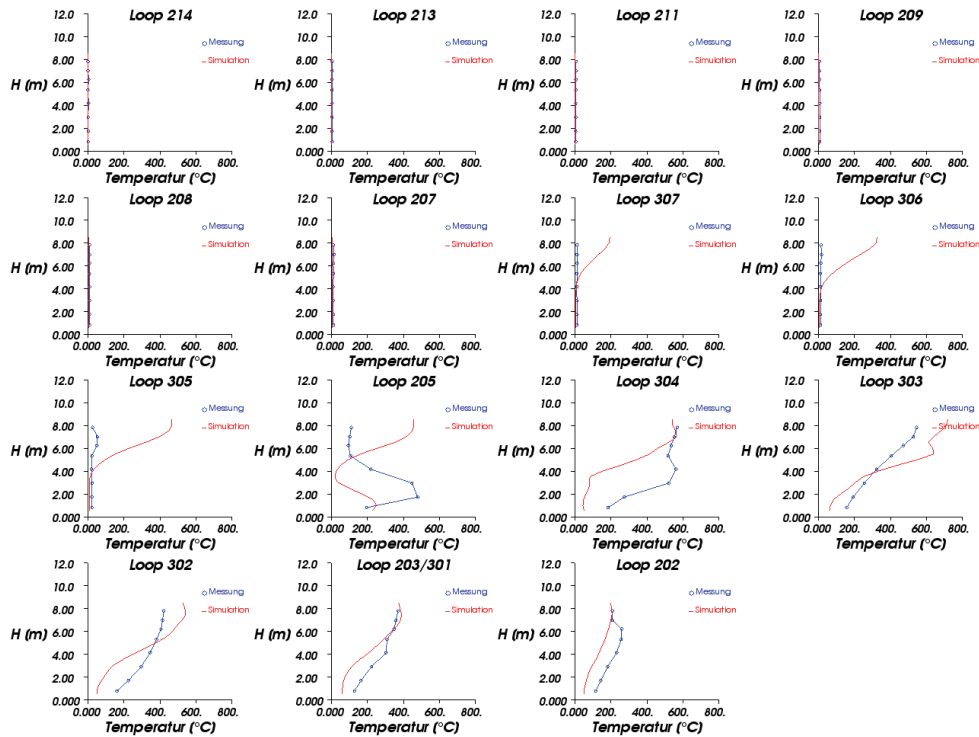


Abbildung 4-9: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 180 sec

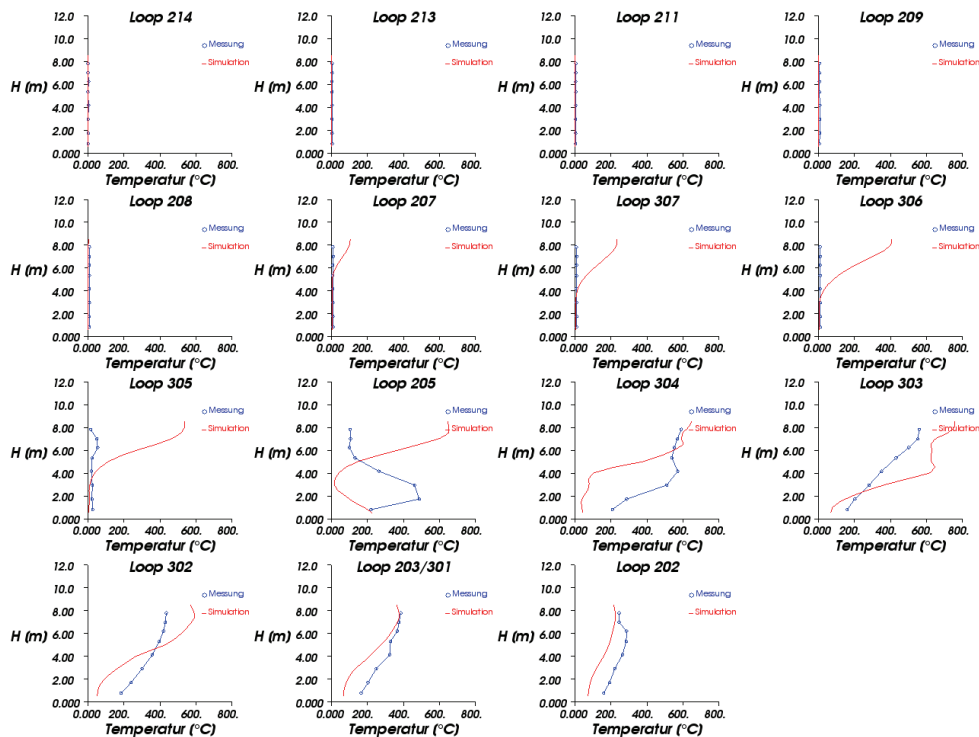


Abbildung 4-10: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 240 sec

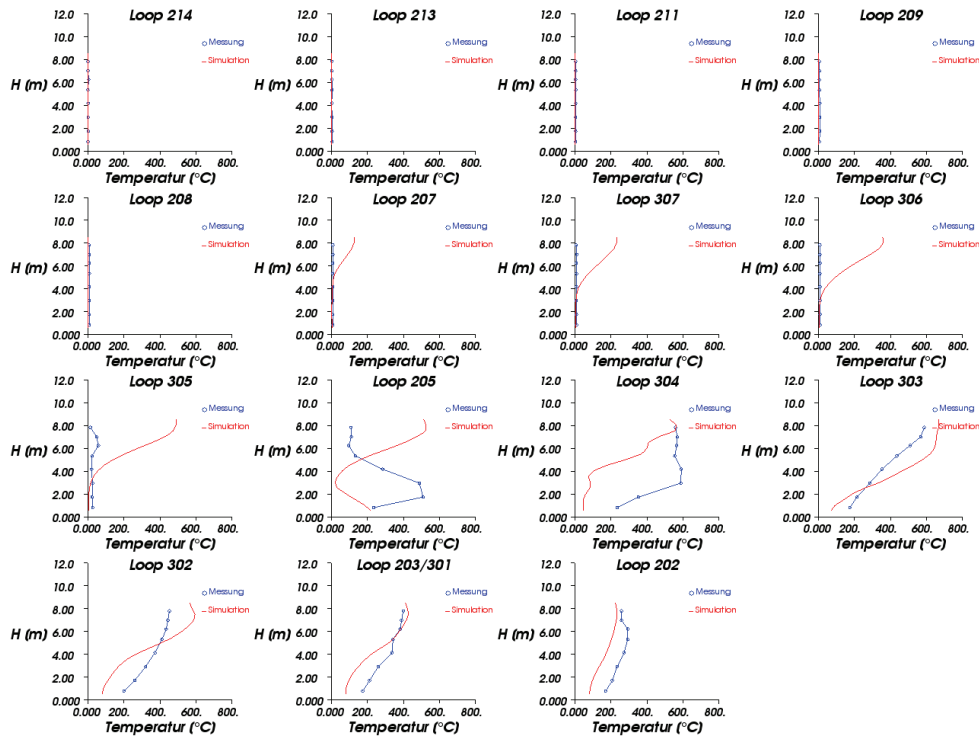


Abbildung 4-11: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 300 sec

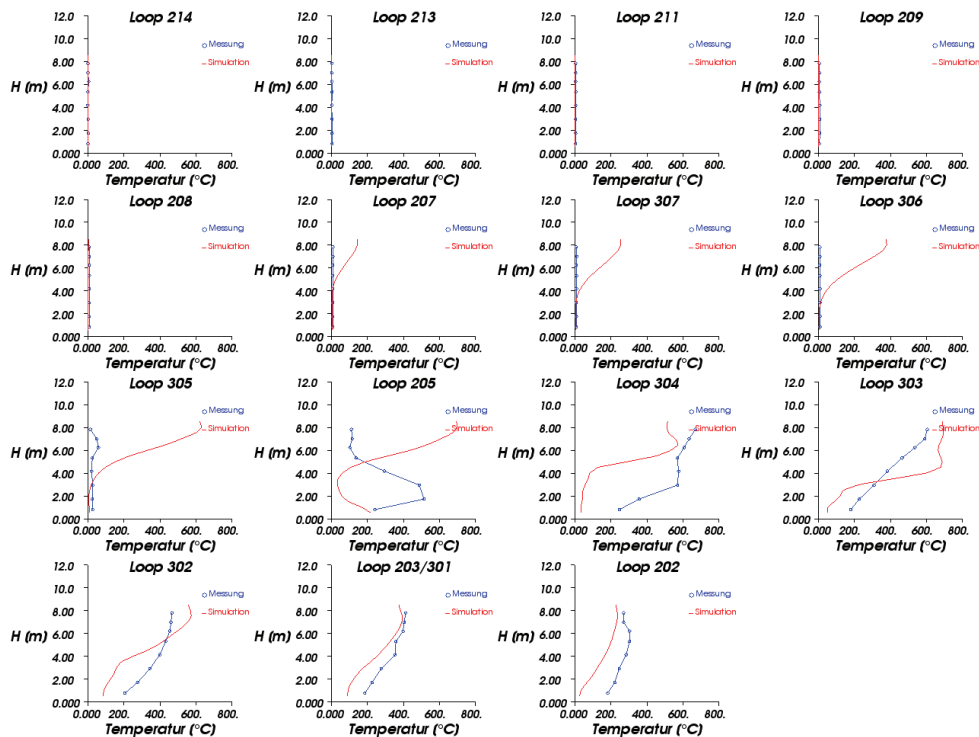


Abbildung 4-12: Temperaturen im Verkehrsraum nach t = 360 sec

V621A Temperaturen t=60s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	1,20	3,18	7,99	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30
Mittelwert Messung [°C]	5,35	11,20	10,81	11,32	25,85	39,06	57,35	91,24	82,89	226,91	231,88	153,89	89,13	44,22	6,39
Abweichung MIN [°C]	1,41	5,15	1,31	2,65	1,92	2,15	3,80	5,84	9,70	67,52	47,13	9,91	1,69	0,11	0,08
Abweichung MAX [°C]	5,47	9,83	4,75	3,40	53,40	116,65	174,69	241,67	329,09	381,03	497,05	336,58	212,95	123,92	4,91
Mittelwert Abweichung [°C]	4,15	8,02	2,82	3,02	17,55	30,76	49,05	82,94	74,59	218,61	223,58	145,59	80,83	36,32	2,36
Mittlere Abweichung [%]	0,62	1,20	0,42	0,45	2,63	4,61	7,34	12,42	11,17	32,73	33,48	21,80	12,10	5,44	0,35
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	65,35														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	9,78														

V621A Temperaturen t=360s

Loop	214	213	211	209	208	207	307	306	305	205	304	303	302	203	202
[m]	19,81	105,77	210,93	320,96	426,42	508,41	553,52	586,13	604,11	615,39	627,58	641,91	681,53	723,29	833,62
Mittelwert Simulation [°C]	1,19	1,77	2,73	3,62	4,04	38,69	78,36	116,56	174,21	291,85	350,69	461,71	312,92	256,94	159,14
Mittelwert Messung [°C]	2,71	4,54	5,78	8,10	9,08	9,03	10,15	10,20	31,94	280,51	533,48	400,22	380,53	325,24	264,58
Abweichung MIN [°C]	0,13	1,82	2,30	2,95	4,42	0,24	0,08	0,28	1,04	7,92	0,63	5,41	1,03	13,76	33,10
Abweichung MAX [°C]	4,94	3,68	3,94	5,71	5,65	130,75	240,38	362,25	553,72	595,73	356,88	269,48	188,24	114,81	156,76
Mittelwert Abweichung [°C]	1,52	2,76	3,04	4,49	5,04	32,79	70,40	108,63	154,03	301,60	198,13	144,88	111,02	68,29	105,45
Mittlere Abweichung [%]	0,23	0,41	0,46	0,67	0,75	4,91	10,54	16,27	23,06	45,16	29,67	21,69	16,62	10,23	15,79
Mittelwert Abweichung Ges. [°C]	87,47														
Mittlere Abweichung Gesamt [%]	13,1														

Tabelle 4-2: Abweichungen der Temperaturen V621A

5 Schaltmatrizen der Strahlventilatoren

5.1 Schaltmatrix V605

V 605		Strahlventilatoren (Jet Fans)																							
Versuchsdauer [min]	0	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	1	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	2	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	3	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	4	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	5	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	6	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	8	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	10	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	12	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	14	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	16	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	18	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	20	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	22	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	24	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	26	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	28	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	30	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24

5.2 Schaltmatrix V606A

V 606A		Strahlventilatoren (Jet Fans)																							
Versuchsdauer [min]	0	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	1	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	2	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	3	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	4	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	5	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	6	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	8	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	10	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	12	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	14	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	16	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	18	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	20	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	22	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	24	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	26	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	28	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	30	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24

5.3 Schaltmatrix V607

V 607		Strahlventilatoren (Jet Fans)																							
Versuchsdauer [min]	0	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	1	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	2	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	3	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	4	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	5	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	6	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	8	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	10	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	12	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	14	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	16	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	18	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	20	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	22	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	24	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	26	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
28	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24	
30	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24	

5.4 Schaltmatrix V610

V 610		Strahlventilatoren (Jet Fans)																							
Versuchsdauer [min]	0	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	1	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	2	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	3	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	4	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	5	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	6	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	8	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	10	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	12	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	14	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	16	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	18	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	20	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	22	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	24	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	26	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
	28	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24
30	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	3	6	9	12	15	18	21	24	

5.5 Schaltmatrix V621A

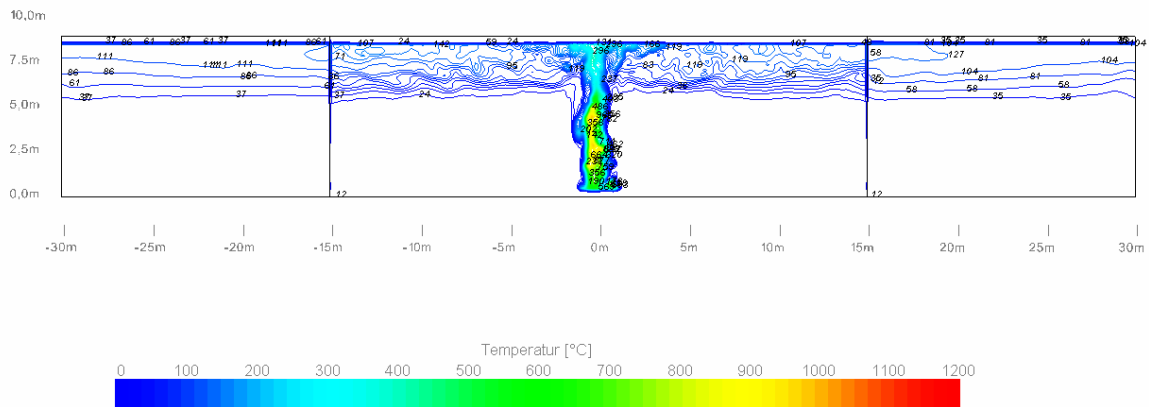
V 621A		Strahlventilatoren (Jet Fans)									
Versuchsdauer [min]	0	1 2 3	4 5 6	7 8 9	10 11 12	13 14 15	16 17 18	19 20 21	22 23 24		
	1	1 2 3	4 5 6	7 8 9	10 11 12	13 14 15	16 17 18	19 20 21	22 23 24		
	2	1 2 3	4 5 6	7 8 9	10 11 12	13 14 15	16 17 18	19 20 21	22 23 24		
	3	1 2 3	4 5 6	7 8 9	10 11 12	13 14 15	16 17 18	19 20 21	22 23 24		
	4	1 2 3	4 5 6	7 8 9	10 11 12	13 14 15	16 17 18	19 20 21	22 23 24		
	5	1 2 3	4 5 6	7 8 9	10 11 12	13 14 15	16 17 18	19 20 21	22 23 24		
	6	1 2 3	4 5 6	7 8 9	10 11 12	13 14 15	16 17 18	19 20 21	22 23 24		
	8	1 2 3	4 5 6	7 8 9	10 11 12	13 14 15	16 17 18	19 20 21	22 23 24		
	10	1 2 3	4 5 6	7 8 9	10 11 12	13 14 15	16 17 18	19 20 21	22 23 24		
	12	1 2 3	4 5 6	7 8 9	10 11 12	13 14 15	16 17 18	19 20 21	22 23 24		
	14	1 2 3	4 5 6	7 8 9	10 11 12	13 14 15	16 17 18	19 20 21	22 23 24		
	16	1 2 3	4 5 6	7 8 9	10 11 12	13 14 15	16 17 18	19 20 21	22 23 24		
	18	1 2 3	4 5 6	7 8 9	10 11 12	13 14 15	16 17 18	19 20 21	22 23 24		
	20	1 2 3	4 5 6	7 8 9	10 11 12	13 14 15	16 17 18	19 20 21	22 23 24		
	22	1 2 3	4 5 6	7 8 9	10 11 12	13 14 15	16 17 18	19 20 21	22 23 24		
	24	1 2 3	4 5 6	7 8 9	10 11 12	13 14 15	16 17 18	19 20 21	22 23 24		
	26	1 2 3	4 5 6	7 8 9	10 11 12	13 14 15	16 17 18	19 20 21	22 23 24		
28	1 2 3	4 5 6	7 8 9	10 11 12	13 14 15	16 17 18	19 20 21	22 23 24			
30	1 2 3	4 5 6	7 8 9	10 11 12	13 14 15	16 17 18	19 20 21	22 23 24			

Modelltunnel

1 Gewölbequerschnitt	E2
1.1 Temperaturverteilung	E2
1.2 Geschwindigkeitsverteilung	E9
2 Rechteckquerschnitt	E16
2.1 Temperaturverteilung	E16
2.2 Geschwindigkeitsverteilung	E23

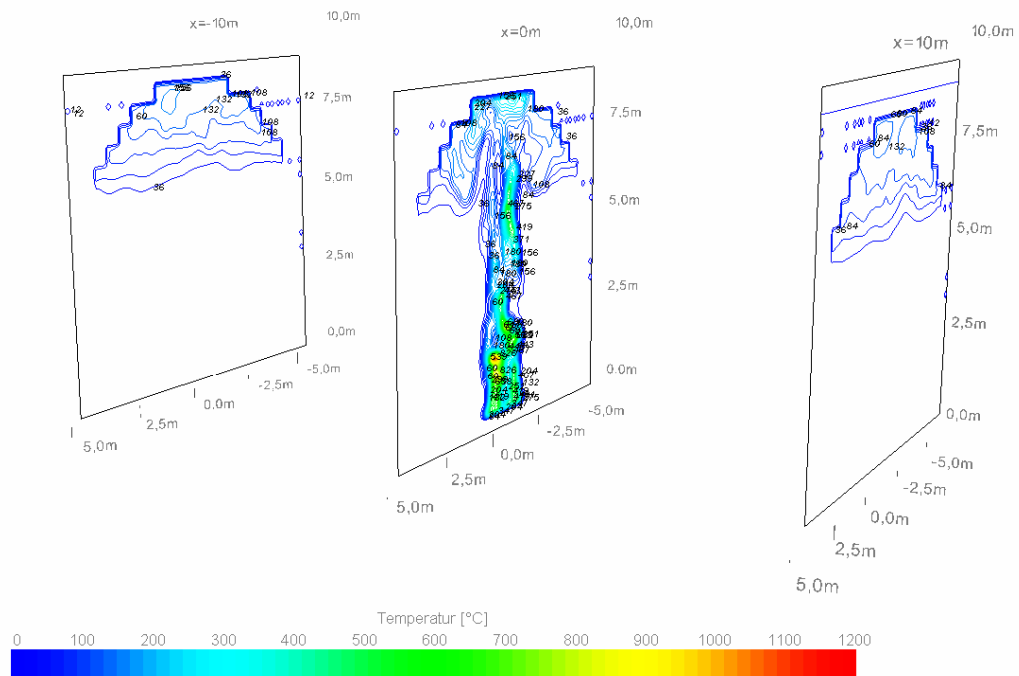
1 Gewölbequerschnitt

1.1 Temperaturverteilung



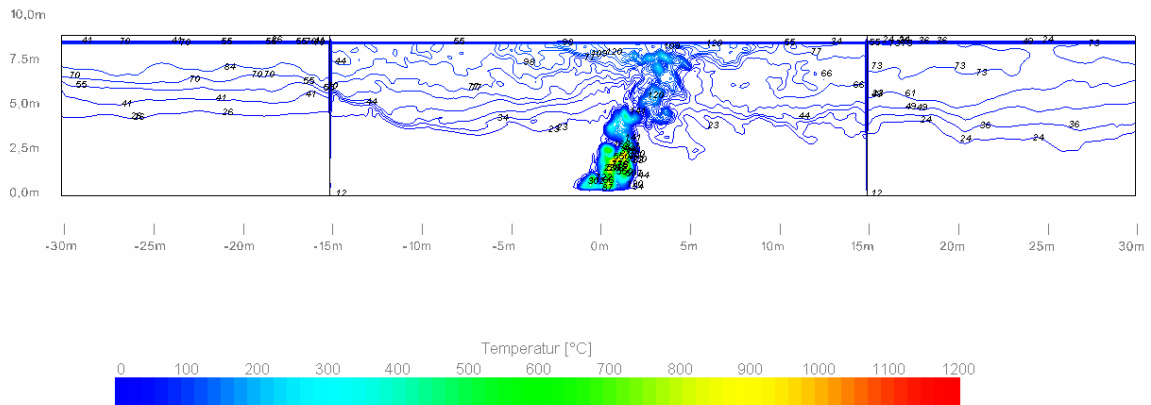
Mayer 2003-2006

Abbildung 1-1: Temperaturverteilung längs, $u = 0,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5\text{MW}$



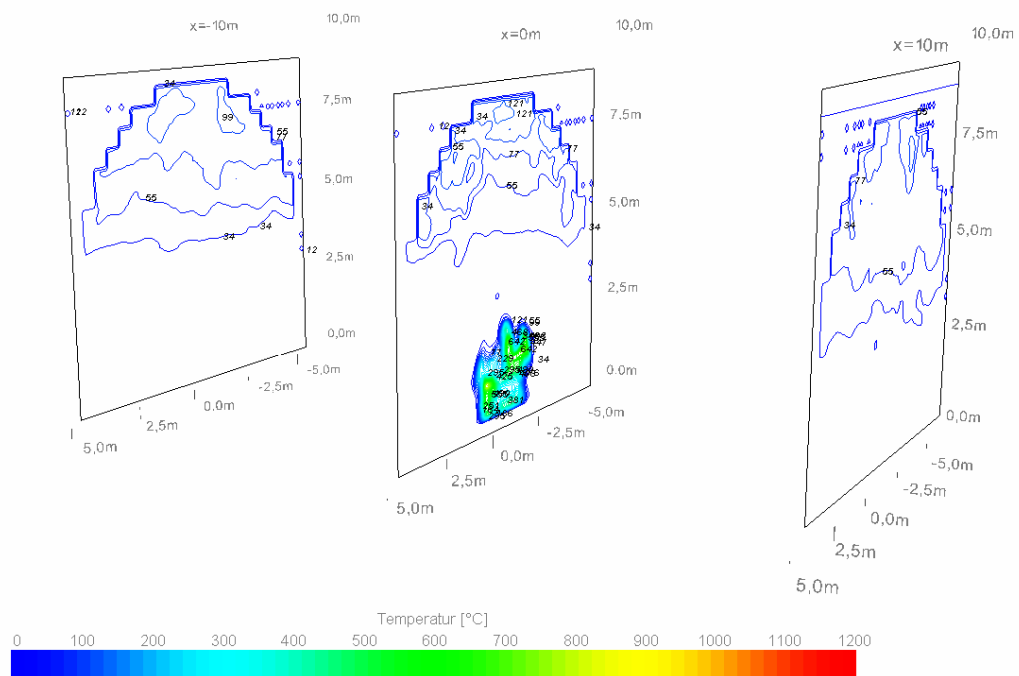
Mayer 2003-2006

Abbildung 1-2: Temperaturverteilung quer, $u = 0,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5\text{MW}$



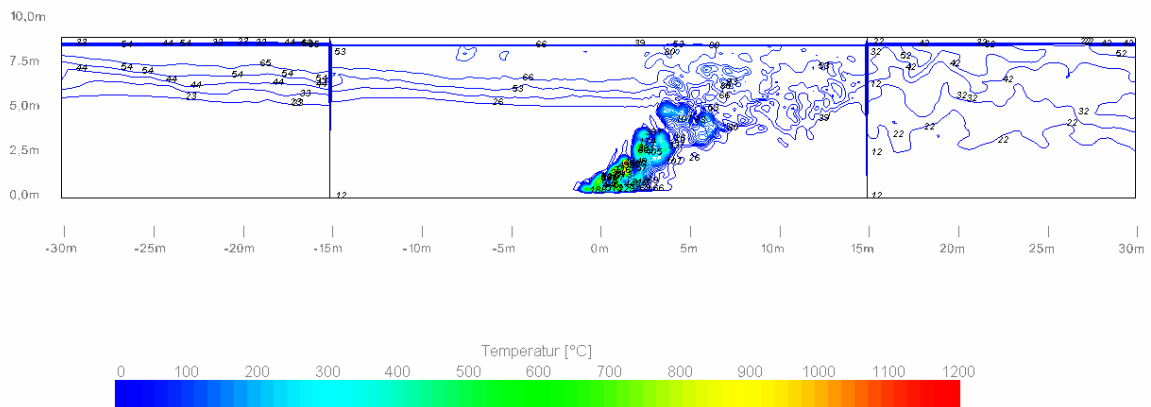
Mayer 2003-2006

Abbildung 1-3: Temperaturverteilung längs, $u = 1,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5 \text{ MW}$



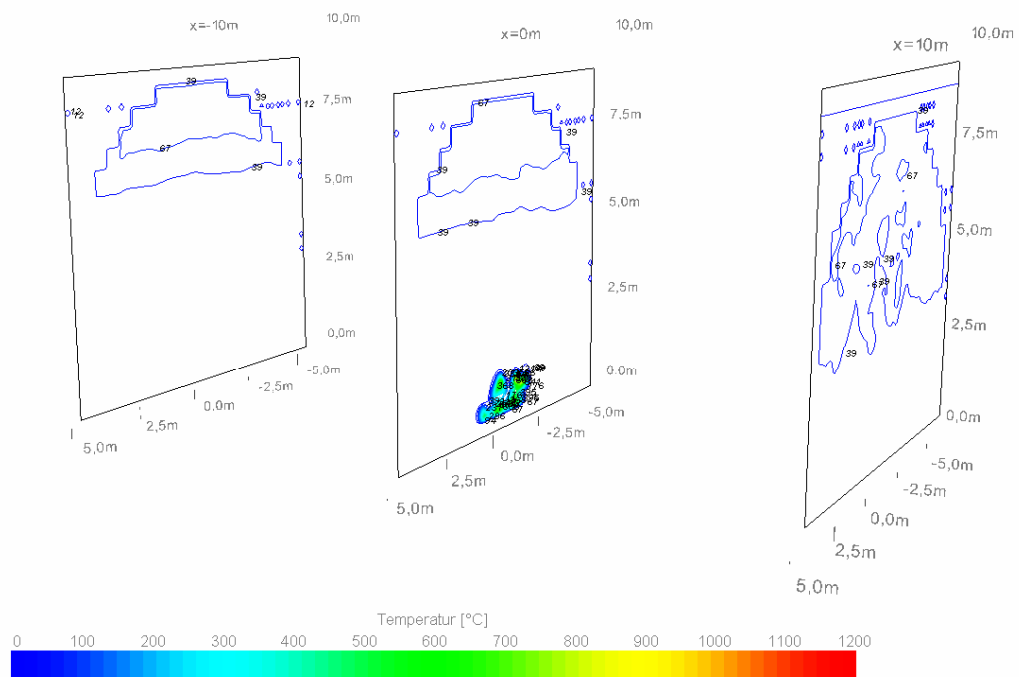
Mayer 2003-2006

Abbildung 1-4: Temperaturverteilung quer, $u = 1,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5 \text{ MW}$



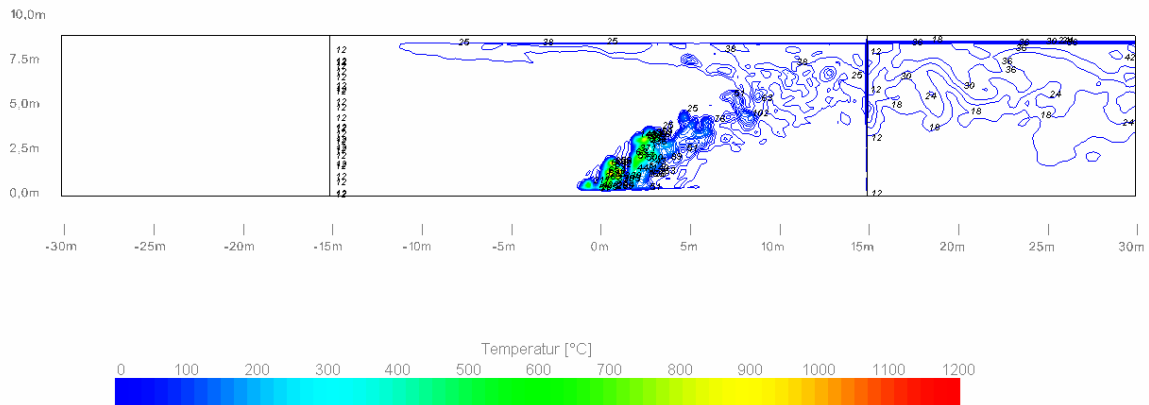
Mayer 2003-2006

Abbildung 1-5: Temperaturverteilung längs, $u = 2,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5\text{MW}$



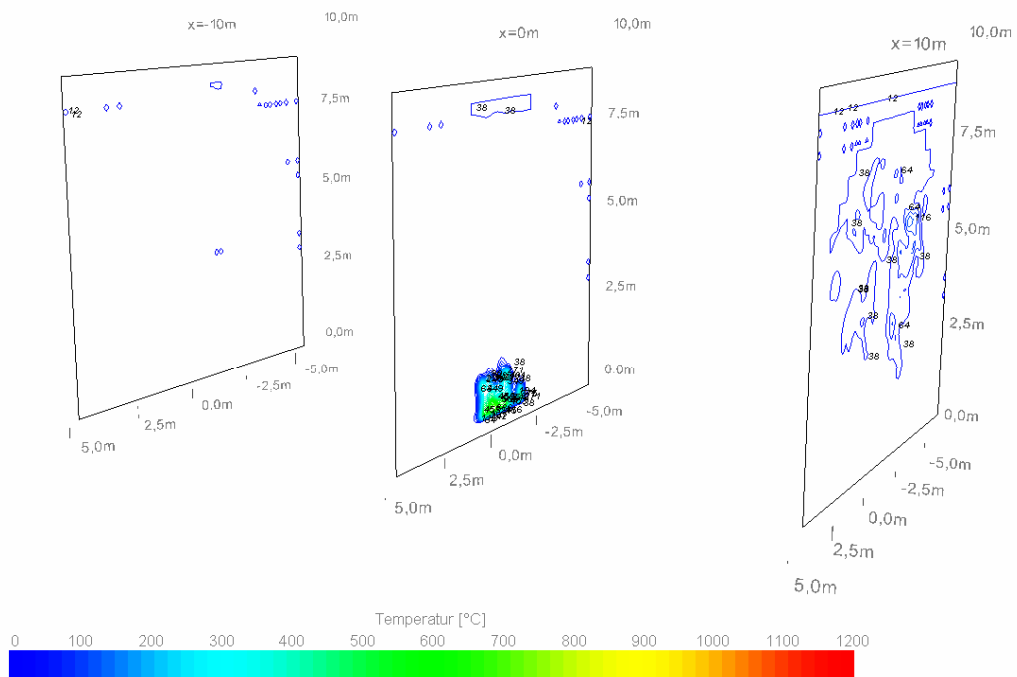
Mayer 2003-2006

Abbildung 1-6: Temperaturverteilung quer, $u = 2,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5\text{MW}$



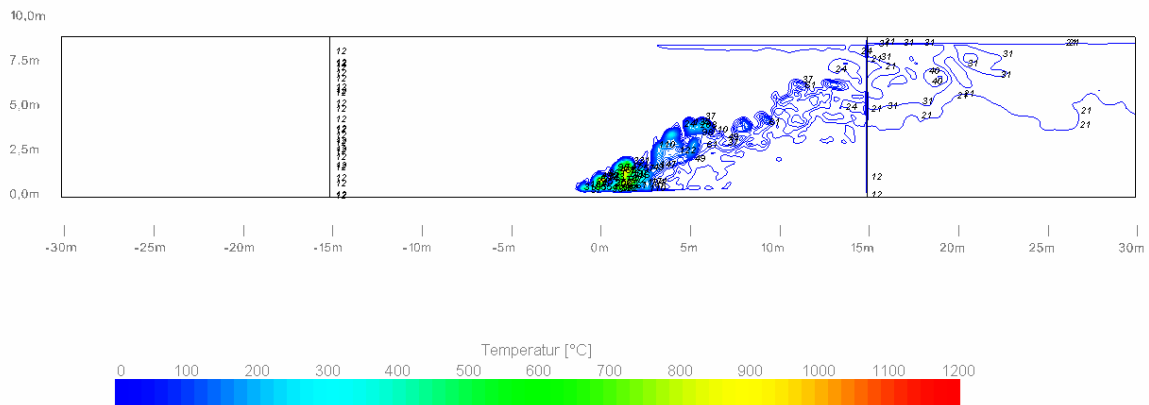
Mayer 2003-2006

Abbildung 1-7: Temperaturverteilung längs, $u = 3,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5 \text{ MW}$



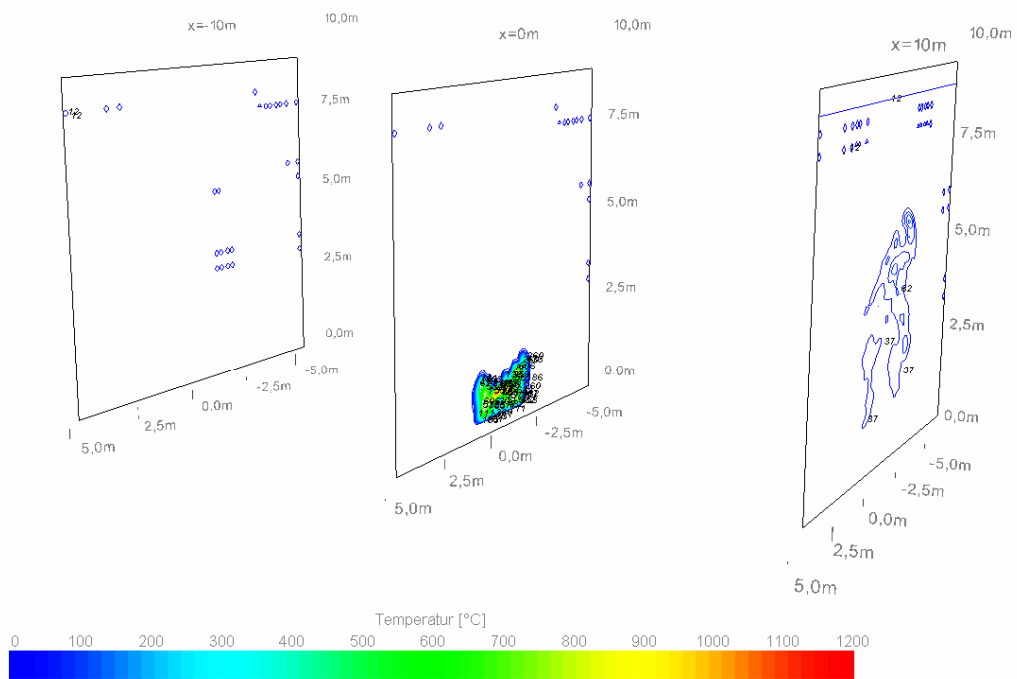
Mayer 2003-2006

Abbildung 1-8: Temperaturverteilung quer, $u = 3,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5 \text{ MW}$



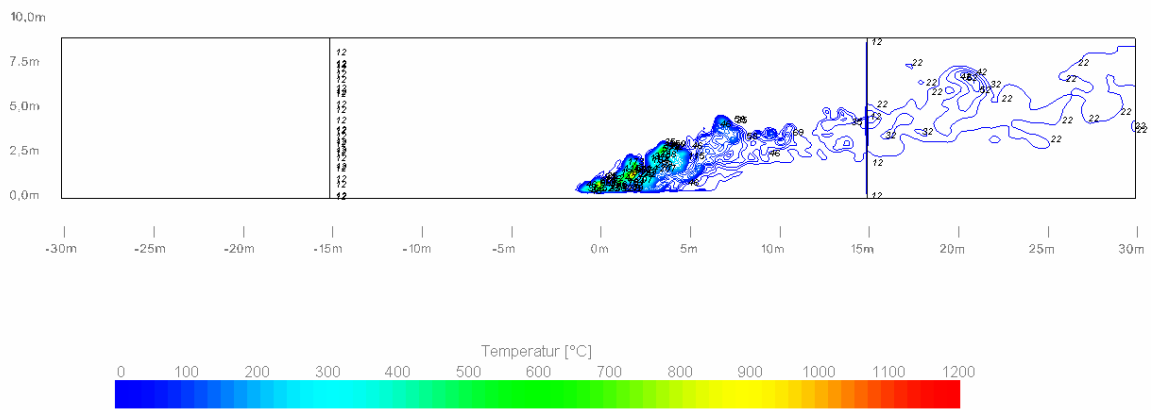
Mayer 2003-2006

Abbildung 1-9: Temperaturverteilung längs, $u = 4,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5 \text{ MW}$



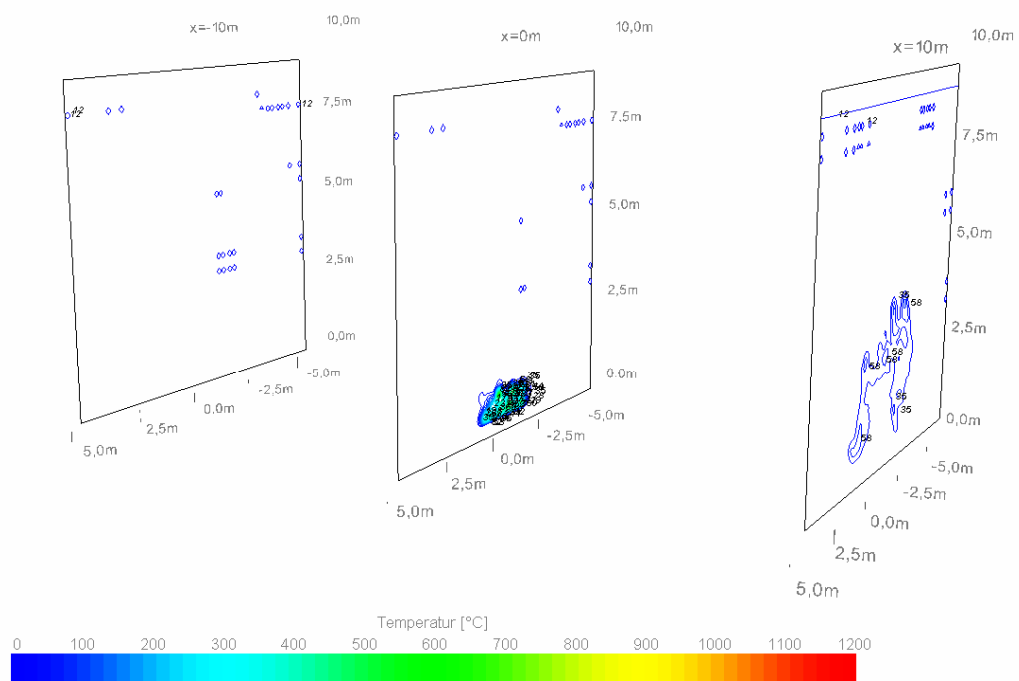
Mayer 2003-2006

Abbildung 1-10: Temperaturverteilung quer, $u = 4,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5 \text{ MW}$



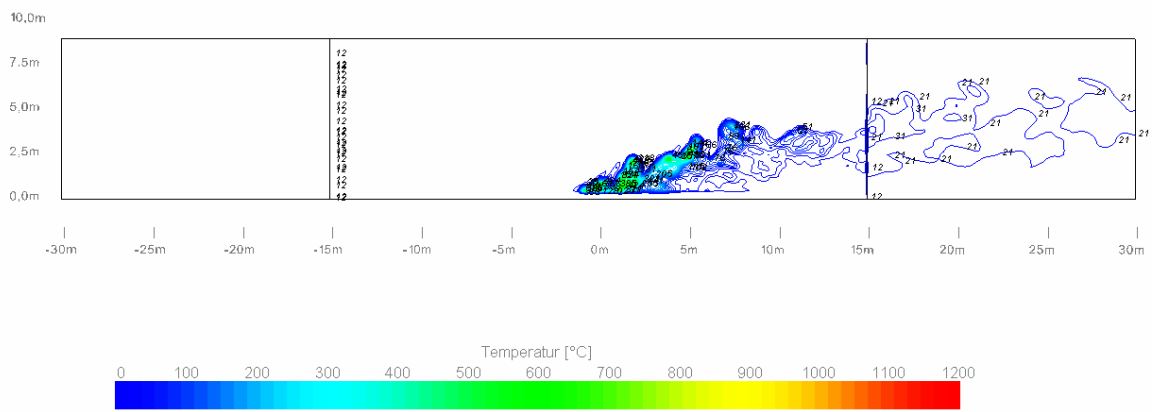
Mayer 2003-2006

Abbildung 1-11: Temperaturverteilung längs, $u = 5,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5\text{MW}$



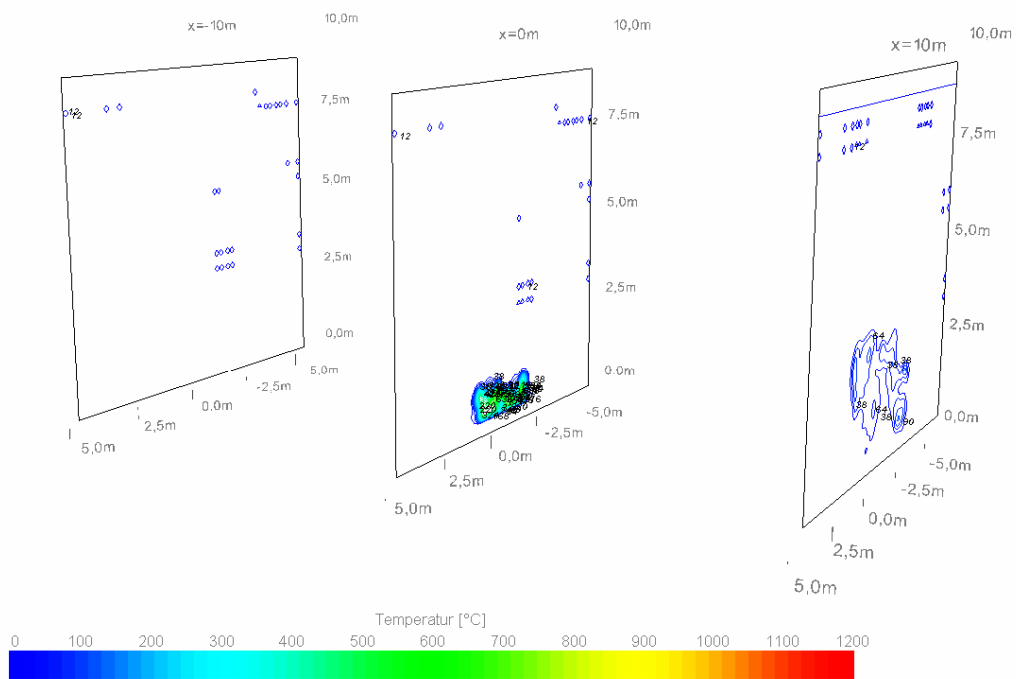
Mayer 2003-2006

Abbildung 1-12: Temperaturverteilung quer, $u = 5,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5\text{MW}$



Mayer 2003-2006

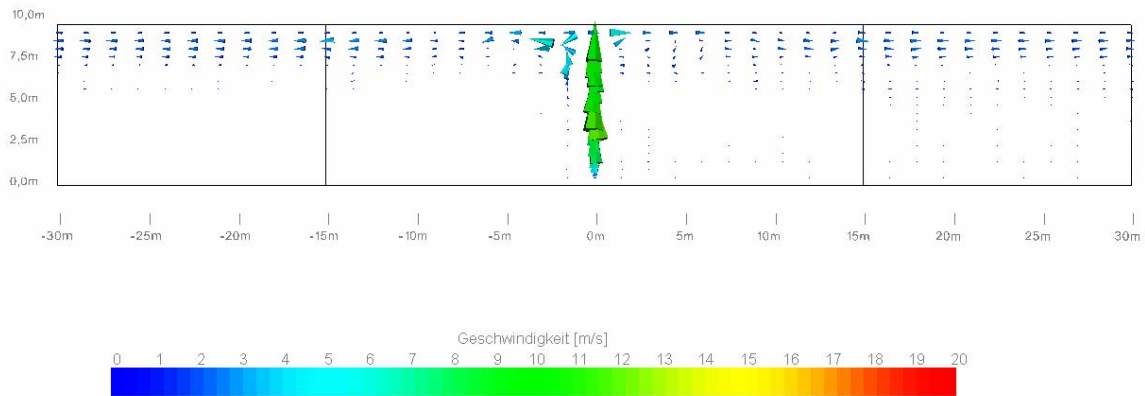
Abbildung 1-13: Temperaturverteilung längs, $u = 6,0$ m/s, $t = 360$ sec, $h_{rr} = 5$ MW



Mayer 2003-2006

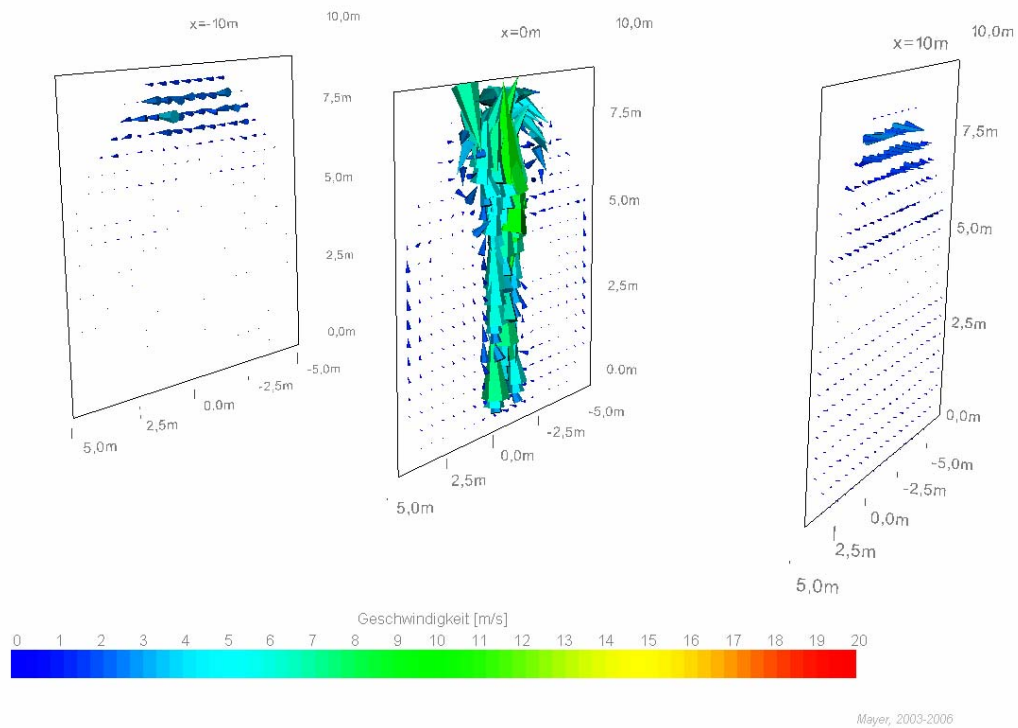
Abbildung 1-14: Temperaturverteilung quer, $u = 6,0$ m/s, $t = 360$ sec, $h_{rr} = 5$ MW

1.2 Geschwindigkeitsverteilung



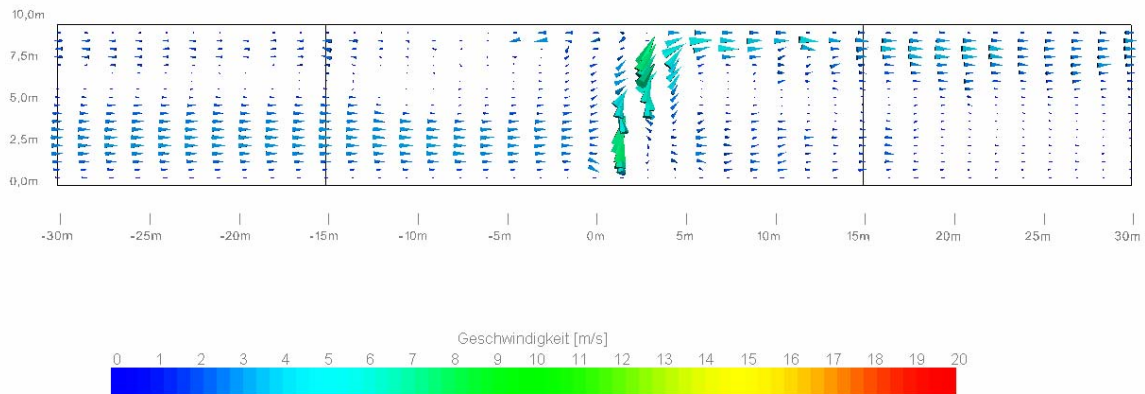
Mayer, 2003-2006

Abbildung 1-15: Geschwindigkeitsverteilung längs, $u = 0,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5 \text{ MW}$



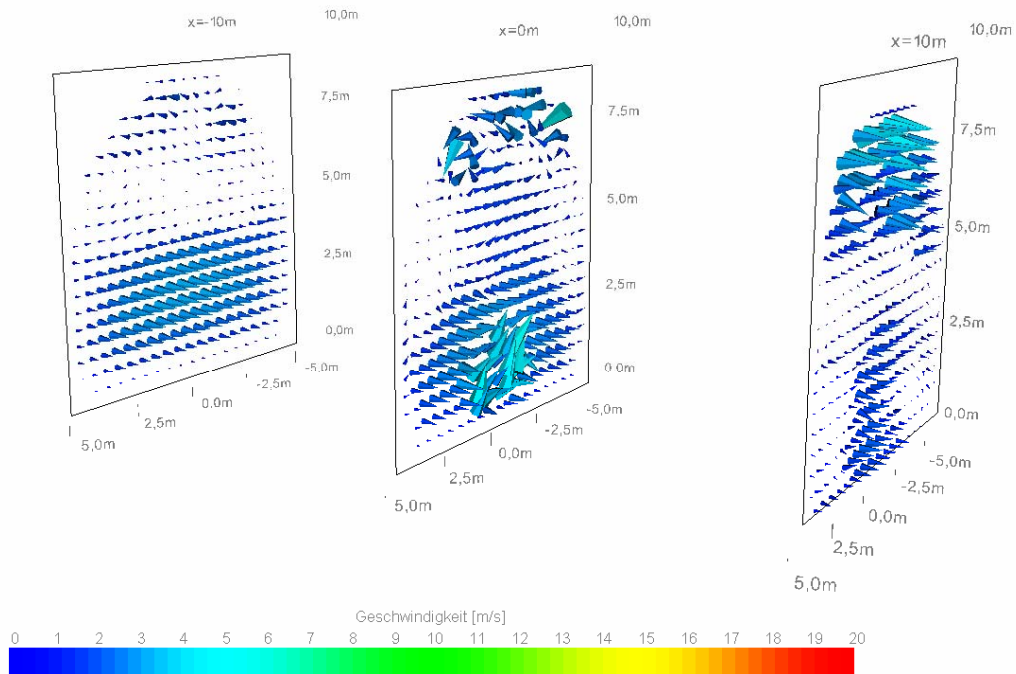
Mayer, 2003-2006

Abbildung 1-16: Geschwindigkeitsverteilung quer, $u = 0,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5 \text{ MW}$



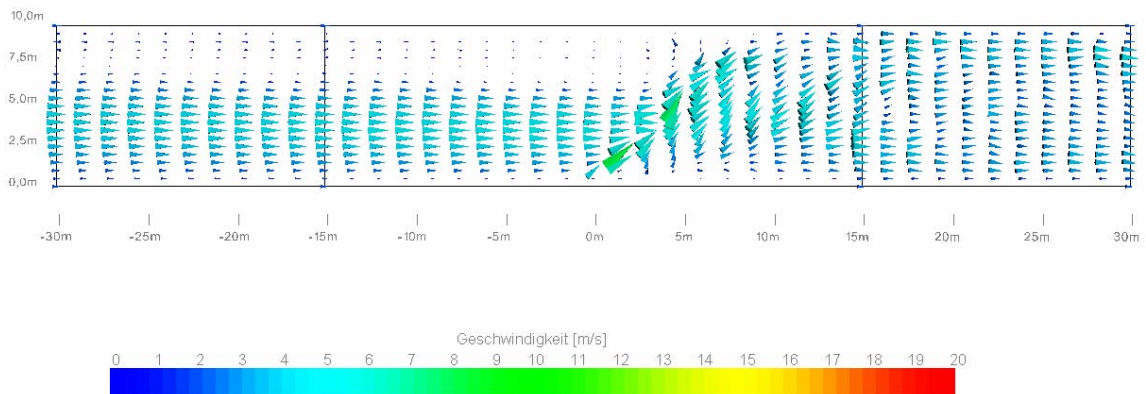
Mayer, 2003-2006

Abbildung 1-17: Geschwindigkeitsverteilung längs, $u = 1,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5\text{MW}$



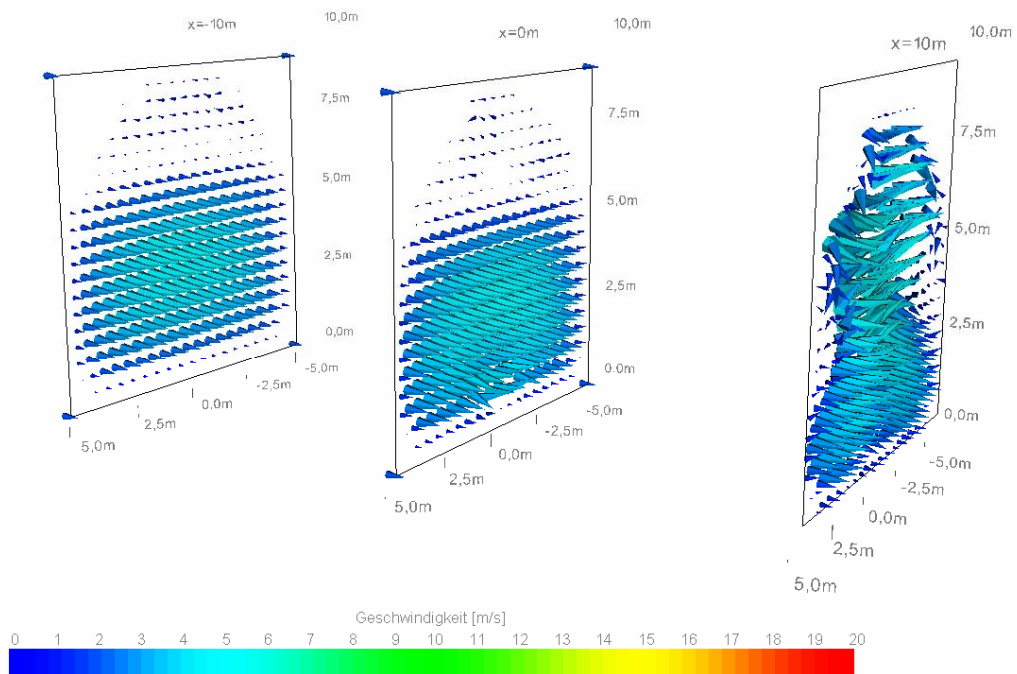
Mayer, 2003-2006

Abbildung 1-18: Geschwindigkeitsverteilung quer, $u = 1,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5\text{MW}$



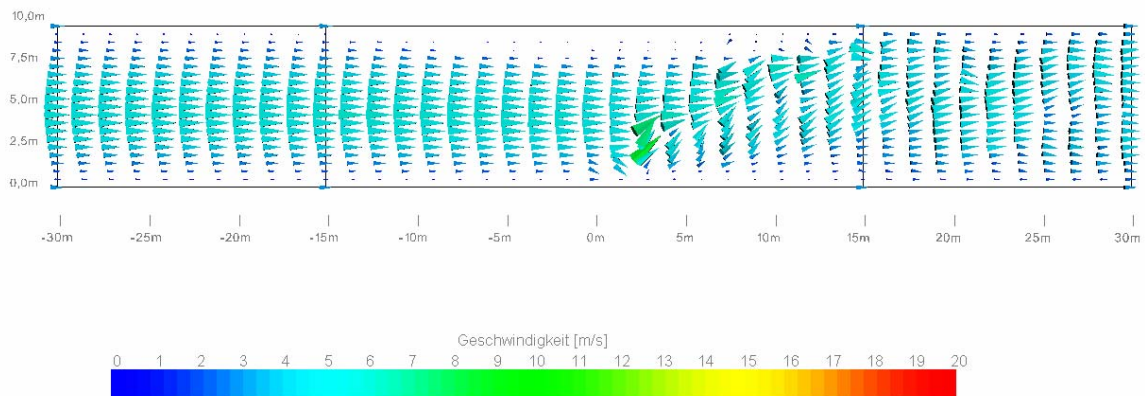
Mayer, 2003-2006

Abbildung 1-19: Geschwindigkeitsverteilung längs, $u = 2,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5 \text{ MW}$



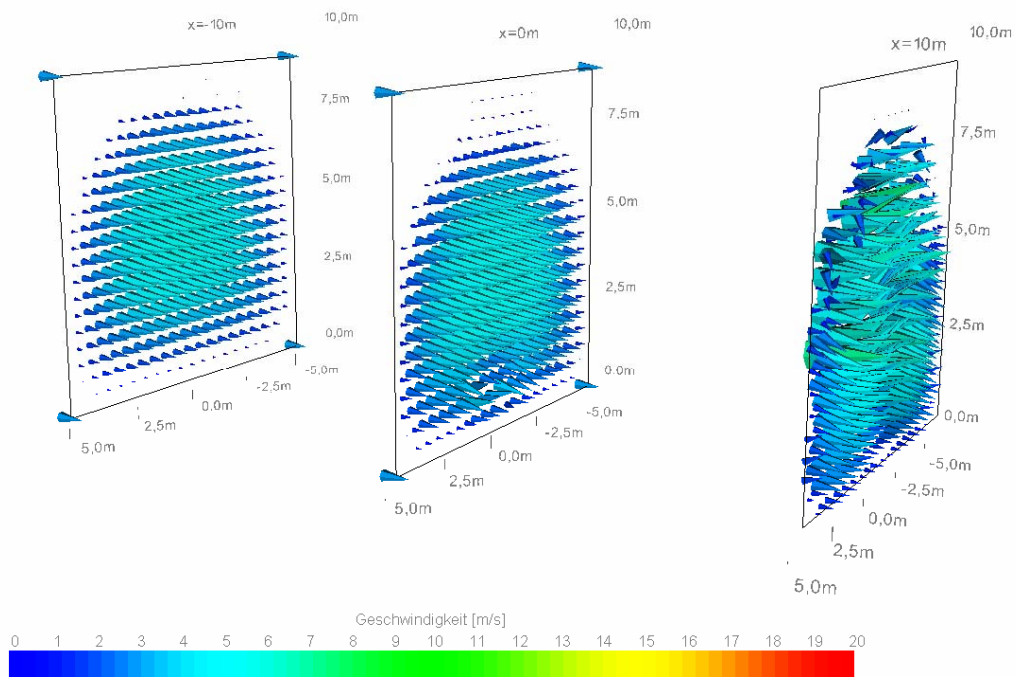
Mayer, 2003-2006

Abbildung 1-20: Geschwindigkeitsverteilung quer, $u = 2,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5 \text{ MW}$



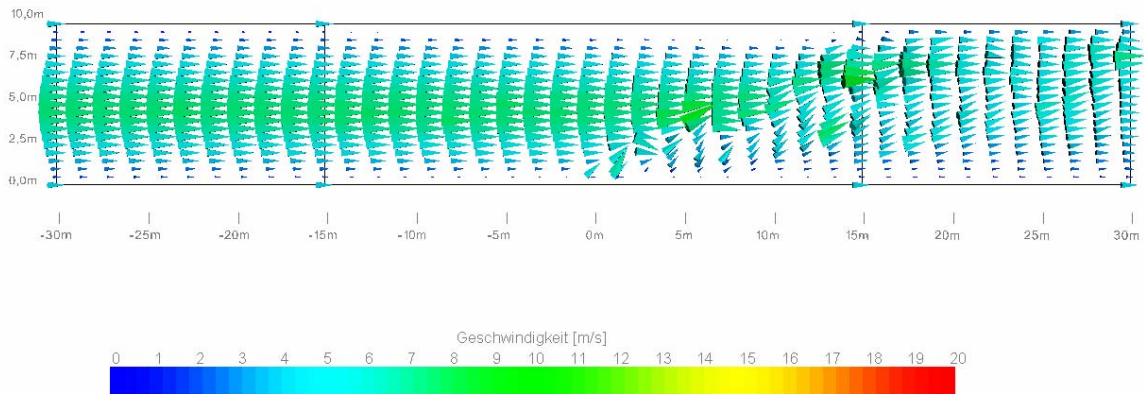
Mayer, 2003-2006

Abbildung 1-21: Geschwindigkeitsverteilung längs, $u = 3,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5 \text{ MW}$



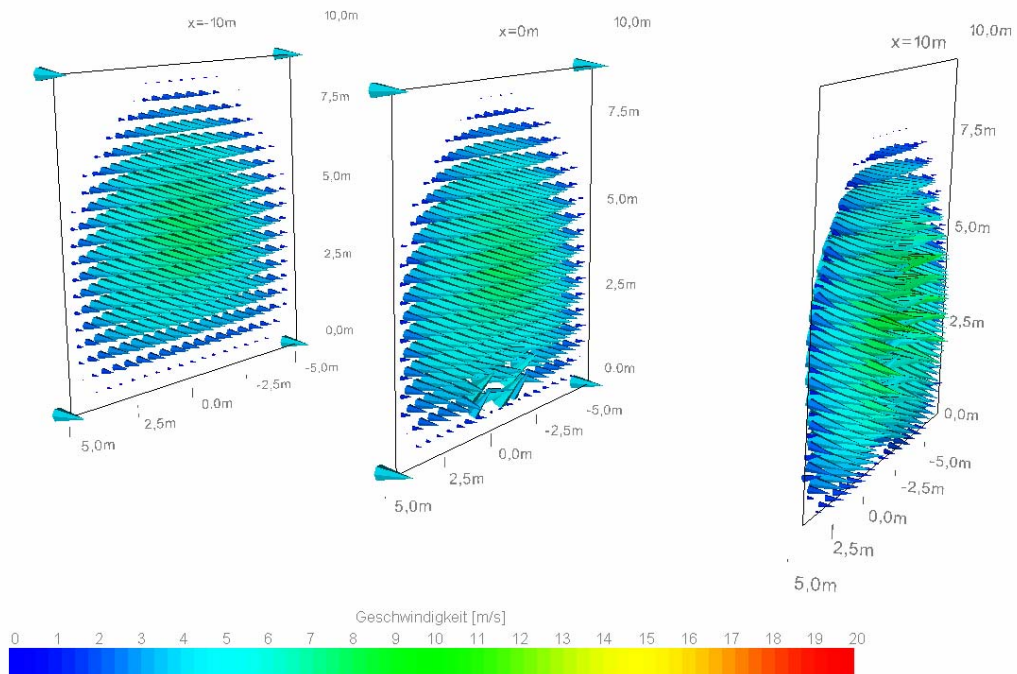
Mayer, 2003-2006

Abbildung 1-22: Geschwindigkeitsverteilung quer, $u = 3,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5 \text{ MW}$



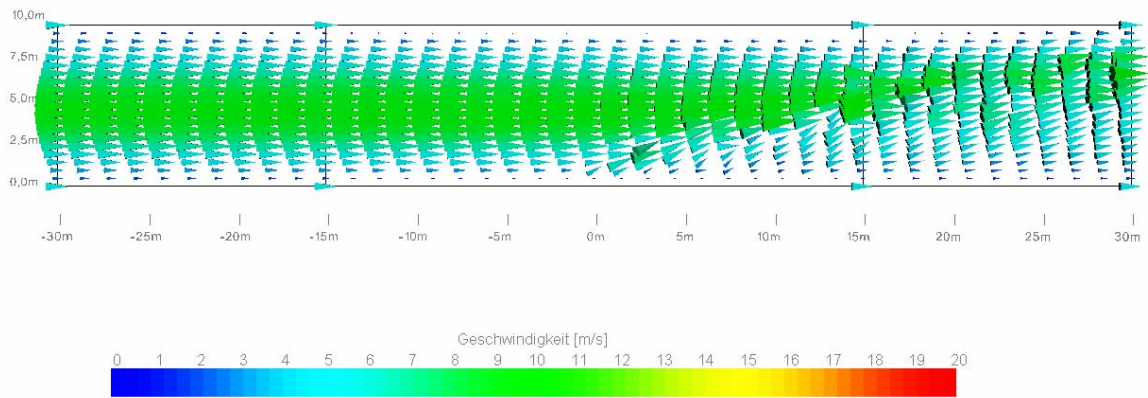
Mayer, 2003-2006

Abbildung 1-23: Geschwindigkeitsverteilung längs, $u = 4,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5 \text{ MW}$



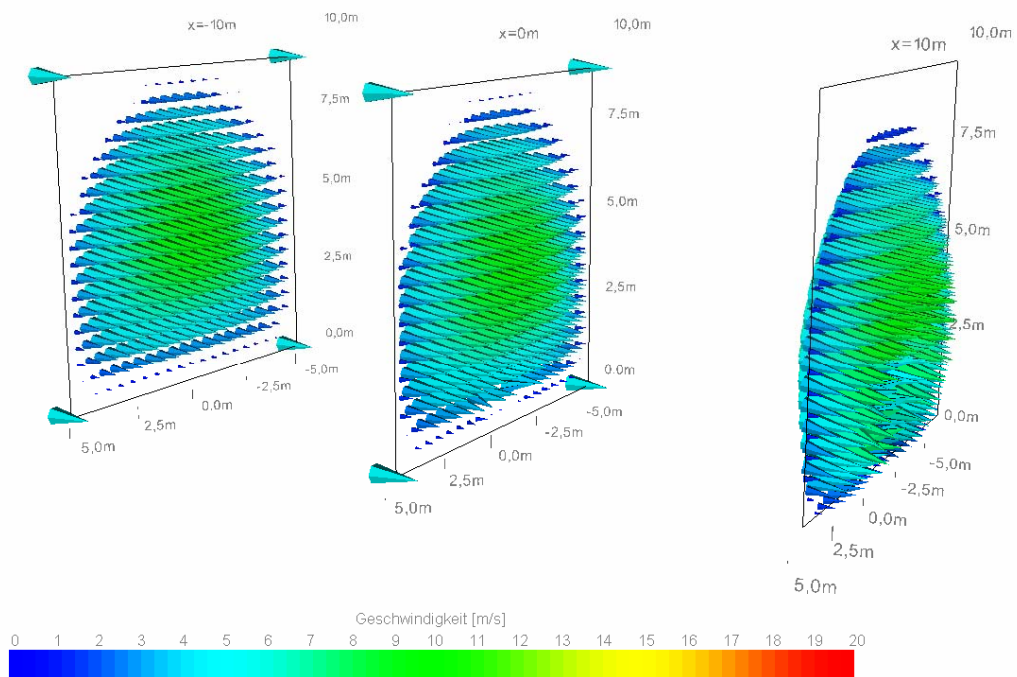
Mayer, 2003-2006

Abbildung 1-24: Geschwindigkeitsverteilung quer, $u = 4,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5 \text{ MW}$



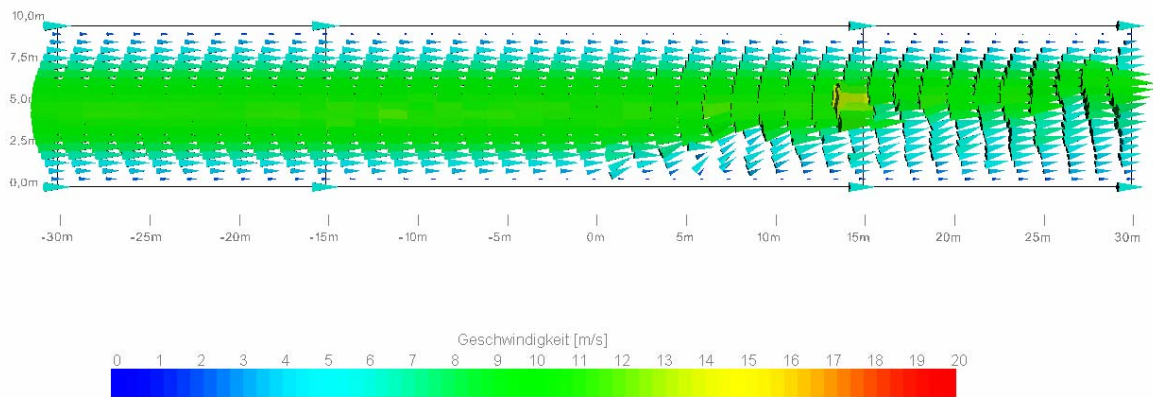
Mayer, 2003-2006

Abbildung 1-25: Geschwindigkeitsverteilung längs, $u = 5,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5\text{MW}$



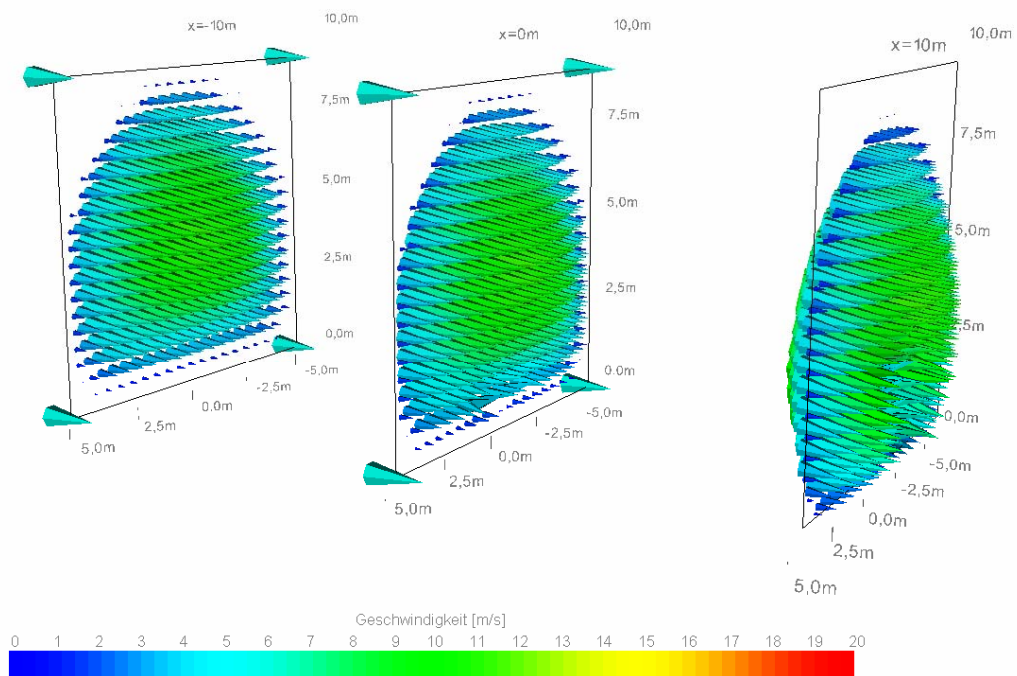
Mayer, 2003-2006

Abbildung 1-26: Geschwindigkeitsverteilung quer, $u = 5,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5\text{MW}$



Mayer, 2003-2006

Abbildung 1-27: Geschwindigkeitsverteilung längs, $u = 6,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5\text{MW}$

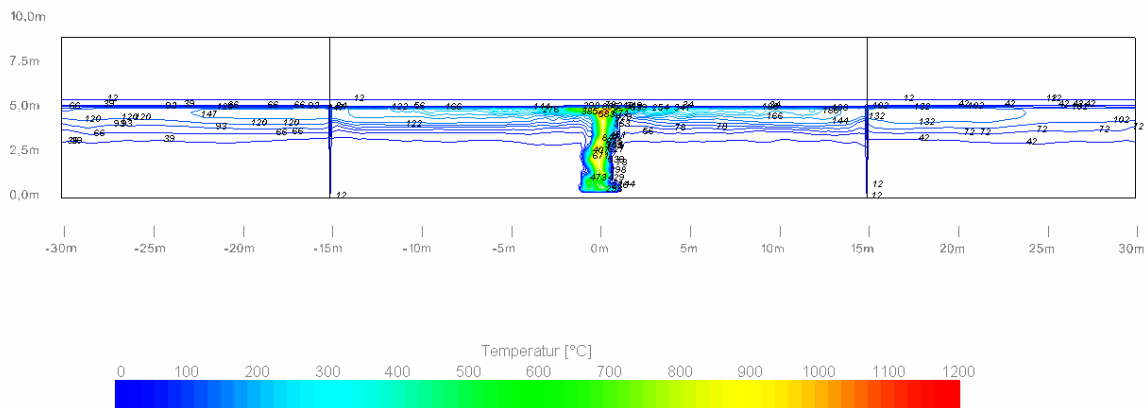


Mayer, 2003-2006

Abbildung 1-28: Geschwindigkeitsverteilung quer, $u = 6,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5\text{MW}$

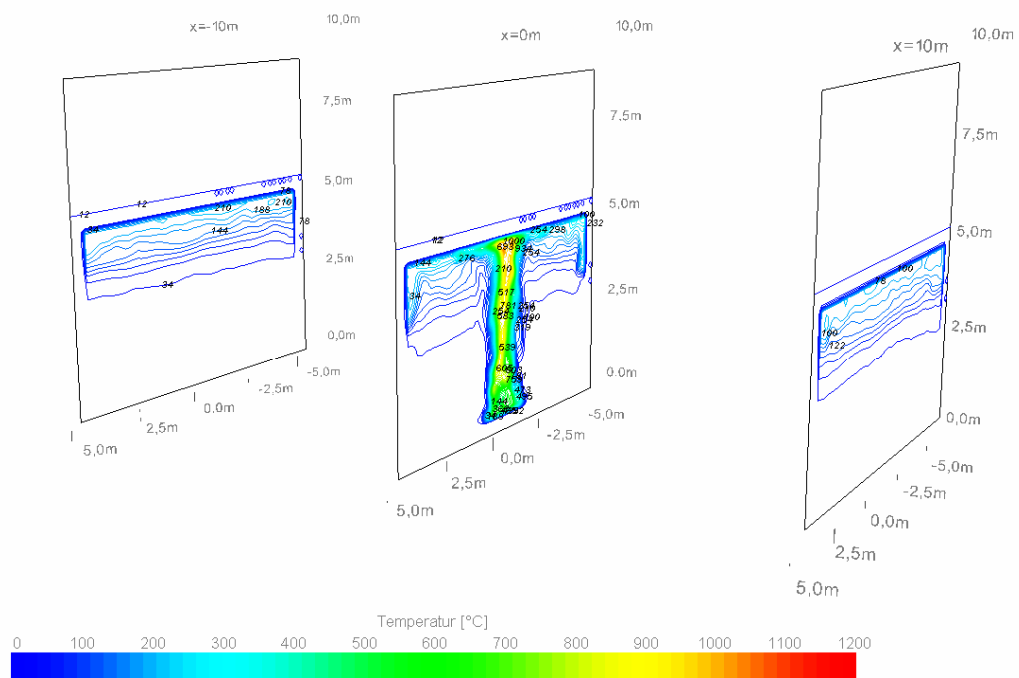
2 Rechteckquerschnitt

2.1 Temperaturverteilung



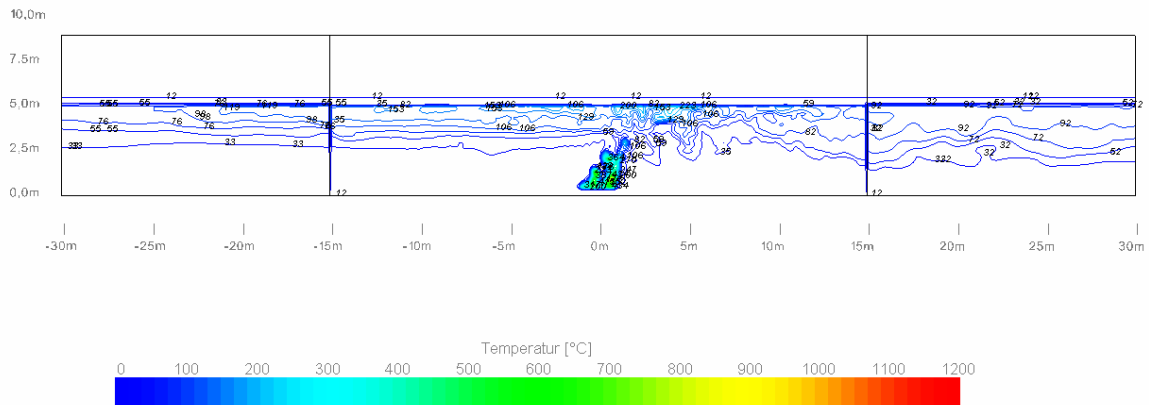
Mayer 2003-2006

Abbildung 2-1: Temperaturverteilung längs, $u = 0,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5 \text{ MW}$



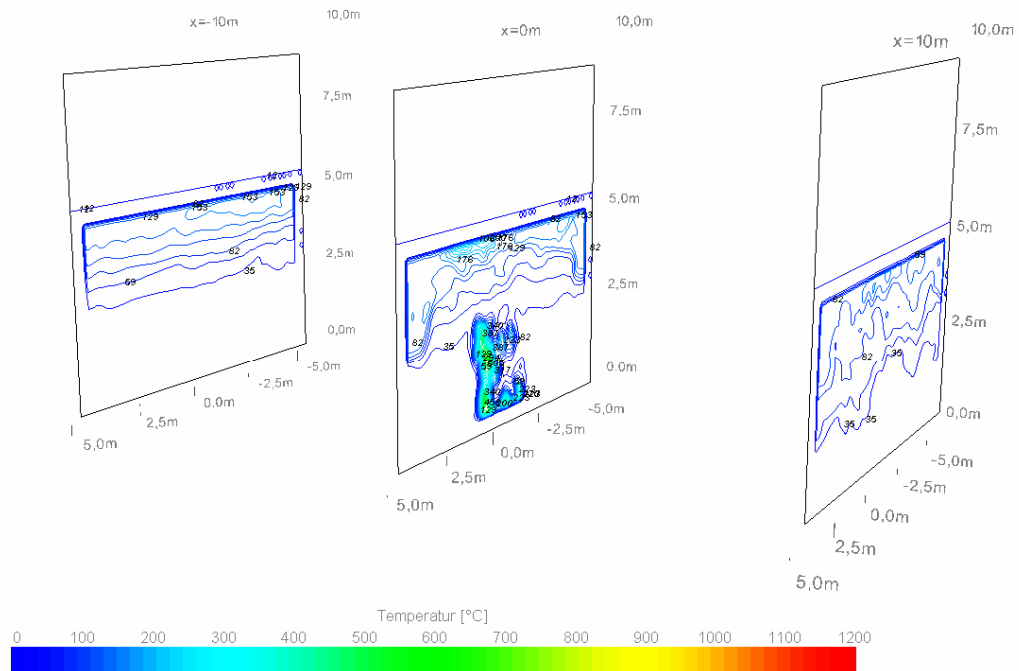
Mayer 2003-2006

Abbildung 2-2: Temperaturverteilung quer, $u = 0,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5 \text{ MW}$



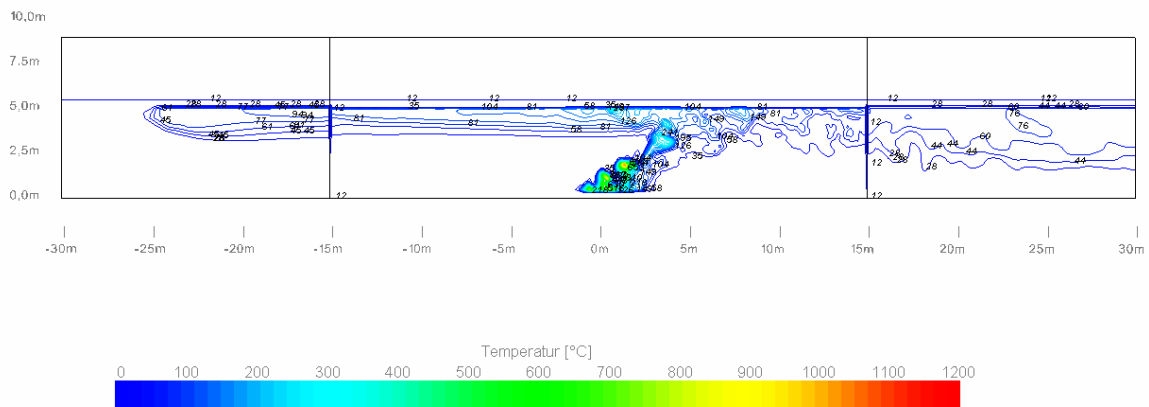
Mayer 2003-2006

Abbildung 2-3: Temperaturverteilung längs, $u = 1,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5 \text{ MW}$



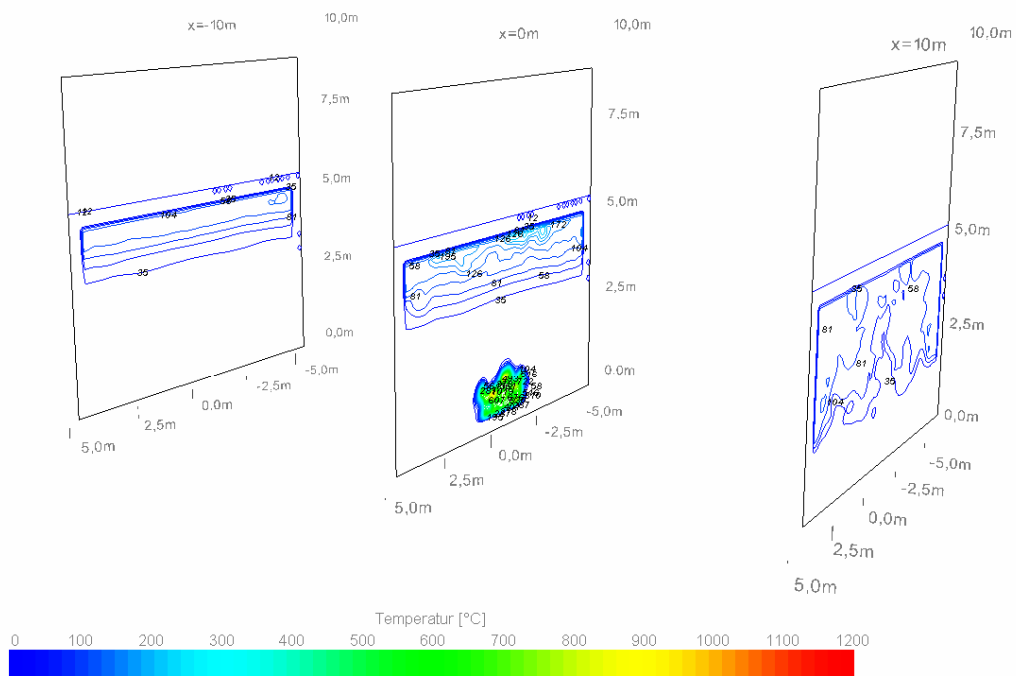
Mayer 2003-2006

Abbildung 2-4: Temperaturverteilung quer, $u = 1,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5 \text{ MW}$



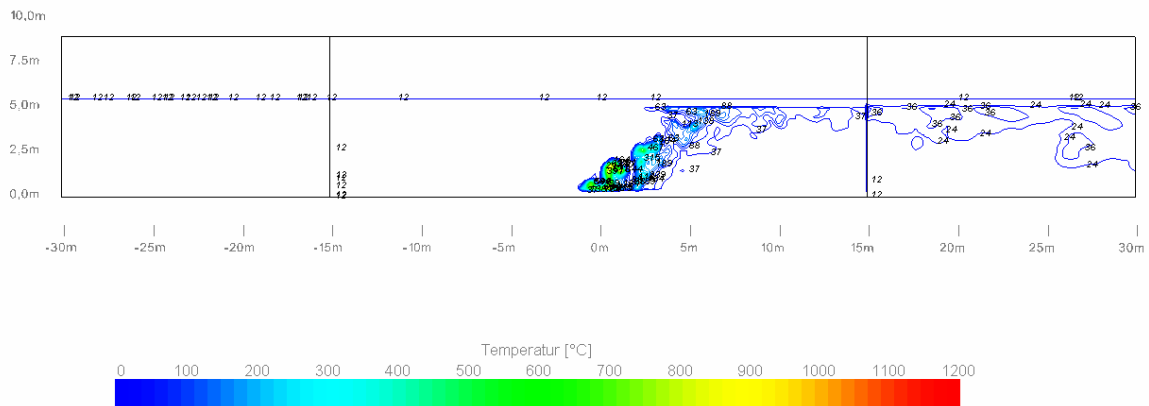
Mayer 2003-2006

Abbildung 2-5: Temperaturverteilung längs, $u = 2,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5 \text{ MW}$



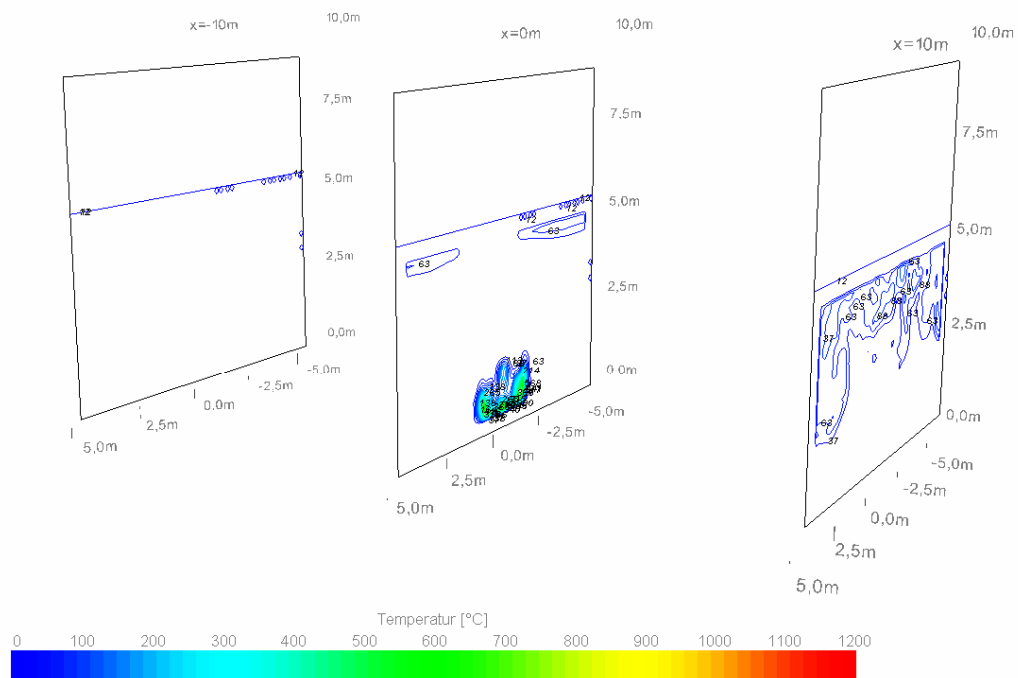
Mayer 2003-2006

Abbildung 2-6: Temperaturverteilung quer, $u = 2,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5 \text{ MW}$



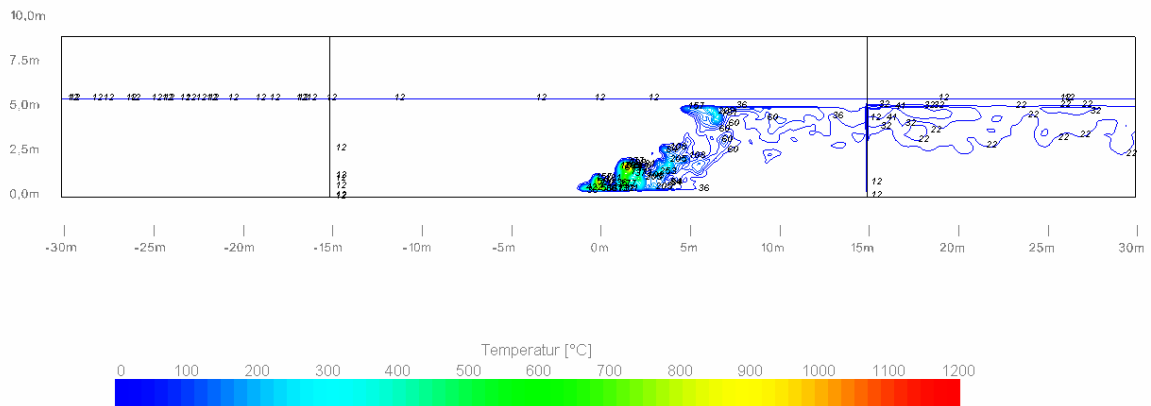
Mayer 2003-2006

Abbildung 2-7: Temperaturverteilung längs, $u = 3,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5 \text{ MW}$



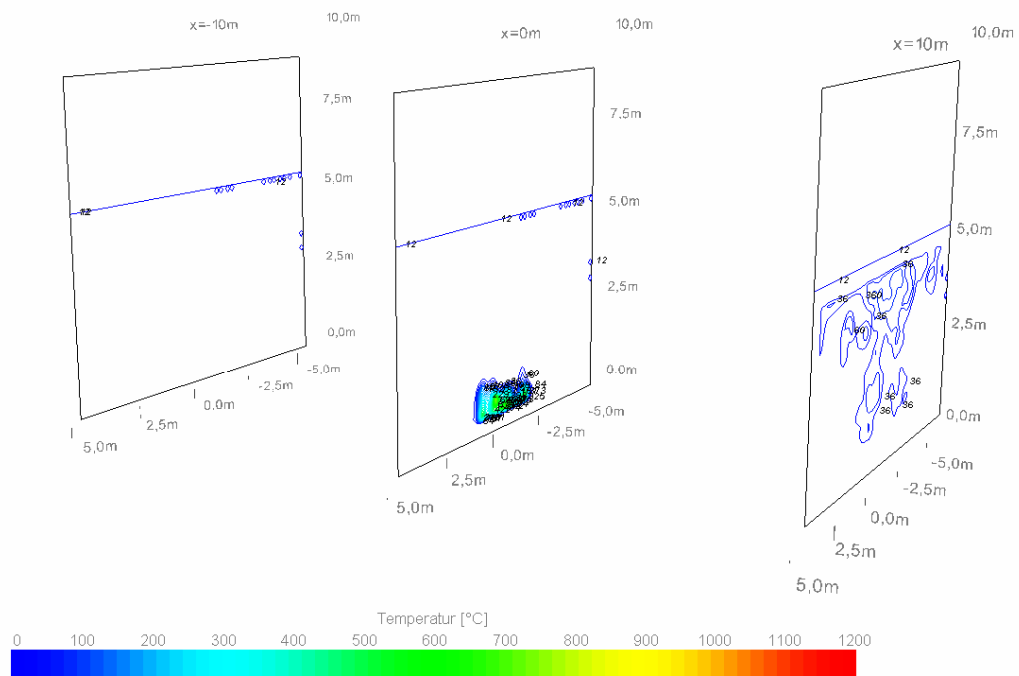
Mayer 2003-2006

Abbildung 2-8: Temperaturverteilung quer, $u = 3,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5 \text{ MW}$



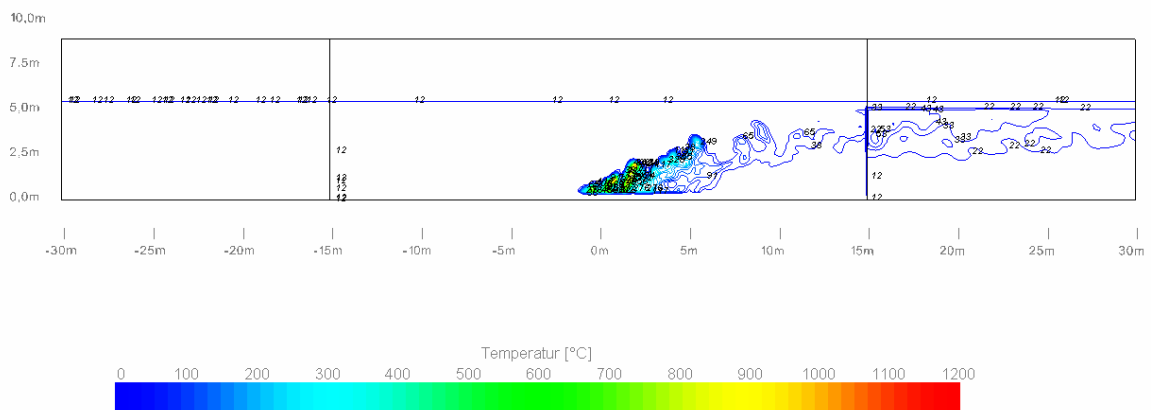
Mayer 2003-2006

Abbildung 2-9: Temperaturverteilung längs, $u = 4,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5 \text{ MW}$



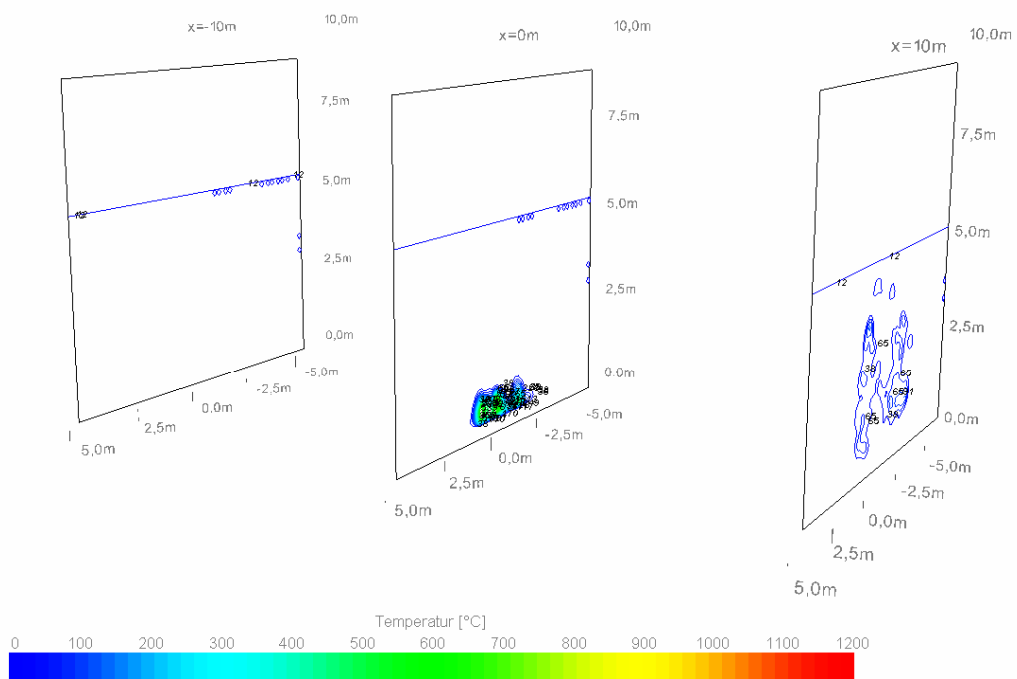
Mayer 2003-2006

Abbildung 2-10: Temperaturverteilung quer, $u = 4,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5 \text{ MW}$



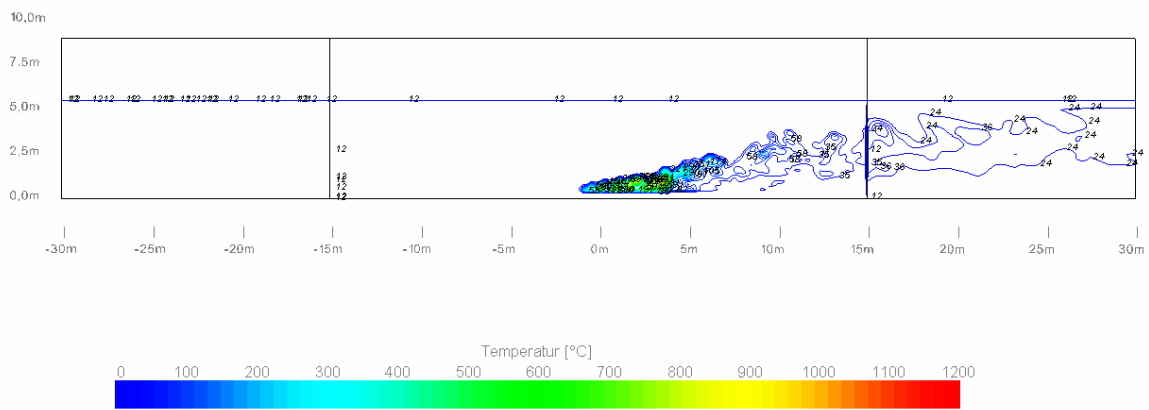
Mayer 2003-2006

Abbildung 2-11: Temperaturverteilung längs, $u = 5,0$ m/s, $t = 360$ sec, $h_{rr} = 5$ MW



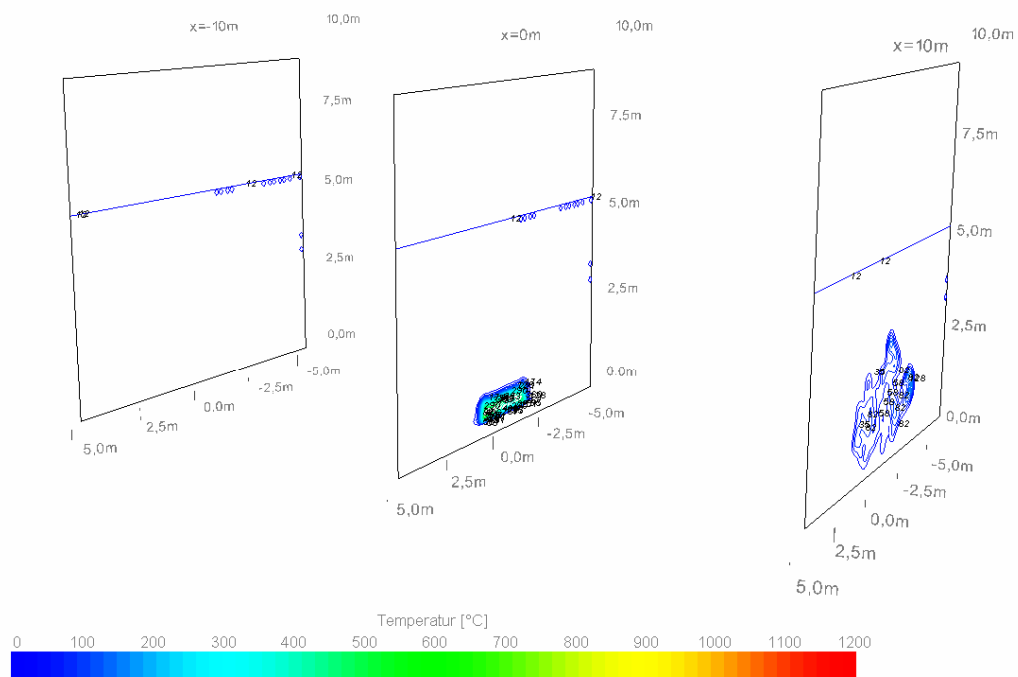
Mayer 2003-2006

Abbildung 2-12: Temperaturverteilung quer, $u = 5,0$ m/s, $t = 360$ sec, $h_{rr} = 5$ MW



Mayer 2003-2006

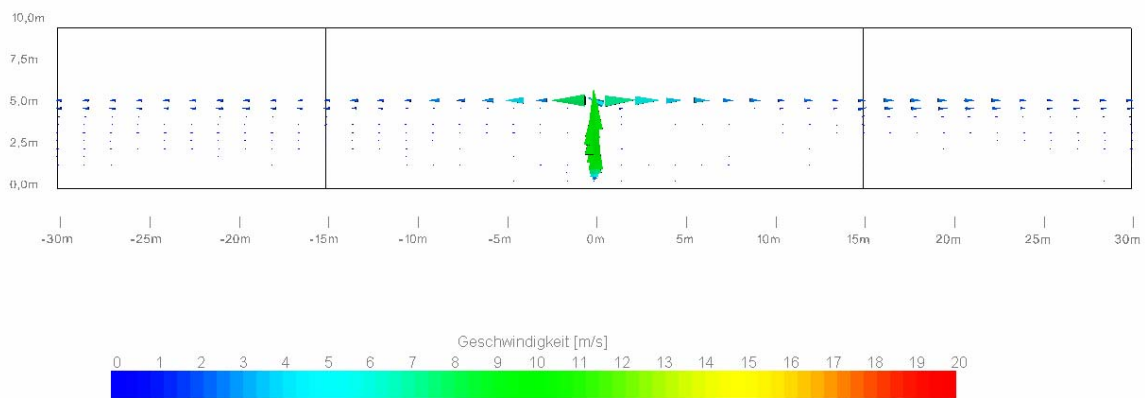
Abbildung 2-13: Temperaturverteilung längs, $u = 6,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5\text{MW}$



Mayer 2003-2006

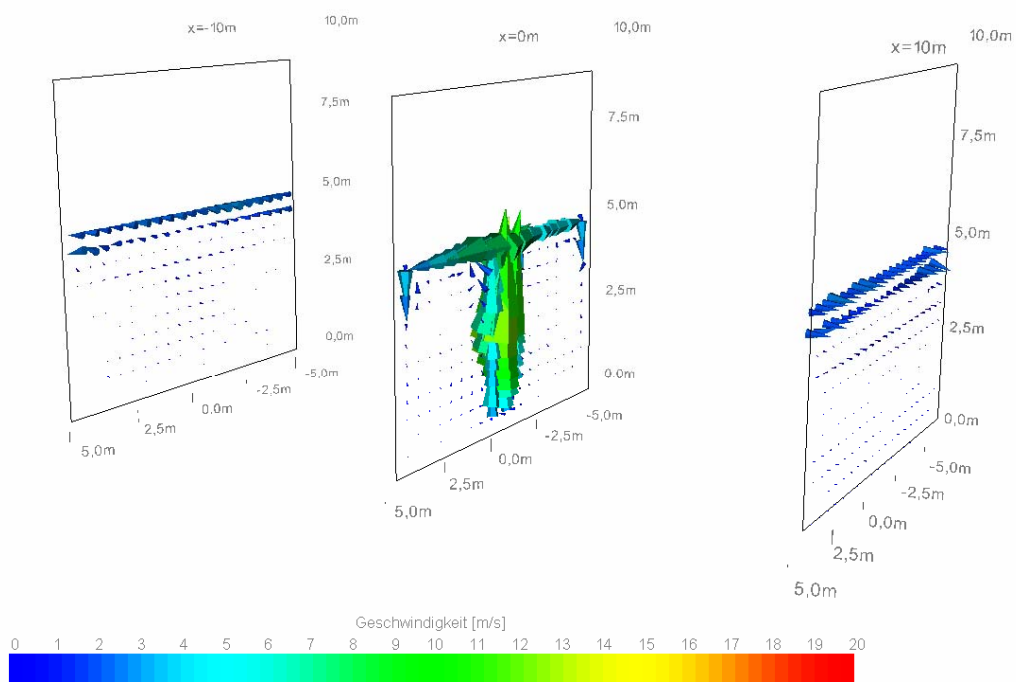
Abbildung 2-14: Temperaturverteilung quer, $u = 6,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5\text{MW}$

2.2 Geschwindigkeitsverteilung



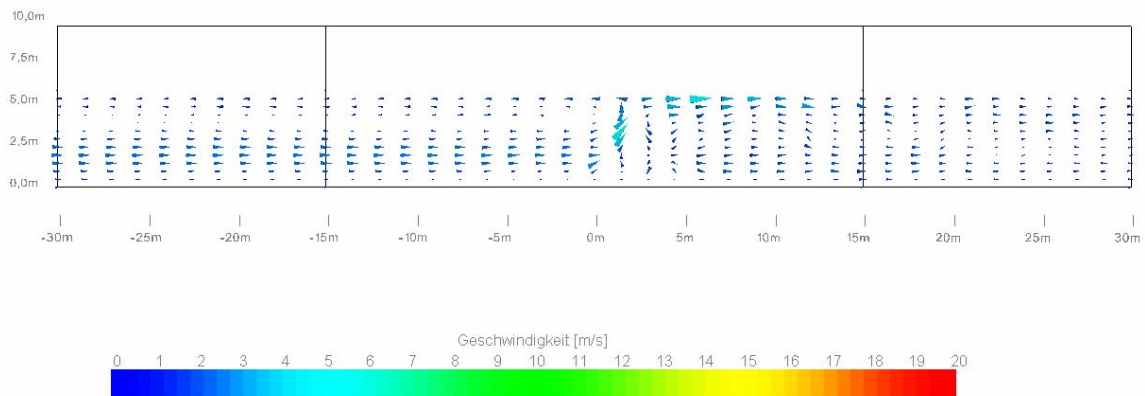
Mayer, 2003-2006

Abbildung 2-15: Geschwindigkeitsverteilung längs, $u = 0,0$ m/s, $t = 360$ sec, $h_{rr} = 5$ MW



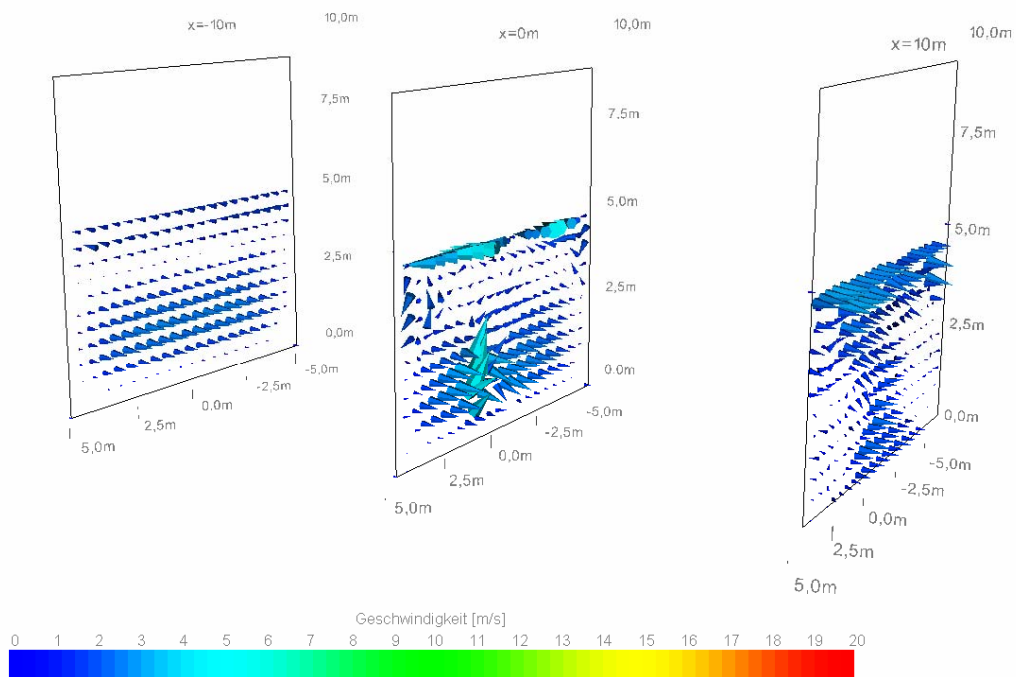
Mayer, 2003-2006

Abbildung 2-16: Geschwindigkeitsverteilung quer, $u = 0,0$ m/s, $t = 360$ sec, $h_{rr} = 5$ MW



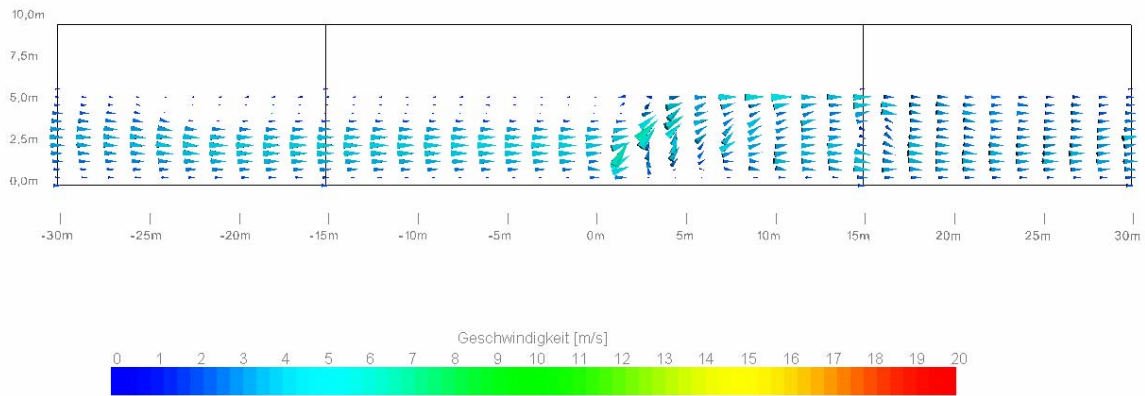
Mayer, 2003-2006

Abbildung 2-17: Geschwindigkeitsverteilung längs, $u = 1,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5 \text{ MW}$



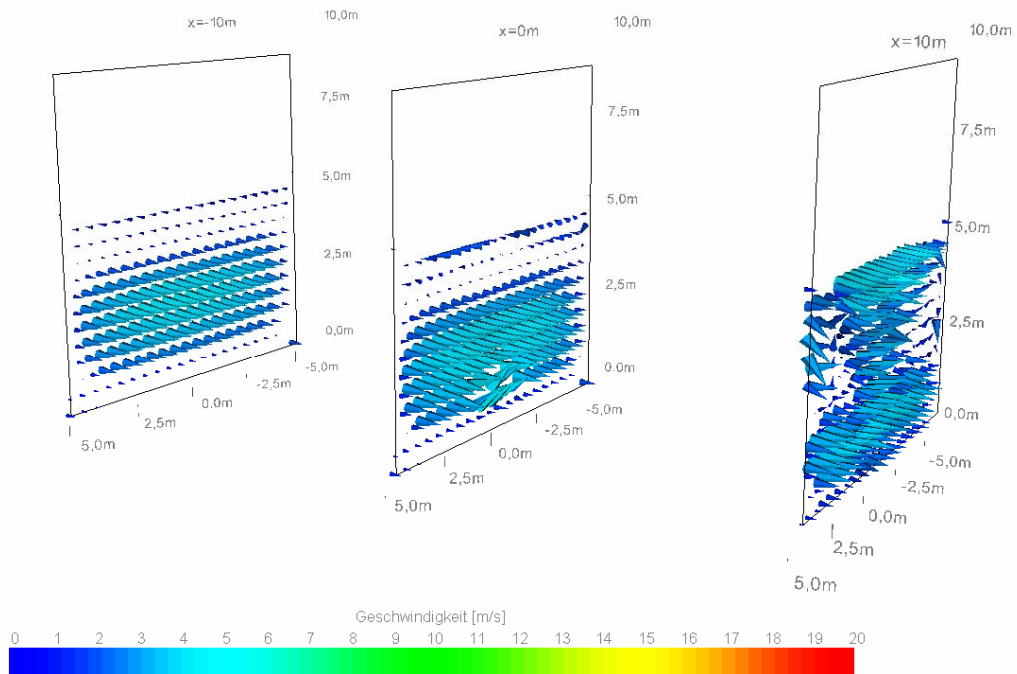
Mayer, 2003-2006

Abbildung 2-18: Geschwindigkeitsverteilung quer, $u = 1,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5 \text{ MW}$



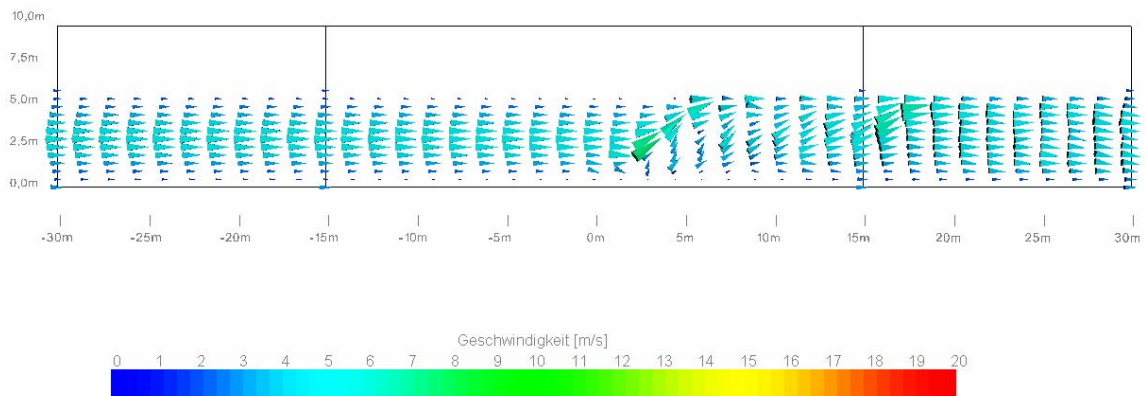
Mayer, 2003-2006

Abbildung 2-19: Geschwindigkeitsverteilung längs, $u = 2,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5 \text{ MW}$



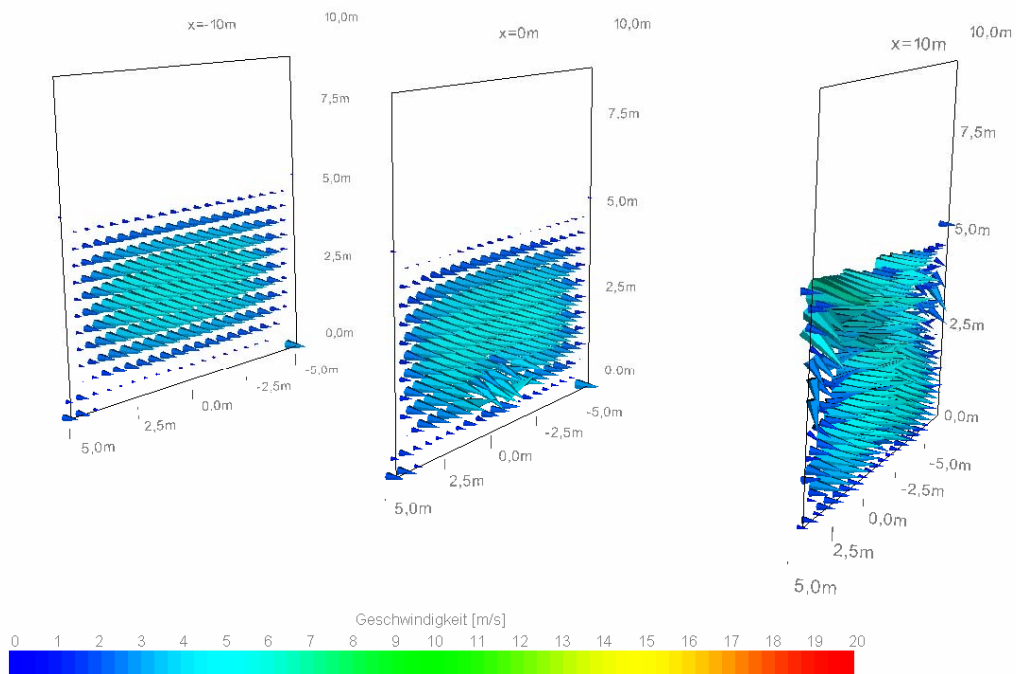
Mayer, 2003-2006

Abbildung 2-20: Geschwindigkeitsverteilung quer, $u = 2,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5 \text{ MW}$



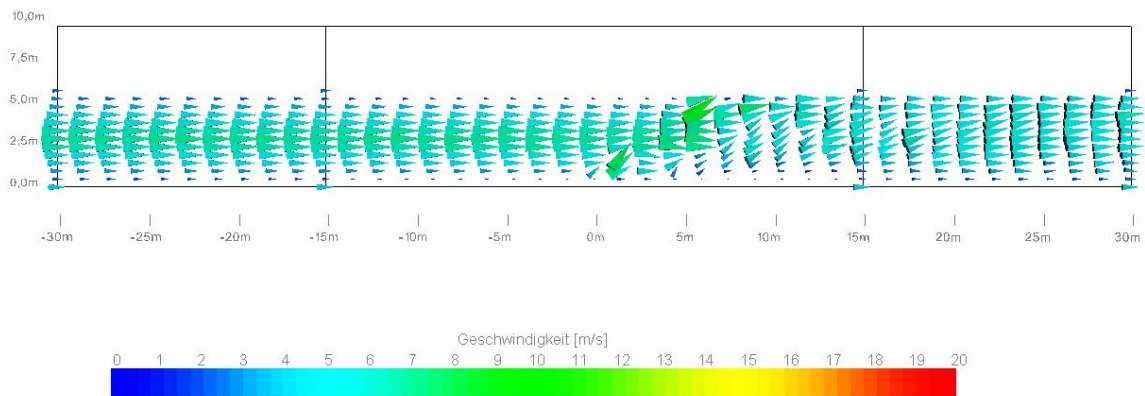
Mayer, 2003-2006

Abbildung 2-21: Geschwindigkeitsverteilung längs, $u = 3,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5 \text{ MW}$



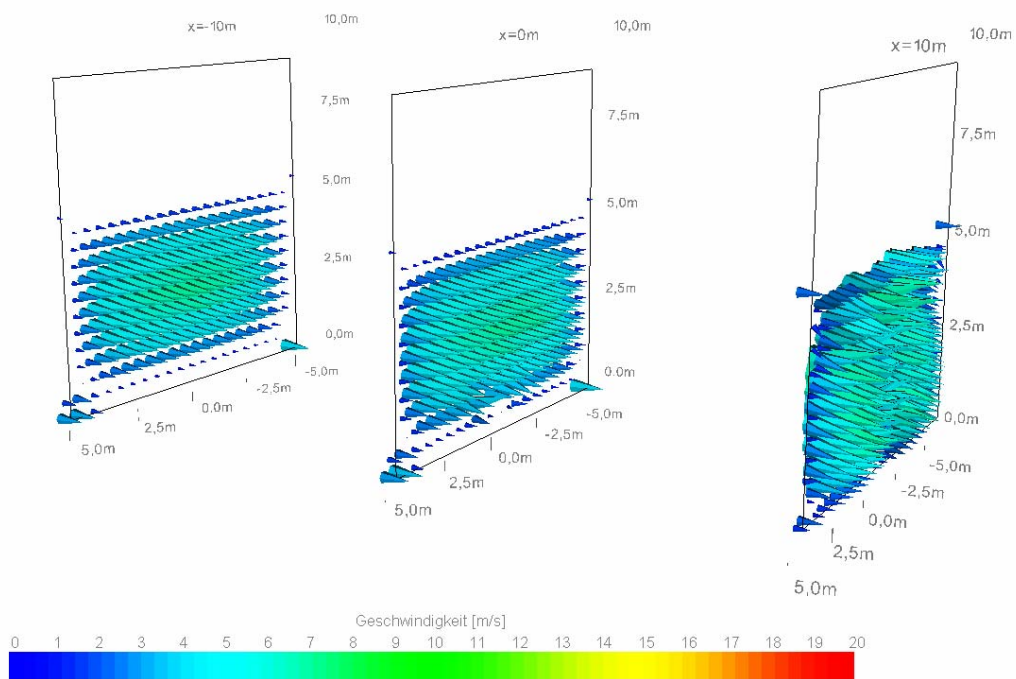
Mayer, 2003-2006

Abbildung 2-22: Geschwindigkeitsverteilung quer, $u = 3,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5 \text{ MW}$



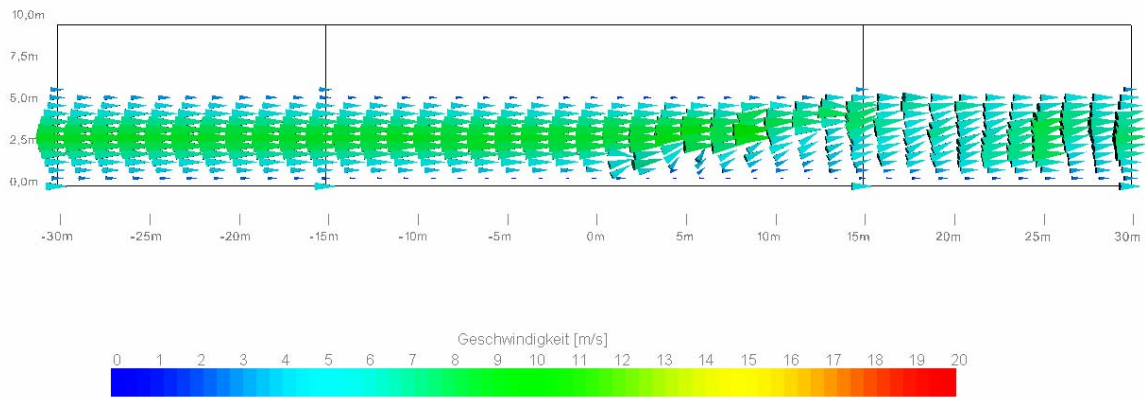
Mayer, 2003-2006

Abbildung 2-23: Geschwindigkeitsverteilung längs, $u = 4,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5\text{MW}$



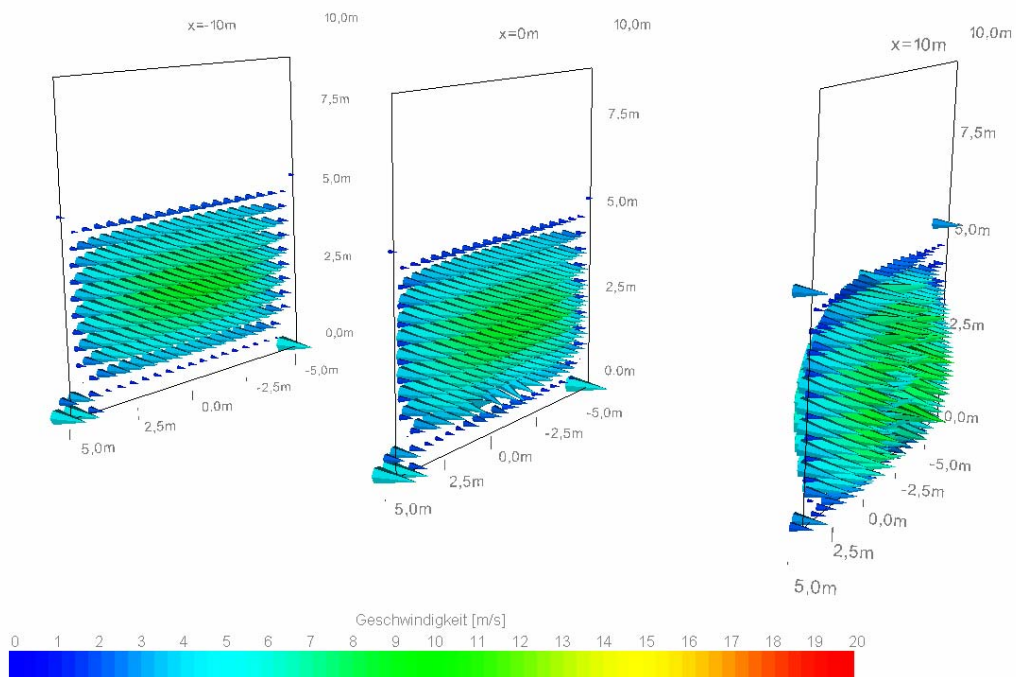
Mayer, 2003-2006

Abbildung 2-24: Geschwindigkeitsverteilung quer, $u = 4,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $hrr = 5\text{MW}$



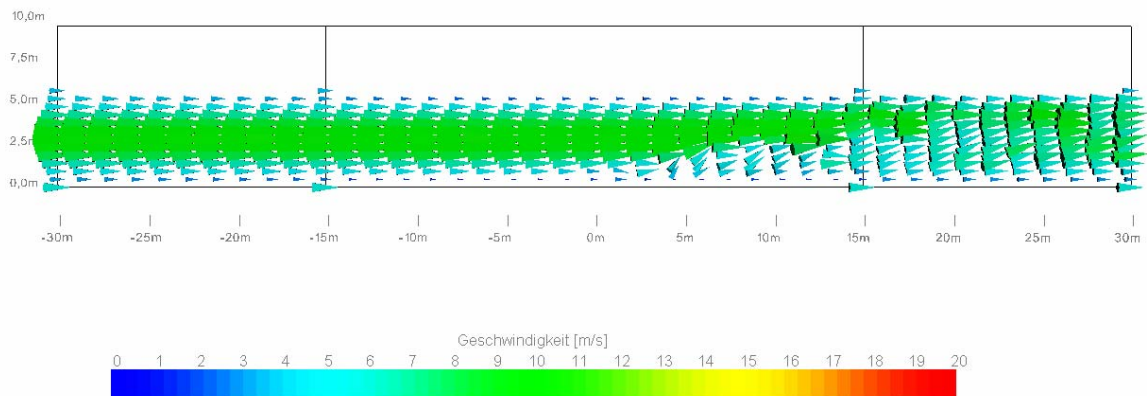
Mayer, 2003-2006

Abbildung 2-25: Geschwindigkeitsverteilung längs, $u = 5,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5\text{MW}$



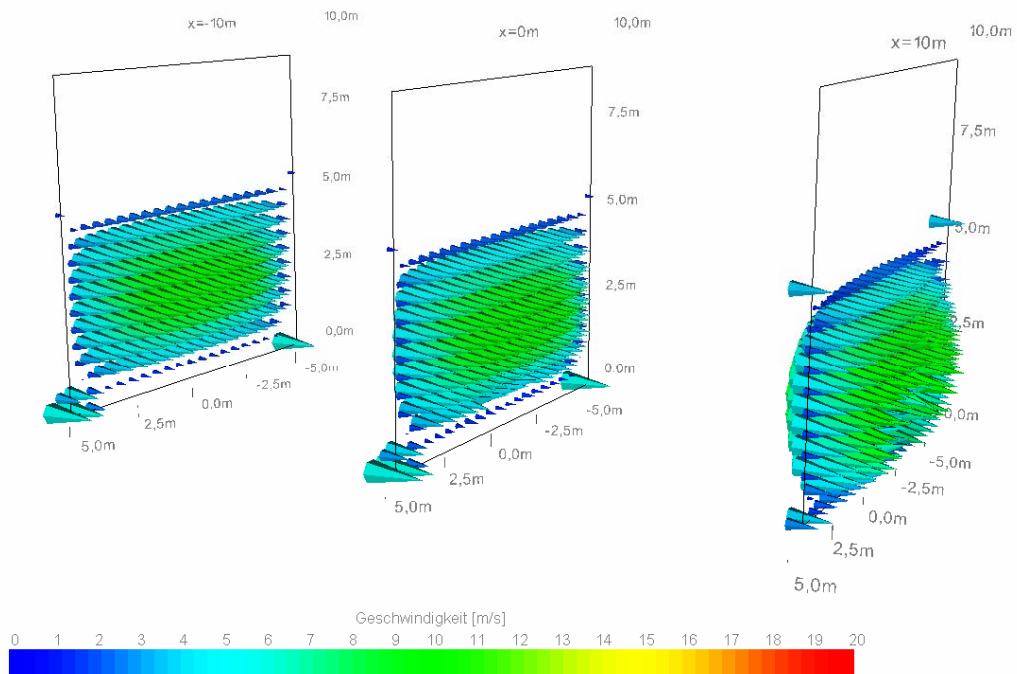
Mayer, 2003-2006

Abbildung 2-26: Geschwindigkeitsverteilung quer, $u = 5,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5\text{MW}$



Mayer, 2003-2006

Abbildung 2-27: Geschwindigkeitsverteilung längs, $u = 6,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5 \text{ MW}$



Mayer, 2003-2006

Abbildung 2-28: Geschwindigkeitsverteilung quer, $u = 6,0 \text{ m/s}$, $t = 360 \text{ sec}$, $h_{rr} = 5 \text{ MW}$

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

1993

- B 1: Realkalisierung karbonatisierter Betonrandzonen
Budnik, Laakkonen, Maaß, Großmann vergriffen
- B 2: Untersuchungen an Fertigteilbrücken BT 70/BT 700
Haser kostenlos
- B 3: Temperaturunterschiede an Betonbrücken
Knabenschuh vergriffen
- B 4: Merkblatt zur Entnahme repräsentativer Strahlschuttproben
MES-93 € 9,00

1994

- B 5: Spezielle Probleme bei Brückenbauwerken in den neuen
Bundesländern
von H. Hase, R. Kaschner
Teil 1: Nachrechnung von Gewölbebrücken
Teil 2: Schubsicherung bei Fertigteilträgern BT 70 und BT 50
Haser, Kaschner € 11,50

1995

- B 6: Zur Berechnung von Platten mit schwacher Querbewehrung
Kaschner € 11,50
- B 7: Erprobung von dichten lärmindernden Fahrbelägen für
Brücken
Sczyslo € 12,50
- B 8: Untersuchungen am Brückenbelag einer orthotropen Fahrbelag-
platte
Krieger, Rat € 17,50
- B 9: Anwendung von zerstörungsfreier Prüfmethode bei Beton-
brücken
Krieger € 13,00
- B 10: Langzeituntersuchungen von Hydrophobierungsmitteln
Maaß, Krieger € 12,50

1996

- B 11: Fahrbeläge auf Sohlen von Trogbauwerken
Wruck € 12,00
- B 12: Temperaturmessungen bei der Verbreiterung der Rodenkir-
chener Brücke
Goebel € 15,50
- B 13: Strukturanalyse von Beton
Gatz, Gusia € 11,00

1997

- B 14: Verhalten von Fahrbelägen aus Asphalt infolge Ho-
rizontallasten
Krieger, Rath € 16,00
- B 15: Temperaturbeanspruchung im Beton und Betonersatz beim
Einbau von Abdichtungen
Großmann, Budnik, Maaß € 14,50
- B 16: Seilverfüllmittel – Mechanische Randbedingungen für Brük-
kenseile
Eilers, Hemmert-Halswick € 27,50
- B 17: Bohrverfahren zur Bestimmung der Karbonisierungstiefe
und des Chloridgehaltes von Beton
Gatz, Gusia, Kuhl € 14,00

1998

- B 18: Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethode
für Betonbrücken
Krieger € 16,50
- B 19: Untersuchung von unbelasteten und künstlich belasteten Be-
schichtungen
Schröder € 11,00
- B 20: Reaktionsharzgebundene Dünnbeläge auf Stahl
Eilers, Ritter € 12,50
- B 21: Windlasten für Brücken nach ENV 1991-3
Krieger € 10,50

1999

- B 22: Algorithmen zur Zustandsbewertung von Inge-
nieurbauwerken
Haardt € 11,50
- B 23: Bewertung und Oberflächenvorbereitung schwieriger Un-
tergründe
Schröder, Sczyslo € 11,00
- B 24: Erarbeitung einer ZTV für reaktionsharzgebundene Dünn-
beläge auf Stahl
Eilers, Stoll € 11,00
- B 25: Konzeption eines Managementsystems zur Erhaltung von
Brücken- und Ingenieurbauwerken
Haardt € 12,50
- B 26: Einsatzmöglichkeiten von Kletterrobotern bei der Bauwerks-
prüfung
Krieger, Rath, Berthold € 10,50
- B 27: Dynamische Untersuchungen an reaktionsharzgebundenen
Dünnbelägen
Eilers, Ritter, Stoll € 11,00

2000

- B 28: Erfassung und Bewertung von reaktionsharzgebundenen
Dünnbelägen auf Stahl
Eilers € 11,00
- B 29: Ergänzende Untersuchungen zur Bestimmung der Karbo-
natisierungstiefe und des Chloridgehaltes von Beton
Gatz, Quaas € 12,00
- B 30: Materialkonzepte, Herstellungs- und Prüfverfahren für elutions-
arme Spritzbetone
Heimbecher € 11,00
- B 31: Verträglichkeit von reaktionsharzgebundenen Dünnbelägen
mit Abdichtungssystemen nach den ZTV-BEL-ST
Eilers, Stoll € 10,50
- B 32: Das Programm ISOCORRAG: Ermittlung von Korrosivitäts-
kategorien aus Massenverlusten
Schröder € 11,50
- B 33: Bewehrung von Belägen auf Stahlbrücken mit orthotropen
Fahrbelagplatten
Eilers, Sczyslo € 17,00
- B 34: Neue reaktionsharzgebundene Dünnbeläge als Fahrbelag-
beläge auf einem D-Brücken-Gerät
Eilers, Ritter € 13,00

2002

- B 35: Bewehrung von Brückenbelägen auf Betonbauwerken
Wruck € 11,50
- B 36: Fahrbeläge aus Asphalt
Wruck € 11,00
- B 37: Messung der Hydrophobierungsqualität
Hörner, von Witzhausen, Gatz € 11,00
- B 38: Materialtechnische Untersuchungen beim Abbruch der Tal-
brücke Haiger
Krause, Wiggenhauser, Krieger € 17,00

B 39: Bewegungen von Randfugen auf Brücken
Eilers, Wruck, Quaas € 13,00

2003

B 40: Schutzmaßnahmen gegen Graffiti
von Weschpfennig € 11,50

B 41: Temperaturmessung an der Unterseite orthotroper Fahr-
tafeln beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht
Eilers, Küchler, Quaas € 12,50

B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau
Von A. Städing, T. Krockner € 12,00

B 43: Entwicklung eines Bauwerks Management-Systems für das
deutsche Fernstraßennetz – Stufen 1 und 2
Haardt € 13,50

B 44: Untersuchungen an Fahrbahnübergängen zur Lärminderung
Hemmer-Halswick, Ullrich € 12,50

B 45: Stahlbrücken – Schäden – wetterfeste Stähle Seile
Teil 1: Dokumentation über Schäden an Stahlbrücken
Teil 2: Dokumentation und Erfahrungssammlung mit Brücken aus
wetterfesten Stählen
Teil 3: Erfahrungssammlung über die Dauerhaftigkeit von Brücken-
seilen und -kabeln
Hemmer-Halswick € 13,00

2004

B 46: Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen im
Tunnelbau
Heimbecher, Decker, Faust € 12,50

2005

B 47: Gussasphaltbeläge auf Stahlbrücken
Steinauer, Scharnigg € 13,50

2006

B 48: Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung von
Brückenbauwerken
Holst, Streicher, Gardei, Kohl, Wöstmann,
Wiggenhauser € 15,00

B 49: Einfluss der Betonoberflächenvorbereitung auf die Haf-
tung von Epoxidharz
Raupach, Rößler € 13,50

B 50: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für
das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3
Holst € 13,50

B 51: Hydrophobierungsqualität von flüssigen und pastösen
Hydrophobierungsmitteln
Panzer, Hörner, Kropf € 12,50

B 52: Brückenseile mit Galfan-Überszug – Untersuchung der
Haftfestigkeit von Grundbeschichtungen
Friedrich, Staack in Vorbereitung

B 53: Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SVB) im
Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 14,50

B 54: Nachweis des Erfolges von Injektionsmaßnahmen zur
Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen
Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kosten-
pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Rath, Berthold, Lähner € 12,50

2007

B 55: Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination
mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von
Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau
Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kosten-
pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Krause, Rath, Sawade, Dumat € 14,50

B 56: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der
Expositionsklasse XF2

Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kosten-
pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Setzer, Keck, Palecki, Schießl, Brandes € 19,50

B 57: Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung
der Durchführung und Auswertung

Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kosten-
pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Steinauer, Mayer, Kündig € 26,50

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.