

Untersuchungen zur Wasserstoffrekombination unter Naturkonvektionsbedingungen

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von:

Berno Simon

Berichter: Universitätsprofessor Dr. rer. nat. Hans-Josef Allelein
 Universitätsprofessor Dr.-Ing. Dirk Müller

Tag der mündlichen Prüfung: 04. September 2015

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Untersuchungen zur Wasserstoffrekombination unter Naturkonvektionsbedingungen

von **Berno Simon**

Kurzfassung

Katalytische Rekombinatoren werden in den Sicherheitsbehältern von Kernkraftwerken eingesetzt, um bei Störfällen mit Freisetzung von Wasserstoff die Bildung zündfähiger Gemische nach Möglichkeit zu verhindern und die Auswirkungen von Wasserstoffverbrennungen zu minimieren. Zur Simulation des Betriebsverhaltens von Rekombinatoren wird am Forschungszentrum Jülich in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik der RWTH Aachen das Rechenprogramm REKO-DIREKT entwickelt, für dessen Validierung u.a. experimentelle Daten aus Jülicher Versuchsanlagen verwendet werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden experimentelle Untersuchungen unter Naturkonvektionsbedingungen im Versuchsstand REKO-4 durchgeführt, um den Kaminzug durch das Rekombinatorgehäuse genauer zu analysieren und darauf aufbauend das Kaminmodell von REKO-DIREKT zu optimieren. Der Versuchsstand verfügt dabei über zahlreiche Messstellen und -sensoren (u.a. Katharometer zur in-situ Wasserstoffkonzentrationsmessung und die optische Strömungsmesstechnik Particle-Image-Velocimetry), die im Zuge von Vorversuchen zunächst qualifiziert und auf ihre Messgenauigkeit untersucht werden. Im anschließenden Versuchsprogramm wird ein kleinskaliger, modular aufgebauter, typischer Rekombinator verwendet, der mit unterschiedlichen Kaminhöhen ausgerüstet werden kann. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen ergeben eine Datenbasis, die vor allem die zentrale Korrelation zwischen der H_2 -Einlasskonzentration, der Katalysatorblechtemperatur und der Einlassgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der jeweiligen Kaminhöhe des Rekombinators bei unterschiedlichen Drücken liefert. Nach Optimierung des Kaminmodells folgt eine Validierung des Simulationsprogramms anhand von Versuchsergebnissen aus der großskaligen THAI-Versuchsanlage in Eschborn, die im Anschluss an diese Arbeit mit Versuchsdaten aus dem OECD/NEA-THAI Projekt (THAI-Anlage) durchgeführt worden ist.

Abschließend wird der Einfluss einer abwärts gerichteten, wandnahen Strömung auf das Betriebsverhalten des kleinskaligen Rekombinatormodells untersucht. Hierbei wird überprüft, ob sich von außen aufgeprägte Strömungen auf den Naturzug durch das Rekombinatorgehäuse und somit das Start- und Betriebsverhalten von Rekombinatoren auswirken. Die Ergebnisse zeigen, dass in einem entsprechenden Störfallszenario für Rekombinatorvarianten, bei denen eine entgegengesetzte Durchströmung nicht durch konstruktive Maßnahmen verhindert wird, das Betriebsverhalten beeinflusst und die Effizienz verringert werden kann.

Investigation of hydrogen recombination under natural convection conditions

by **Berno Simon**

Abstract

Passive Autocatalytic Recombiners (PAR) are installed inside the containment of nuclear power plants in order to prevent the build-up of flammable mixtures and to mitigate the effects of hydrogen deflagrations, which can occur in the event of a severe accident combined with the release of hydrogen. In order to simulate the operating behaviour of PARs, the computer program REKO-DIREKT is being developed at the Forschungszentrum Jülich in collaboration with the Institute for Reactor Safety and Reactor Technology at the RWTH Aachen. For the validation of the code, data from experimental facilities operated at Jülich are used.

This work focusses on the analysis of the chimney effect through the PAR housing as well as the optimization of the chimney model of REKO-DIREKT. Therefore experimental investigations are carried out in the REKO-4 facility under natural convection conditions. This facility is equipped with numerous measuring devices, e.g. katharometers for in-situ measuring of the hydrogen concentration and the optical flow measurement technique Particle-Image-Velocimetry. In preliminary assessments the equipment is being qualified in order to determine the measurement accuracy. In the following experimental investigations, a small-scale PAR is used, that is built in a modular way allowing it to be equipped with different chimney geometries. The experimental results produce a database that shows the central correlation between the hydrogen concentration, the catalyst temperature and the inlet velocity. The results include the variation of the recombiner's chimney height and experiments at different operating pressures. After optimization of the chimney model, the simulation program is validated against experiments in the large-scale facility THAI in Eschborn, which have been performed subsequent to this thesis in the context of the OECD/NEA-THAI project.

Finally, the influence of a downward-directed, near-wall flow on the operational behaviour of the small-scale PAR is investigated. The goal is to analyse, whether or not externally induced flow regimes are able to influence the start-up and operational behaviour of PARs. The results show that downward directed flow conditions may influence the operational behaviour and reduce the efficiency of a recombiner, if the flow through the chimney is not prevented by the outlet design.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI
Nomenklatur	XIII
1 Einleitung	1
2 Hintergrund	4
2.1 Katalytische Rekombinatoren in Kernkraftwerken	5
2.1.1 REKO-Versuchsanlagen im FZ Jülich	8
2.1.2 THAI-Versuchsanlage in Eschborn	10
2.2 Simulation des Betriebsverhaltens katalytischer Rekombinatoren	11
2.2.1 Programmcode REKO-DIREKT	12
2.2.2 Kaminmodell von REKO-DIREKT	13
2.2.3 Abwärtsgerichtete Strömungen im Sicherheitsbehälter	18
3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4	21
3.1 Aufbau des Druckbehälters REKO-4	21
3.2 Konventionelle Messtechnik	25
3.2.1 Temperaturmessung	25
3.2.2 Druckmessung	27
3.2.3 Feuchtemessung	27
3.3 Sensoren zur Wasserstoffkonzentrationsmessung	29
3.3.1 Prinzip von Wärmeleitfähigkeitssensoren	29
3.3.2 Katharometer <i>XEN-TCG3880 + Pt100</i>	31
3.4 Particle Image Velocimetry (PIV) zur Geschwindigkeitsfeldmessung	35
3.4.1 Messprinzip	35
3.5 Instrumentierung des Versuchsbehälters	38
3.5.1 Positionierung konventioneller Messtechnik im Behälter	39
3.5.2 Positionierung der Katharometer im Behälter	41
3.5.3 Anordnung der PIV-Komponenten	44
3.6 Einbau des katalytischen Rekombinators	46
3.7 Diskussion der Messgenauigkeit	52
3.7.1 Fehlerbetrachtung Thermoelemente	53
3.7.2 Fehlerbetrachtung der kapazitiven Feuchtesensoren	58
3.7.3 Fehlerbetrachtung Manometer	59
3.7.4 Fehlerbetrachtung der Katharometer	60
3.7.5 Fehlerbetrachtung PIV	65
3.7.6 Kombinierte Standardunsicherheit	75

Inhaltsverzeichnis

4	Versuchsbeschreibung	77
4.1	Versuchsdurchführung und PIV-Messung	79
4.1.1	Auswertung eines diskontinuierlichen PIV-Messpunktes	81
4.1.2	Auswertung einer kontinuierlichen PIV-Messung	87
4.2	Vorversuche	89
4.2.1	Theoretische Betrachtung der Einspeisung	89
4.2.2	Einspeisung von Luft	92
4.2.3	Einspeisung von Wasserstoff	93
4.2.4	Wasserstoffverteilung im Behälter	94
4.3	Versuchsverlauf am Beispiel R4-M-06	101
4.3.1	Randbedingungen von R4-M-06	103
4.3.2	Betriebsverhalten des Rekombinators	104
4.3.3	Untersuchung der Behälteratmosphäre und -wand	110
4.3.4	Bilanzierung des Versuchs R4-M-06	115
5	Versuchsergebnisse	119
5.1	Untersuchungen zur Kaminhöhenvariation	119
5.1.1	R4-H: Kaminhöhe 0 mm, 1,0 bar	119
5.1.2	R4-G: Kaminhöhe 150 mm, 1,0 bar	122
5.1.3	R4-J: Kaminhöhe 300 mm, 1,0 bar	125
5.1.4	R4-L: Kaminhöhe 450 mm, 1,0 bar	127
5.1.5	R4-M: Kaminhöhe 850 mm, 1,0 bar	130
5.1.6	Vergleich der Kaminvariation	135
5.2	Betriebsverhalten bei unterschiedlichen Drücken	140
5.2.1	R4-J: Kaminhöhe 300 mm, 1,5 bar	141
5.2.2	R4-J: Kaminhöhe 300 mm, 2,0 bar	143
5.2.3	R4-M: Kaminhöhe 850 mm, 1,5 bar	145
5.2.4	R4-M: Kaminhöhe 850 mm, 2,0 bar	145
5.2.5	Vergleich der Versuche bei unterschiedlichen Drücken	148
5.3	Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen früherer Arbeiten	153
5.4	Untersuchung der Auslassströmung (R4-O)	155
5.5	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	162
6	Kaminmodelloptimierung für REKO-DIREKT	164
6.1	Optimiertes Kaminmodell für REKO-DIREKT	164
6.1.1	Bestimmung des Reibungskoeffizienten am Einlass	166
6.1.2	Bestimmung des Reibungskoeffizienten im Kamin	170
6.1.3	Bestimmung des Reibungskoeffizienten am Auslass	170
6.2	Validierung des neuen Kaminmodells anhand der Datenbasis REKO-4	172
6.2.1	Kaminmodellvalidierung für 1,0 bar	172
6.2.2	Optimiertes Kaminmodell für R4-G (1 bar)	173
6.2.3	Vergleich bei 1,5 bar und 2,0 bar	174
6.3	Berechnung eines Versuchspunktes der THAI-Versuchsanlage	174
6.3.1	Vergleich der Rekombinatorvarianten (THAI und REKO-4)	178

Inhaltsverzeichnis

6.3.2	Berechnung des THAI-Rekombinators mit neuem Kaminmodell . . .	179
6.4	Nachrechnung von OECD/NEA-THAI-Experimenten	181
7	Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung	186
7.1	Aufbau, Instrumentierung und Durchführung der Versuche	186
7.1.1	Realisierung einer abwärts gerichteten Strömung	186
7.1.2	Aufbau und Instrumentierung des Rekombinators	188
7.1.3	Durchführung der Versuche mit Gegenströmung	188
7.2	Versuchsergebnisse zum Betriebs- und Startverhalten	191
7.2.1	Rekombinatorvariante mit 850-mm-Kamin und Hutze	191
7.2.2	Rekombinatorvariante mit 300-mm-Kamin und Hutze	196
7.2.3	Rekombinatorvariante mit 300-mm-Kamin ohne Hutze	201
7.3	Zusammenfassung der Ergebnisse unter Einfluss einer Gegenströmung . .	211
8	Zusammenfassung und Ausblick	213
9	Literaturverzeichnis	216
10	Anhang und Tabellen	224
10.1	Kalibrierung der Wärmeleitfähigkeitssensoren	224
10.2	Kalibrierung der Pt-100-Elemente	226
10.3	Quereinflüsse von Temperatur und Feuchtigkeit	228
10.4	Positionierung der Thermoelemente (Behälter)	236
10.5	Positionierung der Thermoelemente (Katalysatorbleche)	237
10.6	Positionierung der Thermoelemente (Rekombinator)	238
10.7	Positionierung und Peripherie der Katharometer	239
	Danksagung	240

Abbildungsverzeichnis

2.1	Prinzip eines katalytischen Rekombinators im AREVA-Design (vgl. [HKSZ95])	5
2.2	Rekombinator im AREVA-Design im Kernkraftwerk Emsland [KSD ⁺ 09] .	7
2.3	Foto REKO-1 zur Sensorqualifizierung (vgl. [Jan10])	9
2.4	Versuchsstand REKO-3 als 3D-Skizze [ASS ⁺ 10]	10
2.5	THAI-Versuchsanlage in Eschborn [KAF ⁺ 07]	11
2.6	Modell eines katalytischen Rekombinators für REKO-DIREKT	13
2.7	Modell und angreifende Kräfte zur Anwendung des Impulssatzes für eine reibungsfreie Strömung (vgl. [ASS ⁺ 10])	14
2.8	Berechnung eines Strömungsverlaufes mit GASFLOW im Sicherheitsbehälter [RRB ⁺ 00]	19
2.9	Schematische Darstellung des Einflusses einer Gegenströmung auf die Wirkungsweise eines Rekombinators	19
3.1	Konstruktionszeichnung des Druckbehälters von REKO-4	22
3.2	Fotos des Versuchsbehälters REKO-4	22
3.3	Verwendete Thermoelemente im Versuchsstand REKO-4 [Sim09]	26
3.4	Feuchtfühler (testo 6614) mit zwei Sensoren und Messumformer (testo 6681)	28
3.5	Beschreibung des Katharometers <i>XEN-TCG3880 + Pt100</i> der Firma <i>Sensor Integration bv</i>	32
3.6	Von links nach rechts: Sensor auf Sockel, Sensor mit Sintermetallkappe, Sensor mit Sintermetallkappe und Schrumpfschlauch zur Befestigung [Ste11]	33
3.7	Verarbeitung des Sensorsignals eines Katharometers mit Temperaturkorrektur	34
3.8	Verstärkerschaltungen der Katharometer zur Wasserstoffkonzentrationsmessung	34
3.9	Schematische Darstellung des optischen Strömungsmessprinzips PIV (vgl. [Kap07])	35
3.10	Vorder- und Rückseite des PIV-Umlenkspiegels	38
3.11	Übersicht über die Messstellen der TE-Sensoren im Behälter	40
3.12	Positionierung der Katharometer während der Vorversuche	42
3.13	Positionierung der Katharometer während der Versuche R4-G, R4-H und R4-J	43
3.14	Positionierung der Katharometer während der Versuche R4-L, R4-M, R4-N, R4-O	44

Abbildungsverzeichnis

3.15	Optischer, druck- und explosionsdichter Zugang zum Versuchsbehälter für PIV	44
3.16	Anordnung des PIV-Systems an REKO-4 zur Messung der Einlassgeschwindigkeit von der Rückseite	45
3.17	Verschiedene Anordnungen der PIV-Komponenten am Versuchsbehälter REKO-4	46
3.18	Überführung eines Rekombinators im AREVA-Design in ein kleinskaliges Modell für REKO-4	47
3.19	Modellierung eines Ausschnitts des Katalysatoreinschubs [Sim09]	48
3.20	Rekombinator mit unterschiedlichen Kaminhöhen	48
3.21	Bestückung der Katalysatorbleche mit Thermoelementen	50
3.22	TE-Positionierung am Kamin zur Messung der Wandtemperatur außen und Gastemperatur innen	51
3.23	Messung der Wasserstoffkonzentration am Einlass und Auslass des Rekombinators	52
3.24	Schematische Darstellung der Thermoelementanschlüsse an die Anlagensteuerung	54
3.25	Einfluss von Wärmestrahlung auf das Thermoelement TR-4-72 RG	56
3.26	Einfluss des Druckes auf die Messung mit Katharometern	61
3.27	Überprüfung der Katharometerkalibrierung nach ca. 20 Monaten Betriebszeit	63
3.28	Überprüfung der Temperaturmessgenauigkeit von Katharometern (Pt-100) und Thermoelementen	63
3.29	Unterteilung der Fehlerbetrachtung von PIV in vier Teilbereiche	66
3.30	Größenverteilung der DEHS-Partikel gemessen mit APS und SMPS	67
3.31	Einfluss einer Winkelabweichung der PIV-Komponenten auf die gemessene Partikelgeschwindigkeit	69
3.32	Einfluss einer Winkelabweichung zwischen PIV-Messebene und gewünschter Messebene	70
4.1	Korrelation der Betriebsparameter	77
4.2	Auswertung des Vektorfelds am Einlass des Rekombinators	82
4.3	Vertikale Geschwindigkeitskomponente der Einlassströmung	83
4.4	1D-Volumenstrom durch den Einlass des Rekombinators bei 4 Vol.-% H ₂	84
4.5	2D-Volumenstrom durch den Einlass des Rekombinators bei 4 Vol.-% H ₂	84
4.6	Vergleich des Geschwindigkeitsprofils mit und ohne Randeffect	86
4.7	Korrekturfaktor η_{korr} in Abhängigkeit von der H ₂ -Konzentration	86
4.8	Korrekturfaktor η_{vert} in Abhängigkeit von der H ₂ -Konzentration	88
4.9	Absolute und vertikale Geschwindigkeit am Rekombinatoreinlass (Startverhalten R4-L-03)	89
4.10	Einspeisung in den Versuchsbehälter	90

Abbildungsverzeichnis

4.11 Unterscheidung von impuls-/auftriebsdominierten Strömungsgebieten in Abhängigkeit von d_{ein} und Fr_ρ [HS08]	91
4.12 PIV-Vermessung der Gaseinspeisung für Luft und Wasserstoff	92
4.13 Geschwindigkeitsfeld am Lufteinlass bei 4 bar Einlassdruck [Kla11]	93
4.14 Messung der Geschwindigkeitsfelds am Wasserstoffeinlass bei zwei unterschiedlichen Volumenströmen	94
4.15 Verlauf der H_2 -Konzentration über die Behälterhöhe (R4-F-05)	95
4.16 Verlauf der H_2 -Konzentration während der Einspeisung im oberen /mittleren / unteren Behälterbereich	97
4.17 Temperaturverlauf von Atmosphäre und Wand im oberen Behälterbereich während der Vorversuche (Thermoelement/Pt-1000-Sensor)	99
4.18 Einteilung des Versuchsbehälters in Schichten	100
4.19 Vergleich der eingespeisten und anhand der Sensoren gemessenen H_2 -Menge im Versuchsbehälter (~ 15 min)	102
4.20 Vergleich der eingespeisten und anhand der Sensoren gemessenen H_2 -Menge im Versuchsbehälter (~ 2 h)	102
4.21 Einspeisung von Wasserstoff und Druckverlauf während des Versuchs R4-M-06	103
4.22 Verlauf der H_2 -Konzentration und Temperatur am Rekombinatoreinlass und -auslass	104
4.23 Temperaturprofil auf Katalysatorblech 1	106
4.24 Temperaturprofil auf Katalysatorblech 2	106
4.25 Vergleich des Temperaturprofils zwischen Blech 1 und Blech 2 (rot: Unterkante, blau: Oberkante)	106
4.26 Ausbildung des Temperaturprofils auf Katalysatorblech 1 während der Startphase	107
4.27 Einlassgeschwindigkeit und -konzentration (R4-M-06)	108
4.28 Äußere Gehäusetemperaturen des Rekombinators (R4-M-06)	109
4.29 Erklärung einer quasistationären PIV-Messung (R4-M-06)	110
4.30 Verlauf der H_2 -Konzentration (oberer und mittlerer Behälterbereich)	111
4.31 Verlauf der Gastemperaturen (oberer und mittlerer Behälterbereich)	111
4.32 Verlauf der Wandtemperaturen (oberer und mittlerer Behälterbereich)	112
4.33 Verlauf der H_2 -Konzentration im unteren Behälterbereich	113
4.34 Feuchtemesstechnik im oberen und unteren Behälterbereich	114
4.35 Einteilung des Versuchsbehälters in Schichten (R4-M-06)	115
4.36 H_2 -Bilanz während des Versuchs R4-M-06	118
5.1 Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstempertur über der H_2 -Einlasskonzentration (R4-H)	120
5.2 Einlassgeschwindigkeit über der H_2 -Einlasskonzentration (R4-H)	121
5.3 Gehäuse- und Auslasstemperturen über der H_2 -Konzentration (R4-H)	121
5.4 Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstempertur über der H_2 -Einlasskonzentration (R4-G)	122

Abbildungsverzeichnis

5.5	Kamin- und Auslasstemperaturen im Vergleich zur Unterkante des Katalysatorblechs (R4-G)	123
5.6	Kamingehäusetemperaturen im Vergleich zur Oberkante des Katalysatorblechs (R4-G)	124
5.7	Vergleich der inneren Kamin- und äußeren Gehäusetemperaturen (R4-G)	125
5.8	Einlassgeschwindigkeit über der H ₂ -Einlasskonzentration (R4-G)	126
5.9	Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstempertur über der H ₂ -Einlasskonzentration (R4-J)	127
5.10	Kamin- und Auslasstemperaturen im Vergleich zur Oberkante des Katalysatorblechs (R4-J)	128
5.11	Kamingehäusetemperaturen im Vergleich zur Oberkante des Katalysatorblechs (R4-J)	128
5.12	Einlassgeschwindigkeit über der H ₂ -Einlasskonzentration (R4-J)	129
5.13	Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstempertur über der H ₂ -Einlasskonzentration (R4-L)	130
5.14	Kamin- und Auslasstemperaturen im Vergleich zur Oberkante des Katalysatorblechs (R4-L)	131
5.15	Kamingehäusetemperaturen im Vergleich zur Oberkante des Katalysatorblechs (R4-L)	131
5.16	Einlassgeschwindigkeit über der H ₂ -Einlasskonzentration (R4-L)	132
5.17	Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstempertur über der H ₂ -Einlasskonzentration (R4-M)	133
5.18	Kamin- und Auslasstemperaturen im Vergleich zur Oberkante des Katalysatorblechs (R4-M)	134
5.19	Kamingehäusetemperaturen im Vergleich zur Oberkante des Katalysatorblechs (R4-M)	134
5.20	Vergleich der inneren Kamin- und äußeren Gehäusetemperaturen (R4-M)	135
5.21	Einlassgeschwindigkeit über der H ₂ -Einlasskonzentration (R4-M)	136
5.22	Vergleich der maximalen Katalysatorblechtemperaturen in Abhängigkeit von der H ₂ -Konzentration	137
5.23	Vergleich der minimalen Katalysatorblechtemperaturen in Abhängigkeit von der H ₂ -Konzentration	137
5.24	Auslasstempertur (TR-70-RG) über der H ₂ -Einlasskonzentration	138
5.25	Einlassgeschwindigkeit \bar{v}_{10mm} über der H ₂ -Einlasskonzentration	139
5.26	Einfluss der Kaminhöhe auf die Geschwindigkeitssteigerung am Einlass	140
5.27	Einlassgeschwindigkeit \bar{v}_{10mm} über der maximalen Katalysatorblechtempertur	141
5.28	Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstempertur über der H ₂ -Einlasskonzentration bei 1,5 bar	142
5.29	Kamin- und Auslasstemperaturen über der H ₂ -Einlasskonzentration bei 1,5 bar	142
5.30	Einlassgeschwindigkeit über der H ₂ -Einlasskonzentration bei 1,5 bar	143

Abbildungsverzeichnis

5.31	Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstempertur über der H ₂ -Einlasskonzentration bei 2,0 bar	144
5.32	Einlassgeschwindigkeit über der H ₂ -Einlasskonzentration bei 2,0 bar . . .	144
5.33	Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstempertur über der H ₂ -Einlasskonzentration bei 1,5 bar	146
5.34	Einlassgeschwindigkeit über der H ₂ -Einlasskonzentration bei 1,5 bar . . .	146
5.35	Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstempertur über der H ₂ -Einlasskonzentration bei 2,0 bar	147
5.36	Einlassgeschwindigkeit über der H ₂ -Einlasskonzentration bei 2,0 bar . . .	147
5.37	Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstempertur über der H ₂ -Einlasskonzentration	148
5.38	Einlassgeschwindigkeit über der H ₂ -Einlasskonzentration bei verschiedenen Drücken (Kaminhöhe 300 mm)	149
5.39	Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstempertur über der H ₂ -Einlasskonzentration	150
5.40	Einlassgeschwindigkeit über der H ₂ -Einlasskonzentration bei verschiedenen Drücken (Kaminhöhe: 850 mm)	151
5.41	Einlassgeschwindigkeit über der maximalen Katalysatorblechtemperatur bei verschiedenen Drücken (Kaminhöhe: 850 mm)	151
5.42	Vergleich der äußeren Gehäusetemperaturen über der Wasserstoffeinlasskonzentration bei verschiedenen Drücken	152
5.43	Vergleich der Daten von REKO-3 und REKO-4 bei unterschiedlichen Eintrittsgeschwindigkeiten (4 % H ₂ stationär)	154
5.44	Vergleich der Daten von REKO-3 und REKO-4 bei unterschiedlichen H ₂ -Eintrittskonzentrationen (ca. 0,25 m/s)	154
5.45	Ausbildung des Temperaturprofils unter Zwangskonvektionsbedingungen (Startverhalten REKO-3)	156
5.46	Ausbildung des Temperaturprofils unter Naturkonvektionsbedingungen (Startverhalten REKO-4)	156
5.47	Einzelne PIV-Aufnahmen der Rekombinatorauslassströmung bei unterschiedlichen H ₂ -Einlasskonzentrationen	158
5.48	Durchschnittliche Absolutgeschwindigkeit am Auslass in Abhängigkeit von der Wasserstoffkonzentration	159
5.49	Vektorbild und farbig codiertes Geschwindigkeitsfeld bei unterschiedlichen H ₂ -Einlasskonzentrationen	160
5.50	Vergleich des Einlass- und Auslassmassenstroms	162
6.1	Größen des optimierten Kaminmodells	165
6.2	Benötigte Größen für das optimierte Kaminmodell (R4-H)	166
6.3	Schematische Darstellung der relevanten geometrischen Einlassgrößen (vgl. [Ide08])	167
6.4	Bestimmung des Reibungsbeiwertes ξ_e aus R4-H	169
6.5	Vergleich zwischen gemessener und berechneter Einlassgeschwindigkeit (R4-G: 150 mm/ -J: 300 mm/ -L: 450 mm/ -M: 850 mm)	172

Abbildungsverzeichnis

6.6	Vergleich zwischen gemessener und berechneter Einlassgeschwindigkeit (R4-G: 150 mm)	173
6.7	Vergleich zwischen gemessener und berechneter Einlassgeschwindigkeit bei 1,5 bar (R4-J: 300 mm/ -M: 850 mm)	175
6.8	Vergleich zwischen gemessener und berechneter Einlassgeschwindigkeit bei 2,0 bar (R4-J: 300 mm/ -M: 850 mm)	175
6.9	Im Rahmen des Versuches HR-2 in der THAI-Anlage verwendeter Rekombinator [Kan09]	176
6.10	Möglicher Einfluss von Wärmestrahlung und -konvektion auf die effektive Kaminhöhe (vgl. [Kan09])	181
6.11	Zeitlicher Verlauf des gemessenen und des mit REKO-DIREKT berechneten Geschwindigkeitsprofil am Rekombinatoreinlass [RKS ⁺ 14]	183
6.12	Vergleich zwischen der gemessenen und der berechneten Strömungsgeschwindigkeit am Rekombinatoreinlass [RKS ⁺ 14]	183
6.13	Vergleich zwischen der gemessenen und der berechneten H ₂ -Konzentration am Rekombinatorauslass [RKS ⁺ 14]	184
6.14	Vergleich zwischen der berechneten und der gemessenen Katalysatortemperatur [RKS ⁺ 14]	184
7.1	Lüfterplatte zur Realisierung einer Abwärtsströmung innerhalb REKO-4 [Häf12]	187
7.2	Vermessung der Gegenströmung mit Axialventilatoren [Häf12]	187
7.3	Übersicht zur Positionierung der Messstellen am Rekombinator für R4-P .	189
7.4	Startverhalten des Rekombinators mit 850-mm-Kamin und Hutze ohne Gegenströmung (R4-P-08 / R4-P-09)	191
7.5	Vergleich der Blechtemperatur und Einlasskonzentration für Versuche mit und ohne Gegenströmung (850-mm-Kamin, R4-P-05 bis R4-P-09)	192
7.6	Vergleich der Bedingungen am Rekombinatorauslass (R4-P-05 bis R4-P-09)	193
7.7	Vergleich der Temperaturen über dem Rekombinatoreinlass mit und ohne Gegenströmung (R4-P-05 bis R4-P-09)	194
7.8	Vergleich der Temperaturen über den Axialventilatoren mit und ohne Gegenströmung (R4-P-05 bis R4-P-09)	195
7.9	Vergleich der Temperaturen am Rekombinatoreinlass mit und ohne Gegenströmung (R4-P-05 / R4-P-08)	196
7.10	Startverhalten des Rekombinators mit 850-mm-Kamin und Hutze für unterschiedliche Gegenströmungen (R4-P-05 bis R4-P-10)	197
7.11	Vergleich des Startverhaltens mit 300- und 850-mm-Kamin und Hutze ohne Gegenströmung (R4-P-08/-09/-14/-15/-16)	198
7.12	Vergleich der Blechtemperatur und Einlasskonzentration für Versuche ohne / maximaler Gegenströmung (300-mm-Kamin)	198
7.13	Temperaturerhöhung im Bereich des Auslasses aufgrund der Abluftfahne (R4-P-11 bis R4-P-16)	199
7.14	Temperaturerhöhung im Bereich des Einlasses (R4-P-11 bis R4-P-16) . . .	200

Abbildungsverzeichnis

7.15	a),b) Installation des Rekombinators mit 300-mm-Kamin ohne Hutze . . .	201
7.16	Vergleich des Startverhaltens aller Versuche mit 850-mm-Kamin / 300- mm-Kamin mit und ohne Hutze (ohne Gegenströmung)	202
7.17	Vergleich der Katalysatortemperatur und Einlasskonzentration des Mo- dells ohne Hutze mit / ohne Gegenströmung (R4-P-17 bis R4-P-22)	203
7.18	Verlauf des Temperaturgradienten $g_{T,10s}$ mit und ohne Gegenströmung über der Zeit (R4-P-17 bis R4-P-22)	203
7.19	Ausbildung des Temperaturprofils auf Katalysatorblech 1 (R4-P-19) . . .	205
7.20	Vergleich der Temperaturprofile mit und ohne Gegenströmung (R4-P-17 bis R4-P-26)	205
7.21	Vergleich der Temperaturen am Rekombinatorein- und auslass zur Unter- suchung der Durchströmungsrichtung bei maximaler Gegenströmung . . .	208
7.22	Vergleich der Temperaturen am Rekombinatorein- und auslass zur Unter- suchung der Durchströmungsrichtung bei reduzierter Gegenströmung . . .	208
7.23	Auslasskonzentration während der Versuche R4-P-17 bis -26	209
7.24	Vergleich der H_2 -Einlasskonzentration und Katalysatorblechtemperatur unter verschiedenen Gegenströmungsgeschwindigkeiten (R4-P-17 bis R4- P-26)	210
10.1	Stützpunkte und Kalibrierfunktion am Beispiel des Katharometers KR-4-06	225
10.2	Kalibrierfunktion und Stützstelle eines Pt-100-Elements (KR-4-19)	229
10.3	Kalibrierfunktion und Stützstelle gemäß [ASS+10]	231
10.4	Gemessene (unkorrigierte) Wasserstoffkonzentration und Sensorkopftem- peratur des Katharometers KR-4-08	232
10.5	Gemessene Wasserstoffkonzentration und die dazugehörige Näherungs- funktion 2. Grades	233
10.6	Verarbeitung des Sensorsignals eines Katharometers mit Temperaturkorrektur	234
10.7	Abweichung der gemessenen H_2 -Konzentration in Abhängigkeit von der Übertemperatur und die dazugehörige Näherungsfunktion 2. Grades . . .	235

Nomenklatur

Lateinische Zeichen		
Zeichen	Einheit	Bedeutung
a_w	mm	Entfernung des Einlasses von der Wand
A	m^2	Fläche
A_{aus}	m^2	Querschnitt des Rekombinatorauslasses
A_e	m^2	Einlassquerschnitt des Rekombinators
A_{ein}	m^2	Einlassquerschnitt der H_2 -Einspeisung
A_K	m^2	Strömungsquerschnitt im Kamin
A_{kat}	m^2	Strömungsquerschnitt zwischen den Katalysatorblechen
A_N	[m^2]	Fläche zur Beschreibung des gemessenen Geschwindigkeitsprofils
A_p	m^2	Querschnitt eines Partikels
A_{theo}	[m^2]	Fläche zur Beschreibung des theoretischen Geschwindigkeitsprofils ohne Verluste durch Randeffekte
b	m	Seitenlänge eines Rechtecks
d_{ein}	m	Einlassdurchmesser
d_h	m	hydraulischer Durchmesser
d_p	m	Partikeldurchmesser
D_e	mm	Durchmesser des Einlasses
$f_{ges,i}$	Ω	Kalibrierkonstante des Pt-100-Elements i
f_{REKO4}	Vol.-% H_2	Korrekturglied für Kalibrierfunktion eines Katharometers
F_a	N	treibende Kraft auf ein Partikel (PIV)
F_g	N	Gravitationskraft
F_t	N	Trägheitskraft
F_z	N	Zentrifugalkraft
\vec{F}_{KV}	N	Summe der auf das Kontrollvolumen einwirkenden äußeren Kräfte
Fr_ρ	[-]	dimensionslose, dichtebezogene Froude-Zahl
g	$9,81 \text{ m/s}^2$	Gravitationskonstante
$g_{T,10s}$	K/s	Über 10 Sekunden gemittelter Temperaturgradient
H	m	Höhe
H_{Kam}	m	Höhe des Rekombinatorkamins
H_{kat}	m	Höhe des Katalysatorbleches
$I_{H_2,mess}$	mA	Messsignal des Katharometers
$I_{mess,Pt-100}$	mA	Messsignal des Pt-100-Elements
\vec{I}	kgm/s	Impuls (physikalische Größe), vektorielle Darstellung

Nomenklatur

Lateinische Zeichen		
Zeichen	Einheit	Bedeutung
l_{RM}	m	Länge des seitlichen Rekombinatoreinlasses
$m_{H_2,MFC}$	kg/s	eingespeiste H ₂ -Masse des Massendurchflussreglers
m_P	kg	Partikelmasse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
\dot{m}_0	kg/s	Anfangs- oder Einlassmassenstrom
\dot{m}_E	kg/s	Massenstrom durch den Einlass des Rekombinators
M	g/mol	Molare Masse
$M_{gem,aus}$	g/mol	Molare Masse des Gasgemisches am Rekombinatorauslass
$n_{H_2,ges}$	mol	gesamte, gemittelte H ₂ -Menge (Schichtmodell)
$n_{H_2,i}$	mol	gemittelte H ₂ -Menge einer Schicht i (Schichtmodell)
$n_{H_2,MFC}$	mol	eingespeiste H ₂ -Menge des Massendurchflussreglers
\vec{n}	[-]	äußerer Normalenvektor
$\dot{n}_{H_2,E}$	mol/s	Rekombinierter Stoffmengenstrom H ₂
N	[-]	Anzahl der Kanäle zwischen den Rekombinatorblechen
N_{Fehler}	[-]	Anzahl an Fehlimpulsen (PIV)
N_i	[-]	Fehlerfrei Anzahl an Impulsen (PIV)
$N_{i,f}$	[-]	Fehlerbehaftete Anzahl an Impulsen (PIV)
p	bar _a , bar _ü	Absolutdruck, Überdruck
p_0	bar	Ausgangsdruck
p_{dyn}	bar	Dynamischer Druck
$p_{MFC,n}$	bar	Norm-Einspeisedruck des Massendurchflussreglers
$p'(0)$	bar	Druck am Einlass
P_{Max}	kW	Maximale Leistung
R	J/molK	Universelle Gaskonstante $R = 8,3144621 \text{ J/molK}$ [Nat10]
R_0	Ω	elektrischer Widerstand
R_{Pt-100}	Ω	elektrischer Widerstand eines Platinwiderstands (100 Ω)
Re	[-]	Dimensionslose Kennzahl, Reynolds-Zahl
Re_{krit}	[-]	Kritische Reynolds-Zahl
s_g	m	zurückgelegte Strecke eines Partikels ohne Schlupf
s_P	m	zurückgelegte Strecke eines Partikels mit Schlupf
S	[-]	Seitenverhältnis
S_{st}	[-]	Standardabweichung
t	s	Zeit
T	K, °C	Temperatur

Nomenklatur

Lateinische Zeichen		
Zeichen	Einheit	Bedeutung
T_a, T_{aus}	K, °C	Temperatur am Rekombinatorauslass
T_e, T_{ein}	K, °C	Temperatur am Rekombinatoreinlass
T_{Kalib}	K, °C	Kalibriertemperatur
T_{mess}	K, °C	gemessene Temperatur
$T_{MFC,n}$	K	Norm-Einspeisetemperatur des Massendurchflussreglers
T_{ref}	K, °C	Referenztemperatur
T_{umg}	K, °C	Umgebungstemperatur
u_c	%	kombinierte Standardunsicherheit
U	m	Umfang
U_T	V	Thermospannung
v	m/s	Geschwindigkeit
v_0	m/s	Anfangsgeschwindigkeit
v_{0mm}	m/s	Geschwindigkeit bezogen auf R4-H (ohne Kamin)
v_{aus}	m/s	Auslassgeschwindigkeit, Geschwindigkeit am Rekombinatorauslass
v_{ave}	m/s	Gemittelte Geschwindigkeit am Rekombinatorauslass
v_{ein}	m/s	Einlassgeschwindigkeit, Geschwindigkeit am Rekombinatoreinlass
v_m	m/s	mittlere Geschwindigkeit
v_{max}	m/s	Maximale Geschwindigkeit am Rekombinatorauslass
v_{sed}	m/s	Sedimentationsgeschwindigkeit
v_y	m/s	Betrag der Geschwindigkeit in y-Richtung
\vec{v}	m/s	Geschwindigkeit, vektorielle Darstellung
\bar{v}_{10mm}	m/s	über 10 mm gemittelte Geschwindigkeit
$\vec{v}_{abs,1V}$	m/s	Absolutgeschwindigkeit (vekt.) eines Vektors
$\vec{v}_{abs,ges}$	m/s	Absolutgeschwindigkeit (vekt.) des gesamten Messfelds
$\vec{v}_{abs,i}$	m/s	Absolutgeschwindigkeit (vekt.) eines Einzelvektors i
$\bar{v}_{E,1D}$	m/s	Geschwindigkeitsprofil am Einlass entlang der x-Achse
$\vec{v}_{x,1V}$	m/s	Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung eines Vektors
$\vec{v}_{y,1V}$	m/s	Geschwindigkeitskomponente in y-Richtung eines Vektors
$\vec{v}_{y,ges}$	m/s	y-Komponente der Geschwindigkeit (vekt.) des gesamten Messfelds
V_{AV}	m ³	Auslegungsvolumen REKO-4
V_{FV}	m ³	Freies (Gas-) Volumen REKO-4
V_{ges}	m ³	Aufsummiertes Volumen REKO-4 aus Schichtmodell
V_{LV}	m ³	Leervolumen REKO-4
\dot{V}	m ³ /s	Volumenstrom

Nomenklatur

Lateinische Zeichen		
Zeichen	Einheit	Bedeutung
\dot{V}_{1D}	m ³ /s	1-dimensional berechneter Volumenstrom
\dot{V}_{2D}	m ³ /s	2-dimensional berechneter Volumenstrom
\dot{V}_{max}	m ³ /s	Maximaler Einlassvolumenstrom
\dot{V}_{min}	m ³ /s	Minimaler Einlassvolumenstrom
$x_{H_2,korr}$	Vol.-% H ₂	Gemessene H ₂ -Konzentration mit Temperaturkorrektur
$x_{H_2,i}$	Vol.-% H ₂	gemittelte H ₂ -Konzentration einer Schicht i (Schichtmodell)
$x_{H_2,m}$	Vol.-% H ₂	eingespeiste, mittlere H ₂ -Konzentration bezogen auf V _{FV}
$x_{H_2,mess}$	Vol.-% H ₂	gemessene H ₂ -Konzentration
$x_{H_2,o}$	Vol.-% H ₂	H ₂ -Konzentration an Oberkante einer Schicht (Schichtmodell)
$x_{H_2,tempkorr}$	Vol.-% H ₂	Gemessene H ₂ -Konzentration mit Temp.-Korrektur für KR-4-07
$x_{H_2,u}$	Vol.-% H ₂	H ₂ -Konzentration an Unterkante einer Schicht (Schichtmodell)
z	m	Seitenlänge eines Rechtecks

Griechische Zeichen		
Zeichen	Einheit	Bedeutung
α_V	°	Winkelversatz
δ_r	mm	Wanddicke des (Rohr-) Einlasses
Δp_{NP}	bar	Nullpunkt-Verschiebung des Drucks
Δp_r	bar	Druckverlust
Δs_{PIV}	m	zurückgelegter Weg eines Partikels (PIV)
Δt	s	Zeitabstand der Messwerterfassung mit der Anlagensteuerung
Δt_{PIV}	ms	Zeitabstand zwischen zwei Bildpaaren (PIV)
ΔT	K	Temperaturunterschied
Δx_{H_2}	Vol.-% H ₂	Konzentrationsunterschied (Wasserstoff)
$\Delta x_{H_2,max}$	Vol.-% H ₂	maximale Abweichung der H ₂ -Konzentration
η	kg/m/s	dynamische Viskosität
η_{korr}	[-]	Korrekturfaktor zur Berechnung eines 2D-Volumenstroms
η_{vert}	[-]	Korrekturfaktor zur Berechnung des vertikalen Geschwindigkeitsanteils
λ / λ_{WLK}	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
λ_{gem}	W/mK	Wärmeleitfähigkeit des Gemisches
ν	kg/ms	kinematische Viskosität
ξ	[-]	Druck- oder Rohrverlustbeiwert
ξ_a	[-]	Druckverlustbeiwert am Auslass

Nomenklatur

Griechische Zeichen		
Zeichen	Einheit	Bedeutung
$\xi_{a,lam}$	[-]	Einlasskoeffizient, Annahme: laminare Strömung
$\xi_{a,turb}$	[-]	Einlasskoeffizient, Annahme: turbulente Strömung
ξ_{bl}	[-]	Reibungsbeiwert zwischen den Katalysatorblechen
ξ_e	[-]	Einlasskoeffizient
$\xi_{e,max}$	[-]	maximaler Einlasskoeffizient
$\xi_{e,min}$	[-]	minimaler Einlasskoeffizient
ξ_{kam}	[-]	Reibungskoeffizient im Kaminsegment
$\xi_{kam,ges}$	[-]	Gesamter Reibungskoeffizient im Kamin
$\xi_{kam,zus}$	[-]	Zusätzlicher Reibungskoeffizient im Kamin
ξ_{kat}	[-]	gesamter Reibungsbeiwert des Katalysatoreinschubs
ξ_{lam}	[-]	Reibungsbeiwert, ausgebildete laminare Strömung (Rechteckkanal)
$\xi_{lam,k}$	[-]	Reibungsbeiwert, ausgebildete laminare Strömung (Kreisrohr)
$\xi_{lam,s}$	[-]	Spaltreibungsbeiwert, ausgebildete laminare Strömung im Katalysatorspalt
ξ_{turb}	[-]	Reibungsbeiwert, ausgebildete turbulente Strömung
$\xi_{turb,rauh}$	[-]	Reibungsbeiwert, turbulent, zwischen Rekombinatorblechen
$\xi_{turb,s}$	[-]	Spaltreibungsbeiwert, ausgebildete turbulente Strömung im Katalysatorspalt
ρ	kg/m ³	Dichte
ρ_0	kg/m ³	Anfangsdichte
ρ_{ein}	kg/m ³	Gasdichte am Einlass
ρ_{kat}	kg/m ³	Gasdichte zwischen den Katalysatorblechen
ρ_K, ρ_{Kam}	kg/m ³	Gasdichte am Kamin des Rekombinators
$\rho_{Umg}, \rho_{\infty}$	kg/m ³	Gasdichte der Umgebung
τ	s	Relaxationszeit
φ	%	Relative Feuchte
$\varphi(S)$	[-]	Korrekturfaktor in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses S
ω_a	m ³ /kg	Druckverlustterme bezogen auf den Auslass
ω_e	m ³ /kg	Druckverlustterme bezogen auf den Eintritt
ω_i	m ³ /kg	Druckverlustterm
ω_r	m ³ /kg	Summe alle Druckverlustterme

Nomenklatur

Chemische Elemente und Stoffe	
Symbol	Bedeutung
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
Cr	Chrom
DEHS	Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (Aerosol für PIV)
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
H ₂ O ^{vap}	Wasser, dampfförmig
I	Iod
N ₂	Stickstoff
Ni	Nickel
O ₂	Sauerstoff
Pt	Platin
ZrO ₂	Zirconiumdioxid

Abkürzungen		
Zeichen	Bedeutung	Erklärung
AF	Absolute Feuchte	
APS	Aerodynamic Particle Sizer	Aerodynamische Echtzeitmessung von Partikeln
CCD	Charge-coupled Device	Verwendeter Chip-Typ der PIV-Kamera
DEHS	Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat	Aerosol für PIV
ME	Messbereichsendwert	
MFC	Massendurchflussregler	Komponente zur Regelung eines Massenstroms
PIV	Particle Image Velocimetry	Optische Strömungsmesstechnik
RF	Relative Feuchte	
RMS	Root Mean Square	Mittelwertbildung einer Messreihe (Quadratisches Mittel)
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer	Größenmessgerät von Partikeln
TE	Thermoelement	Temperatursensor
TL	Thermoleitung	Zur Verlängerung des Signalwegs eines Thermoelements

Nomenklatur

\underbrace{TR}	–	\underbrace{XX}	–	\underbrace{YY}
Thermoelement		Laufende Nummer		Abkürzung für Einsatzort
GO				Gastemperatur in Behälter (oben)
GM				Gastemperatur in Behälter (mitte)
GU				Gastemperatur in Behälter (unten)
RK				Katalysatorblechtemperatur
RG				Gastemperatur im Bereich Rekombinatorgehäuse
WD				Wandtemperatur der Behälterdecke
WO				Wandtemperatur des Behälters (oben)
WM				Wandtemperatur des Behälters (mitte)
WU				Wandtemperatur des Behälters (unten)
WB				Wandtemperatur des Behälterbodens
WMR				Wandtemperatur des Behälters hinter Rekombinator
WML				Wandtemperatur am Mannloch

1 Einleitung

Katalytische Rekombinatoren werden als passive Sicherheitskomponenten in den Sicherheitsbehältern von Leichtwasserreaktoren eingesetzt, um den in einem Störfall mit Kernschmelzen entstehenden Wasserstoff (H_2) frühzeitig wieder in Wasserdampf umzuwandeln und somit die Bildung zündfähiger Gemische, die die Integrität des Sicherheitsbehälters gefährden können, nach Möglichkeit zu verhindern. Zur Abschätzung der Wirksamkeit werden Computermodelle verwendet, die das Betriebsverhalten der installierten Rekombinatoren simulieren und im Rahmen von Störfallsimulationen Aussagen über Menge und zeitlichen Verlauf des Wasserstoffabbaus ermöglichen.

Im Forschungszentrum Jülich wurde in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik der RWTH Aachen University das Simulationsprogramm REKO-DIREKT entwickelt, das das Betriebsverhalten eines Rekombinators unter den für einen Kernschmelzunfall typischen Randbedingungen simuliert. Darüber hinaus bietet dieses Programm Vorteile gegenüber anderen Modellansätzen, da anstelle empirischer Parametermodelle überwiegend mechanistische Modelle zum Einsatz kommen. Zur Optimierung und Validierung von REKO-DIREKT werden in Jülich Versuchsstände in unterschiedlicher Skalierung betrieben, die der detaillierten Untersuchung verschiedener Aspekte der katalytischen Wasserstoffrekombination dienen. Ein bisher nicht genau untersuchtes Phänomen ist dabei die Bildung des auftriebsgetriebenen Kaminzugs im Rekombinator, der eine zentrale Größe für die Effizienz der Wasserstoffumsetzung darstellt.

Zu diesem Zweck wurde der Versuchsstand REKO-4 errichtet, in dessen Versuchsbehälter Experimente an kleinskaligen Rekombinatoren mit H_2 /Luft-Gemischen durchgeführt werden können. Die Konstruktion des Rekombinators ist dabei an das Design einer kommerziell erhältlichen Variante angelehnt. Dabei kommen neben konventioneller Messtechnik wie Thermoelemente, Drucksensoren und Feuchtemesstechnik, auch Wärmeleitfähigkeitssensoren (Katharometer) zur in-situ Messung der Wasserstoffkonzentration sowie Particle-Image-Velocimetry (PIV) als optische Strömungsmesstechnik zum Einsatz. REKO-4 ermöglicht so zum einen die Vorgänge im Rekombinator detailliert zu untersuchen, zum anderen die Wechselwirkung mit der Behälteratmosphäre zu analysieren.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die experimentelle Untersuchung der Auftriebsströmung im Rekombinator und die Ableitung eines optimierten Rechenmodells für das Programm REKO-DIREKT. Darüber hinaus wird der Einfluss einer abwärts gerichteten Gegenströmung auf den Rekombinator untersucht. Hierbei steht die Frage im Vordergrund, in wieweit diese Strömung, die in wandnahen Bereichen innerhalb des Sicherheitsbehälters auftreten kann, die Durchströmung bzw. die Effizienz des Rekombinators

1 Einleitung

beeinflusst. Hierzu wird ein kleinskaliges Rekombinatormodell in Anlehnung an ein kommerzielles Design verwendet. Die Untersuchungen umfassen dabei u.a. die Messungen der für das Betriebsverhalten zentralen Größen wie H_2 -Einlasskonzentration, die Katalysatortemperatur und die Einlassgeschwindigkeit bei verschiedenen Randbedingungen. Der Rekombinator kann dabei durch einen modularen Aufbau mit unterschiedlichen Kaminsegmenten ausgerüstet werden.

In Kapitel 2 wird zunächst das Funktionsprinzip katalytischer Rekombinatoren erklärt. Anschließend werden die für diese Arbeit relevanten Versuchsstände (u.a. THAI-Versuchsanlage) vorgestellt, an denen bereits experimentelle Untersuchungen zur Wasserstoffrekombination durchgeführt worden sind. Im Vergleich dazu erfolgt eine Einordnung des neuen Versuchsstands REKO-4 und eine Darstellung der Prozesse, die nun genauer analysiert werden können. Danach werden der Aufbau des Programms REKO-DIREKT und die bisherige Implementierung des Kaminmodells erläutert.

Aufbau und Instrumentierung des Versuchsstands REKO-4 werden in Kapitel 3 genauer erklärt. Hierbei werden neben der konventionellen Messtechnik insbesondere Katharometer genauer betrachtet, die als innovative Messtechnik zur in-situ Messung der Wasserstoffkonzentration im Rahmen dieser Arbeit vor ihrem Einsatz qualifiziert werden müssen. Ebenso wird die optische Strömungsmesstechnik „Particle Image Velocimetry (PIV)“ besprochen, die die Messung vollständiger Geschwindigkeitsfelder im Bereich des Rekombinators ermöglicht. Das Kapitel schließt mit einer Fehlerbetrachtung der gesamten verwendeten Messtechnik.

In Kapitel 4 wird zunächst die bearbeitete Versuchsmatrix für die Versuche mit einem kleinskaligen Rekombinator vorgestellt. Dabei wird auf die Versuchsdurchführung und die PIV-Messungen näher eingegangen. Anschließend werden Vorversuche zur Wasserstoffverteilung innerhalb des Versuchsbehälters ohne Anwesenheit eines Katalysators vorgestellt. Zur Überprüfung der Messgenauigkeit erfolgt eine Bilanzierung bzw. Betrachtung aller Messgrößen anhand einer Referenzmessung, die eine kontinuierliche Untersuchung der Wasserstoffrekombination zulässt.

Kapitel 5 umfasst die Versuchsreihen zur Kaminmodellvariation bei unterschiedlichen Kaminhöhen und Versuchsdrücken inklusive einer Diskussion der Ergebnisse. Dabei wird ebenfalls eine Untersuchung der Rekombinatorauslassströmung durchgeführt.

Die Optimierung des bestehenden Kaminmodells wird in Kapitel 6 dargestellt und anhand experimenteller Daten validiert. Die Validierung erfolgt dabei sowohl anhand der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Datenbasis als auch anhand der THAI-Versuchsanlage. Hierbei werden insbesondere die Reibungsverluste des Rekombinators genauer analysiert und mit verschiedenen Literaturangaben verglichen. Anschließend werden Ergebnisse transienter Nachrechnungen mit dem optimierten Simulationsprogramm REKO-DIREKT gezeigt, die im Anschluss an diese Arbeit mit Experimenten aus dem OECD/NEA-THAI Projekt (THAI-Anlage) durchgeführt worden sind.

Kapitel 7 befasst sich mit der Wasserstoffrekombination unter Einfluss einer abwärts gerichteten, wandnahen Strömung. Dabei werden zuerst die Modifikationen erläutert, die eine Realisierung einer solchen Strömung im Versuchsbehälter ermöglichen, und an-

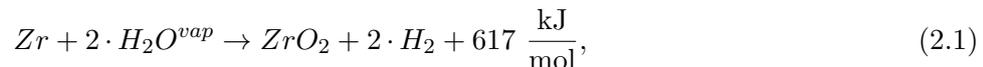
1 *Einleitung*

schließlich das Strömungsbild analysiert, das in Vorversuchen untersucht worden ist. Darauf folgen die experimentellen Untersuchungen zur Wasserstoffrekombination, wobei sowohl verschiedene Rekombinatorvarianten als auch unterschiedliche Luftgeschwindigkeiten der Gegenströmung untersucht werden.

Die Arbeit schließt in Kapitel 8 mit einer Zusammenfassung und Einordnung der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse und gibt einen Ausblick auf weitere notwendige Untersuchungen.

2 Hintergrund

In Leichtwasserreaktoren können im Verlauf eines Störfalls mit Kernschmelzen größere Mengen an Wasserstoff freigesetzt werden. Dieser entsteht zunächst hauptsächlich aus der Oxidation der Zirkon enthaltenden Brennelementhüllrohre in Anwesenheit von Wasserdampf über die Reaktion



die auch als Zirkon-Wasserdampf-Reaktion bezeichnet wird [MSR04]. Die dabei freiwerdenden Massen an Wasserstoff hängen von dem Störfallszenario ab und werden in der Literatur mit 550 - 1100 kg [SHA05] bzw. bis zu 1350 kg [GRS89] abgeschätzt. Zusätzlich stellt die Oxidation bzw. Korrosion weiterer metallischer Komponenten im Reaktordruckbehälter (RDB) eine zusätzliche Wasserstoffquelle dar. Nach Versagen des RDB und der darauf folgenden sogenannten Schmelze-Beton-Wechselwirkung wird weiterer Wasserstoff freigesetzt [ABA⁺01].

Wasserstoff kann im Sicherheitsbehälter zündfähige H₂/Luft-Gemische bilden. Im Falle einer Zündung kann dabei nicht ausgeschlossen werden, dass die Integrität des Sicherheitsbehälters durch sowohl statische als auch dynamische Druckbelastungen und hohe Temperaturen beeinträchtigt wird [ABA⁺02]. Sowohl während des Störfalls von Three-Mile-Island (TMI) in Harrisburg im Jahr 1979 als auch während der Reaktorunfälle in Fukushima im Jahr 2011 sind Wasserstoffverbrennungen aufgetreten. Im Fall von TMI wurden Drücke bis 2,0 bar_ü erreicht, die jedoch keine Schäden am Sicherheitsbehälter verursachten, der auf 5,0 bar ausgelegt worden war [Seh12][KVS⁺12]. In Fukushima hingegen führten die aus der Verbrennung entstehenden Druckbelastungen u.a. an drei Reaktorblöcken zur Zerstörung des Confinements im oberen Bereich des Reaktorgebäudes [BBB⁺13] [KYG⁺].

Vor diesem Hintergrund sind bereits seit vielen Jahren verschiedene Gegenmaßnahmen wie z.B. Inertisierung, Verdünnung, frühe gezielte Zündung oder die katalytische Rekombination bekannt, um Wasserstoffverbrennungen auszuschließen oder zumindest die Auswirkungen möglicher Verbrennungslasten zu minimieren [BBB⁺01]. Seit den 1990er Jahren wurden auf Empfehlung der Reaktor-Sicherheitskommission katalytische Rekombinatoren in deutschen Kernkraftwerken nachgerüstet [RSK09].

2.1 Katalytische Rekombinatoren in Kernkraftwerken

In katalytischen Rekombinatoren wird Wasserstoff mit dem Luftsauerstoff aus der Atmosphäre des Sicherheitsbehälters über eine katalytische Reaktion flammlos in Wasserdampf umgewandelt. Diese Reaktion findet schon bei Konzentrationen von ca. 1 Vol.-% H_2 und somit deutlich unterhalb der unteren Zündgrenze für die konventionelle Verbrennung (ca. 4 Vol.-% H_2) statt [SM54]. Die Aktivierungsenergie der Rekombination wird dabei durch den Katalysator soweit herabgesetzt, dass die Reaktion bereits bei Umgebungstemperatur selbständig startet [WWH54]. Der Druck, bei dem die Rekombinatoren arbeiten, hängt dabei vom Störfallablauf des Kernreaktors ab und kann im Extremfall Werte im Bereich des Auslegungsdrucks des Sicherheitsbehälters erreichen. Dieser liegt je nach Reaktortyp z.B. für einen kugelförmigen Stahlsicherheitsbehälter mit einem Innendurchmesser von 56 m und einer Wandstärke von 28 mm bei ca. 0,6 MPa = 6 bar [KVS⁺12].

Der prinzipielle Aufbau eines katalytischen Rekombinators wird in Abbildung 2.1 anhand eines Rekombinators im AREVA-Design (ehemals Siemens, vgl. [ES00]) erklärt. Im unteren Bereich eines Gehäuses sind Katalysatorelemente in Form von ebenen Ble-

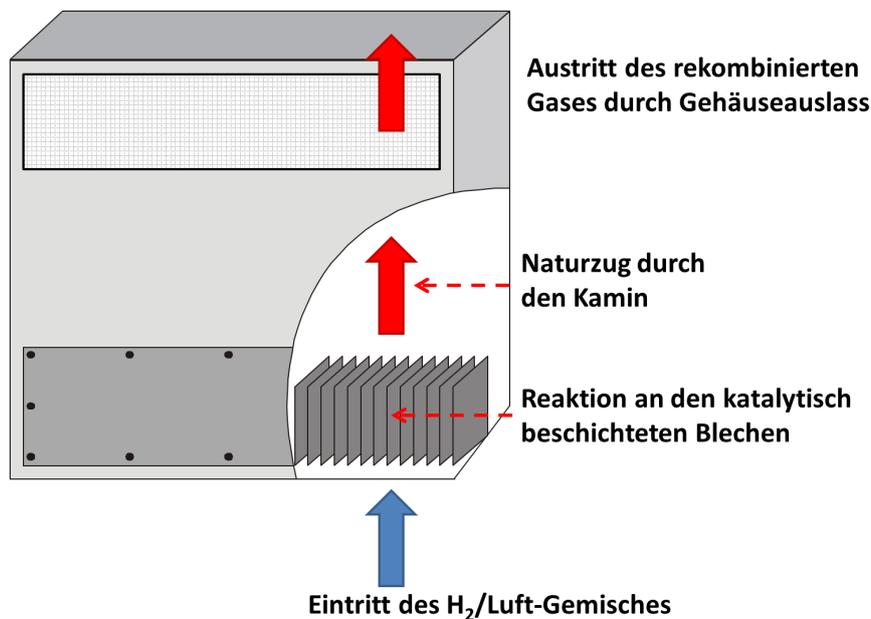


Abbildung 2.1: Prinzip eines katalytischen Rekombinators im AREVA-Design (vgl. [HKSZ95])

chen o.ä. vertikal angeordnet. Das H_2 /Luft-Gemisch strömt von unten in das Gehäuse ein und gelangt an die katalytisch beschichteten Oberflächen, so dass die Rekombinationsreaktion ablaufen kann. Die katalytische Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff

2 Hintergrund

gemäß



ist exotherm und setzt somit Wärmeenergie an den Katalysatorblechen frei [BJWRC04]. Dies führt anfangs zur Erwärmung sowohl der Rekombinatorstrukturen als auch des einströmenden Gemisches. Mit fortschreitendem Ablauf der Rekombinationsreaktion und dementsprechend aufgeheizten Katalysatorblechen geht der Großteil der Reaktionswärme auf das Gas über, so dass die daraus resultierende Temperaturerhöhung eine Dichteänderung des Gases induziert. Der dadurch entstehende thermische Auftrieb wird durch das kaminartige Gehäuse verstärkt. Hierdurch entsteht ein Naturzug, so dass sich der Rekombinator automatisch ein frisches H_2 /Luft-Gemisch ansaugt. Das rekombinierte Gas verlässt das Gehäuse durch eine Auslassöffnung im oberen Bereich. Durch diese Selbstbespeisung aufgrund von Naturkonvektion werden keine aktiven Komponenten benötigt. Somit kann ein Rekombinator als vollkommen passive Sicherheitseinrichtung ausgelegt werden [ASS⁺10].

Kommerzielle katalytische Rekombinatoren werden von verschiedenen Herstellern weltweit angeboten und in Kernkraftwerken eingesetzt. Das Prinzip heutiger katalytischer Rekombinatoren basiert auf der oben beschriebenen Wirkungsweise, wobei jedoch Unterschiede im Design des Rekombinatorgehäuses und der Katalysatorelemente bestehen. In Deutschland sind großteils Rekombinatoren der Firma AREVA installiert, lediglich in vier Anlagen werden Rekombinatoren der Firma NIS Ingenieurgesellschaft mbH (NIS) verwendet (siehe [NIS11]). Daneben existieren international u.a. noch Varianten der kanadischen Firma CANDU (ehemals AECL, Atomic Energy of Canada Limited, siehe z.B. [Mar07]), die u.a. in Kanada, Finnland und Frankreich zum Einsatz kommen [Can11], und der russischen Firma RET (Russian Energy Technologies, siehe z.B. [SKC10]).

Die Katalysatorelemente bestehen dabei zumeist aus drei Bestandteilen. Der Träger besteht aus einem hitzebeständigem Material, z.B. Edelstahl oder Keramik. Darauf wird der Wash-Coat aufgebracht, dessen poröse Struktur für eine größere Oberfläche sorgt. Der Wash-Coat besteht dabei zumeist aus einem keramischen Material wie z.B. Aluminiumoxid (Al_2O_3). Der eigentliche Katalysator befindet sich innerhalb dieser Porenstruktur und besteht in der Regel aus Platin und/oder Palladium.

Die experimentellen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit werden an einem kleinskaligen Rekombinator in Anlehnung an das AREVA-Design durchgeführt (z.B. Kernkraftwerk Emsland, Abbildung 2.2).

Dieses Design besteht aus drei Baugruppen:

Katalysatoreinschub Im unteren Teil des Rekombinators sind die katalytisch beschichteten Bleche angeordnet. Die Zusammensetzung des Katalysatormaterials beinhaltet Elemente wie Platin und Palladium, die sich als Katalysator für die Wasserstoffrekombination eignen.

Kaminmodul Über dem Katalysatoreinschub ist der Kaminaufsatz positioniert. Er un-

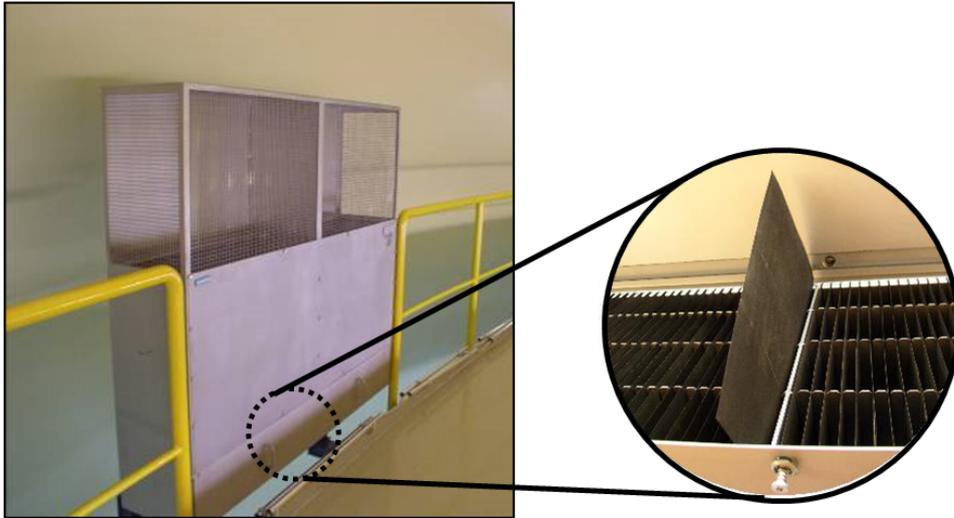


Abbildung 2.2: Rekombinator im AREVA-Design im Kernkraftwerk Emsland [KSD⁺09]

terstützt den Naturzug und somit den Durchsatz durch den Rekombinator aufgrund des Kamineffekts.

Auslasshutze Der Auslass sorgt dafür, dass das heiße, wasserstoffarme Gasgemisch den Rekombinator seitlich verlässt. Die Hutze verhindert dabei, dass herabfallende Fremdkörper in das Rekombinatorgehäuse gelangen.

Bis heute wurden in verschiedenen Versuchsanlagen zahlreiche Experimente durchgeführt, in denen die Praxistauglichkeit der Rekombinatoren unter verschiedenen Randbedingungen untersucht wurde. Die dabei erzielten Daten wurden zur Erstellung von Rechenmodellen benutzt, die das Betriebsverhalten eines Rekombinators in einem Störfall simulieren sollen [RBK⁺10].

Seit den 1980er Jahren werden vor allem in deutschen, französischen und kanadischen Forschungseinrichtungen Versuchsanlagen betrieben, in denen Rekombinatoren verschiedener Hersteller untersucht wurden. So wurden neben Grundlagen- und Qualifikationstests auch spezielle Randbedingungen wie z.B. der Einfluss verschiedener Katalysatorgifte analysiert. Bei diesen Anlagen handelt es sich hauptsächlich um Integraleexperimente, die sich durch eine relativ große Umgebungsgeometrie auszeichnen und bei denen die Versuchsbedingungen an einen realen Störfall angepasst werden können. Andererseits ist z.T. aufgrund der großen Raumgeometrien eine dichtmaschige Instrumentierung nicht möglich, so dass lokal auftretende Effekte häufig nicht untersucht werden können. Als Beispiele sei hier auf die H2PAR-Versuchsanlage in Cadarache, Frankreich [SDP⁺99] und das Battelle Modell-Containment (BMC) in Eschborn, Deutschland ([Kan93] [WBH08]) hingewiesen. Im Gegensatz dazu konzentrieren sich Detailexperimente auf spezielle Aspekte der Rekombination. Sie unterscheiden sich zu den Integraleexperimenten in der detaillier-

2 Hintergrund

teren Messtechnik. Zudem können die experimentellen Randbedingungen exakt gesteuert werden. Auch wenn damit in der Regel vom realen Störfallablauf abweichende Randbedingungen vorliegen, ermöglichen diese Versuche die Erlangung eines grundlegenden Verständnisses der Vorgänge für die Modellentwicklung. Jedoch vertiefen die Ergebnisse aber das grundlegende Verständnis der Vorgänge und sind zudem besser für die Modellbildung geeignet [ASS⁺10].

Im Folgenden werden ausgewählte Rekombinator-Experimente beschrieben, die vor dem Hintergrund dieser Arbeit von besonderem Interesse sind. Für eine umfassendere Liste von Rekombinatorexperimenten wird hierbei auf [ASS⁺10] bzw. auf [ABA⁺01], [ABA⁺02] und [SHA05] verwiesen.

Dies sind zum einen die Versuchsanlagen REKO-1 und REKO-3 im Wasserstofflabor des Forschungszentrums Jülich, bei denen es sich um Detailexperimente handelt. Zum einen bilden sie die experimentelle Grundlage des Rechenprogramms REKO-DIREKT, das in Abschnitt 2.2.1 erläutert wird. Zum anderen werden die Versuchsstände für die Inbetriebnahme und Qualifizierung der Messtechnik verwendet, die für den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Versuchsstand REKO-4 benötigt werden (Abschnitt 3). Daneben wird die THAI-Versuchsanlage der Becker Technologies GmbH in Eschborn dargestellt, die als Integralexperiment angesehen werden kann. Sie liefert experimentelle Daten von Rekombinatorversuchen, die sich zur Nachrechnung eignen und ebenfalls in internationalen Benchmarks herangezogen werden.

2.1.1 REKO-Versuchsanlagen im FZ Jülich

Im Forschungszentrum Jülich werden seit 1996 Versuchsstände zur Untersuchung der Wasserstoffrekombination betrieben. In den Versuchsständen REKO-1 und REKO-3 sind dabei Detailexperimente zur katalytischen Wasserstoffrekombination unter Zwangsdurchströmung möglich. Sie unterscheiden sich untereinander hauptsächlich in ihrer Größe und den darin verwendeten Katalysatorelementen.

Die Versuchsanlage REKO-1 besteht aus einem vertikalen, zylindrischen Strömungsrohr, durch das definierte Gasgemische unterschiedlicher Komponenten (Luft, N₂, O₂, H₂, H₂O u.a.) eingespeist werden können. Innerhalb dieses Strömungsrohrs können unterschiedliche Katalysatorproben positioniert werden. Eine Gasanalytik am Auslass der Anlage misst die Zusammensetzung des austretenden Gases. Die Katalysatorelemente können dabei sowohl mit Thermoelementen als auch durch spezielle Gaseinsätze mit berührungsloser Temperaturmesstechnik wie Pyrometrie untersucht werden.

Die Möglichkeit definierte Gasgemische bei unterschiedlichen Temperaturen in den Versuchsstand einzuleiten, ist vor dem Hintergrund der Sensorqualifizierung von Bedeutung. Daher wird REKO-1 dazu benutzt, die für die Katharometer notwendigen Kalibrierkurven anzufertigen. Außerdem wurden an diesem Versuchsstand der Einfluss von Temperatur und Wasserdampf auf die Messtechnik untersucht [Sim09] [Jan10] [Ste11]. Ebenso werden hier die Feuchtesensoren auf Ihre Genauigkeit unter Einfluss verschiede-

2 Hintergrund

ner Randbedingungen getestet [Kla11]. Abbildung 2.3 zeigt ein Foto des Versuchsstands, bei der die Katharometer auf den Einfluss unterschiedlicher Temperaturen untersucht wurden. Vor diesem Hintergrund sind Heizbänder bzw. die Isolierung zu erkennen, mit denen das Strömungsrohr auf unterschiedliche Temperaturen erwärmt werden kann.

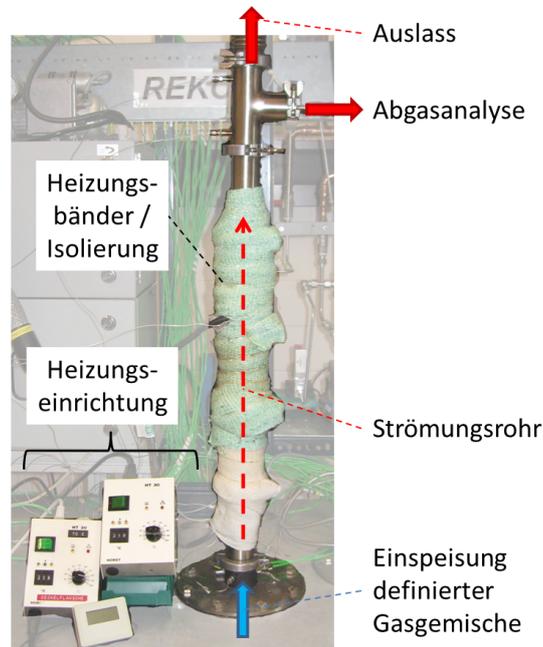


Abbildung 2.3: Foto REKO-1 zur Sensorqualifizierung (vgl. [Jan10])

Die Versuchsanlage REKO-3 besteht ähnlich wie REKO-1 aus einem vertikalen Strömungskanal, der in diesem Fall jedoch einen rechteckigen Querschnitt aufweist. Innerhalb des Kanals können mehrere Bleche so positioniert werden, dass sie einen Ausschnitt eines kommerziellen Rekombinators im AREVA-Design repräsentieren. Abbildung 2.4 zeigt den Versuchsstand anhand einer 3D-Skizze. Das von unten in den Versuchsstand einströmende Gasgemisch kann in Zusammensetzung, Volumenstrom und Gastemperatur definiert werden. Die Katalysatorbleche sind dabei mit zehn Thermoelementen in unterschiedlichen Positionen versehen. Dies ermöglicht die Messung eines Temperaturprofils entlang der Blechhöhe. Diese Bleche werden ebenfalls für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche verwendet und in Abschnitt 3.6 genauer erklärt. Das Gas kann in unterschiedlichen Höhen entnommen und mit einem Gasanalysator bzgl. der Zusammensetzung untersucht werden. Somit können die Reaktionsraten und die Betriebszustände der Katalysatorbleche in Abhängigkeit von der Gaszusammensetzung bestimmt werden.

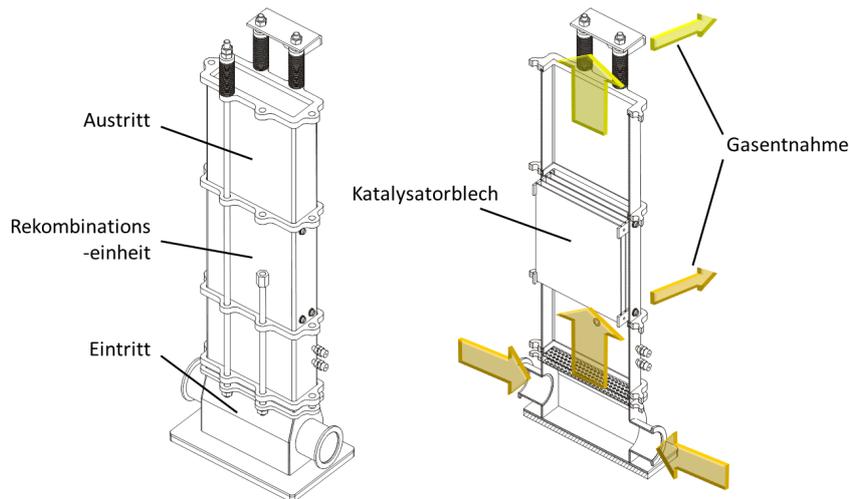


Abbildung 2.4: Versuchsstand REKO-3 als 3D-Skizze [ASS⁺10]

2.1.2 THAI-Versuchsanlage in Eschborn

Die THAI-Versuchsanlage wurde im Jahr 2000 in Eschborn in Betrieb genommen. Das Akronym THAI steht dabei für „**T**hermal-hydraulics **H**ydrogen **A**erosols and **I**odine“. Die Versuchsanlage besteht aus einem ca. 60 m³ großen Stahlbehälter mit einer Höhe von 9,2 m und einem Durchmesser von ca. 3,2 m. Abbildung 2.5 zeigt sowohl den Versuchsbehälter als auch die Unterbringung im Versuchsgebäude. Die Versuche können bis zu einem Druck von 14 bar bei 140 °C durchgeführt werden und ermöglichen Untersuchungen mit radioaktivem Iod ¹²³I [Pos]. Durch spezielle Einbauten ist es möglich, Mehrraumgeometrien innerhalb des Behälters zu bilden.

In der Anlage werden offene Fragen zum Spaltproduktverhalten im Sicherheitsbehälter von Kernkraftwerken untersucht, um die radiologischen Auswirkungen eines schweren Störfalls möglichst belastbar abschätzen zu können. Hierbei sind zum einen die Transportvorgänge von besonderem Interesse, zum anderen die thermodynamische und chemische Wechselwirkung der Spaltprodukte wie Iod oder Aerosolen mit der umgebenden Atmosphäre und den Einbauten. Die Ergebnisse werden z.B. zur Entwicklung und Validierung des deutschen Systemcodes COCOSYS (Containment Code System) der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH verwendet [AAKH⁺].

Die ersten Untersuchungen befassten sich mit der Wechselwirkung von Aerosolen und Rekombinatoren. Hierbei wurde untersucht, ob das in Aerosolen enthaltene Iod durch die hohen Temperaturen auf den Katalysatorblechen in flüchtiges Iod umgewandelt wird und die Rekombinatoren somit zu einer zusätzlichen Iodquelle führen können [KAF⁺07]. Darauf aufbauend wurde im Rahmen des OECD/NEA-THAI Projekts das Betriebsverhalten kommerzieller Rekombinatoren unterschiedlicher Hersteller in der Versuchsanlage untersucht [Kan09]. Daher sind diese Ergebnisse sowohl im Vergleich zu den Versuchen

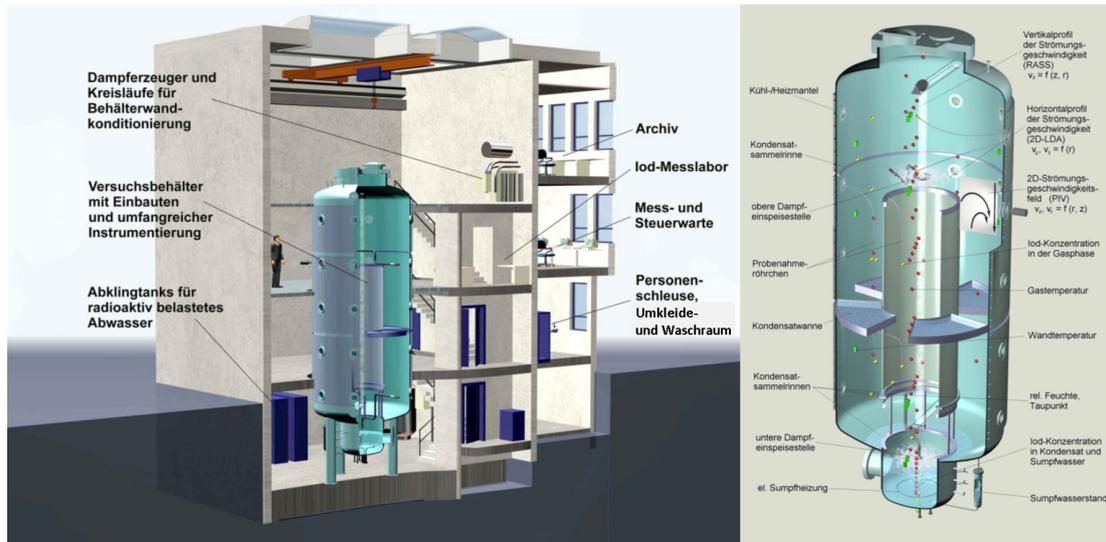


Abbildung 2.5: THAI-Versuchsanlage in Eschborn [KAF⁺07]

in den REKO-Anlagen interessant als auch die Nachrechnung der THAI-Ergebnisse mit dem im Rahmen dieser Arbeit optimierten Programmcode.

2.2 Simulation des Betriebsverhaltens katalytischer Rekombinatoren

Sowohl national als auch international werden verschiedene Rechenprogramme entwickelt und verwendet, um den Störfallverlauf in Leichtwasserreaktoren und die Auswirkung schwerer Störfälle simulieren und die Wirksamkeit von Gegenmaßnahmen beurteilen zu können. Zu diesen Programmen gehören u.a.:

- COCOSYS (Systemcode, GRS, Deutschland)
- GASFLOW (Detailcode, Forschungszentrum Karlsruhe, Deutschland)
- MELCOR (Integralcode, Sandia National Laboratories, USA)
- ASTEC (Integralcode, IRSN, Frankreich und GRS, Deutschland)

Um in Störfallsimulationen die Wirkungsweise katalytischer Rekombinatoren und deren Auswirkungen auf die Containmentatmosphäre beurteilen zu können, sind Rechenmodelle notwendig, die das Betriebsverhalten simulieren [ASS⁺10]. Dafür wurden verschiedene Modelle entwickelt und in die entsprechenden Programme implementiert. Mit Hilfe von Störfallsimulationen werden z.B. die Anzahl, die Positionierung und das Design von Rekombinatoren in Kernkraftwerken optimiert und die Rekombinationsraten unter Störfallbedingungen abgeschätzt [Eyi05] [ABA⁺01].

2 Hintergrund

Zur Beschreibung des Betriebsverhaltens des Rekombinators werden überwiegend empirische Korrelationen eingesetzt, die von den Rekombinatorherstellern entwickelt wurden [RBK⁺10]. Darin wird die H₂-Umsatzrate in Abhängigkeit von der H₂-Konzentration und Druck mit einer einfachen Parametergleichung berechnet

Empirische Modelle basieren auf den Ergebnissen experimenteller Untersuchungen und verwenden globale Parameter wie die H₂/O₂-Konzentration und Temperatur- /Druck-/Feuchtigkeitsbedingungen am Einlass [ABA⁺02]. Diese Programme zeichnen sich zwar durch ihre Einfachheit bzw. einen dementsprechend geringen Rechenaufwand aus, beinhalten aber ebenfalls Nachteile in Hinblick auf Ihre Anwendbarkeit in einem breiten Spektrum von Randbedingungen. Einerseits sind diese Modelle nur für den untersuchten Parameterbereich gültig, andererseits werden die Vorgänge innerhalb des Rekombinators nur unvollständig wiedergegeben [ABA⁺02]. Eine Auswahl an bekannten Simulationsmodellen für Rekombinatoren ist in [ABA⁺02] beschrieben.

In diesem Zusammenhang wird im Forschungszentrum Jülich der Simulationscode REKO-DIREKT für das Betriebsverhalten von Rekombinatoren entwickelt, der im Vergleich zu anderen einschlägigen Modellen mit einer höheren Genauigkeit auflöst und im Zusammenhang mit der katalytischen Reaktion einen neuen Ansatz verfolgt (vgl. [Rei99]).

2.2.1 Programmcode REKO-DIREKT

Der Programmcode REKO-DIREKT, der im Forschungszentrum Jülich entwickelt wird, ist in Anlehnung an das Thermohydraulikprogramm DIREKT entstanden [Str88]. REKO-DIREKT berechnet das Betriebsverhalten eines katalytischen Rekombinators mit Katalysatorblechen. Ziel dieses Programmcodes ist es unter Verwendung aller relevanten Atmosphärenbedingungen am Einlass alle Vorgänge zu berechnen, die sich auf die Umgebung auswirken. So sind vor allem die Bedingungen wie Temperatur, Zusammensetzung und Volumenstrom des austretenden Gasgemisches von Interesse. Ebenso wird die Katalysatortemperatur explizit berechnet, wobei auch die Wärmestrahlung der Katalysatorbleche und die Gehäusetemperatur des Rekombinators berücksichtigt werden [ASS⁺10]. Das Programm wurde bereits im Rahmen mehrerer Arbeiten beschrieben, weiterentwickelt und optimiert (u.a. [RBDT] [Böh06] [Jüh07] [Sch11] [Kub13]).

Abbildung 2.6 zeigt ein Modell eines Rekombinators mit der Einteilung in die Reaktionszone, in der die Rekombinationsreaktion stattfindet und die Kamin-/Auslasszone, die zur Berechnung des Naturzugs durch das Gehäuse verwendet wird. Ebenso sind die Randbedingungen angegeben, die REKO-DIREKT für die Berechnung benötigt. Im Gegensatz zu den im vorigen Abschnitt erwähnten Modellen verwendet dieses Programm in der Reaktionszone nicht den Arrhenius-Ansatz einer Oberflächenreaktion. Vielmehr wird die Reaktionskinetik des Codes auf Grundlage des theoretischen Ansatzes einer diffusionskontrollierten Reaktion beschrieben. Daraus folgt, dass keine Einzelreaktionen berechnet werden, sondern dass der diffusive An- und Abtransport von Wasserstoff an die Katalysatoroberfläche den geschwindigkeitsbestimmenden Schritt darstellen. Dieser Ansatz wird in der Fachliteratur vorgeschlagen (z.B. [IP75]) und wurde bereits anhand expe-

2 Hintergrund

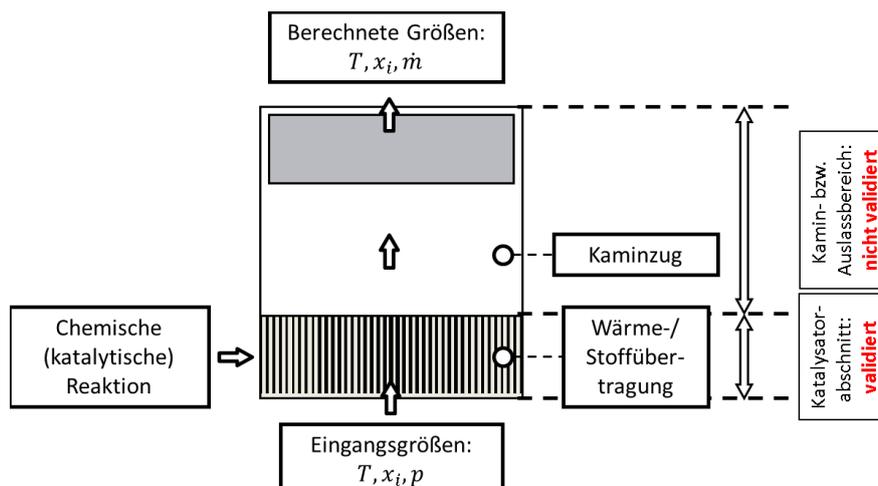


Abbildung 2.6: Modell eines katalytischen Rekombinators für REKO-DIREKT

rimenteller Ergebnisse für stationäre Untersuchungen bestätigt [Rei99]. Wenn hingegen aufgrund von niedrigen Reaktionstemperaturen die Rekombination oberflächenreaktionskontrolliert abläuft, ist es möglich durch die Verwendung eines vereinfachten Arrhenius-Ansatzes die Reaktionskinetik dementsprechend anzupassen [Sch11] [ASS⁺10]. Im Falle der diffusionskontrollierten Reaktion kann die katalytische Wasserstoffrekombination unter Berücksichtigung der Stoff- und Wärmeübertragungsvorgänge modelliert werden. Die Berechnung der Vorgänge im Katalysatoreinschub wurde anhand von Ergebnissen der Versuchsanlage REKO-3 validiert [Dri06]. Ein Vergleich zwischen berechneten und experimentellen Daten zeigt, dass das Programm die Messungen gut wiedergibt, wobei im niedrigen Geschwindigkeitsbereich noch Abweichungen auftreten [RBDT] [ASS⁺10]. Die Versuchsergebnisse wurden unter Zwangsbedingungen mit vorgegebenem Einlassmassenstrom erzielt.

Darauf aufbauend wurde ein Kaminmodell entwickelt, das den Massenstrom durch das Gehäuse aufgrund des Naturzugs berechnet, der maßgeblich vom Kamin beeinflusst wird [Jüh07] [Sch11] [ASS⁺10]. Dieses Modell konnte aber bisher nur unzureichend an experimentellen Daten entwickelt und validiert werden. So zeigten sich bei Nachrechnungen noch Differenzen zwischen den mit REKO-DIREKT berechneten und experimentellen Daten der THAI-Versuchsanlage [RSSA10]. Insbesondere bei Variation der Rekombinatorgeometrie und Umgebungsbedingungen wie z.B. unterschiedlichen Drücken zeigt das Kaminmodell bzw. der Programmcode REKO-DIREKT noch Abweichungen, die u.a. auf das Kaminmodell zurückzuführen sind.

2.2.2 Kaminmodell von REKO-DIREKT

Das in REKO-DIREKT implementierte Kaminmodell beruht auf der sogenannten Umlaufgleichung, die das dynamische Gleichgewicht zwischen Auftrieb und Widerstand be-

2 Hintergrund

schreibt (vgl. folgende Herleitung [Ung88] [Jüh07]). Sie wird auf Grundlage des Impulserhaltungssatzes für stationäre Strömungen hergeleitet. Abbildung 2.7 zeigt das Modell und die angreifenden Kräfte, die zur Bilanzierung einer zunächst reibungsfreien Strömung benötigt werden. Laut dem zweiten Newtonschen Gesetz ist die zeitliche Änderung

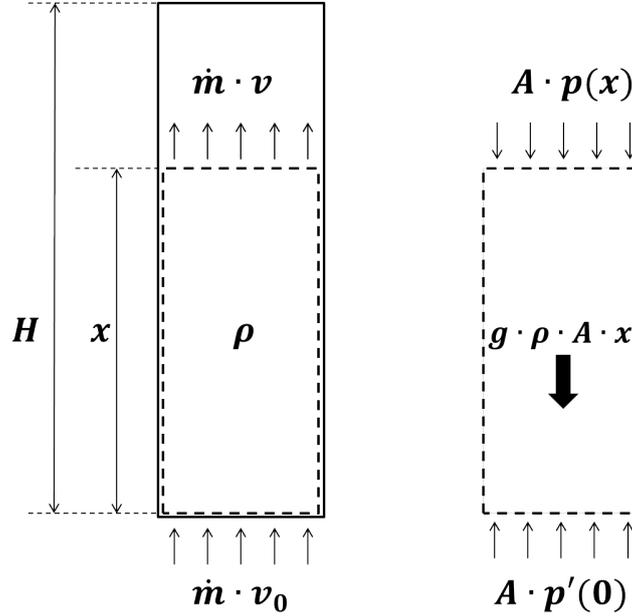


Abbildung 2.7: Modell und angreifende Kräfte zur Anwendung des Impulssatzes für eine reibungsfreie Strömung (vgl. [ASS⁺10])

des Impulses eines Systems $\frac{d\vec{I}}{dt}$ gleich der auf das System wirkenden äußeren Kräfte \vec{F}_{KV} . Für stationäre Strömungen ergibt sich somit

$$\frac{d\vec{I}}{dt} = \underbrace{\int_{KF} \rho \cdot \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA}_{\text{Nettoimpulsfluss durch die Kontrollfläche (KF)}} = \underbrace{\sum \vec{F}_{KV}}_{\substack{\text{Summe der auf das} \\ \text{Kontrollvolumen (KV)} \\ \text{einwirkenden äußeren Kräfte}}}, \quad (2.3)$$

wobei ρ die Dichte, \vec{v} die vektorielle Geschwindigkeit und \vec{n} der äußere Normalenvektor sind [Sch04]. Bezogen auf ein eindimensionales System, in dem nur die x-Komponente des Impulssatzes berücksichtigt wird, ergibt sich somit für das in Abbildung 2.7 beschriebene, reibungsfreie System:

$$\dot{m} - \dot{m}_0 = [p'(0) - p(x)] \cdot A - g \cdot \rho \cdot A \cdot x \quad (2.4)$$

Die reibungsfreie Umlaufgleichung vernachlässigt dabei sämtliche Druckverluste, die aufgrund von Ein- und Ausströmeffekten oder durch Reibungsverluste im Kamin hervorgerufen werden. Diese Verluste treten vor allem durch Schubspannungen auf, die an

2 Hintergrund

festen Rohrwänden am größten sind und die Strömung behindern. Zusätzlich treten an Einbauten und Hindernissen Sekundärströmungen und Strömungsablösungen auf, die ebenfalls als fluidmechanischer Energieverlust die ursprüngliche fluidmechanische Energie der Strömung vermindern [Tru96].

Infolgedessen wird Gleichung 2.4 dahingehend erweitert, dass auch Druck- bzw. Reibungsverluste der Strömung berücksichtigt werden (vgl. [Jüh07]). Hierzu wird der Druckverlustterm Δp_r eingeführt, der der Auftriebsströmung entgegenwirkt. ξ^* ist hierbei der dimensionslose Rohrverlustbeiwert, der unter Berücksichtigung des in der Literatur gebräuchlichen Rohrverlustbeiwerts ξ , der Rohrlänge H und des hydrodynamischen (oder gleichwertigen) Durchmessers d_h über

$$\xi^* = \xi \cdot \frac{H}{d_h} \quad (2.5)$$

berechnet werden kann. Des Weiteren hängt Δp_r von der mittleren Geschwindigkeit v_m ab und kann somit unter Verwendung von Gleichung 2.5 über

$$\Delta p_r = \xi^* \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_m^2 \quad (2.6)$$

$$= \xi \cdot \frac{H}{d_h} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_m^2 \quad (2.7)$$

mit

$$d_h = 4 \cdot \frac{A}{U} = 2 \cdot \frac{b \cdot z}{b + z} \quad (\text{für rechteckige Querschnitte}) \quad (2.8)$$

berechnet werden. Hierbei bezieht sich d_h auf die Querschnittsfläche A und den Umfang U eines rechteckigen Kanals mit den Seitenlängen b und z . Diese Annahme gilt für die vollausgebildete laminare Strömung durch ein Rohr und ist auch als Darcy-Weisbach-Gleichung bekannt [Tru96] [Wil00]. Durch Ersetzen der mittleren Fluidgeschwindigkeit v_m in Gleichung 2.7 durch

$$v_m = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A} \quad (2.9)$$

erhält man den Druckverlustterm

$$\Delta p_r = \xi \cdot \frac{H}{d_h} \cdot \frac{1}{2 \cdot \rho} \cdot \frac{\dot{m}^2}{A^2} \quad (2.10)$$

Somit ergibt sich aus Gleichung 2.4 und 2.6

$$\dot{m} - \dot{m}_0 = [p'(0) - p(x) - \Delta p_r] \cdot A - g \cdot \rho \cdot A \cdot x \quad (2.11)$$

gemäß dem Impulssatz für ein reibungsbehaftetes System. Der statische Druck $p'(0)$ am Kamineinlass folgt gemäß dem Satz von Bernoulli aus

$$p_0 = p'(0) + \frac{\rho_0}{2} \cdot v_0^2 \quad (2.12)$$

2 Hintergrund

Somit ergibt sich durch Einsetzen von Gleichung 2.12 in 2.11 über

$$p(x) = p_0 - \frac{\rho_0}{2} \cdot v_0^2 - g \cdot \rho \cdot x - \Delta p_r - \frac{\dot{m}}{A} \cdot (v - v_0) \quad (2.13)$$

der Druck in Abhängigkeit von der x-Richtung. Unter Berücksichtigung der Kontinuität

$$\dot{m} = v \cdot A \cdot \rho \quad (2.14)$$

sowohl für die Dichte ρ_0 als auch für ρ folgt daraus

$$p(x) = p_0 - g \cdot \rho \cdot x - \Delta p_r + \frac{\dot{m}^2}{A^2} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot \rho_0} - \frac{1}{\rho} \right). \quad (2.15)$$

Wird zusätzlich der Differenzdruck $\Delta p(x)$ zwischen dem Umgebungsdruck und dem Druck im Kamin über

$$\Delta p(x) = (p_0 - g \cdot \rho_0 \cdot x) - p(x) \quad (2.16)$$

definiert, führt dies zu

$$p(x) = g \cdot x \cdot (\rho - \rho_0) + \frac{\dot{m}^2}{A^2} \cdot \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{2 \cdot \rho_0} + \xi \cdot \frac{H}{d_h} \cdot \frac{1}{2 \cdot \rho} \right). \quad (2.17)$$

Bei der Durchströmung des Kamins wird davon ausgegangen, dass das Gas parallel zur Kaminwand nach oben strömt bzw. dementsprechend die Stromlinien parallel zur Kaminwand verlaufen. Unter der Annahme, dass der Druck orthogonal zu parallelen Stromlinien konstant ist, muss am Kaminauslass der Druck

$$p(x) = p(H) = p_0 - g \cdot \rho_0 \cdot H \quad (2.18)$$

sein bzw. deswegen die Druckdifferenz

$$\Delta p(x = H) = 0 \quad (2.19)$$

verschwinden. Mit dieser sogenannten Abströmbedingung lässt sich nun der Massenstrom \dot{m} über

$$\dot{m} = A \cdot \sqrt{\frac{g \cdot H \cdot (\rho_0 - \rho)}{\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{2 \cdot \rho_0} + \underbrace{\frac{\xi \cdot H}{2 \cdot d_h \cdot \rho}}_{\omega_r} \right)}} \quad (2.20)$$

bestimmen. Der Term ω_r in Gleichung 2.20 ist mit

$$\omega_r = \sum \omega_i = \omega_e + \omega_{Reibung} + \omega_a + \dots \quad (2.21)$$

in der Einheit

$$\omega_r, \omega_i = \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$$

2 Hintergrund

die Summe aller Druckverlustterme ω_i , die in der Umlaufgleichung auftreten und im Rahmen dieser Arbeit behandelt werden. Diese Definition unterscheidet sich leicht von den Definitionen in [Jüh07] oder [ASS⁺10], wo je nach Herleitung noch das quadratische Verhältnis zwischen dem Massenstrom \dot{m} und der Querschnittsfläche A mit einbezogen werden. Im Folgenden wird jedoch ausschließlich die getroffene Definition in Gleichung 2.20 bzw. 2.21 verwendet. Ferner folgt aus Gleichung 2.20 mit $\xi = 0$ der Massenstrom

$$\dot{m} = A \cdot \sqrt{\frac{g \cdot H \cdot (\rho_0 - \rho)}{\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{2 \cdot \rho_0}\right)}} \quad (2.22)$$

für eine reibungsfreie Kaminströmung. Auch wenn der reibungsbehaftete Fall in dieser Arbeit von primärer Bedeutung ist, wird Gleichung 2.22 im Rahmen der Ergebnisinterpretation in Kapitel 5.1.6 verwendet.

Mit Hinblick auf die Strömungseigenschaften im Rekombinator sind zwischen den Blechen laminare Strömungen zu erwarten [Böh06], so dass die oben getroffene Annahme bzgl. einer vollausgebildeten laminaren Strömung erfüllt wird. Dahingegen ist im Kamin ein Übergang zur turbulenten Strömung möglich, da der hydrodynamische Durchmesser größer ist. Als Richtwert kann davon ausgegangen werden, dass ab einer Reynolds-Zahl

$$Re_{krit} = \frac{\rho \cdot v_m \cdot d_h}{\eta} > 2300 \quad [\text{Ung88}] \quad (2.23)$$

die Strömung turbulent wird, wobei eine eindeutige Grenze nicht angegeben werden kann (vgl. zum Beispiel Grenzwerte: $Re > 2320$ [Tru96] [BG01], $Re > 4000$ (turbulent) mit $2100 > Re > 4000$ (transitioneller Bereich) [Sch04]).

Der Reibungsbeiwert kann nach [VDI06] für eine ausgebildete laminare Strömung in einem Kreisrohr über

$$\xi_{lam,k} = \frac{64}{Re} \quad (2.24)$$

berechnet werden. Die geforderten Annahmen bzgl. der Rauigkeit sind für den gesamten Rekombinator erfüllt. Um aus dem Reibungsbeiwert für kreisförmige Querschnitte auf rechteckige Querschnitte schließen zu können, wird eine Korrekturfunktion $\varphi(S)$ auf Grundlage von [VDI06] hergeleitet [Jüh07]. Diese Funktion liefert in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses $S = b/z$ des Rechteckquerschnitts den Korrekturfaktor $\varphi(S)$ für

$$\xi_{lam} = \varphi \cdot \xi_{lam,k} = \varphi \cdot \frac{64}{Re} \quad (2.25)$$

mit

$$\varphi(S) = -0,7604 \cdot S^3 + 2,025 \cdot S^2 - 1,8746 \cdot S + 1,5 \quad (2.26)$$

Für den Fall einer turbulenten Strömung mit $Re < 100.000$ kann der Reibungsbeiwert ξ_{turb} über

$$\xi_{turb} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (2.27)$$

2 Hintergrund

berechnet werden, wobei zwar geringe Abweichungen in Bezug auf Rauigkeitsannahmen auftreten, die in Bezug auf die Ergebnisse jedoch marginal sind [VDI06] [ASS⁺10]. Ebenso muss mit einer zusätzlichen Rauigkeit zwischen den Rekombinatorblechen gerechnet werden. Da das Strömungsregime aber mit großen Unsicherheiten behaftet ist, wird der Reibungsbeiwert $\xi_{turb,rauh}$ unter der Annahme einer vollständig ausgebildeten Strömung über

$$\xi_{turb,rauh} = \left(2 \cdot \lg \left(\frac{d_h}{K} \right) + 1, 14 \right)^{-2} \quad (2.28)$$

angenommen [VDI06]. Hierbei ist zu beachten, dass der berechnete Reibungsbeiwert pro Spalt zwischen zwei Blechen definiert ist und dementsprechend bei mehreren Blechen mit der Spaltanzahl multipliziert werden muss. Der Druckverlust erweitert sich so nach Gleichung 2.10 zu

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{H}{d_h} \cdot \frac{1}{2 \cdot \rho} \cdot \frac{\dot{m}^2}{A^2} \cdot N^2, \quad (2.29)$$

wobei N^2 das Quadrat der Spaltanzahl zwischen den Rekombinatorblechen darstellt.

Der Druckverlust am Auslass wird dabei mit $\xi_a = 3$ angenommen, da die Austrittsfläche der Querschnittsfläche des Kamins entspricht [Ide08]. Eine Diskussion dieser Reibungsbeiwerte folgt in Abschnitt 6.1. Die Umlaufgleichung 2.20 mit den Druckverlusttermen gemäß Gleichung 2.21 und den Annahmen bzgl. der Reibungskoeffizienten für den laminaren und turbulenten Bereich kann nun dazu verwendet werden, den Massenstrom durch das Rekombinatorgehäuse zu berechnen.

2.2.3 Abwärtsgerichtete Strömungen im Sicherheitsbehälter

Im Sicherheitsbehälter bzw. Containment werden bei einem Kühlmittelverluststörfall große Mengen an heißem Dampf und Wasserstoff aus dem Primärkreislauf freigesetzt werden. Aufgrund der hohen Temperatur- bzw. Dichteunterschiede steigt dieses Gemisch zunächst aufwärts an die Decke, von wo es durch Abkühlung an den kalten Innenwänden abwärts strömt. Art und Ausprägung dieser Strömung hängen dabei stark vom Leckageort und den Einbauten ab, die die Strömungsrichtung des Gemisches beeinflussen [RRB⁺00]. Computersimulationen mit dem Code GASFLOW zur Berechnung von Containmentströmungen ergaben Geschwindigkeiten von üblicherweise unter 1 m/s ([Häf12], vgl. [RRB⁺00]). Abbildung 2.8 zeigt die Strömungsverläufe einer solchen Rechnung zu einem festen Zeitpunkt innerhalb des Sicherheitsbehälters. Hieraus ist zu erkennen, dass gerade in wandnahen Bereichen die Strömung abwärts gerichtet sein kann (Abbildung 2.8: rechte, senkrechte Wand der Stahlhülle).

Aufgrund dieser Strömung kann nicht ausgeschlossen werden, dass ein katalytischer Rekombinator, der wandnah im Bereich einer auftretenden Abwärtsströmung positioniert ist, in seinem Start- oder Betriebsverhalten beeinflusst wird. Abbildung 2.9 verdeutlicht dies anhand einer schematischen Darstellung. Hierbei wird nicht mehr davon

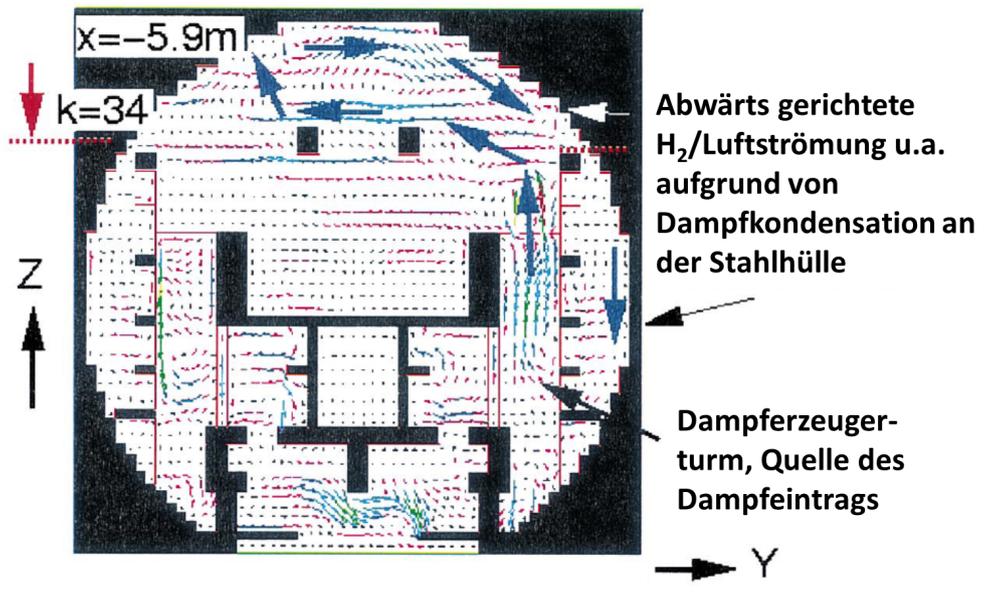


Abbildung 2.8: Berechnung eines Strömungsverlaufes mit GASFLOW im Sicherheitsbehälter [RRB⁺00]

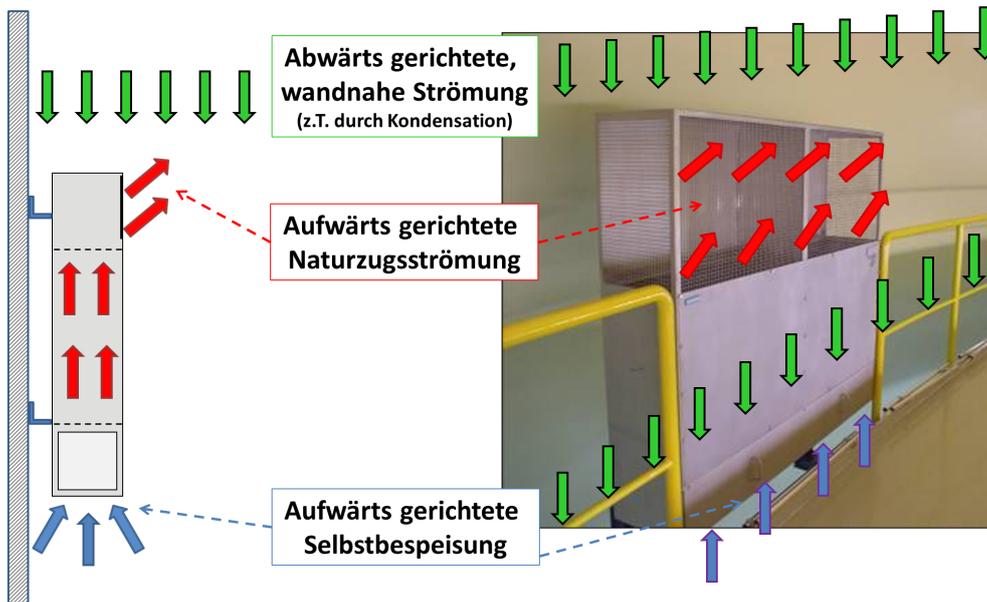


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung des Einflusses einer Gegenströmung auf die Wirkungsweise eines Rekombinators

2 Hintergrund

ausgegangen, dass sich der Rekombinator zu Beginn in einer nahezu ruhenden Umgebung, sondern durch von außen aufgeprägte Strömungsbedingungen in einer Abwärtsströmung befindet. Insbesondere am Einlass und Auslass des Rekombinators herrschen u.U. entgegengesetzte Strömungen (siehe Abb. 2.9). Infolgedessen kann z.B. nicht ausgeschlossen werden, dass das rekombinierte Gas ohne Beeinträchtigung durch den Auslass des Rekombinators strömen kann. Ebenso ist eine dem thermischen Auftrieb entgegengesetzte Durchströmung des Rekombinatorgehäuses von oben nach unten nicht auszuschließen. Gerade in der Startphase, in der die Katalysatorblechtemperaturen und somit der Naturzug durch den Rekombinator noch nicht ausgebildet sind, ist es denkbar, dass der Rekombinator nicht genügend Auftrieb im Katalysatoreinschub und -kamin erzeugen kann, um sich gegen die abwärts gerichtete Strömung durchzusetzen.

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

Der Versuchsstand REKO-4 wird im Wasserstofflabor des Forschungszentrums Jülich betrieben, um das Betriebsverhalten katalytischer Rekombinatoren an kleinskaligen Modellen unter Naturkonvektionsbedingungen untersuchen zu können. Die Ergebnisse der Validierung des Störfallcodes REKO-DIREKT. Dabei schließt der Versuchsstand REKO-4 die Diskrepanz zwischen Integralexperimenten und Detailexperimenten, da die verwendete Messtechnik zum einen eine präzise Untersuchung der Vorgänge am Rekombinatormodell ermöglicht, zum anderen der Einfluss der Wasserstoffrekombination auf die umgebende Behälteratmosphäre untersucht werden kann, ohne jedoch das Containment eines Kernkraftwerks maßstäblich abbilden zu wollen [ASS⁺10].

Im Folgenden wird zuerst der Aufbau des Versuchsstands REKO-4 erklärt. Daran anschließend wird die Messtechnik beschrieben und die Positionierung im Versuchsbehälter erläutert. Hierbei wird insbesondere auf die Verwendung von Katharometern zur Wasserstoffkonzentrationsmessung und auf Particle-Image-Velocimetry (PIV) als optische Strömungsmesstechnik eingegangen. Danach werden der Aufbau, die Instrumentierung und die Positionierung eines kleinskaligen Rekombinatormodells erläutert, an dem die Untersuchungen zur Wasserstoffrekombination durchgeführt werden. Das Kapitel schließt mit einer Fehlerbetrachtung der im Versuchsstand eingesetzten Messtechnik, um die Messgenauigkeit der Untersuchungen abschätzen zu können.

3.1 Aufbau des Druckbehälters REKO-4

Der Versuchsstand REKO-4 besteht aus einem zylindrischen, druckdichten Stahlbehälter mit einem Leervolumen V_{LV} von ca. $5,33 \text{ m}^3$, der Experimente mit zündfähigen Wasserstoff/Luft-Gemischen ermöglicht. Abbildung 3.1 zeigt eine Konstruktionszeichnung mit Bezeichnung der Flansche und Abbildung 3.2 (links) ein Foto des noch unbestückten Versuchsbehälters. Die Betriebsdaten des Behälters sind in Tabelle 3.1 angegeben.

Neben dem tatsächlichen Leervolumen ist auch das freie Volumen V_{FV} mit $5,317 \text{ m}^3$ angegeben, das die innerhalb des Behälters positionierten Einbauten berücksichtigt. Hierunter fallen u.a. das Rekombinatormodell, die Messtechnik inklusive Sensoren, Anschlusskabel, Kupplungen und Konstruktionselemente innerhalb des Behälters wie z.B. Gestänge, Trittgitter und die Einlassrohre [Häf12].

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

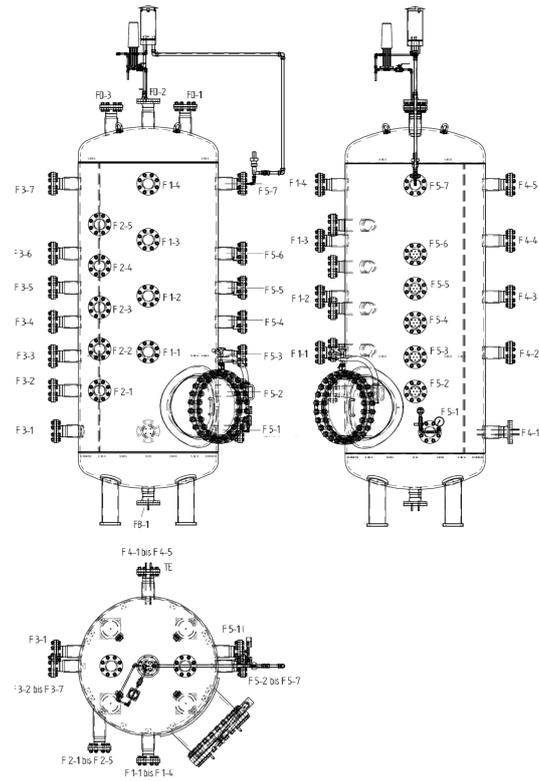


Abbildung 3.1: Konstruktionszeichnung des Druckbehälters von REKO-4



(a) Rohbehälter ohne Anbauten



(b) Behälter mit Edelstahlverkleidung

Abbildung 3.2: Fotos des Versuchsbehälters REKO-4

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

Auslegungsvolumen V_{AV}	5450 dm ³ $\hat{=}$ 5,45 m ³
Tatsächliches Leervolumen V_{LV}	5330,2 dm ³ $\hat{=}$ 5,330 m ³
Einbauten	13,2 dm ³ $\hat{=}$ 0,013 m ³
Freies Volumen V_{FV}	5317,0 dm ³ $\hat{=}$ 5,317 m ³
Innenhöhe ohne Fuß und Flansch	3742 mm
Innendurchmesser ohne Fuß und Flansch	1400 mm
Wandstärke des Behälters	20 mm
Anzahl der Flansche	32
Innendurchmesser eines Flansches	105 mm
Innendurchmesser des Mannlochs	594 mm
Auslegungsdruck	25 bar
Abblasedruck über Berstscheibe	23 bar
Zulässiger Betriebsdruck	2,0 bar
Automatischer Druckabbau über Sicherheitsventil	2,3 bar
Auslegungstemperatur des Behälters	280 °C
Maximale H ₂ -Konzentration über den gesamten Behälter	6 Vol.-% H ₂

Tabelle 3.1: Daten des Versuchsbehälters REKO-4 [Sim09] [Häf12]

Auf der äußeren Behälterwand ist eine Heizung mit einer maximalen Leistung von 29 kW montiert, die mit 200 mm Dämmung aus Glaswolle umgeben ist. Die Heizung inklusive Dämmmaterial ist zusätzlich mit einer Blechhülle aus Edelstahl verkleidet, die die äußere bzw. sichtbare Schicht des Versuchsbehälters darstellt (Abbildung 3.2). Die Heizung wird im Rahmen dieser Arbeit nicht benötigt. Dennoch ist sie fest am Behälter installiert, so dass sie den Wärmeübergang zwischen Behälter und Luft maßgeblich beeinflusst und somit z.B. bei späteren Nachrechnungen der durchgeführten Experimente im Versuchsstand REKO-4 berücksichtigt werden muss.

Während der Versuche liegen verschiedene Gase bzw. Stoffe in z.T. unterschiedlichen Aggregatzuständen (flüssig/gasförmig) und Konzentrationen im Behälter vor. Diese sind entweder schon zu Beginn eines Versuches im Behälter vorhanden (wie z.B. Luft), werden während der Versuchsdurchführung eingespeist (z.B. Wasserstoff) oder entstehen aufgrund der Rekombinationsreaktion (z.B. Wasser). Die nachfolgende Aufzählung gibt einen Überblick über alle Stoffe, die im Behälter während eines Versuches vorhanden sein können.

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

Stickstoff liegt in der Behälteratmosphäre als Bestandteil der Luft vor. Die absolute Menge ist während der gesamten Versuchsdurchführung konstant, da angenommen werden kann, dass keine Reaktion von Stickstoff mit Sauerstoff oder Wasserstoff innerhalb des Behälters stattfindet. Ebenso kann aus Sicherheitsgründen Stickstoff als Inertgas aus Flaschen in den Behälter eingespeist werden.

Sauerstoff liegt in der Behälteratmosphäre ebenso wie Stickstoff als Bestandteil der Luft vor. Die Menge an molekular vorhandenem Sauerstoff nimmt durch die Rekombinationsreaktion mit Wasserstoff während des Versuchsverlaufs ab.

Wasserstoff wird während der Versuche diskontinuierlich über einen Massendurchflussregler in den Behälter eingespeist. Die Wasserstoffkonzentration sinkt durch die Rekombination mit Sauerstoff zu Wasserdampf.

Wasser bzw. Wasserdampf liegt zu Beginn eines Versuches nur in vergleichsweise geringen Mengen gasförmig in der Atmosphärenluft vor. Üblicherweise liegt die relative Feuchtigkeit bei unter 10 %, wenn der Behälter mit getrockneter Druckluft gespült worden ist. Die Feuchtigkeit steigt mit zunehmender Versuchsdauer an, da durch die katalytische Reaktion Wasser entsteht. Mit Erreichen des Sättigungszustands kann Wasser im Behälter kondensieren. Dies zeigt sich zumeist in Form von Tröpfchenbildung an der inneren Behälterwand oder spiegelt sich in Form von beschlagenen Glasflanschen wider. Für die Messung mit PIV folgen hieraus besondere Maßnahmen, um trotzdem mit den optischen Komponenten arbeiten zu können. Dies wird in den Abschnitten 3.4.1 und 3.5.3 genauer erläutert.

DEHS-Partikel sind für die Messung mit PIV notwendig und werden sowohl zu Beginn als auch während der Versuche diskontinuierlich in den Behälter eingespeist.

Die Einspeisung von Gasen bzw. Aerosolen (Luft, H₂, N₂, DEHS) in den Behälter erfolgt über vier Rohrleitungen im Flansch 4-1. Diese Leitungen bestehen aus Edelstahl mit einem Innendurchmesser von 10 mm und ragen 20 mm in den Behälter hinein. Jedes Rohr verfügt dabei über einen manuell zu bedienenden Absperrhahn und über eine Rückschlagsperre im Fall einer Zündung innerhalb des Behälters. Im Falle eines unvorhergesehenen Ereignisses, wie z.B. Stromausfall im Wasserstofflabor, soll die Anlage automatisch in einen sicheren Zustand übergehen. Dafür sind am Druckluft- und Stickstoffanschluss Magnetventile „stromlos offen“ installiert, die bei Störung automatisch öffnen und die Anlage spülen. Die Handventile sind während eines Versuchs geöffnet, so dass die Gase nur durch das Magnetventil zurückgehalten werden. Wasserstoff verfügt über ein Magnetventil mit der Eigenschaft „stromlos geschlossen“, so dass die Wasserstoffeinspeisung sofort unterbrochen wird. Druckluft und Stickstoff werden über einen manuell zu variierenden Überdruck in den Behälter eingebracht, wobei die Menge nicht gemessen wird. Wasserstoff wird mit einem Massendurchflussregler eingeleitet, der die Einspeisung genau definierter Mengen ermöglicht und über die Anlagensteuerung geregelt wird.

Zusätzlich sind sowohl im Boden- als auch im Deckenbereich Handventile vorhanden, die das Spülen des Behälters ermöglichen. Durch Einleitung von Druckluft in den Ver-

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

suchsstand und Öffnen des oberen Auslasses wird die Behälteratmosphäre durch die Decke in die Umgebung abgegeben. Zudem sind im oberen Bereich über separate Auslassrohre sowohl ein Sicherheitsventil als auch eine Berstscheibe installiert, die den Behälter vor dem Überschreiten des Auslegungsdruckes schützen. Im Falle einer Zündung des Wasserstoff/Luft-Gemisches innerhalb des Behälters wird von einer dynamischen Druckbelastung p_{dyn} ausgegangen, die maßgeblich vom Ausgangsdruck p_0 über

$$p_{dyn} = 10 \cdot p_0 \quad (3.1)$$

bestimmt wird [SH05]. Das Sicherheitsventil öffnet bei einem Absolutdruck von 2,3 bar, so dass im Fall einer Zündung mit einer dynamischen Druckbelastung von maximal 23 bar gerechnet werden muss, die unter dem Auslegungsdruck von 25 bar liegt. Aus Sicherheitsgründen wird zudem eine Berstscheibe mit einem Ansprechdruck von 23 bar installiert, um eine zusätzliche Druckgrenze vor Erreichen des Auslegungsdruckes zu errichten und somit die Integrität des Behälters zusätzlich zu schützen.

3.2 Konventionelle Messtechnik

Im Versuchsstand REKO-4 kommt zur Messung der Temperaturen, des Druckes und der Feuchtigkeit konventionelle Messtechnik zum Einsatz. Diese bestehen zwar aus erprobten Messsystemen, die jedoch z.T. gesonderten Anforderungen bzgl. Installation und Betrieb im Versuchsbehälter unterworfen sind.

3.2.1 Temperaturmessung

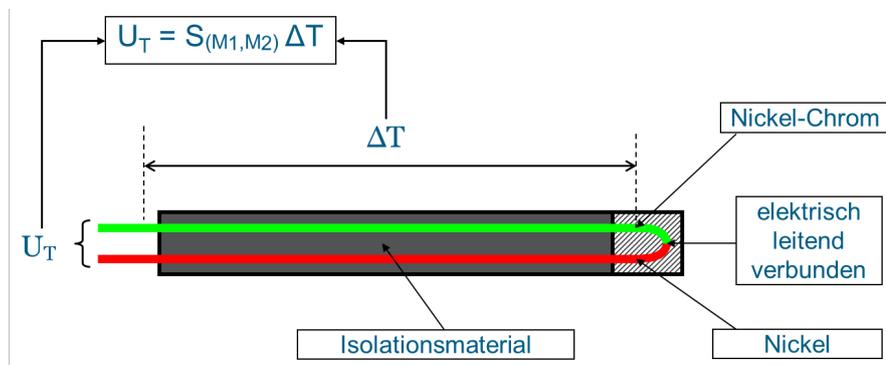
Innerhalb des Behälters treten aufgrund der exothermen Rekombinationsreaktion von Wasserstoff mit Luftsauerstoff ($H_2 + \frac{1}{2} \cdot O_2 \Rightarrow H_2O$) hohe Temperaturen im Bereich der Katalysatorbleche auf, die sich aufgrund von Strahlung- und Strömungseffekten auf die Gas- und Wandtemperaturen im gesamten Versuchsbehälter auswirken. Daher ist der Versuchsstand mit zahlreichen Temperaturmessstellen ausgerüstet.

Für die Temperaturmessung werden ausschließlich Berührungsthermometer verwendet. Für die Messung der Gastemperaturen und der Temperaturen von Wand-/Gehäuse- und Katalysatorblechen kommen Thermoelemente des Typs K (Thermoelementpaarung Nickel/Chrom-Nickel, Klasse 1) zum Einsatz, die auf dem thermoelektrischen Effekt (oder Seebeck-Effekt) beruhen. Hierbei muss ein guter thermischer Kontakt zwischen Sensor und dem Medium vorhanden sein, um Messfehler zu vermeiden. Zusätzlich zu Thermoelementen (oder TE-Sensoren) werden Widerstandsthermometer (Pt-100-Elemente/Pt-1000-Elemente) verwendet. Sie ermöglichen aus der Messung des elektrischen, temperaturabhängigen Widerstands eines Pt-100-Elements (respektive Pt-1000-Elements) die Berechnung der Temperatur am Widerstand. Widerstandsthermometer werden jedoch nur in Verbindung mit anderen Messsensoren verwendet. So werden Pt-100-Elemente in Verbindung mit Katharometern zur Wasserstoffkonzentrationsmessung

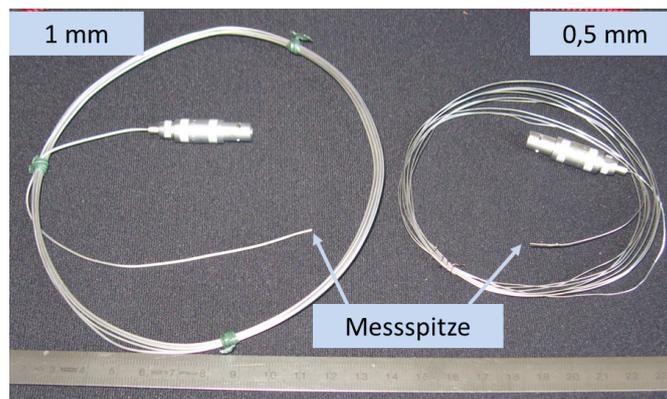
3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

verwendet, um den Temperatureinfluss minimieren zu können (siehe Abschnitt 10.2). Diese besitzen aber bautechnisch bedingt eine relativ hohe Trägheit, so dass sie zur Gastemperaturmessung nur bedingt geeignet sind. Ebenso werden Pt-1000-Elemente in Verbindung mit der Feuchtigkeitsmessung verwendet, um aus der relativen Feuchtigkeit die absolute Feuchtigkeit bestimmen zu können. Sie werden vom Hersteller funktionsfertig geliefert, so dass keine weiteren Maßnahmen unternommen werden müssen und als diversitäre Messtechnik neben den Thermoelementen verwendet werden können. Eine Fehlerbetrachtung aller im Versuchsstand REKO-4 verwendeten Berührungsthermometer erfolgt in Abschnitt 3.7.

Die verwendeten Thermoelemente arbeiten in einem Messbereich von -200 °C bis 1372 °C [Kle10]. Sie haben in Abhängigkeit des Verwendungszwecks unterschiedliche Durchmesser von $0,5\text{ mm}$ oder $1,0\text{ mm}$. Abbildung 3.3 zeigt zum einen den schematischen Aufbau eines Nickel/Chrom-Nickel-Thermoelements und zum anderen eine Fotografie zweier TE-Sensoren unterschiedlicher Größe. Die Thermoelemente mit einem



(a) Schematische Darstellung eines Thermoelements



(b) Foto zweier Thermoelemente unterschiedlicher Größe

Abbildung 3.3: Verwendete Thermoelemente im Versuchsstand REKO-4 [Sim09]

Durchmesser von 1 mm werden hauptsächlich für die Messung der Gastemperaturen in

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

unterschiedlichen Höhen des Versuchsbehälters REKO-4 verwendet. Zusätzlich kommen sie dort zur Messung der Gehäusetemperaturen am Rekombinatormodell zum Einsatz, wo durch häufige Umbaumaßnahmen eine höhere Festigkeit gefordert ist. Im Gegensatz dazu werden die Thermoelemente mit einem Durchmesser von 0,5 mm an den Positionen eingesetzt, wo entweder wenig Platz für die Sensoren vorhanden ist (z.B. in den Katalysatorblechen oder im Kaminaufbau, siehe Abschnitt 3.6) oder für die Instrumentierung der Wandtemperaturen, die für die gesamte Versuchsdurchführung nicht geändert werden. Eine Beschreibung der Messpositionen erfolgt in Abschnitt 3.5.1. Thermoelemente zur Messung von Wandtemperaturen (Rekombinatormodell, Behälterwand etc.) werden an die entsprechende Stelle gelegt und an der Sensorspitze mit Wärmeleitkleber an der Wand befestigt. Die Wärmeleitpaste besitzt hierbei eine relativ hohe Wärmeleitfähigkeit ($\lambda_{WLK} > 7,5 \text{ W/mK}$), um die thermische Leitfähigkeit zwischen Wand und Sensor zu optimieren und Messfehler zu reduzieren.

3.2.2 Druckmessung

Der Innendruck des Versuchsbehälters wird mit einem Digital-Manometer gemessen. Ein Analog-Manometer mit eigener Anzeige ermöglicht zudem die strom-unabhängige Überwachung des Behälterdrucks. Das Digital-Manometer MAN-LD3S der Firma Koblold ist am Flansch 5-2 installiert und verfügt über einen Messbereich von 0 - 2,5 bar Überdruck. Es misst den Differenzdruck zwischen Behälter und Umgebung und ist mit dem Behälterinnenraum über einen Druckbegrenzer verbunden, der das Manometer vor Drücken von mehr als 2,5 bar schützt. Die zulässige Temperatur der Behälteratmosphäre liegt im Bereich von -30 bis $+85$ °C, während die maximale Umgebungstemperatur des Manometers auf $+60$ °C begrenzt ist [Kob06]. Dabei werden Druckunterschiede bis in den mbar-Bereich genau angezeigt. Das Manometer wird neben der versuchsbegleitenden Messung zusätzlich dazu verwendet, die Dichtigkeit des Behälters bei Drucktests anzuzeigen. Eine Fehlerbetrachtung für das Digital-Manometer erfolgt in Abschnitt 3.7.3.

3.2.3 Feuchtemessung

Die Rekombinationsreaktion $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \Rightarrow H_2O^D$ führt zu einem steigenden Wasserdampfanteil im Versuchsbehälter, dessen Partialdruck bei entsprechend hoher Umsatzrate über den Sättigungsdruck der Atmosphäre steigen kann. Daher werden zur Bestimmung der relativen bzw. absoluten Feuchte im oberen und unteren Bereich des Behälters insgesamt zwei Feuchtigkeitssensoren installiert, die im Rahmen einer vorangegangenen Arbeit ausgewählt und qualifiziert wurden [Kla11]. Die Auswahl zog dabei die zu erwartenden Umgebungsbedingungen während der Versuche innerhalb des Versuchsbehälters in Betracht, aus denen sich Anforderungen für die Messtechnik ableiten. Zum einen wird ein robustes Messsystem benötigt, das über einen weiten Temperatur- und Feuchtebereich bis zur Hochfeuchte präzise misst und nicht durch Verunreinigungen wie z.B. Tracer-Partikel aus DEHS verunreinigt wird (siehe optische Strömungsmesstechnik PIV Kap. 3.4). Zum anderen sollen jedoch die Einbaugröße und damit die Störung von

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

Strömungseffekten möglichst gering bzw. der Anschluss mit geeigneten Flanschdurchführungen für die Messsignale gewährleistet sein, um die Integrität des Druckbehälters sicherzustellen. Zudem sollen die Messsignale mit einem 4-20 mA-Signal in die bereits bestehenden Anlagensteuerung DeltaV integriert werden.

Im Rahmen der Sensorqualifizierung wurde ein kapazitives Feuchtemesssystem bestehend aus zwei Sensoreinheiten (beheizter Feuchtefühler und Pt-1000-Temperatursensor, „testo 6614“) gewählt, das auch die Messung unter Atmosphärenbedingungen nahe der Sättigungsgrenze ermöglicht (relative Luftfeuchte $\approx 100\%$) [Kla11]. Hierzu wird durch eine Beheizung des Fühlers die relative Feuchte künstlich herabgesetzt und anschließend durch die Messung mit dem räumlich getrennten Pt-1000-Element auf die tatsächliche Temperatur korrigiert. Abbildung 3.4 zeigt die beiden Messsonden sowohl im freien als auch im eingebauten Zustand und den dazugehörigen Messumformer. Die Länge

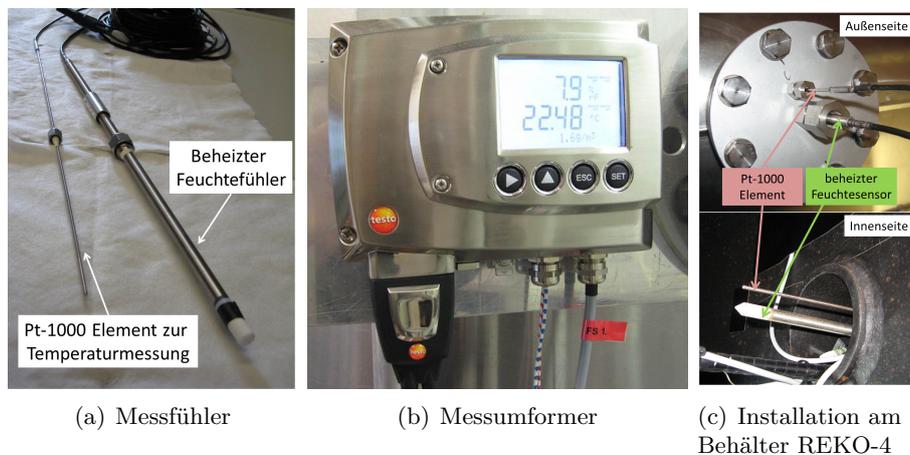


Abbildung 3.4: Feuchtefühler (testo 6614) mit zwei Sensoren und Messumformer (testo 6681)

der Sensoren beträgt dabei 500 mm, damit sie im eingebauten Zustand die Länge des Flanschzugangs überbrücken und bis in die Behälteratmosphäre reichen. Der Temperaturmessbereich liegt zwischen -40 °C bis $+180\text{ °C}$. Die Berechnung und Übertragung der Messwerte erfolgt in dem zum Messsystem gehörenden Messumformer *Testo 6681* mit digitaler Anzeige und einer Auflösung von $0,1\text{ \% rH}$ bzw. $0,1\text{ °C}$ [Tes09]. Die Messung der Temperatur erfolgt somit ebenfalls über die eigene Verstärkerschaltung und ist unabhängig von den Messumformern der Anlagensteuerung. Letztere verarbeitet und speichert die Daten unverändert (Feuchtigkeit und Temperatur) und stellt zudem die Spannungsversorgung vor das Messsystem zu Verfügung. Dieses ermöglicht dabei die Messung der folgenden Größen:

Absolute Feuchte Die absolute Feuchte ist die Dichte ρ_w des Wasserdampfs in der Luft in g/m^3 [Luc04].

Relative Feuchte Die relative Feuchte ist das Verhältnis der absoluten Feuchte zur ab-

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

soluten Feuchte bei Sättigung $\varphi = \frac{\rho_w}{\rho_{sw}}$ in % [Luc04].

Temperatur Die Temperatur in °C, die zur Korrektur der Messung des beheizten Sensors benötigt wird und eine Umrechnung der relativen Feuchte in die absolute Feuchte ermöglicht.

Die Qualifizierung des Sensors konnte die Herstellerangaben zur Unempfindlichkeit und zur Reaktionszeit uneingeschränkt bestätigen. Ebenso weist der Sensor keine Querempfindlichkeit gegenüber unterschiedlichen Wasserstoffkonzentrationen auf. Darüber hinaus zeigten sich eine hohe Reproduzierbarkeit der Messwerte und ein stabiles Verhalten selbst bei kondensierenden Atmosphärenbedingungen. Einzig der Einfluss von Wärmestrahlung auf die Temperaturmessung des Sensors führte zu einer Messwertabweichung in Bezug auf die relative Feuchte [Kla11]. Eine Abschätzung dieses Messfehlers erfolgt in Abschnitt 3.7.2.

3.3 Sensoren zur Wasserstoffkonzentrationsmessung

Aufgrund von lokalen Konzentrationsunterschieden im Versuchsbehälter, die sich z.B. durch die Einspeisung, den Abbau von Wasserstoff und durch verschiedene Strömungs- und Diffusionseffekte sowohl örtlich als auch zeitlich unterscheiden, ist die Messung der H₂-Konzentration an mehreren Positionen erforderlich. Daher werden im Rahmen dieser Arbeit Wärmeleitfähigkeitssensoren bzw. Katharometer zur in-situ Messung im Versuchsstand REKO-4 eingesetzt.

3.3.1 Prinzip von Wärmeleitfähigkeitssensoren

Wärmeleitfähigkeitssensoren ermöglichen eine Messung der Änderung der Wärmeleitfähigkeit λ von Gasgemischen mit variierender Gaszusammensetzung. Zur Wärmeleitfähigkeitsmessung wird eine Temperaturerhöhung über einen Heizwiderstand herbeigeführt. Mit Hilfe einer Temperaturdifferenzmessung auf dem Sensorkopf kann auf die Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gasgemischen bzw. über eine Kalibrierkurve deren Differenz zu Gasgemischen mit bekannter Wärmeleitfähigkeit berechnet werden. Wenn angenommen werden kann, dass sich nur ein Bestandteil des Gases ändert, kann aus der Änderung der Wärmeleitfähigkeit des Gasgemisches auf die Konzentrationsänderung geschlossen werden. Dies ist aber nur dann mit guter Genauigkeit möglich, wenn das in seiner Konzentration variierende Gas eine vom übrigen Gasgemisch stark abweichende Wärmeleitfähigkeit besitzt. Die Wärmeleitfähigkeiten der Komponenten Stickstoff, Sauerstoff, und Wasserdampf liegen hierbei relativ dicht beieinander, wobei λ_{H_2} eine um den Faktor 7 höhere Wärmeleitfähigkeit als O₂ und N₂ besitzt bzw. um den Faktor 10 in Bezug auf Wasserdampf. Die Wärmeleitfähigkeit eines Gemisches λ_{gem} aus mehreren

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

Komponenten wird mit der Mischungsregel von Wassiljeva, Mason und Saxena über

$$\lambda_{gem} = \frac{\sum x_i \cdot \lambda_i}{\sum x_j \cdot F_{ij}} \quad (3.2)$$

mit

$$F_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_j}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{M_j}{M_i}\right)^{\frac{1}{4}}\right]^2}{\sqrt{\left[8 \cdot \left(1 + \frac{M_i}{M_j}\right)\right]}} \quad (3.3)$$

berechnet [VDI06].

Hierbei bezeichnet $\lambda_{i,j}$ die Wärmeleitfähigkeit, $\eta_{i,j}$ die dynamische Viskosität und $M_{i,j}$ die molare Masse der jeweiligen Komponente, die z.T. noch abhängig von der Temperatur und dem vorherrschenden Druck sind. Unter Verwendung der Stoffdaten aus Tabelle 3.2 kann somit die Wärmeleitfähigkeit eines Gemisches bei unterschiedlichen Konzentrationen der einzelnen Komponenten berechnet werden.

Stoffgröße	Komponente	Wert
Molare Masse	M_{Luft}	28,96 g/mol
	M_{H_2}	2,02 g/mol
Dynamische Viskosität	η_{Luft}	18,6 μ Pas
	η_{H_2}	8,9 μ Pas
Wärmeleitfähigkeit	λ_{Luft}	0,0261 W/mK
	λ_{H_2}	0,1807 W/mK

Tabelle 3.2: Stoffwerte zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit von unterschiedlichen H₂/Luft-Gemischen bei T = 25 °C= 298 K, p_{Umg} = 1 bar

Diese Berechnung ist in Tabelle 3.3 für ein Gemisch aus Luft und Wasserstoff mit verschiedenen Konzentrationen ebenfalls bei einer Temperatur von 25 °C bzw. 298 K und einem Umgebungsdruck von 1 bar unter Verwendung von Gleichung 3.2- 3.3 durchgeführt worden.

Hieraus wird ersichtlich, dass bereits eine Konzentrationserhöhung um 2 Vol.-% H₂ zu einem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit des Gemisches von 5,7 % führt. Somit bewirkt schon eine geringe Änderung der Wasserstoffkonzentration eine relativ große Änderung der Wärmeleitfähigkeit des Gasgemisches, die von den Wärmeleitfähigkeitssensoren registriert werden kann. Daher ist mit Katharometern eine Messung der Wasserstoffkonzentration in einem Luftgemisch mit für die Versuche hinreichender Genauigkeit möglich.

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

H₂-Konzentration	Wärmeleitfähigkeit λ_{Gem}
0 Vol.-%	0,0261 W/mK
1 Vol.-%	0,0269 W/mK
2 Vol.-%	0,0276 W/mK
4 Vol.-%	0,0292 W/mK
6 Vol.-%	0,0308 W/mK

Tabelle 3.3: Wärmeleitfähigkeit von unterschiedlichen H₂/Luft-Gemischen bei T = 25 °C = 298 K, p_U = 1 bar

In vorangegangenen Arbeiten wurden verschiedene Wärmeleitfähigkeitssensoren von verschiedenen Herstellern auf ihre Merkmale untersucht und für den Einsatz im Versuchsstand REKO-4 unter Berücksichtigung verschiedener Faktoren qualifiziert [Sim09][Jan10][Ste11]. Hierbei standen vor allem neben Größe, Peripherie des Sensors und Kosten auch die vorherrschenden Umgebungsbedingungen innerhalb des Versuchsbehälters im Vordergrund. So wurden verschiedene Quereinflüsse wie z.B. variierende Temperaturen und hohe Wasserdampfanteile als mögliche Störeinflüsse identifiziert. Eine Diskussion dieser Faktoren, mögliche Korrekturmöglichkeiten und eine Abschätzung der Messgenauigkeit folgt in Abschnitt 3.7.4. In Anbetracht der gewonnenen Erkenntnisse wird der Sensor *XEN-TCG3880 + Pt100* der Firma *Xensor Integration bv* für die Konzentrationsmessung verwendet. Dieser verfügt neben einer sehr hohen Belastbarkeit in Bezug auf die maximalen Umgebungstemperaturen noch über eine zusätzliche Temperaturmessstelle (Pt-100-Element), die u.a. zur Kompensation des Temperatureinflusses auf den Messwert benutzt werden kann.

3.3.2 Katharometer *XEN-TCG3880 + Pt100*

Der Sensor *XEN-TCG3880 + Pt100* besteht aus einem Wärmeleitfähigkeitssensor und einem Widerstandsthermometer (Pt-100-Element). Im Folgenden wird die gesamte Sensoreinheit inklusive Wärmeleitfähigkeitssensor und Widerstandsthermometer als Katharometer bezeichnet (Abbildung 3.5 [a]). Sie zeigt den prinzipiellen Aufbau des Wärmeleitfähigkeitssensors mit dem Heizwiderstand R_{heat} in der Mitte und sechs in Reihe geschalteten Thermoelementen, die die Temperaturdifferenz zwischen Sensormitte und Sensorrand messen. Die Temperaturdifferenz entsteht durch Wärmeleitung vom Heizwiderstand an die Umgebung bzw. an den Sensorrand. Die Wärmeleitung teilt sich hierbei in zwei Bestandteile auf. Zum einen wird die Wärme durch das Sensormaterial vom Heizwiderstand abgeführt. Dieser Anteil ist nur abhängig von dem Sensormaterial zwischen Mitte und Rand des Sensors, somit unabhängig vom umgebenden Medium und daher während der Messung konstant. Der zweite Bestandteil der Wärmeabfuhr besteht aus der Wärmeleitung des Gases von der Sensormitte an die Umgebung bzw. an den Sensorrand. Dieser ist abhängig von der Gaszusammensetzung bzw. den einzelnen Gaskomponenten.

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

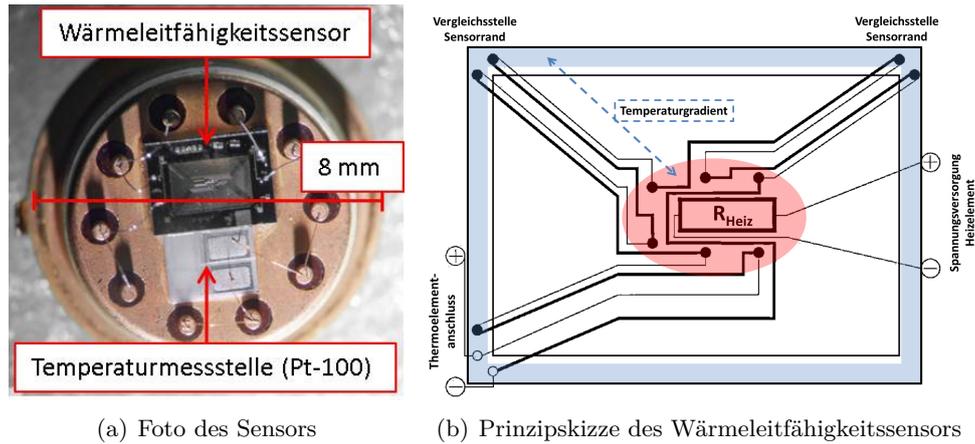


Abbildung 3.5: Beschreibung des Katharometers *XEN-TCG3880 + Pt100* der Firma *Xensor Integration bv*

Daher sind sechs Thermoelemente so angebracht, dass sie die Temperaturdifferenz zwischen dem Heizwiderstand (roter Bereich) und dem Sensorrand (blauer Bereich) messen. Die Reihenschaltung der Thermoelemente bewirkt eine Addition und somit eine Verstärkung der Thermoelementspannung, die ein robusteres Messsignal ermöglichen. Steigt die Wasserstoffkonzentration des Gasgemisches, steigt die Wärmeleitung von der Sensormitte zum Sensorrand bzw. sinkt deren Temperaturdifferenz. Diese Temperaturdifferenz wird von den in Reihe geschalteten Thermoelementen registriert und als Ausgangssignal des Sensors verwendet.

Wichtig für die Funktionsfähigkeit der Wärmeleitfähigkeitssensoren ist dabei, dass die Wärme des Heizelements nur über Wärmeleitung von der Mitte des Sensors abgeführt wird. Um Wärmeabfuhr über Konvektion zu verhindern werden die Sensoren mit Sintermetallkappen versehen, die das Gas ausschließlich über Diffusion an den Sensorkopf gelangen lassen, was bereits in früheren Arbeiten bestätigt wurde [Sim09]. Abbildung 3.6 zeigt den Aufbau eines Sensors mit Diffusionskappe. Der linke Sensor besteht aus dem Sensorkopf bzw. dem Katharometer mit Wärmeleitfähigkeitssensor und Pt-100-Element, der auf einem Sensorsockel mit den entsprechenden Kabelanschlüssen positioniert ist. Der mittlere Sensor mit einer Diffusionskappe ausgestattet. Rechts ist der gesamte Sensor zusätzlich mit Schrumpfschlauch ummantelt, um die Sensorkappe mit dem Sensorsockel zu fixieren und somit eine stabile Sensoreinheit herzustellen. Neben der Wärmeabfuhr des Heizelements über Leitung und Konvektion muss theoretisch ebenfalls Wärmestrahlung berücksichtigt werden. Diese ist bei der Betrachtung der Funktionsweise der Katharometer jedoch von untergeordneter Bedeutung, da die Temperaturdifferenz und somit die Strahlungsanteil weitgehend konstant über den gesamten Messbereich sind und in die Kalibrierkurve mit einfließen.

Die Verarbeitung des Sensorsignals ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Das Sensorsignal des Katharometers ist ein Spannungssignal im mV-Bereich und relativ stör anfällig gegen

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4



Abbildung 3.6: Von links nach rechts: Sensor auf Sockel, Sensor mit Sintermetallkappe, Sensor mit Sintermetallkappe und Schrumpfschlauch zur Befestigung [Ste11]

äußere Einflüsse. Ebenso ist die Sensorleitungslänge aufgrund des schwachen Signals begrenzt. Daher wird dieses Signal unmittelbar außerhalb des Behälters mit einer entsprechenden Verstärkerschaltung in ein stabileres Messsignal im mA-Bereich transformiert. Abbildung 3.8 (a) zeigt ein Foto einer Verstärkerplatine, die für die Signalverstärkung eines Sensors benötigt wird. Abbildung 3.8 (b) zeigt einen Schaltkasten mit insgesamt sieben Verstärkerschaltungen, die direkt außerhalb des Behälters positioniert sind, um den Weg des unverstärkten Sensorsignals so kurz wie möglich zu halten. Das verstärkte Messsignal korreliert direkt mit der Wärmeleitfähigkeit des am Sensorkopf anliegenden Gasmisches. Die Berechnung der Konzentration aus der Wärmeleitfähigkeit erfolgt mit Hilfe einer Kalibrierfunktion, die für jeden Sensor separat generiert werden muss. Dies liegt unter anderem daran, dass sowohl die Katharometer als auch die Verstärkerschaltungen selbst Fertigungstoleranzen unterliegen, die zu leicht unterschiedlichen Ausgangssignalen führen. Der letzte Schritt der Signalverarbeitung umfasst die Temperaturkorrektur, die störende Quereinflüsse wie z.B. variierende Temperaturen berücksichtigt. Die Kalibrierung der Katharometer bzw. die Durchführung der Temperaturkorrektur unter Verwendung der auf dem Sensorkopf platzierten Pt-100-Elemente wird im Anhang 10.1 - 10.3 genauer erläutert.

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

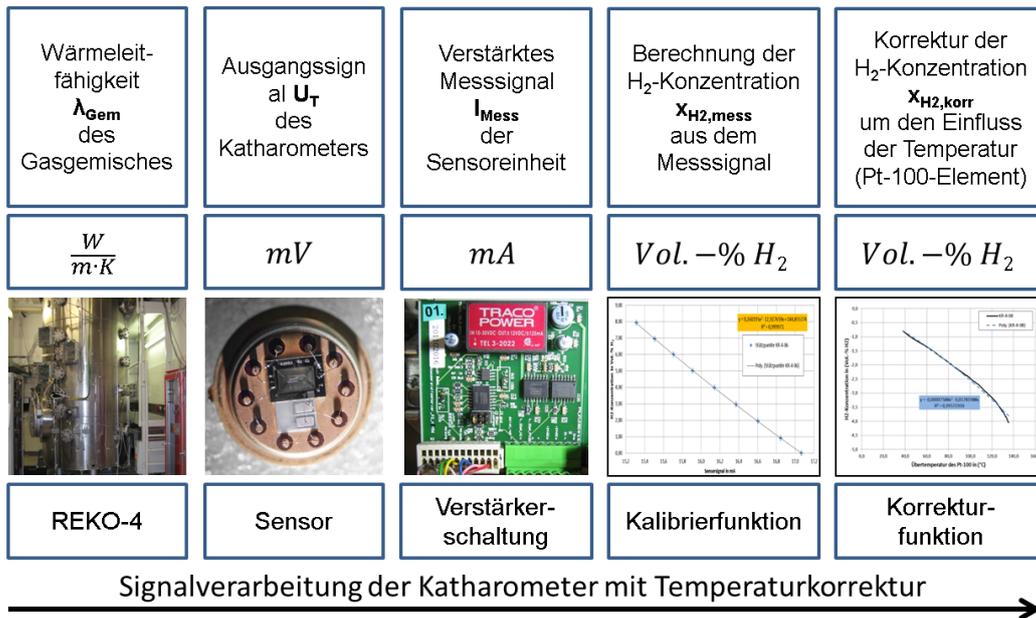


Abbildung 3.7: Verarbeitung des Sensorsignals eines Katharometers mit Temperaturkorrektur

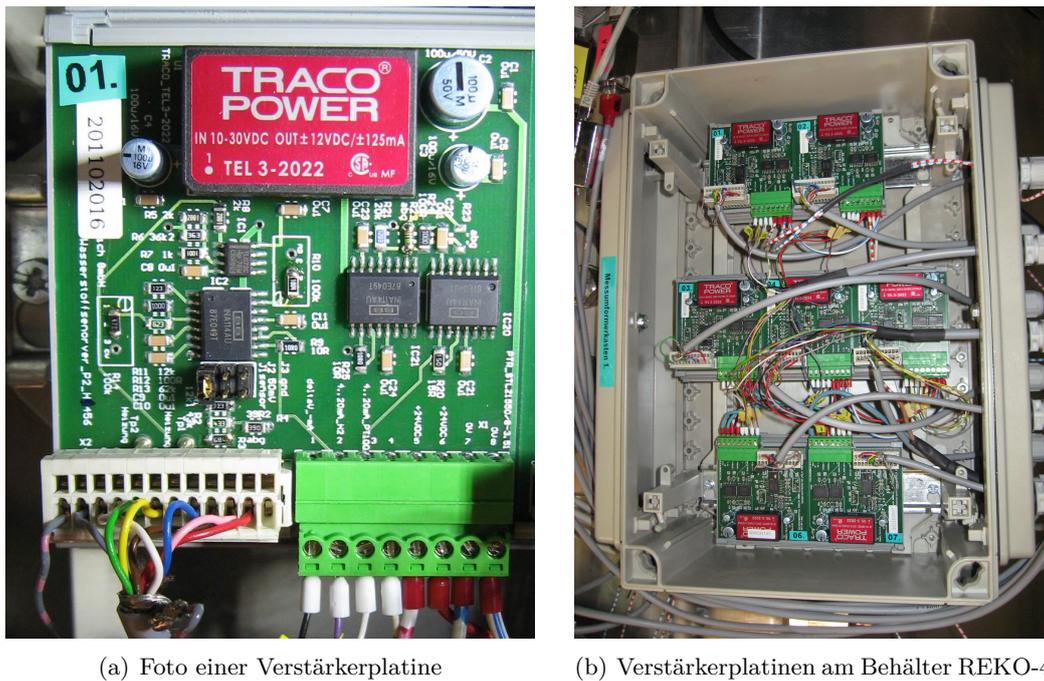


Abbildung 3.8: Verstärkerschaltungen der Katharometer zur Wasserstoffkonzentrationsmessung

3.4 Particle Image Velocimetry (PIV) zur Geschwindigkeitsfeldmessung

Die Gasgeschwindigkeit am Einlass bzw. der Gasdurchsatz durch das Gehäuse stellen die zentrale Größe für die Wasserstoffumsetzung im Rekombinator dar. Zu ihrer Bestimmung wird im Rahmen dieser Arbeit das optische Strömungsmessverfahren Particle-Image-Velocimetry (PIV) verwendet. Im Folgenden wird das Prinzip erklärt und die Installation in REKO-4 erläutert. Eine Fehlerabschätzung erfolgt in Abschnitt 3.7.5.

3.4.1 Messprinzip

PIV ist ein optisches Messverfahren zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern und eignet sich durch sein berührungsloses Messprinzip auch für die Untersuchung störungsempfindlicher oder komplexer Strömungen. Die Messtechnik ermöglicht die vollständige Erfassung und Analyse des Strömungsbilds innerhalb der betrachteten Ebene (zweidimensional, 2D-PIV) [NB06]. Sie beruht auf der optischen Verfolgung von Tracer-Partikeln innerhalb der Gasatmosphäre mit einer Hochgeschwindigkeitskamera. Mit Hilfe mathematischer Algorithmen kann der zurückgelegte Weg von Partikeln ermittelt und somit deren Geschwindigkeit und Richtung bestimmt werden. Unter der Annahme, dass die Partikel der Strömung schlupffrei folgen, kann somit ein vollständiges Strömungsfeld unter Angabe der Geschwindigkeit und Richtung der Gasströmung berechnet werden.

Das Prinzip von PIV ist in Abbildung 3.9 schematisch dargestellt. Der Gasatmosphä-

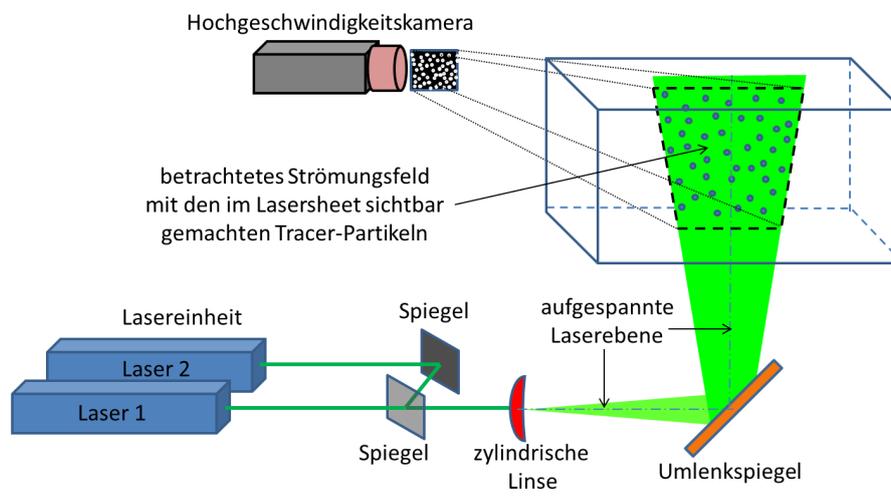


Abbildung 3.9: Schematische Darstellung des optischen Strömungsmessprinzips PIV (vgl. [Kap07])

re werden Tracer-Partikel über einen Partikelgenerator (nicht abgebildet) hinzugegeben.

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

Zwei Laser erzeugen in kurzem zeitlichen Abstand ($\Delta t_{PIV} = 100 \mu\text{s} - 100 \text{ms}$ in dieser Arbeit) jeweils einen Laserimpuls, die über ein System aus z.T. halbdurchlässigen Spiegeln übereinander gelegt und anschließend von einer zylindrischen Linse zu einer Laserebene aufgespannt werden. Diese Laserebene kann nun direkt oder optional über Umlenkspiegel in die gewünschte Messebene gelenkt werden. Das von den Tracer-Partikeln gestreute Laserlicht wird von einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen. So entsteht ein Bildpaar, das die Berechnung des Versatzes der Partikel von einem Bild zum anderen ermöglicht. Aus diesem Versatz kann der zurückgelegte Weg Δs_{PIV} bestimmt und unter Berücksichtigung des Zeitabstands Δt_{PIV} zwischen den Bildaufnahmen respektive der Laserimpulse die Geschwindigkeit über

$$v = \frac{\Delta s_{PIV}}{\Delta t_{PIV}} \quad (3.4)$$

bestimmt werden. Hierbei wird angenommen, dass die Partikel mit einem Durchmesser d_p von $\sim 0,2 - 0,3 \mu\text{m}$ entsprechend ihrem Strömungsfolgeverhalten dieselbe Geschwindigkeit und Richtung wie die Gasströmung besitzen. Hierbei ist zu beachten, dass das von den Tracer-Partikeln gestreute Licht die Strecke bis zur Kameraposition durch die übrige, mit Tracer-Partikeln angereicherte Luft zurücklegen muss. Größere Distanzen beeinflussen zum einen die Bildqualität, zum anderen wird eine starke Vergrößerung durch ein entsprechendes Kameraobjektiv notwendig, das aber Grenzen bzgl. der Größe der aufzulösenden Fläche und des optischen Zugangs durch den Glasflansch unterliegt.

Als Tracer-Substanz wird das synthetische Öl „Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS)“ (Tabelle 3.4) verwendet, das über spezielle Düsen des Partikelgenerators zerstäubt und in die Behälteratmosphäre gegeben wird. Die Verdampfungstemperatur von $232 - 249 \text{ }^\circ\text{C}$

Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS)	
Dichte	912 kg/m ³
Dynamische Viskosität	22 - 24 mPas
Verdampfungstemperatur	232 - 249 °C
Durchschnittliche Größe bei Zerstäubung	0,2 - 0,3 μm

Tabelle 3.4: Stoffdaten von Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS) [TOP08]

schränkt den Einsatz während der Versuche ein, da z.B. heiße Gasströmungen am Auslass des Rekombinators nur eingeschränkt untersucht werden können. Dieses Problem ließe sich durch die Verwendung von Feststoffpartikeln zwar beheben, führt jedoch zu anderen Problemen bzgl. Gesundheitsgefährdung und der anschließenden Reinigung der Versuchsanlage. Die Messung der Auslassgeschwindigkeit ist für diese Arbeit von untergeordneter Bedeutung, so dass auf die Verwendung von Feststoffpartikeln verzichtet wird.

Die zeitliche Ansteuerung der Laser wird von einem Synchronisator (Synchroniser)

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

übernommen, der sowohl die Zeitabstände zwischen den Laserimpulsen als auch die Synchronisation mit der Hochgeschwindigkeitskamera regelt. Die technischen Daten der PIV-Laser sind in Tabelle 3.5 angegeben. Die aufgespannte Laserebene besteht aus

Anzahl der Laser	2 Stück
Laserschutzklasse	4
Laserart	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser (Nd:YAG-Laser)
Wellenlänge	532 nm (grün) (Frequenz verdoppelt aus 1064 nm (infrarot))
Maximale Impulsleistung	24 MW
Impulsdauer	3 - 5 ns
Maximale Frequenz der Impulspaare	bis zu 15 Hz

Tabelle 3.5: Daten der PIV-Lasereinheit

monochromem Licht mit einer Wellenlänge von 532 nm (grün). Die maximale Frequenz von 15 Hz wird nur in Ausnahmefällen bei hohen Geschwindigkeitsgradienten benötigt. Während der Versuche in REKO-4 liegt die verwendete Frequenz zwischen 1 - 5 Hz.

Die Hochgeschwindigkeitskamera ist mit einem Charge-coupled Device (CCD) Chip mit einer Auflösung von 1600 x 1200 Pixel ausgestattet. Sie ist aufgrund der kurzen Belichtungsdauer jedes einzelnen Bildes sehr lichtstark, arbeitet aber im sichtbaren Bereich. Der Chip wird zudem thermisch auf -14°C gekühlt, um Bildrauschen zu minimieren. Der interne Speicher der Kamera ist auf 2 GB begrenzt, was die maximale Aufnahmedauer einer zusammenhängenden Messung begrenzt. Mit einem alternativen Aufnahmemodus kann diese Begrenzung umgangen werden, so dass kontinuierliche PIV-Messungen über längere Zeiträume möglich sind, womit jedoch ein erheblicher, zusätzlicher Aufwand bei der Berechnung der Strömungsbilder verbunden ist.

Zum Aufspannen bzw. Umlenken der Laserebene werden zylindrische Linsen und Spiegel verschiedener Größen benötigt. Die Spiegel sind mit einer Spiegelheizung versehen, um Kondensation zu verhindern. Abbildung 3.10 links zeigt die Vorderseite des Umlenkspiegels vor dem Flansch, durch den die Laserebene in den Behälter eingekoppelt wird. Rechts ist die Rückseite mit zwei Heizmatten dargestellt, die den Spiegel auf eine Übertemperatur von ca. 35 K heizen. Ebenso ist in beiden Abbildungen die Verstelleinrichtung erkennbar, die für eine genaue Justierung der Laserebene notwendig ist. Da die Heizung einen thermischen Auftrieb durch Naturkonvektion senkrecht über dem Spiegel

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

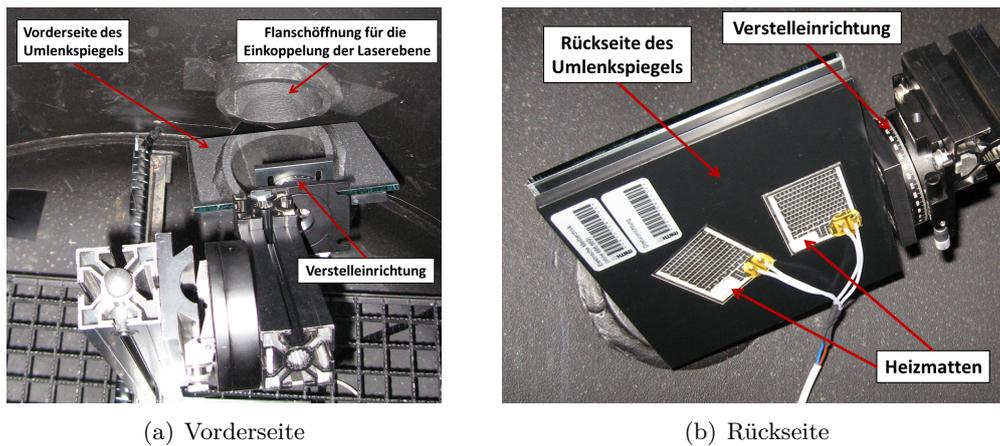


Abbildung 3.10: Vorder- und Rückseite des PIV-Umlenkspiegels

induziert, ist die Durchführung einer PIV-Messung während und kurz nach dem Betrieb der Heizung nicht zulässig, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Strömung beeinflusst wird.

Die Auswertung der Bildpaare bzw. die Berechnung der Partikelgeschwindigkeit und -richtung wird unter Verwendung der Software VidPIV 4.6 der Firma ILA GmbH durchgeführt. Sie verwendet mathematische Algorithmen wie z.B. Kreuzkorrelationen, um die Bewegung eines Partikels bzw. eines Partikelmusters in zwei aufeinander folgenden Bildern ermitteln zu können. Der Vergleich der verschiedenen Lichtintensitäten (Partikel = hell, Hintergrund = dunkel) zwischen den Bildern eines Bildpaares ermöglicht somit die Bestimmung des zurückgelegten Wegs. Eine Fehlerbetrachtung dieser Messtechnik erfolgt in Abschnitt 3.7.5.

3.5 Instrumentierung des Versuchsbehälters

Die Messpositionen innerhalb des Versuchsstands REKO-4 unterteilen sich grob in zwei Bereiche. Der erste Bereich umfasst alle Messstellen, die das Betriebsverhalten des Rekombinators erfassen. Hierzu gehören die Bedingungen am Einlass und Auslass des Rekombinators, die Temperaturen der Katalysatorbleche sowie die Temperaturen im Kamin und am Rekombinatorgehäuse. Der zweite Bereich beinhaltet die Umgebung des Rekombinators bzw. die umgebende Atmosphäre. Hierunter fällt die Messung der Gas- und Wandtemperatur, der Wasserstoffkonzentration, des Behälterdrucks und der Feuchtigkeit in verschiedenen Höhen des Behälters. Jedem Messsensor ist ein eindeutiger Name und eine eindeutige Position zugeordnet, wobei sich die Position einiger Messstellen im Zuge verschiedener Versuchsreihen ändern kann.

3.5.1 Positionierung konventioneller Messtechnik im Behälter

Die Bezeichnung der Thermoelemente (TE) ist in Tabelle 3.6 erklärt: Insgesamt sind

\overbrace{TR}	–	\overbrace{XX}	–	\overbrace{YY}
Thermoelement		Laufende Nummer		Abkürzung für Einsatzort
GO				Gastemperatur in Behälter (oben)
GM				Gastemperatur in Behälter (mitte)
GU				Gastemperatur in Behälter (unten)
RK				Katalysatorblechtemperatur
RG				Gastemperatur im Bereich Rekombinatorgehäuse
WD				Wandtemperatur der Behälterdecke
WO				Wandtemperatur des Behälters (oben)
WM				Wandtemperatur des Behälters (mitte)
WU				Wandtemperatur des Behälters (unten)
WB				Wandtemperatur des Behälterbodens
WMR				Wandtemperatur des Behälters hinter Rekombinator
WML				Wandtemperatur am Mannloch

Tabelle 3.6: Kennzeichnung der Thermoelemente im Versuchsstand REKO-4

69 TE-Sensoren (32 Gastemperaturen/36 Wandtemperaturen + 1 Ersatz-TE) im Behälter installiert. Die Bezeichnung TR-53-RK bezeichnet somit ein Thermoelement mit der laufenden Nummer 53, das eine Katalysatortemperatur misst. Abbildung 3.11 gibt einen Überblick über die Positionen im Behälter. Neben den TE-Sensoren sind ebenfalls die Positionen der Feuchtigkeitssensoren und des Manometers eingetragen. Die Instrumentierung des Rekombinators folgt in Abschnitt 3.6. Die Gastemperatur im Behälter wird auf drei Traversen mit je neun TE-Sensoren gemessen. Ein Thermoelement ist dabei direkt auf der vertikalen Mittelachse des Behälters positioniert, während die übrigen acht auf zwei konzentrischen Kreisen mit unterschiedlichem Durchmesser (300 mm und 600 mm) angebracht sind. Dies ermöglicht die Messung des sich ausbildenden Temperaturgradienten in sowohl vertikaler als auch radialer Richtung. In der gleichen vertikalen Aufteilung werden auch die Wandtemperaturen gemessen. Daneben werden noch die Temperaturen an der höchsten und niedrigsten Stelle im Behälter, am Mannloch und an der Wand hinter dem Rekombinators aufzeichnet.

Insgesamt sind zwei Feuchtigkeitssensoren (Tabelle 3.7) in Behälterwandnähe angebracht. Sie messen zum einen im oberen Bereich unter der Behälterdecke und zum ande-

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

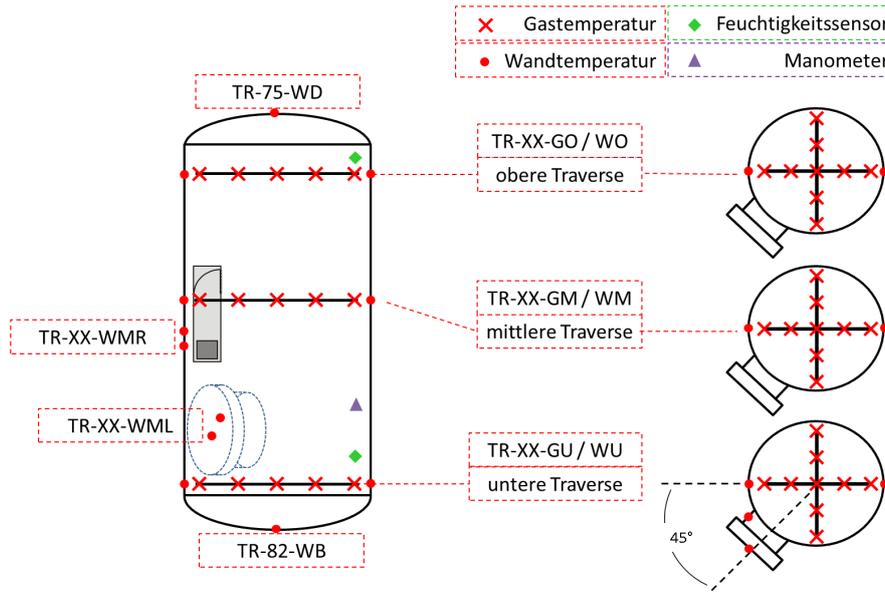


Abbildung 3.11: Übersicht über die Messstellen der TE-Sensoren im Behälter

ren im unteren Bereich in der Höhe des Mannloches. Jeder Feuchtigkeitssensor verfügt seinerseits über ein eigenes Pt-1000-Element zur Temperaturmessung, das in einem Abstand von 50 mm über dem Feuchtesensor positioniert ist.

Messposition	Bezeichnung	Messgröße
Behälter (oben)	HR-4-01 RF	Relative Feuchte
	HR-4-01 AF	Absolute Feuchte
	HR-4-01 T	Temperatur
Behälter (unten)	HR-4-02 RF	Relative Feuchte
	HR-4-02 AF	Absolute Feuchte
	HR-4-02 T	Temperatur

Tabelle 3.7: Kennzeichnung der Feuchtesensoren und Messgrößen

Das Manometer ist in in mittlerer Behälterhöhe angebracht (vertikaler Abstand vom Behälterboden ca. 950 mm). Da während der regulären Versuche nur mit kleinen Druckgradienten zu rechnen ist, werden keine besonderen Anforderungen an dessen Positionierung gestellt.

Die genaue Positionierung in Zylinderkoordinaten (r, φ, z) sowie zusätzliche Informationen bzgl. der konventionellen Messtechnik sind in Tabelle 10.4 im Anhang angegeben. Die Instrumentierung der Behälteratmosphäre bzw. der Behälterwand ist mit Ausnahme der Versuchsreihe R4-P für alle in dieser Arbeit durchgeführten Versuche weitgehend

identisch. Eventuelle Abweichungen werden im Abschnitt 4 genauer erläutert. Die Versuchsreihe R4-P wird gesondert in Abschnitt 7.1 beschrieben.

3.5.2 Positionierung der Katharometer im Behälter

Insgesamt sind 20 Katharometer im Versuchsbehälter installiert, deren Positionen während der Versuchsreihen variieren können. Daher wird im Folgenden zwischen verschiedenen Versuchsreihen unterschieden bzw. auf Unterschiede der Instrumentierung zur Wasserstoffkonzentrationsmessung eingegangen. Dabei wird in Anlehnung an die Beschreibung der konventionellen Messtechnik zwischen Behälteratmosphäre und der Messung direkt am Rekombinator differenziert, auch wenn hier eine klare Abgrenzung nicht immer möglich ist. Die Instrumentierung des Rekombinators wird in Abschnitt 3.6 beschrieben.

Die Positionierung der Katharometer variiert mit der jeweiligen Versuchsreihe und lässt sich grob in drei Abschnitte unterteilen. Der erste Bereich umfasst die Vorversuche zur Wasserstoffverteilung im Behälter. Der zweite und dritte Bereich beschreibt die Versuche R4-G und R4-J bzw. R4-L und R4-O, die sich in der Positionierung der Katharometer im unteren Behälterbereich unterscheiden. In den Versuchen R4-L bis R4-O wurde ein Teil der Katharometer auf die Höhe des Rekombinatoreinlasses verlegt, um zusätzliche Messungen der Einlasskonzentration zu ermöglichen. Jeder Katharometer besitzt eine eindeutige Bezeichnung und Position. Die Bezeichnung erfolgt gemäß:

$$\underbrace{KR}_{\text{Katharometer}} - \underbrace{4}_{\text{REKO-4}} - \underbrace{XX}_{\text{Laufende Nummer}}$$

Positionierung der Katharometer während der Vorversuche

Zur Inbetriebnahme des Versuchsstands REKO-4 werden u.a. Vorversuche ohne Rekombinator durchgeführt, um die Verteilung von Wasserstoff im Behälter zu analysieren. Diese ungestörte Verteilung stellt somit einen Referenzzustand dar, anhand dessen der Einfluss des Rekombinators auf die umgebende Atmosphäre bewertet werden kann.

In den Vorversuchen wird die Wasserstoffkonzentration in möglichst vielen unterschiedlichen Höhen gemessen, um die Verteilung sowohl während der Einspeisephase (einige Minuten) als auch in der anschließenden Verteilungsphase über längere Zeit (mehrere Stunden) untersuchen zu können (Abbildung 3.12). Die Katharometer werden dazu in unterschiedlichen Behälterhöhen auf denselben Traversen positioniert, die für die TE-Sensoren verwendet werden. Jede Traverse wird mit fünf Sensoren bestückt, wobei sich jeweils ein Katharometer auf der Mittelachse des Behälters befindet, während vier weitere auf einem konzentrischen Kreis mit einem Durchmesser 450 mm verteilt sind. Zusätzlich wird jeweils ein Katharometer an der niedrigsten (KR-4-01) und höchsten (KR-4-19) Stelle im Behälter angebracht. Die Katharometer KR-4-07 / -08 / -20, die in den späteren Versuchen für die Bestimmung der Einlass- und Auslasskonzentration am Rekombinator verwendet werden, werden in verschiedenen Höhen auf der Mittelachse zwischen der oberen und unteren Traverse positioniert. Somit ergeben sich für

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

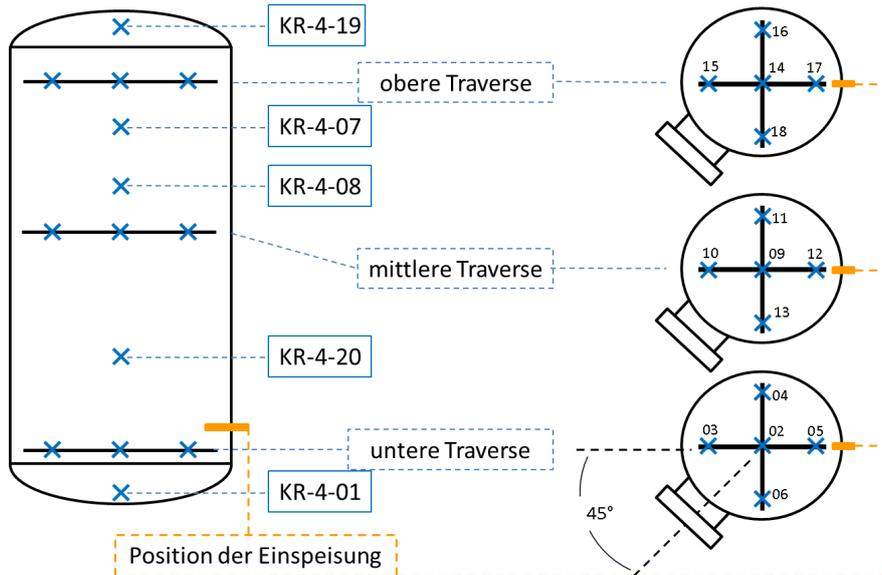


Abbildung 3.12: Positionierung der Katharometer während der Vorversuche

die Vorversuche acht Messebenen in vertikaler Richtung, wovon drei horizontale Ebenen (Traversen) zusätzlich die Konzentrationsverteilung in radialer Richtung auflösen können. Die genaue Positionierung der Katharometer in Zylinderkoordinaten (r, φ, z) mit zusätzlichen Informationen zu den verwendeten Kabellängen oder Spezialkabeln ist im Anhang in Tabelle 10.7 aufgelistet.

In Abbildung 3.12 ist die Position der Wasserstoffeinspeisung angegeben. Sie liegt ca. 200 mm über der unteren Traverse mit Richtung Behältermitte. Der Blick von oben auf den Behälter zeigt, dass die Katharometer KR-4-09 / -10 und -12 der mittleren Traverse bzw. KR-4-14 / -15 und -17 der oberen Traverse auf der Einspeiseachse liegen. Im Rahmen der Vorversuche wird auf diese Weise geklärt, wie sich der Wasserstoffvolumenstrom im Behälter verteilt, sobald er das Einspeiserohr verlässt (Abschnitt 4.2).

Positionierung der Katharometer während der Versuche R4-G, R4-H und R4-J

Die Positionierung der Katharometer während der Versuche R4-G, R4-H und R4-J ist in Abbildung 3.13 dargestellt. Die Katharometer auf den Traversen sowie am niedrigsten und höchsten Punkt im Behälter bleiben zu der Vorversuchsanordnung unverändert. Eine schematische Darstellung des Rekombinators zeigt dessen Lage im Behälter und zeigt die Instrumentierung, die abhängig von der Rekombinatorversion ist und auf die in Abschnitt 3.6 genauer eingegangen wird. Ab der Versuchsreihe R4-J wird der Katharometer KR-4-06 (in Abbildung 3.13 mit einem Stern (*) gekennzeichnet) zur zusätzlichen Überprüfung der Rekombinatoreinlasskonzentration in die Nähe des Katharometers KR-4-07 verlegt.

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

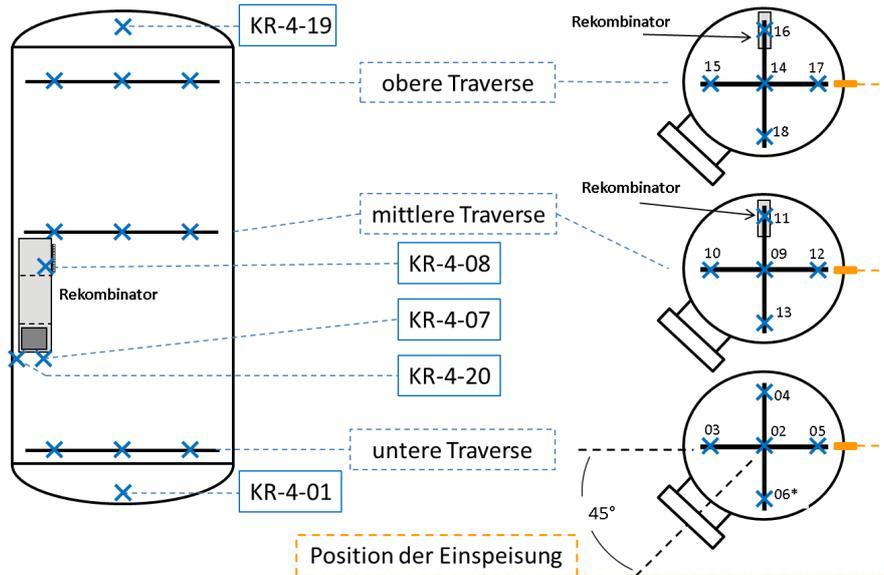


Abbildung 3.13: Positionierung der Katharometer während der Versuche R4-G, R4-H und R4-J

Positionierung der Katharometer während der Versuche R4-L bis R4-O

Abbildung 3.14 zeigt schematisch die Verteilung der Katharometer für die Versuche R4-L bis R4-P. Die untere Traverse (mit Ausnahme von KR-4-05) wird mit Beginn der Versuchsreihe R4-L in die Höhe des Rekombinatoreinlasses verlegt. Dabei wird sowohl die Ausrichtung als auch der Winkel zwischen den Traversenbalken verändert, so dass sich der Einlass in einem Sektor befindet, der mit sechs Katharometern bestückt ist (blau schraffierte Fläche im Schnitt unten rechts). KR-4-05 wird in die Behältermite verschoben, bleibt aber in der Höhe, in der vorher die untere Traverse lag. In wie weit die Vernachlässigung radialer Konzentrationsunterschiede im unteren Behälterbereich gerechtfertigt ist, wird im Rahmen der Vorversuche untersucht. In den mit dieser Instrumentierung durchgeführten Versuchen wird ein Rekombinatoremodell mit Kamin-aufsätzen mit einer Höhe von mindestens 450 mm verwendet. Die daraus resultierende Gesamthöhe führt dazu, dass der Auslass oberhalb der mittleren Traverse liegt. Daher wird der mittlere Traversenarm durch eine leichte Verdrehung ($\leq 5^\circ$) neben den Rekombinator-kamin gelegt (siehe Abschnitt 3.14 rechts, mittlerer Schnitt durch Behälter). Mit Beginn der Versuchsreihe R4-N wird das Rekombinatoremodell aus Gründen der PIV-Messung um 100 mm nach oben verschoben. Die Traverse wird nicht mitverschoben, so dass ab dieser Versuchsreihe ein vertikaler Abstand von ca. 120 mm von Katharometer KR-4-02 / -03 / -04 zum Rekombinatoreinlass besteht. Weitere vereinzelte Änderungen der Sensorpositionierung werden im Rahmen der jeweiligen Versuchsdurchführung bzw. der Versuchsmatrix erläutert.

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

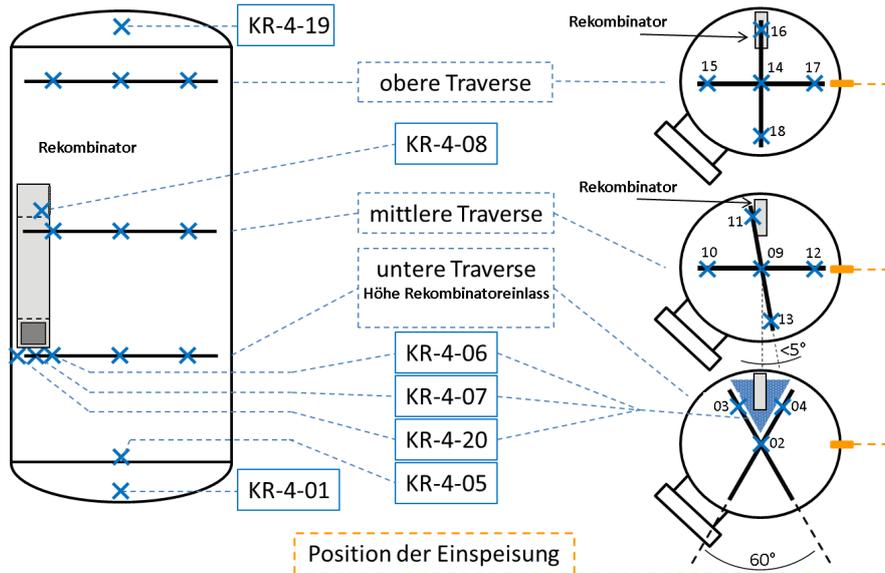


Abbildung 3.14: Positionierung der Katharometer während der Versuche R4-L, R4-M, R4-N, R4-O

3.5.3 Anordnung der PIV-Komponenten

Der optische Zugang sowohl für das Einkoppeln der Laserebene in den Behälter als auch für die visuelle Erfassung der Messebene mit der PIV-Kamera wird über druckfeste Flanschscheiben mit Glaseinsatz sichergestellt (Abbildung 3.15 (a)) Die Glasflansche

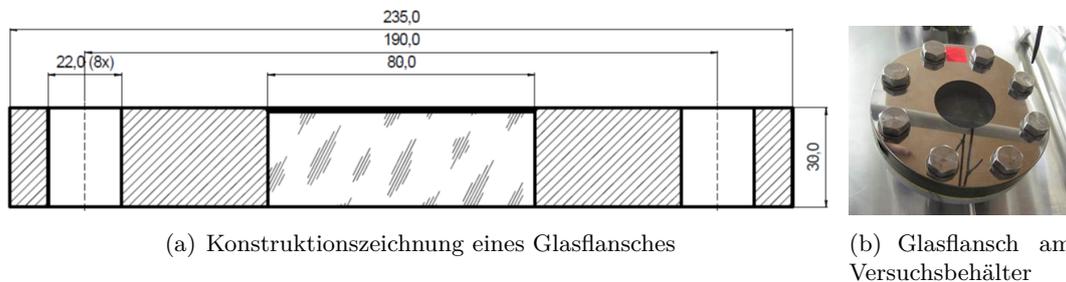


Abbildung 3.15: Optischer, druck- und explosionsdichter Zugang zum Versuchsbehälter für PIV

bestehen aus Borsilikatglas und sind im Wellenlängenbereich des Lasers und des von den Tracer-Partikeln gestreuten Lichts durchlässig, so dass keine Einschränkungen in Bezug auf die Messung mit PIV bestehen. Zur Vermeidung von Kondensation aufgrund der mit zunehmender Versuchsdauer steigenden Luftfeuchtigkeit in Behälter werden die Flansche von außen mittels Heißluftgebläsen beheizt. Der Wärmeeintrag ist weit ($>$

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

300 mm) von der Messebene entfernt, so dass eine Beeinflussung der dortigen Strömung ausgeschlossen werden kann.

Der Laser und die Kamera werden direkt vor den Glasflanschen installiert. Abbildung 3.16 zeigt schematisch die Anordnungen der PIV-Komponenten am Versuchsbehälter. In dieser Variante ist die Distanz zwischen Messebene und Kamera mit 400

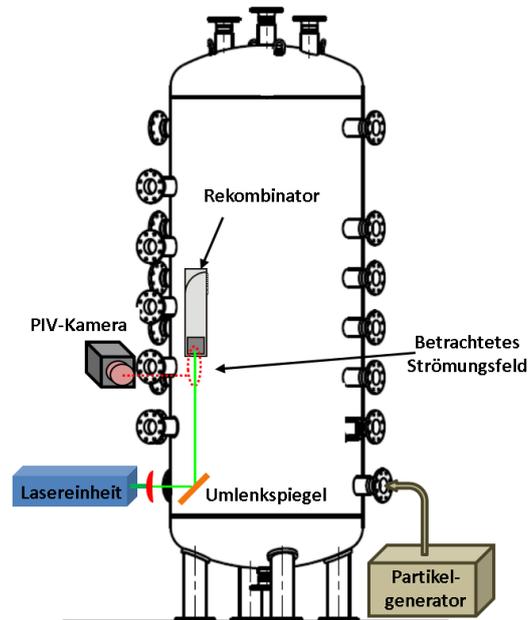


Abbildung 3.16: Anordnung des PIV-Systems an REKO-4 zur Messung der Einlassgeschwindigkeit von der Rückseite

- 500 mm am geringsten, was die Messung mit PIV begünstigt. Mit dieser Anordnung wird der Großteil der Geschwindigkeitsmessungen am Rekombinatoreinlass durchgeführt (R4-J bis R4-M). Zur Berechnung eines möglichst präzisen Einlassvolumenstroms ist zusätzlich noch das Geschwindigkeitsprofil von der Seite interessant (R4-N). Hierzu werden die Messebene respektive die Kamera rechtwinkelig zur Messebene aus Abbildung 3.16 angeordnet, wie in Abbildung 3.17 (a) dargestellt. Da hierbei die Distanz zwischen Messebene und Kamera auf ca. 1500 mm steigt, kann auf diese Weise zwar eine größere Fläche unterhalb des Rekombinatormodells erfasst werden, jedoch ergeben sich Einschränkungen für die Genauigkeit.

Unabhängig von der Messung der Einlassgeschwindigkeit wird auch die Auslassgeschwindigkeit des Rekombinatormodells untersucht. Diese PIV-Anordnung ist in Abbildung 3.17 (b) dargestellt. Hierbei wird durch Verschieben des Umlenkspiegels in Richtung der Behältermitte und einer dementsprechend geänderten Positionierung der PIV-Kamera die Messung der Auslassströmung ermöglicht.

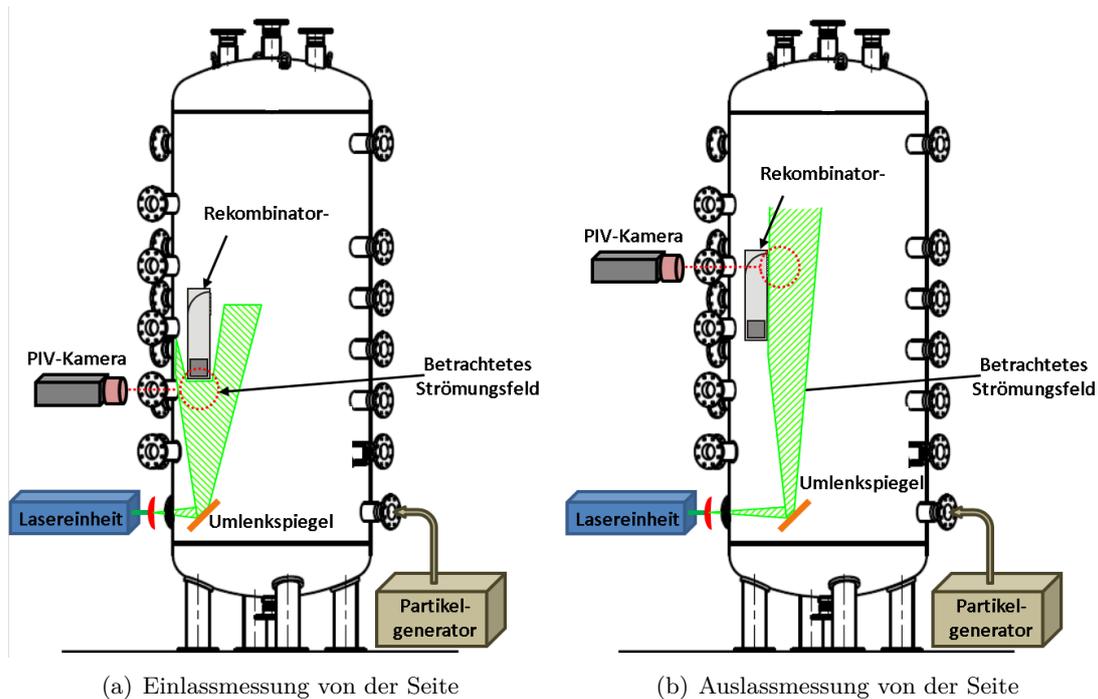


Abbildung 3.17: Verschiedene Anordnungen der PIV-Komponenten am Versuchsbehälter REKO-4

3.6 Einbau des katalytischen Rekombinators

Die drei Baugruppen (Katalysatoreinschub, Kamin und Auslass: siehe Kapitel 2.1) werden in einen kleinskaligen Rekombinator überführt (Abb. 3.18) und zur Positionierung im Versuchsbehälter auf einem Schlitten montiert. Die Geometrie des Katalysatoreinschubs wird dabei so gewählt, dass sie einen Ausschnitt eines kommerziell erhältlichen Rekombinators im AREVA-Design darstellt (Abb. 3.19). Der Katalysatoreinschub des Rekombinators besteht aus einem rechteckigen Edelstahlrohr mit den Außenmaßen 150 x 50 mm und einer Wandstärke von 2 mm. Innerhalb dieses Rohres befinden sich in äquidistantem Abstand vier quadratische Katalysatorbleche mit einer Kantenlänge von 143 mm und einer Blechdicke von 1,5 mm. Die genaue Zusammensetzung des Katalysators bzw. der Katalysatoroberfläche ist dabei für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche nicht von Bedeutung. In vorangegangenen Arbeiten wurde bereits gezeigt, dass nach dem Starten der Reaktion bzw. nach Überschreiten der Blechtemperatur über 70 °C die Transportvorgänge (Diffusion durch die Grenzschicht) zum katalytischen Blech der geschwindigkeitsbestimmende Schritt der Rekombination sind und demnach die Zusammensetzung nur von marginaler Bedeutung ist [Rei99].

Der Kamin und die Hutze des Rekombinators bestehen aus dem gleichen rechteckigen Edelstahlrohr wie das Gehäuse des Katalysatoreinschubs. Der Kamin ist austauschbar,

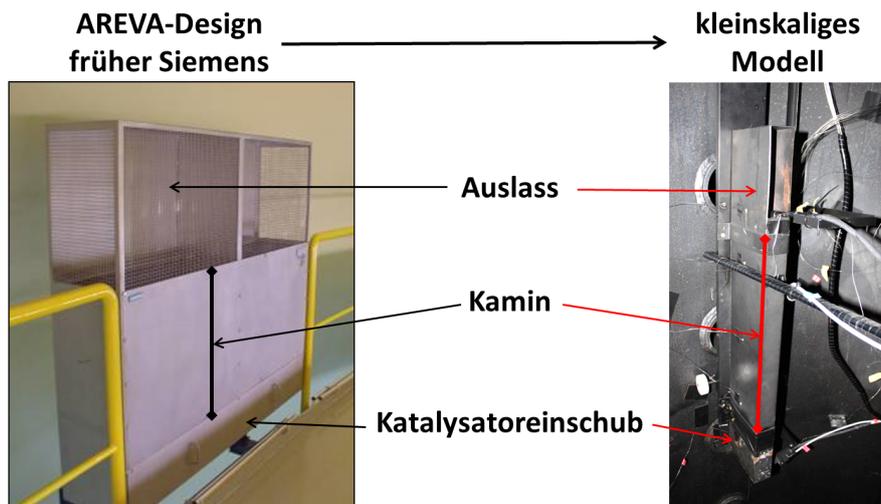


Abbildung 3.18: Überführung eines Rekombinators im AREVA-Design in ein kleinskaliges Modell für REKO-4

so dass der Einfluss unterschiedlicher Kaminhöhen auf den Rekombinatordurchsatz untersucht werden kann. Die Hutze besitzt eine Auslassöffnung, die das rekombinierte Gas horizontal in Richtung Behältermitte aus dem Rekombinator strömen lässt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden vier verschiedene Kamine mit unterschiedlicher Höhe untersucht (Abb. 3.20). Tabelle 3.8 zeigt sowohl die Gesamthöhe der Kamine als auch die durchströmte Höhe und die Gesamthöhe gemessen von der Unterkante bis zur Oberkante des Rekombinators. Die Höhe des Kamins mit 850 mm ist in einer ähnlichen Größenordnung wie die von kommerziell erhältlichen Rekombinatoren. Der Katalysatoreinschub besitzt eine Höhe von 150 mm, die Hutze eine Höhe von 200 mm mit einer Auslassöffnung von 150 mm. An den Übergängen der drei Bereiche (Katalysatorein-

Nr.	Kaminhöhe	Durchströmte Höhe	Gesamthöhe
1	ohne Kamin	150 mm	150 mm
2	150 mm	350 mm	500 mm
3	300 mm	500 mm	650 mm
4	450 mm	650 mm	800 mm
5	850 mm	1050 mm	1200 mm

Tabelle 3.8: Höhe des Rekombinators in Abhängigkeit von der verwendeten Kaminhöhe

schub, Kaminmodul und Auslasshutze) sind Manschetten angebracht, die die Bauteile in vertikaler Position übereinander halten. Die Hutze führt aufgrund dieser Manschette zu einer zusätzlichen Kaminhöhe von effektiv 50 mm. Am Übergang Katalysatorein-

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

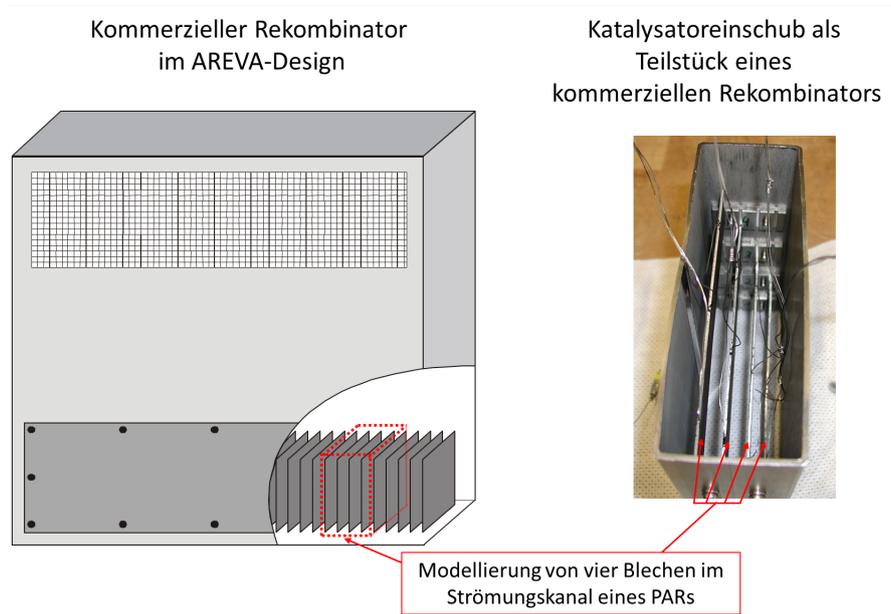


Abbildung 3.19: Modellierung eines Ausschnitts des Katalysatoreinschubs [Sim09]

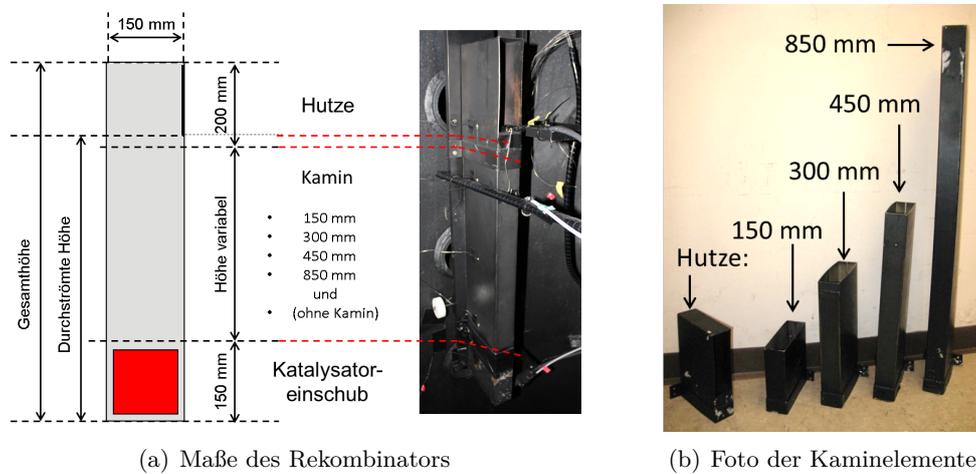


Abbildung 3.20: Rekombinator mit unterschiedlichen Kaminhöhen

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

- Kamin wird zusätzlich zum Abdichten Aluminiumklebeband verwendet.

Katalysatoreinschub, Kamin und Hutze werden mit Schrauben auf einem Schlitten befestigt, der über eine Kette im Behälter wandnah aufgehängt wird. Die Befestigungshöhe des Rekombinators wird dabei maßgeblich vom optischen Zugang für das PIV-System vorgegeben. Je nach Messposition (Einlass/Auslass des Rekombinators) wird der Rekombinator so positioniert, dass die PIV-Kamera eine optimale Perspektive auf den Messbereich hat. Für die Vermessung der Einlassgeschwindigkeit mit Sicht auf die Rückseite des Modells (Versuchsreihen G, H, J, L, M) bedeutet das, dass der Einlass vor dem Kameraflansch (Flansch 3-3) positioniert ist. Der optische Zugang für die Strömungsmessung am Einlass und Auslass von der Seite (Versuchsreihen N, O) erfolgt durch die Flansche 2-2 und 2-5, so dass der Rekombinator dafür um 120 mm nach oben verschoben werden muss. Da die Innenhöhe des Behälters mit ca. 3700 mm um mehr als eine Größenordnung darüber liegt, wird der Einfluss dieser Höhenänderung auf die Wechselwirkung mit der Behälteratmosphäre als vernachlässigbar angesehen,

Die Instrumentierung des Rekombinators umfasst Thermoelemente zur Temperaturmessung und Katharometer zur in-situ Bestimmung der Wasserstoffkonzentration. Die Thermoelemente dienen dabei zur Messung sowohl von Gastemperaturen als auch von Festkörpertemperaturen wie z.B. den Katalysator- und Gehäusetemperaturen.

Zur Messung der Katalysatortemperatur sind zwei der vier Katalysatorbleche mittels Funkenerosion mit jeweils zehn bzw. neun Bohrungen versehen, die es ermöglichen mit 0,5-mm-Thermoelementen die Blechtemperatur in verschiedenen Höhen zu messen. Das Blech mit zehn Bohrungen ist dabei als Mittelblech positioniert und steht im direkten Strahlungsaustausch mit den umgebenden Katalysatorblechen, während das andere als Randblech eingesetzt wird, dessen eine Seite zur Gehäusewand weist. Abbildung 3.21 zeigt ein Foto der Katalysatorbleche mit den installierten Thermoelementen (a) und eine Zeichnung der beiden bestückten Bleche, aus denen die Benennung, Position und Tiefe der Bohrungen ersichtlich sind (b). Diese Instrumentierung ermöglicht zum einen die Bestimmung des Temperaturprofils über die Höhe eines Bleches. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Temperaturgradient quer zur Strömungsrichtung vernachlässigt werden kann. Zum anderen kann anhand der beiden unterschiedlichen Positionen der bestückten Platten der Unterschied eines Randbleches zu einem Mittelblech abgeschätzt werden.

Zur Messung der Gehäusetemperatur des Rekombinators befinden sich fünf Thermoelemente in verschiedenen Höhen an der Außenseite des Gehäuses. Ein Thermoelement ist dabei an der Außenseite des Katalysatoreinschubs befestigt und ein zweites auf der Höhe der Auslassunterkante. Die drei übrigen TE-Sensoren werden in Abhängigkeit von der verwendeten Kaminhöhe an verschiedenen Positionen installiert, um die Temperaturverteilung über die Kaminhöhe zu bestimmen. Abbildung 3.22 (a) zeigt eine schematische Darstellung der Thermoelementpositionierung und Tabelle 3.9 die dazugehörigen Abmessungen.

Zur Messung der Gastemperaturen am Rekombinator und innerhalb des Kamins wer-

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

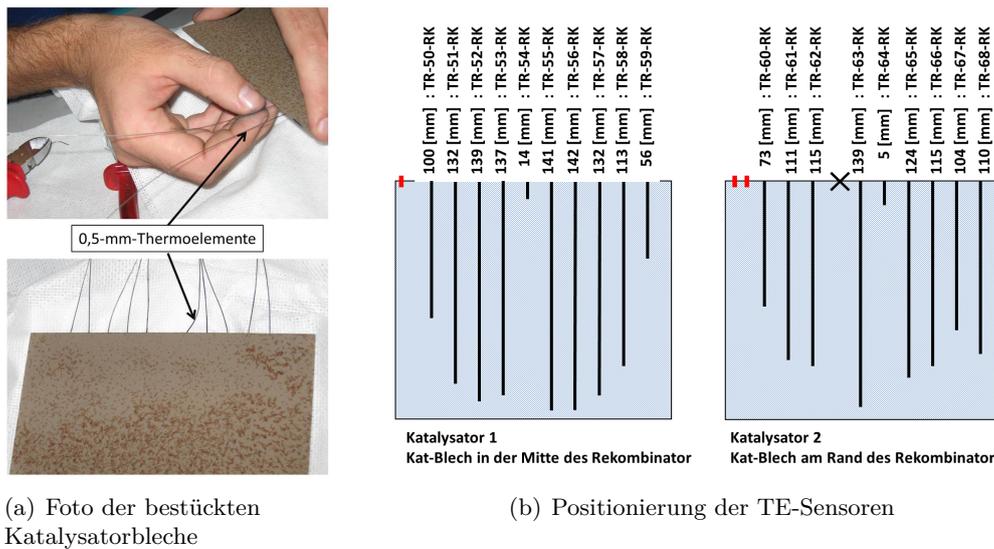


Abbildung 3.21: Bestückung der Katalysatorbleche mit Thermoelementen

den Thermoelemente mit einem Durchmesser von 0,5 mm verwendet. Jeweils ein Thermoelement ist für die Messung der Einlass- und Auslassbedingungen zuständig. Innerhalb des Gehäuses werden drei TE-Sensoren angebracht, die in unterschiedlichen Höhen die Gastemperatur innerhalb des Kamins messen. Die Positionen und die Abmessungen sind aus Abbildung 3.22 (b) und Tabelle 3.10 ersichtlich. Die TE-Elemente werden mit einem dünnen Drahtgestell positioniert, das durch den Auslass in den Kamin geführt wird. Die Höhenangaben beziehen sich daher auf die Unterkante des Auslasses. Bei dieser Positionierung kann nicht immer verhindert werden, dass die Thermoelemente die ebenfalls im Kamin entlanglaufenden Leitungen der Katalysator-Thermoelemente berühren. Eine Störung der Gastemperaturmessung im Kamin durch Wärmeleitung an den Berührungstellen oder durch eine leicht veränderte Lage in Bezug auf die Kaminwand kann nicht

TE-Element	Kamin 150 mm	Kamin 300 mm	Kamin 450 mm	Kamin 850 mm	ohne Kamin 0 mm
TR-88-RG (h_1)	65 mm				
TR-89-RG (h_2)	120 mm	120 mm	135 mm	185 mm	[-]
TR-90-RG (h_3)	40 mm	115 mm	175 mm	325 mm	[-]
TR-91-RG (h_4)	35 mm	115 mm	175 mm	325 mm	[-]
TR-92-RG (h_5)	90 mm	85 mm	100 mm	150 mm	[-]

Tabelle 3.9: Abmessungen der TE-Positionierung an der Außenwand des Rekombinatorgehäuses

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

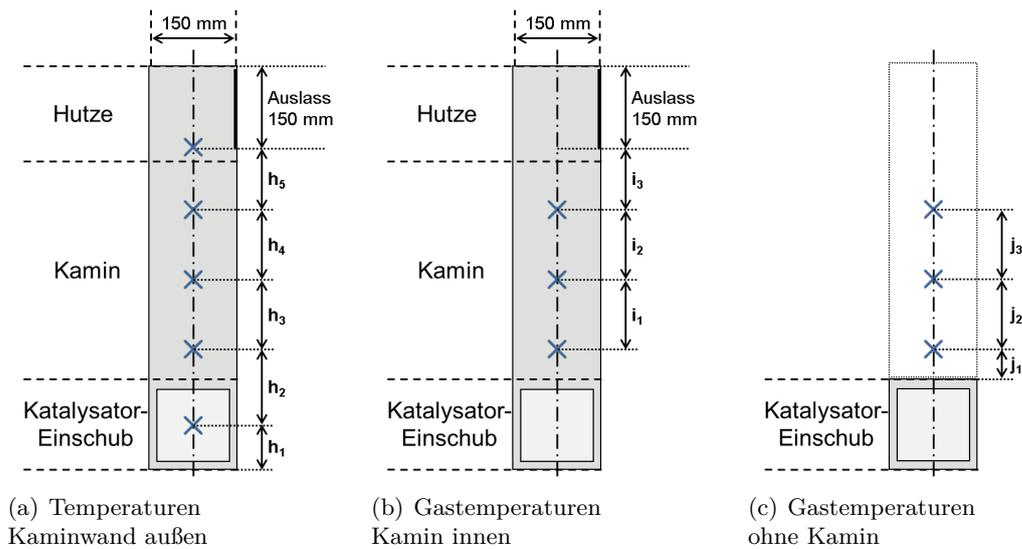


Abbildung 3.22: TE-Positionierung am Kamin zur Messung der Wandtemperatur außen und Gastemperatur innen

TE-Element	Kamin 150 mm	Kamin 300 mm	Kamin 450 mm	Kamin 850 mm	ohne Kamin 0 mm
TR-71-RG (i_1/j_1)	75 mm	90 mm	100 mm	320 mm	30* mm
TR-73-RG (i_2/j_2)	65 mm	90 mm	150 mm	335 mm	65* mm
TR-74-RG (i_3/j_3)	60 mm	80 mm	150 mm	125 mm	65* mm
* Die Angaben zum Rekombinator ohne Kamin beziehen sich auf den Abstand der TE-Elemente zum Katalysatoreinschub					

Tabelle 3.10: Abmessungen der TE-Positionierung innerhalb des Kamins

ausgeschlossen werden.

Zur Messung der Wasserstoffkonzentration am Einlass und Auslass werden modifizierte Katharometer verwendet. Durch den Einsatz temperaturfester Materialien können sie auch an Positionen eingesetzt werden, wo durch Wärmetransport bzw. Konvektion im Auslass höhere Gastemperaturen auftreten oder wo durch Wärmestrahlung von den Katalysatorblechen die Katharometer direkt erwärmt werden. Die Positionierung der Katharometer am Rekombinator ist in Abbildung 3.23 dargestellt. Da der Katharometer direkt im Einlass einer starken Erwärmung infolge Wärmestrahlung unterliegt, wird die Einlasskonzentration mit bis zu sechs Sensoren, die sich in der Nähe des Einlasses befinden, gemessen. Die Anzahl und die Bezeichnung der Katharometer zur Bestimmung der Einlasskonzentration sind aus Tabelle 3.11 ersichtlich. Im Folgenden wird, wenn nicht anders angegeben, zur Einlasskonzentrationsbestimmung der Katharometer KR-4-

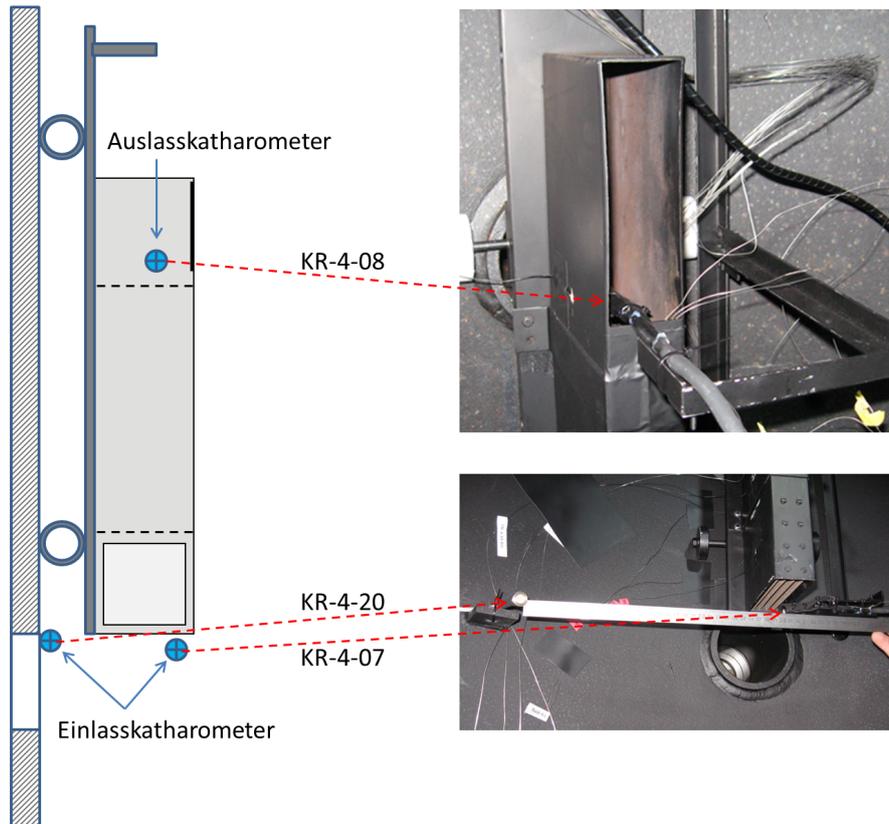


Abbildung 3.23: Messung der Wasserstoffkonzentration am Einlass und Auslass des Rekombinators

20 verwendet. Die Auslasskonzentration wird mit dem Katharometer KR-4-08 gemessen. An dieser Stelle wird aufgrund des geringen Platzes im Auslass und der Forderung, die Störung der Naturkonvektionsströmung so gering wie möglich zu halten, nur ein Sensor positioniert.

3.7 Diskussion der Messgenauigkeit

Definitionsgemäß bezeichnet die Messgenauigkeit den Abstand vom wahren Wert zum Messwert [Rab10]. Im Folgenden wird die im Versuchsstand REKO-4 verwendete Messtechnik betrachtet. Hierbei wird insbesondere die Temperaturmessung, die Wasserstoffkonzentrationsmessung mit Wärmeleitfähigkeitssensoren und die optische Geschwindigkeitsmessung PIV genauer untersucht. Zum einen ist die in-situ Messung in dieser Implementierung mit zahlreichen variablen Sensoren neuartig, weshalb noch keine Erfahrungswerte bzgl. der Messgenauigkeit bekannt sind. Zum anderen unterliegt die Messung mit PIV einer Reihe von Annahmen, die in Bezug auf die Randbedingungen innerhalb des

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

Versuchsreihe	Anzahl Katharometer	Bezeichnung
R4-G-01 bis -06	2	KR-4-07, KR-4-20
R4-H-01 bis -03	2	KR-4-07, KR-4-20
R4-J-01 bis -05	2	KR-4-07, KR-4-20
R4-J-06 bis -08	3	KR-4-06, KR-4-07 KR-4-20
R4-L-01	4	KR-4-05, KR-4-06 KR-4-07, KR-4-20
R4-L-02 bis -03	6	KR-4-02, KR-4-03 KR-4-04, KR-4-06 KR-4-07, KR-4-20
R4-M-01 bis -06	6	KR-4-02, KR-4-03 KR-4-04, KR-4-06 KR-4-07, KR-4-20
R4-N-01 bis -06	3	KR-4-06, KR-4-07 KR-4-20
R4-O-01	3	KR-4-06, KR-4-07 KR-4-20
R4-P-01 bis -26	3	KR-4-06, KR-4-07 KR-4-20

Tabelle 3.11: Anzahl und Bezeichnung der Einlasskatharometer

Versuchsbehälters diskutiert und mit Hinblick auf die Genauigkeit untersucht werden müssen.

3.7.1 Fehlerbetrachtung Thermoelemente

Im Versuchsbehälter REKO-4 werden ausschließlich Nicht-Edelmetall-Thermoelemente des Typs K (NiCr-Ni) der Klasse 1 mit einem Durchmesser von 0,5 mm oder 1,0 mm verwendet. Sie werden durch druckdichte Durchführungen aus dem Versuchsbehälter geführt und mit Hilfe von Thermoleitungen mit den Messumformern verbunden, die die Sensorsignale verstärken und zur Anlagensteuerung weiterleiten. Abbildung 3.24 zeigt zur Untersuchung des Messfehlers schematisch den Signalweg eines Thermoelements bis zur Anlagensteuerung. Jede Komponente, wie Thermoelement, Thermoleitung (TL, Verlängerung) und Messumformer, beeinflusst die Messgenauigkeit. Die Messunsicherheit für Thermoelemente und Thermoleitungen ist in der IEC 584-2 (DIN EN 60 584-2) fest-

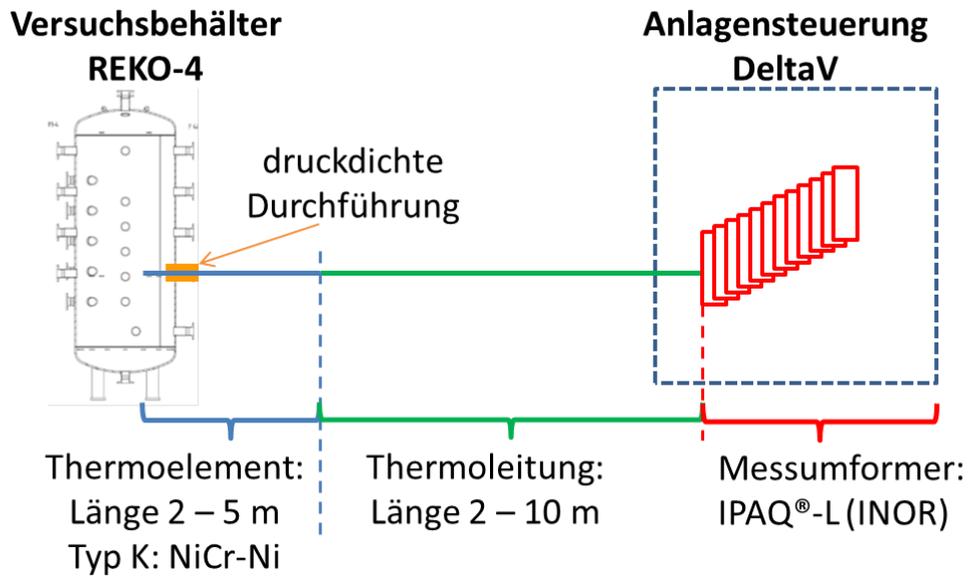


Abbildung 3.24: Schematische Darstellung der Thermoelementanschlüsse an die Anlagensteuerung

gelegt. Die Messunsicherheit der Messumformer wird dem Datenblatt des Herstellers entnommen. Die Durchföhrung hat keine Auswirkungen auf das Temperatursignal. Tabelle 3.12 zeigt den Einsatzbereich der verwendeten Komponenten und gibt den jeweils zu erwartenden Fehler wieder.

Die Messwertabweichung der Thermoleitung gilt bei einer gemessenen Temperatur des angeschlossenen Thermoelements von 900 °C und ist für stark abweichende Temperaturen größer [Kle10]. Die Umgebungstemperatur ist hierbei die Temperatur im Wasserstofflabor, die durch eine Klimaregelung in einem Bereich von 20°C bis 25°C liegt und ebenfalls über eine Luftentfeuchtung verfügt, so dass die geforderten Einsatzbedingungen für die Komponenten stets eingehalten werden.

Die Abschätzung der Messungenauigkeit des Messumformers umfasst dabei den Einfluss des Langzeitdrifts (ca. 0,1 % pro Jahr, Messumformer nicht älter als 3 Jahre), Linearisierungsfehler der Eingangsspanne (ca. 0,2 %), den Kalibrierungsfehler (0,1 %) und den Temperatureinfluss der Umgebungstemperatur, der aber aufgrund der Temperaturregelung im Wasserstofflabor 0,25 % nicht überschreitet. Die aufsummierte Messungenauigkeit des Thermoelements berechnet sich für die Maximaltemperatur von 900 °C (TL) zu 6,1 K, was einer relativen Abweichung von weniger als 1 % vom Endwert entspricht. Dies gilt hauptsächlich für die Temperaturmessung am Rekombinatoremodell, insbesondere in den Katalysatorblechen, die Temperaturen von teilweise über 700 °C aufweisen. Die Umrechnung in Kelvin entfällt, da die Messunsicherheit der Thermoelemente ebenfalls auf die Celsius-Skala bezogen wird. Für Thermoelemente, die nur für Temperaturen bis ma-

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

Komponente	Spezifikation	Umgebungsbedingungen	Messbereich	Messunsicherheit
Thermoelement NiCr-Ni	Typ K (Klasse 1)	0 bis 200 °C (→ TL)	- 40 bis 1000 °C	$\pm 1,5^\circ\text{C}$ oder $0,004 \cdot T_{\text{mess}}$
Thermo- leitung (TL)	Typ 2K (Klasse 1)	0 bis 200 °C	Fehler bei 900 °C	$\pm 1,5^\circ\text{C}$
Mess- umformer	INOR (IPAQ-L)	-20 bis 70 °C 0 bis 95% RH	gemäß TE	< 1%
kumulierte Messunsicherheit mit Thermoelement Typ K			bis 900 °C bis 375 °C	6,1 K $\hat{=}$ 0,68 % 4,0 K $\hat{=}$ 0,44 %

Tabelle 3.12: Einsatzbedingungen und Messunsicherheit der verwendeten Komponenten zur Temperaturmessung mit Thermoelementen

ximal 375 °C verwendet werden (z.B. Gastemperaturen), wird eine Messunsicherheit von 4 K angenommen, da auch für niedrigere Temperaturen der Einfluss des Thermoelements laut Hersteller auf eine minimale Abweichung von 1,5 K festgelegt ist.

Da es sich bei den Messungen hauptsächlich um quasistationäre Messpunkte handelt, ist das Ansprechverhalten der Thermoelemente und die damit verbundene Aktualisierungszeit des Messumformers nur von untergeordneter Bedeutung. Im Falle von hohen Temperaturgradienten kann das Ansprechverhalten jedoch zu einem zeitlichen Versatz der Temperaturmessung führen, da das Thermoelement der Temperaturänderung nur eingeschränkt schnell folgen kann. (Tabelle 3.13).

Komponente	Spezifikation	Ansprechzeit*
Thermoelement	0,5 mm	5,9 s bis 90 % vom Endwert
Thermoelement	1,0 mm	15 s bis 90 % vom Endwert
Messumformer	INOR / IPAQ-L	1,5 s (Aktualisierungszeit)
*Annahme: Temperatursprung in Luft bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 2 m/s		

Tabelle 3.13: Ansprechverhalten der Thermoelemente und Messumformer

Die empfohlene Einbaulänge für Thermoelemente mit einem Durchmesser von 1,5 mm/ 1,6 mm liegt bei 8 mm bis 12 mm für die Messung in Feststoffen und bei 22 mm bis 30 mm für die Messung von Gastemperaturen [Kle10]. So soll der Einfluss der Wärmeableitung minimiert werden, der durch Temperaturunterschiede zwischen Sensorspitze und Sensorkabel auftritt. Die Ableitung von Wärme und der damit verbundene Messfehler wächst mit steigender Temperaturdifferenz und sinkender Einbautiefe. Für die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Thermoelemente mit einem noch geringeren Durchmesser von 0,5 mm und 1,0 mm liegen die genannten Einbautiefen dementsprechend noch niedriger. Somit wird die erforderliche Einbautiefe von allen Thermoelementen zur Messung der Gas- und Katalysatortemperatur erfüllt. Dies gilt ebenfalls für die Messstel-

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

le TR-64-RK mit einem Durchmesser von 0,5 mm und einer Einbautiefe von 5 mm. Hier kann alternativ die Näherungsformel angewendet werden, die für Feststoffe eine Einbautiefe von mindestens dem fünf- bis zehnfachen Durchmesser des Thermoelements fordert [Kle10]. Für die gemessenen Wandtemperaturen (Behälterwandtemperaturen und Rekombinatorgehäusetemperaturen) wird diese Forderung nicht eingehalten. Zur Minimierung des daraus resultierenden Messfehlers wird Wärmeleitpaste verwendet, die eine hohe thermische Leitfähigkeit zwischen Wand und Sensorspitze realisieren soll. Zudem sind die Thermoelemente von der Spitze an gemessen über einer Länge von mindestens 50 mm entlang der erwarteten Isothermen auf die jeweilige Wand angebracht, um Ableitungseffekte zu minimieren. Mit Bezug auf die Behälterwandtemperaturen wird die Messgenauigkeit durch die relativ geringen Temperaturgradienten von ca. 20 °C zwischen Behältergas und -wand verhältnismäßig gering ausfallen. Für die Temperaturmessung der Rekombinatorwand muss aber mit höheren Abweichungen gerechnet werden, da hier dementsprechend höhere Temperaturdifferenzen zwischen Gastemperatur (~ 20 °C) und Gehäusetemperatur (~ 400 °C) auftreten.

Unabhängig von den Messunsicherheiten, die sich aufgrund der Messkette ergeben, muss auch bei der Positionierung der Thermoelemente sichergestellt werden, dass sie nicht im direkten Strahlungsaustausch mit in der Nähe befindlichen heißen Oberflächen stehen. Wärmestrahlung führt dazu, dass das Thermoelement direkt erwärmt wird und die gemessene Temperatur deshalb über der zu messenden Gastemperatur liegt. Dies ist vor allem für die Thermoelemente TR-4-70 RG bis TR-4-74 RG zu beachten, die zur Messung der Gastemperatur in direkter Nähe unter- oder oberhalb der Rekombinatorbleche positioniert sind. Abbildung 3.25 verdeutlicht diese Problematik anhand des

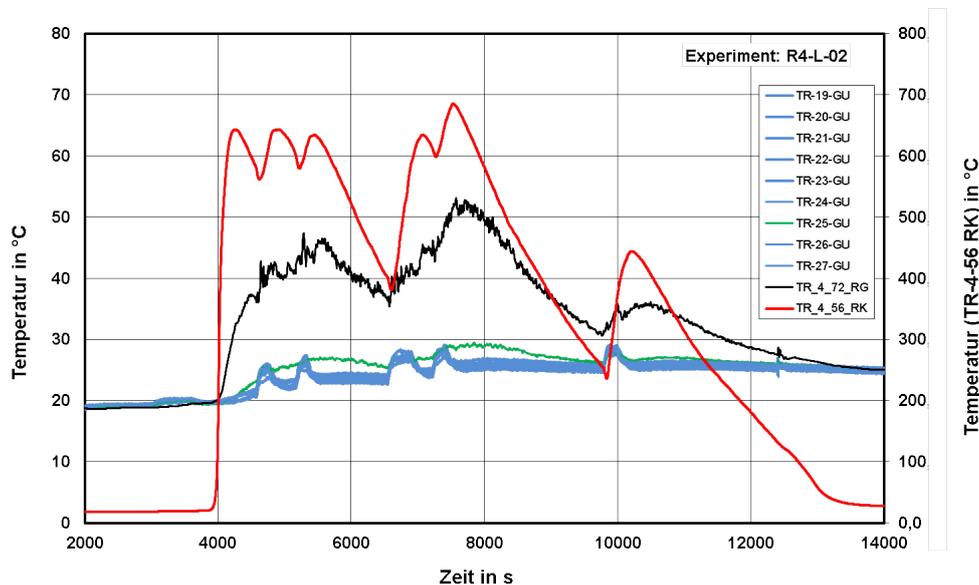


Abbildung 3.25: Einfluss von Wärmestrahlung auf das Thermoelement TR-4-72 RG

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

Thermoelements TR-4-72 RG (schwarze Kurve) während des Versuchs R4-L-02, das sich in einem Abstand von ca. 50 mm vom Rekombinatoreinlass befindet. Somit steht es in direktem Strahlungsaustausch mit der unteren Kante der Katalysatorbleche, deren Temperatur anhand der Katalysatortemperatur TR-4-54 RK (rote Kurve mit Skala auf der Sekundärachse) beispielhaft dargestellt ist. TR-4-19 TU bis TR-4-27 TU sind in derselben Höhe wie TR-4-72 RG positioniert, stehen jedoch nicht in direktem Strahlungsaustausch mit den Blechen. Deren Temperatur liegt für die gesamte Versuchsdauer nach 4000 s zwischen 20 °C und 30 °C, wobei durch die Einspeisung von Wasserstoff eine kurzzeitige Durchmischung der Behälteratmosphäre stattfindet, die sich in einem kurzfristigen Anstieg der Temperatur widerspiegelt (vier kurzzeitige Temperaturerhöhungen zwischen 4000 s und 8000 s). Eine Ausnahme bildet hierbei TR-4-25 GU (grün), das neben dem Katalysatoreinschub positioniert ist und somit durch Wärmestrahlung um ca. 3 K erhöhte Werte zeigt. Dahingegen liegt die gemessene Temperatur von TR-4-72 RG mit z.T. über 50 °C um 25 K über den gemessenen Temperaturen der Thermoelemente, die nicht im direkten Strahlungsaustausch stehen. Beim Vergleich von TR-4-72 RG mit der Katalysatortemperatur TR-4-54 RK wird die Abhängigkeit der Einlasstemperatur von der Katalysatortemperatur deutlich. Somit führt Wärmestrahlung in diesem Fall zu Messunsicherheiten bis zu 30 K Abweichung, wobei in anderen Versuchen auch höhere Abweichungen beobachtet werden (z.B. R4-M-05 mit einer Abweichung von über 50 K).

Dieses Phänomen kann prinzipiell über eine analytische Messwertkorrektur minimiert werden, was jedoch nur mit relativ hohem Aufwand möglich ist und zudem im Vergleich zu Thermoelementen, die nicht unter dem Einfluss von Wärmestrahlung stehen, nicht zu vergleichbar präzisen Messwerten führt [Mos12].

Daher wird für das Thermoelement TR-4-72 RG auf eine Messwertkorrektur verzichtet und der Sensor nicht zur Messung der Einlasstemperatur verwendet. Stattdessen wird auf Temperatursensoren zurückgegriffen, die zwar in unmittelbarer Nähe des Einlasses positioniert sind, sich jedoch nicht in direktem Strahlungsaustausch mit den Katalysatorblechen befinden. Die übrigen Thermoelemente zur Messung der Gastemperatur im Kamin und am Auslass (TR-4-XX RG) werden ebenfalls durch Wärmestrahlung beeinflusst, wobei hier die Diskrepanz zur Gastemperatur leicht niedriger ausfällt. Die gemessene Temperatur des rekombinierten Gases im Kamin dicht über den Blechen liegt dabei im Bereich bis ca. 200 °C, wobei die Oberkante der Katalysatorbleche Temperaturen im Bereich von 500 - 600 °C aufweist. Dementsprechend sind auch hier Messabweichungen von 50 K nicht auszuschließen. Insbesondere TR-4-71 RG und teilweise auch TR-4-73 RG, die zur Messung der Kamingastemperatur dicht über den Blechen verwendet werden, sind durch die Thermoelementleitungen der Blechtemperaturen sowohl in der Positionierung als auch aufgrund von Ableitungseffekten in ihrer Messgenauigkeit gestört, so dass auch hier z.T. Abweichungen von über 50 K angenommen werden müssen.

3.7.2 Fehlerbetrachtung der kapazitiven Feuchtesensoren

Im Rahmen der Qualifizierung der Feuchtesensoren wurde auch eine Fehlerbetrachtung vorgenommen, um eventuelle Störeinflüsse auf die Messtechnik abschätzen zu können. Hierbei wurde als Hauptfehlerquelle eine verfälschte Temperaturmessung des Pt-1000-Elements (analog zur Temperaturmessung mit Thermoelementen) in der Nähe heißer Oberflächen identifiziert [Kla11]. Wenn die Temperatursonde in direktem Wärmestrahlungsaustausch mit heißen Oberflächen steht, erhöhen sich die Temperatur des Sensors und somit auch der Temperaturmesswert im Vergleich zur realen Gastemperatur, wodurch die relative Feuchte unterschätzt wird. Diese Abweichungen sind gerade im niedrigen Temperaturbereich entscheidend, wo kleine Temperaturunterschiede zu einer großen Abweichung der relativen Feuchte führen. Der Fehler erreicht hierbei im Versuchsstand REKO-1, in dem die Qualifizierungsuntersuchungen durchgeführt wurden, in Extremfällen eine Messwertabweichung von 20 % relativer Feuchte [Kla11]. Diese Randbedingungen können für die Versuche im Versuchsstand REKO-4 ausgeschlossen werden, da die Sensoren so weit von heißen Oberflächen positioniert sind, dass der Einfluss der Wärmestrahlung auf die Temperaturmessung mit den Pt-1000-Elementen vernachlässigt werden kann. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit von einer Genauigkeit ausgegangen, die laut Herstellerangaben folgende Beiträge umfasst (siehe [Tes09]):

Linearität inklusive Streuung beinhaltet systematische Fehler und Streuung aufgrund von Fertigungstoleranzen der verwendeten Bauteile.

Scheinbare Hysterese bezeichnet den Fehler, der durch die Messwertangleichung des Sensors aus dem oberen oder unteren Messbereich bis zum tatsächlichen Messpunkt hervorgerufen wird.

Reproduzierbarkeit bezeichnet die Wiederholgenauigkeit eines Messpunkts.

Abgleichplatz Fertigung bezeichnet die Messunsicherheit der Referenzgeräte in der Fertigung.

Unsicherheit der Prüfung beinhaltet Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der Linearität und der scheinbaren Hysterese.

Die Genauigkeit der einzelnen Komponenten ist in Tabelle 3.14 angegeben. Die Messungenauigkeit bzgl. der Feuchte beträgt somit 2,7 % rH und 0,55 °C in Bezug auf Temperaturmessung mit dem Pt-1000-Element.

Während der Versuche im Versuchsstand REKO-4 ist die Kondensation direkt am Sensor weitgehend ausgeblieben. Unter besonderen Umständen konnte nach Beendigung eines Versuches Betauung an den Sensoren festgestellt werden, die aber von der Messtechnik erkannt wurde, so dass keine Messwerte mehr aufgezeichnet wurden. Des Weiteren zeigen sowohl die Herstellerangaben als auch die Sensorqualifizierung, dass Kondensatbildung zu keiner langfristigen Messstörung führt und nach kurzer Zeit abklingt, sobald die Bedingungen wieder den gesättigten Bereich verlassen [Tes09] [Kla11].

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

Komponente	Größe	Wert
Messumformer (Testo 6681)	Auflösung	0,1 % rH bzw. 0,1 °C
	Genauigkeit	föhlerabhängig
Messfühler (Testo 6614)	Feuchte in rH (0...100% rH)	$\pm (1,0 \% \text{ rH} + 0,007 \cdot \text{Messwert})$ $= 1,7 \% \text{ rH}$
	Feuchte in Abhängigkeit der Behältertemperatur ($T_{\text{ref}}=25 \text{ °C}$)	$\pm(0,02 \% \frac{\text{rH}}{\text{K}})$ $= 0,9 \% \text{ rH}$ ($T_{\text{max}}=70 \text{ °C}$)
	Feuchte in Abhängigkeit der Elektroniktemperatur ($T_{\text{ref}}=25 \text{ °C}$)	$\pm(0,02 \% \frac{\text{rH}}{\text{K}})$ $= 0,1 \% \text{ rH}$ ($T_{\text{umg}}=20 \text{ °C}$)
	Temperatur (Testo)	$\pm 0,15 \text{ °C}$
	DIN 1/3 Klasse B [Mes] Pt-1000	$= 0,4 \text{ °C}$ bei $T_{\text{mess}} = 180 \text{ °C}$
Gesamter Messfehler	Feuchte	2,7 % rH
	Temperatur	0,55 °C

Tabelle 3.14: Genauigkeit der Feuchtemessung (Testo-Messumformer 6681 und Testo-Messfühler 6614) [Tes09]

3.7.3 Fehlerbetrachtung Manometer

Für die Versuche im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich Messwerte des Digitalmanometers (MAN-LD3S der Firma Kobold) aufgezeichnet. Die zur Berechnung der Messgenauigkeit relevanten Betriebsdaten sind in Tabelle 3.15 angegeben.

Die Genauigkeitsklasse 0,5 definiert dabei die maximal zulässige Abweichung in Prozent vom Messbereichsendwert und führt zu einer Messungenauigkeit des Manometers von $\leq \pm 0,0125 \text{ bar}$. Der Einfluss unterschiedlicher Temperaturen bezieht sich auf eine Referenztemperatur von 20 °C . Durch die klimatische Regelung innerhalb des Wasserstofflabors (Bereich von $20 - 25 \text{ °C}$) ist somit kein zusätzlicher Fehler zu berücksichtigen. Die Wandlungsrate liegt mit 5 Messungen pro Sekunde über der Aufnahmezeit der Anlagensteuerung und führt somit auch zu keiner zusätzlichen Messwertverzögerung.

Das Manometer unterliegt im Betrieb einer von den Umgebungsbedingungen abhängigen Nullpunktverschiebung, die dazu führt, dass auch bei isobaren Verhältnissen zwischen Behälter- und Umgebungsdruck Werte von $\Delta p_{NP} = 0,08 \text{ bar}$ auftreten. Daher

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

Bezeichnung	Wert
Messbereich	0 - 2,5 bar
Anzeige	4 Stellen 3 Nachkommastellen
Genauigkeit	Klasse 0,5
Temperaturkoeffizient	
- Nullpunkt	$\leq \pm 0,2\%v. ME^{*1}/10 K$
- Spanne	$\leq \pm 0,1\%v. ME^{*1}/10 K$
Wandlungsrate	$5 \frac{1}{s}$
Maximale Abweichung	0,0125 bar
*1ME = Messbereichsendwert	

Tabelle 3.15: Genauigkeit der Druckmessung (Kobold MAN-LD3S) [Kob06]

muss bei der Betrachtung der Druckmesswerte beachtet werden, dass der zu Beginn des Versuchs vorherrschende Druck als Offset von den Messergebnissen während der Versuche subtrahiert wird, um die reale Druckdifferenz zwischen Behälter und Umgebung zu bestimmen.

3.7.4 Fehlerbetrachtung der Katharometer

Die Messgenauigkeit der Katharometer hängt von den Umgebungsbedingungen ab, unter denen sie betrieben werden. So wurde schon in früheren Arbeiten u.a. die Abhängigkeit der Katharometer vom Atmosphärendruck untersucht [Sim09]. Diese Untersuchungen wurden jedoch nur bei Drücken von ca. 1,1 bar bzw. 0,1 bar Überdruck durchgeführt. Zudem wurde ein Katharometer verwendet, der über kein Pt-100-Element als Temperatursmessstelle verfügte und somit nicht baugleich mit den in dieser Arbeit verwendeten Sensoren war. Daher wurden die Untersuchungen bzgl. der Druckabhängigkeit mit den in dieser Arbeit verwendeten Katharometern wiederholt. Abbildung 3.26 zeigt die Abhängigkeit des Sensorsignals vom vorherrschenden Druck im Behälter. Auf der Primärachse sind die Messsignale von drei Katharometern aufgetragen, während der Druck (schwarze Kurve) auf der Sekundärachse als Überdruck dargestellt ist. Der Druck wird durch die Zufuhr von Druckluft ab 1000 s von etwas unter 0,1 bar Überdruck (inklusive Offset) bis ca. 2250 s um 1 bar angehoben. Der Sensormesswert steigt in dieser Zeit leicht an, wobei die absoluten Abweichungen jedoch nur in einem Bereich von 0,05 - 0,08 Vol.-% H_2 liegen. Da dieser Offset konstant ist, kann er bei Versuchen mit höheren Drücken als Offset vom Messergebnis subtrahiert werden. Aufgrund des marginalen Einflusses wird jedoch im Rahmen der Druckuntersuchungen darauf verzichtet.

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

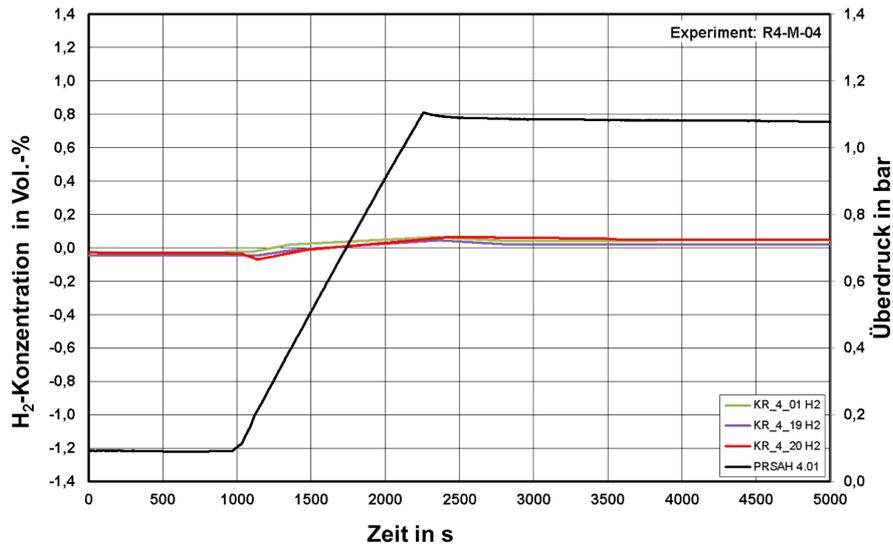


Abbildung 3.26: Einfluss des Druckes auf die Messung mit Katharometern

Zur Abschätzung des Messfehlers wird die Positionierung der Katharometer in drei Bereiche unterteilt, die sich in den jeweiligen Randbedingungen unterscheiden.

Bereich 1 umfasst die Katharometer zur Bestimmung der H₂-Konzentrationen in unterschiedlichen Behälterhöhen, ohne im direkten Einfluss des Rekombinatormodells zu stehen. Dieser Bereich umfasst einen Großteil der im Versuchsstand REKO-4 verwendeten Katharometer einschließlich des Einlasskatharometers KR-4-20. In diesem Bereich sind relativ langsame Temperaturänderungen von weniger als 10 K in 100 s und Maximaltemperaturen von unter 70 °C zu erwarten. Die relative Luftfeuchte kann bis zu 100 % betragen, so dass unter Umständen Kondensation eintritt.

Bereich 2 umfasst Katharometer, die zwar Konzentrationen außerhalb des Rekombinatormodells messen, jedoch in direkter Nähe bzw. im Strahlungsaustausch mit dem Katalysatoreinschub respektive den Katalysatorblechen stehen. Dies ist vor allem der Einlasskatharometer KR-4-07 und später u.U. auch der in unmittelbarer Nähe angebrachte Katharometer KR-4-06. Die vom Pt-100-Element registrierten zeitlichen Temperaturgradienten können dabei Werte von bis zu 30 K in 100 s erreichen und bis auf Maximaltemperaturen von 110 °C steigen. Die gemessenen Temperaturen entstehen dabei durch die Aufheizung des Sensors durch Wärmestrahlung der Bleche, während die Temperatur des Gases in einem Bereich von 15 - 30 °C liegt. Diese Diskrepanz zwischen Sensor- und Gastemperatur führt zu stark schwankenden und instationären Messwerten, die zu einem relativ hohen Fehler führen.

Bereich 3 betrifft mit Ausnahme der Versuchsreihe R4-O nur den Auslasskatharometer KR-4-08. Dieser Katharometer ist im Auslass des Rekombinators positioniert und

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

liegt somit direkt in der Auslassfahne. Das rekombinierte Gas kann am Auslass Temperaturen von bis zu 300 °C erreichen und besitzt dabei durch die Rekombinationsreaktion zu H₂O eine hohe absolute Feuchte. Die Katharometer arbeiten hierbei im Bereich der maximal zulässigen Einsatztemperaturen von 280 °C, was zu einem hohen Messfehler im Vergleich zu anderen Katharometern z.B. im Bereich 1 führt. In der Versuchsreihe R4-O befindet sich aufgrund der PIV-Messung kein Katharometer am Auslass.

Im Folgenden wird die Genauigkeit aller Katharometer für den Bereich 1 analysiert. Anschließend werden die geänderten Randbedingungen des 2. und 3. Bereiches hinzugezogen und der Einfluss auf die Messgenauigkeit quantifiziert. Die Katharometer werden, wie in Abschnitt 10.1 erläutert, in der nahezu gleichen Anordnung kalibriert und anschließend mit dem Korrekturglied f_{REKO4} an den Versuchsstand REKO-4 angepasst. Die Verwendung eines Wasserstoffanalysators ermöglicht eine Genauigkeit bzgl. der Kalibrierung von abschätzend $\pm 0,02$ Vol.-% H_{2,abs} absolut. Die Langzeitstabilität wurde überprüft, indem nach ca. 2 Jahren eine erneute Kalibrierung durchgeführt wurde. Hierbei wurden Katharometer aus allen 3 Bereichen gewählt:

KR-4-06 / KR-4-20 Bis zu diesem Zeitpunkt ausschließlich in Bereich 1 eingesetzt

KR-4-07 Einlasskatharometer in Bereich 2

KR-4-08 Auslasskatharometer in Bereich 3

Die Konfiguration der Katharometer (Sensor, Kabel, Kabellängen, Kupplungen, Verstärkerschaltung) während der Wiederholungskalibrierung in REKO-3 zur Überprüfung der Langzeitstabilität ist identisch zu der Konfiguration in REKO-4. Hierzu werden die Katharometer direkt im Strömungskanal von REKO-3 positioniert und mit vier verschiedenen H₂-Konzentrationen bei Umgebungstemperatur beaufschlagt. Die eingestellte Wasserstoffkonzentration wird dann mit den Katharometern gemessen und zusätzlich mit einer H₂-Analytik überprüft. Abbildung 3.27 zeigt die gemessene Wasserstoffkonzentration der Katharometer (farbige, dünne Kurven) im Vergleich zur Wasserstoffanalytik (schwarze, dicke Kurve). Nach einer Einlaufzeit von einigen Sekunden steigt die Konzentration sprunghaft an und nähert sich einer jeweiligen Zielkonzentration, die sich mit dem Wert der Analytik mit hoher Genauigkeit deckt. Hierbei ist zu beachten, dass die scheinbare Ansprechzeit von einigen Sekunden nicht ausschließlich durch die Trägheit der Sensoren verursacht wird, sondern auch durch die Regelung des Versuchsstands REKO-3, die ebenfalls Zeit benötigt, die neue Wasserstoffkonzentration einzustellen. Da die Konzentrationen im Behälter während der Versuche sehr langsamen Gradienten folgen, kann die Betrachtung der Reaktionszeit vernachlässigt werden. Die späte Reaktion der H₂-Analytik in REKO-3 auf eine Konzentrationsänderung liegt an der Absaugstrecke des Analysators, wodurch die Konzentrationsänderung prinzipbedingt erst ca. 30 Sekunden später registriert werden kann.

Zur Bestimmung des absoluten Fehlers der Konzentrationsmessung während der Überprüfung werden die Messwerte über 120 Sekunden gemittelt und mit denen der Analytik verglichen (Tabelle 3.16). $|\Delta x_{H_2, max}|$ gibt hierbei für jeden Sensor die maximale Abwei-

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

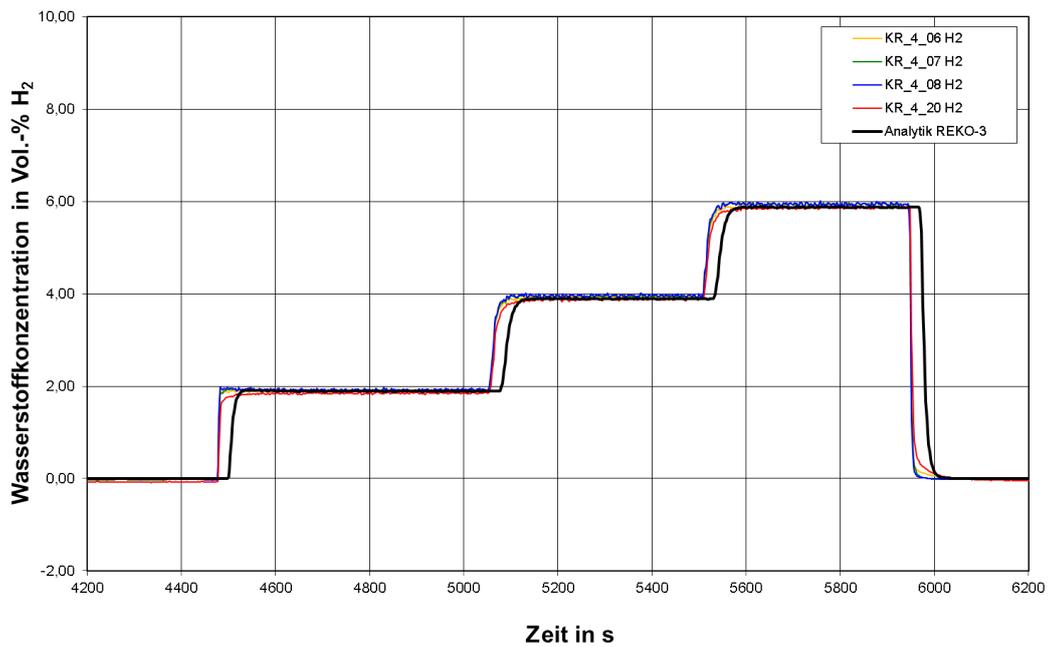


Abbildung 3.27: Überprüfung der Katharometerkalibrierung nach ca. 20 Monaten Betriebszeit

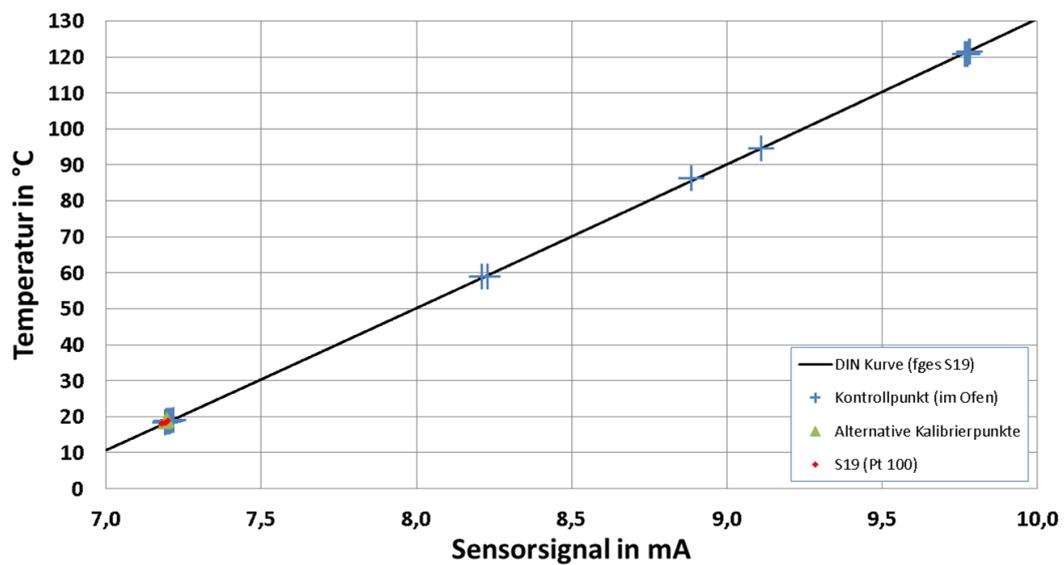


Abbildung 3.28: Überprüfung der Temperaturmessgenauigkeit von Katharometern (Pt-100) und Thermoelementen

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

Konzentration	H ₂ -Analytik	KR-4-06	KR-4-07	KR-4-08	KR-4-20
	Vol.-% H ₂	Vol.-% H ₂	Vol.-% H ₂	Vol.-% H ₂	Vol.-% H ₂
0 Vol.-% H ₂	0,00	-0,02	-0,03	-0,02	-0,08
2 Vol.-% H ₂	1,89	1,90	1,91	1,92	1,85
4 Vol.-% H ₂	3,89	3,92	3,95	3,96	3,88
6 Vol.-% H ₂	5,87	5,88	5,94	5,94	5,86
0 Vol.-% H ₂	0,00	-0,01	-0,01	-0,02	-0,05
$ \Delta x_{H_2, max} $	[-]	0,03	0,07	0,07	0,08

Tabelle 3.16: Vergleich der Messwerte der Katharometer mit der H₂-Analytik

chung zur Wasserstoffanalytik wieder. Sie beträgt für alle Sensoren unter 0,08 Vol.-% H₂ und liegt in einem Bereich von beobachteten Messwertschwankungen, die ebenfalls unter 0,1 Vol.-% H₂ liegen. Somit folgt für alle Katharometer, dass sie unabhängig ihres Einsatzortes während der zwei Jahre im Versuchsstand REKO-4 nur marginale Abweichungen aufgrund von Langzeitdrifteffekten bzw. den dort vorherrschenden Bedingungen aufweisen. Weder die Einlasskatharometer in direktem Strahlungsaustausch in Bereich 2 noch der Auslasskatharometer in Bereich 3, der zeitweise im Bereich der maximal zulässigen Betriebsbedingungen arbeitet, weisen höhere Abweichungen auf.

Die Katharometer unterliegen in allen Bereichen einem mit zunehmender Versuchsdauer erhöhten Einfluss von Wasserdampf bzw. der steigenden Feuchte. Dieser Einfluss wird mit der im Anhang Abschnitt 10.3 beschriebenen Temperaturkorrektur minimiert, da diese ebenfalls unter erhöhter Feuchtigkeit erstellt worden ist.

Zur Überprüfung der Messgenauigkeit mit dem auf dem Sensorkopf installierten Pt-100-Element wird ein Katharometer unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt. Hierzu wird der Sensor KR-4-19 innerhalb eines Ofens positioniert. Die Temperatur des Ofens wird dabei sowohl mit Thermoelementen als auch mit einem Quecksilberthermometer überprüft. Das Pt-100-Element wird mit der im Anhang Abschnitt 10.2 beschriebenen Kalibrierung betrieben, d.h. es wird der auf DIN IEC 751 basierende Funktionsgraph nach Gleichung 10.12 verwendet, der mittels eines Kalibrierpunkts mit dem jeweiligen Sensor abgeglichen worden ist. Abbildung 3.28 zeigt den Vergleich zwischen der mit Hilfe der DIN-Kurve errechneten Temperatur (schwarze Kurve) und alternativen Messpunkten, die anhand eines Thermoelements gewonnen wurden. Die aus DIN IEC 751 berechnete Kurve wird hierbei mit dem Kalibrierpunkt für KR-4-19 (rote Raute) erstellt. Die Kontrollmessungen (grün und blau) bestehen hierbei aus dem Sensorsignal $I_{mess, Pt-100}$ und der mit Thermoelementen vom Pt-100-Element unabhängig bestimmten Temperatur. Die Kontrollmessungen und die DIN-Kurve stimmen dabei sehr gut überein und weichen bei genauerer Betrachtung um weniger als 1 K ab. Dabei handelt es sich jedoch um stationäre Messwerte, die nach einer hinreichend langen Zeit aufgenommen werden. Wie bereits erwähnt eignet sich diese Messmethode nicht zur instationären Gastempe-

raturmessung, da die relativ große Masse des Sensorkopfes zu einem dementsprechend trägen Temperaturfolgeverhalten führt. Bei der Bestimmung der Einlasstemperatur in Korrelation mit der Einlasskonzentration (z.B. KR-4-20) hingegen, wo die Stationarität der Messwerte von entscheidender Bedeutung ist, ist die Temperaturmessung mit Pt-100-Elementen mit der ermittelten Genauigkeit von 1 K gut geeignet.

3.7.5 Fehlerbetrachtung PIV

Die Fehlerbetrachtung der PIV-Messung wurde im Rahmen eines intern angefertigten Berichts durchgeführt (siehe [Sim12]). Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammengefasst.

Grundsätzlich wird zwischen systematischen Fehlerquellen, stochastischen Fehlerquellen und sogenannten Grobfehlern/Ausreißern (engl.: „outlying“) bzw. Fehlmessungen durch Versehen oder „grobe Schnitzer“ (engl.: „blunder“) unterschieden [Rab10], vgl. [DIN99]. Grobfehler und Fehlmessungen, die aufgrund von unvorhergesehenen Ereignissen wie z.B. Schwankungen in der Stromversorgung, Fehlbedienung des Messgerätes usw. hervorgerufen werden, führen zu sehr großen Abweichungen des Messwerts. Diese Art von Fehlern wird in der Fehlerbetrachtung nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass sie schon in der Auswertungsphase erkannt und dementsprechend eliminiert werden können. Stochastische Fehler liegen dann vor, wenn die Schwankungen einzelner Messergebnisse nicht vorhersagbar sind. Andererseits kann die stochastische Schwankung durch eine genügend große Anzahl an Messungen und durch Mittelung der Einzelmessungen minimiert werden, was für die Messungen mit PIV durch Aufnahme von 60 Bildpaaren pro Messpunkt erreicht wird. Dennoch darf gerade für die Betrachtung einzelner Bildpaare der stochastische Fehler nicht vernachlässigt werden [Rab10]. Im Gegensatz dazu bleiben systematische Fehler auch bei Wiederholung konstant oder ändern sich nach einem geordneten Muster. Je nach Berechenbarkeit kann der Einfluss solcher Fehler u.U. reduziert und eine Fehlerkorrektur auf das Messergebnis angewandt werden, um den Einfluss zu minimieren. Eine vollständige Elimination des systematischen Fehlers ist jedoch grundsätzlich unmöglich [Rab10]. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten PIV-Messungen ist jedoch die Erstellung einer Korrektur zur Fehlerminimierung für die relevanten systematischen Fehler nicht durchführbar.

Die Fehlerbetrachtung der PIV-Messung kann in vier Teilbereiche differenziert werden, die sich auf jeweils unterschiedliche Aspekte der Messung beziehen (Abbildung 3.29).

1. **Wechselwirkung Partikel-Strömung**

Dieser Bereich untersucht die Annahme, dass die Partikel der Strömung schlupffrei folgen.

2. **Anordnung der PIV-Komponenten**

Der Einfluss von Ungenauigkeiten in der Anordnung der PIV-Komponenten untereinander, wie z.B. Abweichungen in der Winkel- und Entfernungsmessung, wird quantitativ abgeschätzt.

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

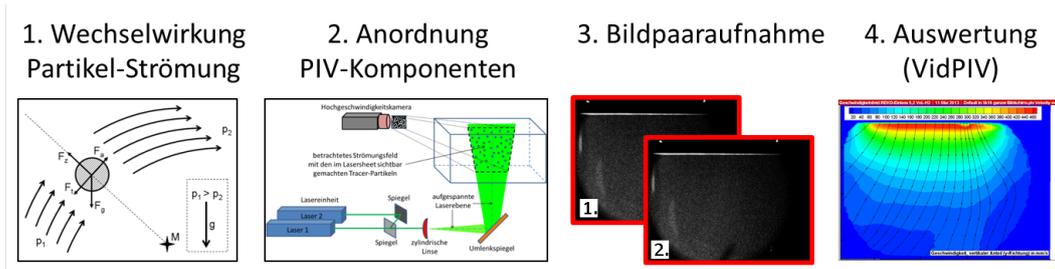


Abbildung 3.29: Unterteilung der Fehlerbetrachtung von PIV in vier Teilbereiche

3. Bildpaaraufnahme

Die Betrachtung der Bildaufnahme analysiert zum einen den Einfluss der Auflösung des Chips in der Hochgeschwindigkeitskamera, zum anderen die Genauigkeit der Synchronisation mit der Lasereinheit.

4. Auswertung mit VidPIV

Die Berechnung des Geschwindigkeitsfelds aus den Bildpaaren wird auf ihre Genauigkeit untersucht.

Wechselwirkung Partikel-Strömung

Die Partikeldichte innerhalb des Behälters liegt üblicherweise in der Größenordnung von 10 l/mm^3 . Dabei kann davon ausgegangen werden, dass die Partikel die Eigenschaften des Gases nicht beeinflussen [Roc92]. Die Annahme, dass die Partikel der Strömung schlupffrei folgen, basiert auf dem Teilchenfolgevermögen, das wiederum zum einen von den Partikeleigenschaften selber abhängt, zum anderen von den Strömungseigenschaften. Der Querschnitt der DEHS-Partikel ist dafür verantwortlich, dass ein Teilchen in einer Strömung mitgerissen wird. Jedoch wirken zusätzlich verschiedene Kräfte wie z.B. Gravitation und Trägheitskräfte, die dazu führen, dass die Partikel nicht mehr der Stromlinie des Gases folgen, sondern über zusätzliche Geschwindigkeitskomponenten verfügen. Die Partikel weisen dann einen sogenannten Schlupf zwischen ihrer Bewegung und der Bewegung des Gases auf [TYF07]. Alle im Rahmen der „Wechselwirkung Partikel-Strömung“ identifizierten Ursachen, die zu Schlupf führen können, sind systematische Fehler.

Die Gravitationskraft F_g ist als einzige Kraft unabhängig von der Strömung und wirkt immer in Richtung der Erdgravitation. Das Absinken aufgrund der eigenen Gewichtskraft wird im Kontext von Partikeln und Aerosolen auch als Sedimentation bezeichnet [Hin99]. Im Gegensatz dazu treten Trägheitskräfte auf, die von Strömungseigenschaften wie Gasbeschleunigung bzw. -entschleunigung (Trägheitskraft F_t) oder Änderung der Strömungsrichtung (Zentrifugalkraft F_z) hervorgerufen werden. Die zentrale Partikeleigenschaft in diesem Zusammenhang ist der Partikeldurchmesser d_p und die damit einhergehende Partikelmasse m_p . Die DEHS-Partikel liegen im flüssigen Aggregatzustand vor, so dass die Form als kugelförmig angenommen werden kann. Die treibende Kraft

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

F_a , die die Partikel in der Strömung mitreißt, hängt über

$$F_a = f(A_P) = f\left(\frac{\pi}{4} \cdot d_P^2\right) \sim d_P^2 \quad (3.5)$$

mit dem Querschnitt des Partikels A_P und somit quadratisch mit dem Partikeldurchmesser d_P zusammen. Die Gewichts- und Trägheitskräfte hingegen sind proportional zur Partikelmasse und steigen dementsprechend gemäß

$$F_g, F_t, F_z = f(m_P) = f\left(\rho \cdot \frac{\pi}{6} \cdot d_P^3\right) \sim d_P^3 \quad (3.6)$$

kubisch mit d_P . Das bedeutet, dass mit steigender Partikelgröße auch die Trägheitskräfte und somit der systematisch störende Einfluss auf die Messung steigen. Aus der Betrachtung des Querschnitt-/Volumenverhältnisses bzw. Querschnitt-/Masseverhältnisses folgt, dass kleine Partikel der Strömung grundsätzlich besser folgen. Ebenso führen hohe Geschwindigkeitsgradienten bzw. Richtungsänderungen ebenfalls zu einem hohen Schlupf, der in der Messgenauigkeit berücksichtigt werden muss. Die Partikelgröße bzw. -größenverteilung wurde in diesem Zusammenhang separat sowohl mit einem „Aerodynamic Particle Sizer (APS)“ mit einem Messbereich von 0,5 μm bis 30 μm als auch mit einem „Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)“ mit einem Messbereich von 30 - 500 nm gemessen. Abbildung 3.30 zeigt zusammengefasst die Größenverteilung der DEHS-Partikel über mehrere Messungen.

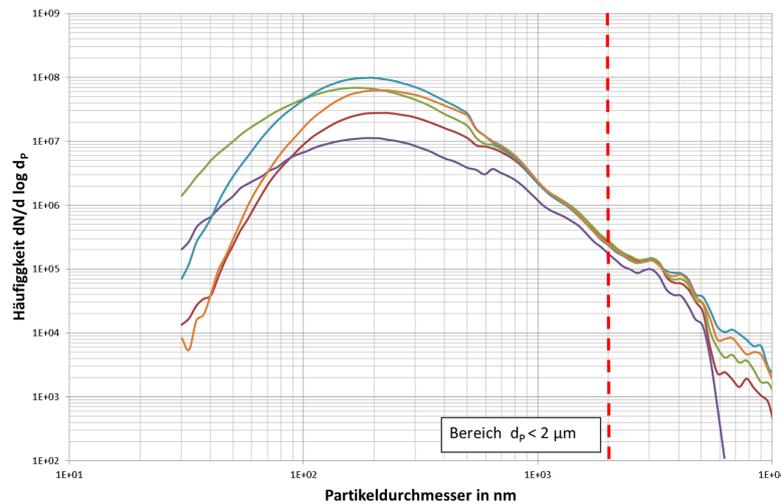


Abbildung 3.30: Größenverteilung der DEHS-Partikel gemessen mit APS und SMPS

Das Maximum der Häufigkeitsverteilung liegt zwischen 0,1 μm und 0,3 μm . Die Häufigkeit von Aerosolen über 2 μm liegt dabei schon um zwei bis drei Größenordnungen darunter. Daher wird im Rahmen dieser Fehlerbetrachtung davon ausgegangen, dass der maximale Partikeldurchmesser $d_{P,\text{max}}$ 2 μm nicht übersteigt. In diesem Zusammenhang wird unter Berücksichtigung der relevanten Stoffeigenschaften, der Umgebungsbedingungen für Luft und DEHS (dynamische/kinematische Viskosität η/ν , Dichte ρ , freie

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

Weglänge λ) und Naturkonstanten der Fehler quantitativ berechnet. Hierbei müssen Annahmen bzgl. der Strömung im Messfeld getroffen werden. Dazu gehört die Annahme einer maximalen und minimalen Strömungsgeschwindigkeit und -beschleunigung. Unter Berücksichtigung einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 2 m/s und der daraus berechneten Reynoldszahl von $Re < 1$ kann auf eine laminare Strömung geschlossen werden, in der die Reibungskräfte größer sind als die Trägheitskräfte (siehe [Sim12]). Insgesamt befindet sich die Strömung im Bereich des Stokes'schen Gesetzes [Hin99]. Die Sedimentationsgeschwindigkeit v_{sed} kann somit unter Vernachlässigung der Dichte der Luft ρ_{Luft} gegenüber der Dichte der DEHS-Partikel ρ_{DEHS} und der Bestimmung der Cunningham'schen Slip-Korrektur zu

$$v_{sed} = 1,183 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} = 0,1183 \text{ mm/s} \quad (3.7)$$

bestimmt werden und ist im Vergleich zu den zu erwartenden Geschwindigkeiten zu vernachlässigen (siehe [Sim12]). Der Fehler durch Schlupf in Folge der Partikelträgheit wird anhand der Relaxationszeit τ bestimmt. Sie beschreibt die charakteristische Zeit, die ein Partikel braucht, um auf einen Geschwindigkeitsgradienten zu reagieren. Hiermit kann die Strecke s_P berechnet werden, die das Partikel zurückgelegt hat und die sich aufgrund des Schlupfes von der zurückgelegten Strecke s_G unterscheidet. Der Quotient aus s_P und s_G spiegelt den Fehler wieder und liegt für geradlinige Beschleunigungen im Bereich von

$$\frac{s_P}{s_G} < 0,05\% \quad (3.8)$$

und für Gasströmungen mit Richtungsänderungen bei

$$\frac{s_P}{s_G} < 0,2\% \quad , \quad (3.9)$$

wobei konservative Annahmen bzgl. der Strömungen im Versuchsstand REKO-4 getroffen werden.

PIV-Anordnung

Die optischen Komponenten müssen möglichst präzise zueinander ausgerichtet werden, um eine Geschwindigkeitsmessung zu ermöglichen. So muss die Blickachse der Kamera möglichst orthogonal auf die Laserebene ausgerichtet sein. Abweichungen der Winkel führen zu Partikelbewegungen bzw. einer Partikelgeschwindigkeitskomponente, die von der Kamera des PIV-Systems nicht erfasst werden kann. Abbildung 3.31 veranschaulicht dies anhand einer 2D-Betrachtung. Im oberen Teil der Abbildung, in der von einer perfekten Ausrichtung der Komponenten ausgegangen wird, ist die von der PIV-Kamera registrierte Strecke des Partikels Δs_{PIV} gleich der real zurückgelegten Strecke des Partikels Δs_P . Der untere Teil geht nun von einem Winkelversatz α_V zwischen Laserebene und Kameraachse aus, der eine zusätzliche Geschwindigkeitskomponente des Partikels

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

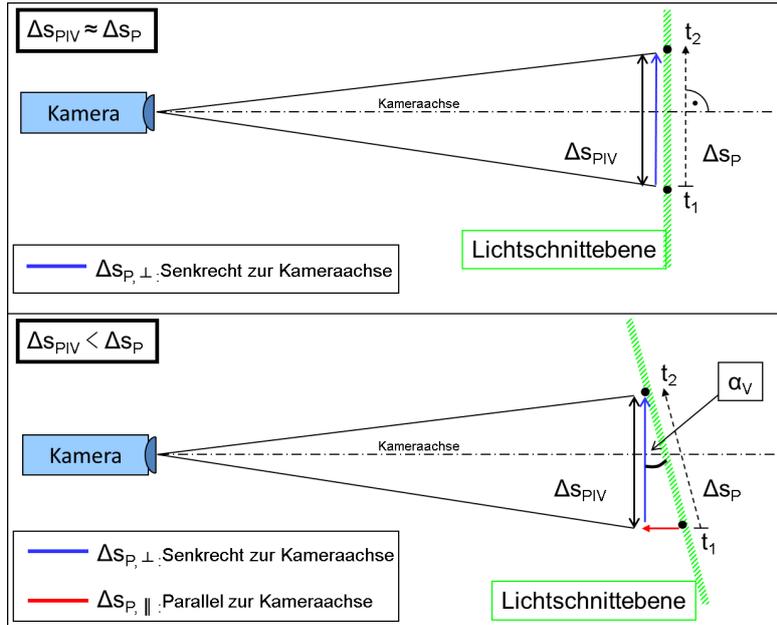


Abbildung 3.31: Einfluss einer Winkelabweichung der PIV-Komponenten auf die gemessene Partikelgeschwindigkeit

parallel zur Kameraachse induziert (rot), die von der Kamera im Gegensatz zum senkrechten Anteil nicht erfasst wird. Das bedeutet, dass das Partikel einen längeren Weg zurücklegt und somit eine höhere Geschwindigkeit besitzt als mit PIV gemessen wird. Der Quotient aus der gemessenen und realen Strecke Δs_{PIV} bzw. Δs_P ist nur vom Cosinusquadrat des Winkels α_V über

$$\frac{\Delta s_{PIV}}{\Delta s_P} = \cos^2(\alpha_V) \quad (3.10)$$

abhängig. Hieraus folgt, dass eine angenommene Abweichung von 3° (bzw. $\pm 1,5^\circ$) zu einem Fehler von

$$\frac{\Delta s_{PIV}}{\Delta s_P} \leq 0,07\% \quad (3.11)$$

führt. In Bezug auf die Messungen im Versuchsstand REKO-4 ist dieser Fehler jedoch irrelevant, da die Geschwindigkeitskomponente, die von der Kamera nicht erfasst wird, ebenfalls keinen Einfluss auf die Messung des Volumenstroms durch den Rekombinator hat. Zum Verständnis betrachtet man nochmals den unteren Teil von Abbildung 3.31. Unter der Annahme, dass eine Einlassgeschwindigkeit unterhalb des Rekombinators gemessen werden soll, wobei Δs_{PIV} entgegen der Gravitation nach oben verläuft, wird deutlich, dass die von der Kamera nicht erfasste Geschwindigkeit (rot) die Geschwindigkeitskomponente nach oben nicht beeinflusst. Streng genommen ist die gemessene Geschwindigkeit niedriger als die reale Geschwindigkeit, doch ist für die Betrachtung

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

der Einlassströmung ohnehin nur die aufwärtsgerichtete Geschwindigkeit von Interesse. Analog dazu kann ebenfalls der Einfluss der Lichtschnittdicke zu einer von der Kamera nicht zu erfassenden Geschwindigkeitskomponente führen, die für die Geschwindigkeitsmessung jedoch nicht relevant ist. Sie wird hier daher nicht genauer betrachtet.

Dies gilt nicht für den Fall, dass die Ausrichtung der PIV-Komponenten einen Winkel zur eigentlich gewünschten Messebene aufweist. Dies ist in Abbildung 3.32 dargestellt. In diesem Fall misst PIV eine größere Geschwindigkeit Δs_{PIV} , die zwar der realen Ge-

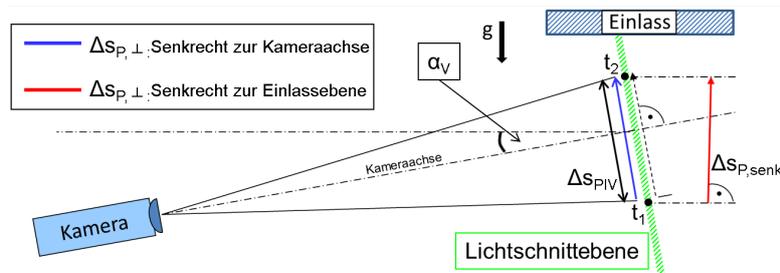


Abbildung 3.32: Einfluss einer Winkelabweichung zwischen PIV-Messebene und gewünschter Messebene

schwindigkeit des Partikels bzw. Gasströmung entspricht, jedoch nicht die eigentlich gewünschte Geschwindigkeit $\Delta s_{P,senk}$ der Partikel senkrecht zur Rekombinatoreinlassenebene wiedergibt. Der Fehler berechnet sich analog zu Gleichung 3.10 zu ca. 0,07 %, wenn von einer Winkelgenauigkeit zwischen PIV-Ebene und gewünschter Messebene von $\pm 1,5^\circ$ ausgegangen wird.

Generell muss bei der Anordnung der PIV-Komponenten auf eine möglichst genaue Ausrichtung geachtet werden, weil größere Abweichungen auch automatisch zu schlechten bzw. unscharfen Bereichen in den Partikelbildern führen. Dies verhindert eine Auswertung der gemessenen Geschwindigkeitsfelder, so dass keine (sinnvollen) Messwerte berechnet werden. Solche Messungen werden im Rahmen der Messungenauigkeit nicht betrachtet, sondern, wie bereits erläutert, als technischer Grobfehler im Rahmen der Datenanalyse identifiziert und eliminiert.

Bildpaaraufnahme

Bei der Betrachtung des Messfehlers durch die Bildpaaraufnahme werden sowohl optische Eigenschaften wie z.B. Streuverhalten der DEHS-Partikel und Abbildung auf dem CCD-Chip der Kamera diskutiert, aber auch Ungenauigkeiten der PIV-Komponenten selbst. Hierbei ist vor allem die Genauigkeit des Synchronizers von Bedeutung, der für die Zeitmessung bzw. für das Zeitintervall Δt_{PIV} zwischen den beiden Bildern eines Bildpaares verantwortlich ist.

Aus der Betrachtung der Streueigenschaften und der Streuintensität der Partikel in Verbindung mit der Pixelgröße des CCD-Chips lassen sich Vorgaben für eine PIV-

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

Messung ableiten. So ist der Zeitabstand Δt_{PIV} so zu wählen, dass die Partikel eine hinreichend große Strecke über mehrere Pixellängen von einem zum anderen Partikelbild zurücklegen können. Zudem müssen die Partikel groß genug sein bzw. das Kameraobjektiv das Bild dementsprechend vergrößern, um ein sogenanntes Peak-Locking zu verhindern [TYF07]. Hierbei hat sich gezeigt, dass eine Strecke von 6 - 10 Pixeln auf dem Kamerachip ausreicht. Die damit verbundene Abweichung aufgrund der Diskretisierung von Partikelbildern führt zwar wieder zu einer Messungenauigkeit von 2% im Vergleich zum wahren Wert, die aber als stochastische Abweichung auftritt und demnach über Mittelung von mehreren Partikelbildern minimiert werden kann (siehe [Sim12]). Da in dieser Arbeit alle stationären PIV-Messpunkte aus der Mittelung von 60 Bildpaaren bestehen, ist diese Fehlerquelle somit nicht von Bedeutung.

Der zeitliche Abstand Δt_{PIV} zwischen den Bildern wird vom Synchronizer vorgegeben, der die Lasereinheit steuert und die Bildpaaraufnahme mit der PIV-Kamera koordiniert. Abweichungen bei der Zeitmessung führen hierbei direkt zu einem Messfehler der Partikelgeschwindigkeit. Die Zeitmessung erfolgt dabei über die Zählung von Impulsen, die der Synchronizer zur Abschätzung der Zeitdauer Δt_{PIV} benötigt. Diese Impulse sind sowohl stationären als auch zeit- bzw. altersabhängigen Abweichungen unterworfen, die in Tabelle 3.17 aufgelistet sind.

Art des Fehlers	Impulsabweichung $\Delta N_{Fehler} = \Delta N_f$
Frequenztoleranz des Synchronizers	± 30 ppm (Durchschnitt) ± 50 ppm (Maximum)
Alterung des Synchronizers	$\pm 5 \frac{\text{ppm}}{\text{Jahr}}$
Durchschnittlicher Fehler nach 4 Jahren	50 ppm
Maximaler Fehler nach 4 Jahren	70 ppm
Maximaler Fehler nach 6 Jahren	80 ppm

Tabelle 3.17: Fehlertoleranzen des Synchronizers gemäß ILA GmbH [ILA12]

Der Synchronizer unterliegt bei der Zählung bzw. Verwendung von $1 \cdot 10^6$ Impulsen einem konservativ abschätzend maximalen Fehler von 80 Impulsen. Dadurch entsteht ein zeitlicher Fehler, der sich über das Verhältnis $x_{\Delta t}$ der mit Fehler behafteten Impulsbestimmung $N_{i,f}$ zur präzisen, fehlerfreien Impulsbestimmung N_i über

$$x_{\Delta t} = \frac{N_{i,f}}{N_i} = \frac{N_i + N_{Fehler}}{N_i} = 1,00008 \quad (3.12)$$

bestimmen lässt. Der maximale zeitliche Fehler des Synchronizers aufgrund der maximal abweichenden Impulsmessung liegt somit bei 0,008% und ist im Vergleich zu anderen Fehlerquellen des PIV-Systems nur von untergeordneter Bedeutung.

Auswertung mit VidPIV

Zur Berechnung einer Geschwindigkeit aus den Partikelbildern ist eine Kalibrierplatte notwendig, die die Abstände auf den Partikelbildern (in Pixel) mit realen Abmessungen und Strecken (in mm) in Verbindung setzt. Die Messung und Verwendung der Abstände auf der Kalibrierplatte ist ebenfalls mit einem Fehler behaftet. Unter der Annahme, dass die gesamte Kalibriermusterabmessung einem Messfehler von 0,2 mm unterliegt und sowohl Start- als auch Endpunkt einer Kalibrierstrecke nur auf zweimal eine halbe Pixellänge genau gekennzeichnet werden kann, folgt ein maximaler Kalibrierfehler von 0,26 % (siehe [Sim12]).

Zur Auswertung der Bildpaare wird das Softwareprogramm VidPIV in der Version 4.6 der Firma ILA Intelligent Laser and Application GmbH verwendet [ILA12]. Dieses Programm verwendet spezielle Algorithmen (z.B. Cross-Correlation, Adaptive Cross-Correlation), um die Partikelbewegungen zwischen den Bildern eines Bildpaares zu erkennen und zu berechnen. Dabei gibt es eine Vielzahl an Einstellungen und Berechnungsschritten, die das Ergebnis beeinflussen können. Bei der Ermittlung der Genauigkeit der Programmberechnung muss beachtet werden, dass das Programm nur als „Black-Box“-Modell untersucht werden kann, da der Quellcode bzw. die Berechnungsalgorithmen des Programms nicht zugänglich sind. Zum einen lassen sich indirekt mit künstlich erzeugten Partikelbildpaaren Testrechnungen durchführen und somit Aussagen über die Genauigkeit machen. Zum anderen ist VidPIV Gegenstand von Benchmarks, die ebenfalls unter Verwendung von künstlich erzeugten Partikelbildern die Berechnungsgenauigkeit der Programmcodes untersucht und miteinander verglichen haben [SOK⁺08]. Dabei zeigt sich, dass die Berechnung der Geschwindigkeiten aus den Partikelbildern den größten Einfluss auf die Genauigkeit der Messung hat.

Die Untersuchungen zeigen, dass die unterschiedlichen Berechnungen der selbst erstellten Partikelbilder (geradlinige Strömung ohne Querbewegung, Turbulenzbewegung und Geschwindigkeitsänderung) zu Abweichungen von bis zu 0,2 % des theoretisch präzisen Geschwindigkeitswerts führen. Dabei ist die Erstellung der Partikelbilder relativ aufwändig, so dass die simulierte Strömung bzw. deren Berechnung einfacher ausfällt als die in den realen Experimenten zu erwartenden Strömungen, in denen auch Be- und Entschleunigungsvorgänge innerhalb der Gasströmungen auftreten. Diese Abschätzung des Fehlers anhand der selbsterstellten Partikelbilder ist somit sehr optimistisch. In den Benchmarks wurden verschiedene Strömungen als Testfälle untersucht. Das Programm VidPIV lieferte für Strömungen, die bei weitem komplexer strukturiert sind als die Strömungen im Versuchsstand REKO-4, eine Abweichungen von 5 % RMS (root mean square) [SOK⁺08]. Das bedeutet, dass im Rahmen dieser Arbeit von einer Berechnungsgenauigkeit der PIV-Software ausgegangen wird, die im optimalen Fall nur eine Abweichung von 0,2 % beinhaltet und konservativ abschätzend bei 5 % liegt.

Zusammenfassung der Fehlerbetrachtung von PIV

Zur Untersuchung der Messgenauigkeit von PIV wurden die vier verschiedenen Bereiche „Wechselwirkung Partikel-Strömung“, „Anordnung der PIV-Komponenten“, „Bildpaar-aufnahme“ und „Auswertung mit VidPIV“ untersucht und die jeweiligen Fehlerquellen identifiziert und bzgl. ihrer Fehlerart „stochastisch“, „deterministisch“ und „Grobfehler“ kategorisiert. Unter Verwendung dieser Größen kann der maximale Fehler berechnet werden, dem die Geschwindigkeitsmessung innerhalb REKO-4 unterliegt, wenn davon ausgegangen werden darf, dass die jeweiligen Voraussetzungen der Fehlerbetrachtung eingehalten werden. Hierunter fällt zum Beispiel eine Ausrichtung der PIV-Komponenten auf $\pm 1,5^\circ$ Genauigkeit und die Identifizierung von Grobfehlern in der Analysephase. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass eine Mittelwertbildung aus 60 Einzelmessungen zu einer Minimierung der stochastischen Fehlerquellen führt und somit ebenfalls nicht betrachtet werden muss. Dennoch ist zu beachten, dass für die Betrachtung von Einzelbildpaaren, z.B. während instationärer Messungen, die Messgenauigkeit abweichen kann.

Die einzelnen Fehlerquellen sind in Tabelle 3.18 dargestellt. Da die Sedimentationsgeschwindigkeit als einziger Fehler nur absolut zu berechnen ist (in mm/s), geht der Gesamtfehler bei niedrigen Geschwindigkeiten gegen unendlich. Daher gilt der Fehler im unteren Geschwindigkeitsbereich nur für Geschwindigkeiten von $v > 30$ mm/s. Unter diesen Bedingungen folgt daraus ein maximaler Fehler von 0,4%, der für höhere Geschwindigkeiten reziprok proportional sinkt. Die Addition aller relevanten Fehlerquellen ergibt den zu erwartenden Fehler, der bei der Berechnung eines Messpunkts unter Verwendung von mehreren PIV-Bildpaaren auftreten kann. Der verhältnismäßig größte Einfluss liegt in der computergestützten Berechnung der Geschwindigkeiten aus den Partikelbildern. Hierbei ergeben sich die zwei Fehlerabschätzungen E-1 und E-2, die sich nur in der Berücksichtigung des Fehlers für die PIV-Berechnung mit VidPIV 4.6 (Fehlernummer 6 und 7) unterscheiden. Während die Fehlerabschätzung für minimale Strömungsgeschwindigkeiten von 30 mm/s unter Verwendung der selbst erstellten, jedoch recht einfach gehaltenen PIV-Bilder einen Fehler von unter 1,6% vom Endwert ergibt, steigt der Fehler durch die Verwendung des PIV-Benchmarks auf knapp unter 6,4 %, wobei sehr komplexe Strömungsbilder analysiert wurden. Für höhere Geschwindigkeiten sinkt der Einfluss der Sedimentation, so dass im Rahmen der Fehlerbetrachtung von PIV während der experimentellen Untersuchung eine Genauigkeit zwischen 1,2 % bis 6 % erreicht wird. Unter Berücksichtigung der relativ geradlinigen, turbulenzfreien Strömung unterhalb des Rekominatoreinlasses kann daher im Rahmen dieser Arbeit davon ausgegangen werden, dass für die Messung der Einlassgeschwindigkeit eine Genauigkeit von ca. 3 % erreicht wird.

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

Nr.	Bereich	Fehlerquelle	Annahme	Abweichung vom Messwert
1.	Teilchen- folgevermögen	Sedimentations- geschwindigkeit	$d_{p,max} < 2\mu\text{m}$ $v_{min} > 30\text{mm/s} < 0,4 \%$	0,1183 mm/s
2.		Beschleunigung, geradlinig	Naturkonvektion REKO-4	< 0,05 %
3.		Beschleunigung, kurvenförmig	$d_{p,max} < 2\mu\text{m}$	< 0,2 %
4.	Anordnung PIV-Komponenten	Ausrichtung Lichtschnitt/ Kamera	Ausrichtung $\alpha_V \pm 1,5\%$	< 0,07 %
5.	Bildpaaraufnahme	Ungenauigkeit der Zeitmessung	Alterung des Synchronizers über 6 Jahre	< 0,0008%
6.	Auswertung PIV mit VidPIV 4.6	Genauigkeit der Berechnung	Selbst erstellte Partikelbilder	< 0,2%
7.		Genauigkeit der Berechnung	Benchmark	< 5%
8.		Kalibrierung des Maßstabs		< 0,26%
E-1		Fehlernummer 1, 2, 3, 4 5, 6, 8	Annahmen bzgl. REKO-4, 60 Bildpaare, eigener VidPIV-Test	< 1,6%
E-2		Fehlernummer 1, 2, 3, 4 5, 7, 8	Annahmen bzgl. REKO-4, 60 Bildpaare, veröffentlichter PIV-Benchmark	< 6,4%

Tabelle 3.18: Auflistung der im Rahmen dieser Arbeit relevanten Fehlerquellen von PIV

3.7.6 Kombinierte Standardunsicherheit

Zur Abschätzung der Auswirkung mehrerer Messunsicherheiten auf abgeleitete Größen werden Unsicherheitsfortpflanzungsgesetze bzw. Gleichungen, die die Fortpflanzung von Unsicherheiten beschreiben, verwendet [DIN99][DIN96]. Diese sogenannte kombinierte Standardunsicherheit $u_c(y)$ der Messgröße y wird aus der positiven Quadratwurzel mit

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta f}{\delta x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (3.13)$$

gebildet. Hierbei bezeichnen f die Funktion, die zur Berechnung der kombinierten Messgröße verwendet wird, und $u^2(x_i)$ die Standardunsicherheit der jeweiligen Einflussgröße [DIN99]. Im Folgenden wird die Genauigkeit der aus den Messgrößen Temperatur (T), Druck (p) und Konzentration (x) berechneten Strömungsgeschwindigkeit v_{ein} bestimmt. Für die Herleitung wird die in Kapitel 2.2.2 bereits erläuterte reibungsfreie Umlaufgleichung (Gl. 2.22) verwendet und gemäß

$$v_{ein} = \frac{1}{\rho_0} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot H \cdot (\rho_0 - \rho)}{\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{2 \cdot \rho_0}\right)}} \quad (3.14)$$

nach v_{ein} umgestellt. Daraus folgt, dass die Genauigkeit der abgeleiteten Strömungsgeschwindigkeit v_{ein} von der Unsicherheit bei der Bestimmung der Gasdichten ρ_0 und ρ abhängt. Beide Dichten bestehen hierbei wiederum aus Größen, die aus Messwerten abgeleitet werden und ebenfalls einer Messunsicherheit unterliegen. Die Dichte wird jeweils gemäß dem idealen Gasgesetz über

$$\rho = \frac{M \cdot p}{R \cdot T} \quad (3.15)$$

berechnet. Bei genauerer Betrachtung sind die Messungenauigkeit der Messgrößen Druck (p) und Gastemperatur (T) von entscheidender Bedeutung. Die berechnete Molmasse des Gasgemisches unterliegt bei der hergeleiteten absoluten Genauigkeit der Wasserstoffkonzentrationsmessung mit Katharometern von 0,1 Vol.-% H₂ einem vernachlässigbaren Fehler, da die Molmasse von Wasserstoff im Vergleich zu Luft gering ist. Die Ungenauigkeit der Molmasse liegt bei dem im Rahmen dieser Arbeit vorliegendem Konzentrationsbereich bis 6 Vol.-% H₂ unter 0,1 %.

Der relative Fehler berechnet sich unter Berücksichtigung von Gleichung 3.13 und der Bildung der partiellen Ableitung für Druck und Temperatur zu

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2 + \left(-\frac{\Delta T}{T}\right)^2} \quad (3.16)$$

Aus Gleichung 3.16 wird deutlich, dass der relative Fehler für niedrige Drücke und Temperaturen maximal wird. Der minimale Druck im Versuchsstand ist Umgebungsdruck (Annahme = 960 mbar) und die minimale Temperatur aufgrund der Klimaregelung im Wasserstofflabor 20 °C. Bei Verwendung der in Abschnitt 3.7.1 und 3.7.3

3 Beschreibung des Versuchsstands REKO-4

hergeleiteten Messunsicherheiten für die Gastemperatur ($\Delta T = +/ - 4\text{K}$) und für den Behälterinnendruck ($\Delta p = +/ - 12,5\text{mbar}$) lässt sich die maximale Abweichung der Dichte zu 1,9 % bestimmen. Die Ungenauigkeit der Dichte führt bei der Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit gemäß Gl. 3.14 zu einer Abweichung von unter 1 %. Damit ist der auf Messunsicherheiten beruhende Fehler vernachlässigbar klein gegenüber den Fehlern, die durch Annahmen bezüglich spezifischer Druckverlustbeiwerte und bei der Berechnung der einzelnen Strömungswiderstände entstehen.

4 Versuchsbeschreibung

Bei diesen Versuchen sind insbesondere die Korrelation zwischen der H_2 -Eintrittskonzentration am Rekombinator, die Eintrittsgeschwindigkeit und die Katalysatorblechtemperatur von besonderem Interesse. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 4.1 dargestellt und gibt zusätzlich die verwendeten Messtechniken an, die zur Untersuchung der jeweiligen Größe zum Einsatz kommen.

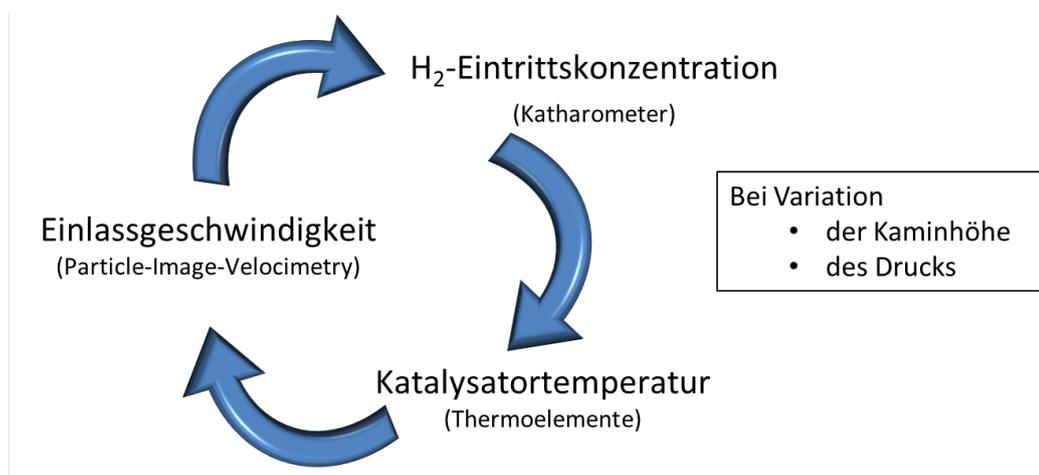


Abbildung 4.1: Korrelation der Betriebsparameter

Die Einlasskonzentration hängt direkt mit der Wasserstoffmenge zusammen, die in den Rekombinator einströmt. Sie korreliert somit direkt mit der Temperatur, die sich aufgrund der exothermen Reaktion auf den Katalysatorblechen einstellt. Die freigesetzte Wärmemenge induziert einen Naturzug durch das Gehäuse, der aus Kontinuitätsgründen u.a. anhand der resultierenden Einlassgeschwindigkeit abgeschätzt werden kann. Diese Geschwindigkeit bestimmt zusammen mit der Einlasskonzentration wiederum die einströmende H_2 -Menge. Hierbei stellt sich ein Gleichgewicht ein, das zum einen durch die Kaminhöhe bestimmt wird, die den Naturzug maßgeblich beeinflusst. Zum anderen ist der Druck von besonderem Interesse, da dieser direkt-proportional zur absoluten Wasserstoffmenge ist, die in den Rekombinator gelangt. Die Analyse dieser Parameter ist somit entscheidend, um das Betriebsverhalten katalytischer Rekombinatoren abschätzen zu können. Die Untersuchungen werden sowohl unter Variation der Kaminhöhen als auch bei unterschiedlichen Behälterdrücken durchgeführt.

4 Versuchsbeschreibung

Das gesamte Versuchsprogramm umfasst elf Versuchsreihen. Alle Versuche im Rahmen dieser Arbeit werden gemäß

$$\underbrace{R4}_{\text{Versuchsstands REKO-4}} \quad - \quad \underbrace{Y}_{\text{Versuchsreihe}} \quad - \quad \underbrace{XX}_{\text{fortlaufende Versuchsnummer}}$$

bezeichnet. Die Bezeichnung der Versuchsreihe besteht dabei aus einem Großbuchstaben, der bis auf die Versuchsreihe R4-P den verwendeten Rekombinator bzw. die verwendete Kaminhöhe und die Ausrichtung der PIV-Messung eindeutig definiert (Tabelle 4.1).

Versuchsreihe/ Inhalt	Kaminhöhe (ohne Hutze)	Behälterdruck (absolut)	Richtung der PIV-Messung
E: Vorversuche Einspeisevorgang	ohne Rekombinatormodell	1 bar	Einspeiserohr
F: Vorversuche H ₂ -Verteilung	ohne Rekombinatormodell	1 bar	ohne PIV-Messung
G: Kaminvariation	150 mm	1 bar	Einlass (Rückseite)
H: Kaminvariation	ohne Kamin ohne Hutze	1 bar	Einlass (Rückseite)
J: Kaminvariation / Druckvariation	300 mm	1 / 1,5 / 2 bar	Einlass (Rückseite)
K: Gegenströmung	300 mm und 850 mm	1 bar	Höhe Einlass ohne Rekombinator
L: Kaminvariation	450 mm	1 bar	Einlass (Rückseite)
M: Kaminvariation Druckvariation	850 mm	1 / 1,5 / 2 bar	Einlass (Rückseite)
N: seitliche Einlassvermessung	850 mm	1 / 1,5 / 2 bar	Einlass (Seite, 3 Ebenen)
O: Vermessung der Auslassströmung	850 mm	1 bar	Auslass (Seite)
P: Gegenströmung	300/850 mm mit/ohne Hutze	1 bar	ohne PIV-Messung (Gegenströmung)

Tabelle 4.1: Beschreibung der durchgeführten Versuche

Die Vorversuche R4-E wurden im Rahmen einer vorangegangenen Arbeit zur Untersuchung der Einlassströmung durchgeführt [Kla11]. In Messreihe R4-F wurde die Wasserstoffverteilung im Behälter zu untersucht. Die Versuchsreihen G, H, J, L und M beinhalten die Variation der Kaminhöhe z.T. bei unterschiedlichen Drücken, wobei die PIV-Messungen ausschließlich von der Rückseite des Modells durchgeführt wurden

4 Versuchsbeschreibung

(siehe Abschnitt 3.5.3). Die Versuchsreihe N beinhaltet die Analyse der Gasgeschwindigkeitsverteilung am Rekombinatoreinlass. Diese Messung wurde in drei verschiedenen Ebenen durchgeführt, um ein vollständiges Strömungsbild der Einströmung zu erhalten und das Geschwindigkeitsprofil und somit den Volumen- bzw. Massenstrom durch den Rekombinator bestimmen zu können. In Reihe O wird das Geschwindigkeitsfeld am Rekombinatorauslass untersucht. Die Versuchsreihen K und P untersuchen das Rekombinatorverhalten unter dem Einfluss einer Gegenströmung. Auf die jeweilige Variation des Rekombinators wird gesondert in Abschnitt 7.1 eingegangen.

4.1 Versuchsdurchführung und PIV-Messung

Die Versuchsreihen zur Kaminvariation lassen sich anhand der zwei Parameter Kaminhöhe und Druck während des Versuchs unterscheiden (Tab. 4.2). In Versuch R4-M-06

Versuchsmatrix		Druck →		
		1,0 bar	1,5 bar	2,0 bar
Kaminhöhe ↓	0 mm	R4-H-02	[-]	[-]
	150 mm	R4-G-02 R4-G-03 R4-G-05	[-]	[-]
	300 mm	R4-J-01 R4-J-02 R4-J-06	R4-J-04	R4-J-05
	450 mm	R4-L-01 R4-L-02 R4-L-03	[-]	[-]
	850 mm	R4-M-01 R4-M-02	R4-M-03 (R4-M-06)	R4-M-04 R4-M-05

Tabelle 4.2: Einordnung der einzelnen Versuche zur Optimierung des Kaminmodells

werden keine stationären Messpunkte aufgenommen sondern eine kontinuierliche Geschwindigkeitsmessung über die gesamte Versuchsdauer durchgeführt.

Zu Beginn eines Versuchs befindet sich der Rekombinator in der jeweiligen Konfiguration in Luftatmosphäre bei Umgebungstemperatur im geschlossenen Versuchsbehälter. Sämtliche benötigte Messapparaturen sind installiert und betriebsbereit. Das PIV ist ausgerichtet, kalibriert und bereit für die in der Regel diskontinuierlichen Messungen. Sämtliche Temperaturen liegen im Bereich der Umgebungstemperatur und die Luftfeuch-

4 Versuchsbeschreibung

tigkeit im Behälter in der Regel unter 20 % relativer Feuchte.

Der Versuch startet mit der Einspeisung von Wasserstoff in den Behälter. Die Einspeisung erfolgt mit einer konstanten Rate von $1,9 \text{ m}^3/\text{h}$, wobei die letzten 5 % der einzuspeisenden Wasserstoffmenge mit einem reduzierten Volumenstrom von $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ eingebracht werden. Sobald die Wasserstoffrekombination an den Katalysatorblechen startet, steigen die Temperaturen im Bereich des Rekombinators. Für die Durchführung der PIV-Messungen werden quasistationäre Bedingungen angestrebt, unter denen die Thermoelemente sowohl in den Katalysatorblechen als auch am Rekombinatorgehäuse nahezu konstante Werte anzeigen. Quasistationäre Zustände sind in den vorliegenden Experimenten erreicht, sobald die Wasserstoffeinspeisung abgeschlossen ist und die Konzentration am Einlass des Rekombinators wieder sinkt. Dementsprechend fallen auch die Temperaturen im Bereich des Rekombinators. Die H_2 -Einlasskonzentration sinken jedoch aufgrund des großen Volumens des Versuchsbehälters relativ langsam (im Durchschnitt unter 0,5 Vol.-% H_2 in 100 s), so dass die Messungen als quasistationär bei unterschiedlichen Einlasskonzentrationen durchgeführt werden können.

Alle Messwerte mit Ausnahme der Geschwindigkeit werden von der Anlagensteuerung kontinuierlich mit einer Zeitschrittweite von $\Delta t = 2 \text{ s}$ aufgenommen. Die PIV-Messung hingegen wird weitgehend diskontinuierlich zu bestimmten Zeitpunkten durchgeführt. In diesem Fall besteht eine PIV-Messung aus 60 Messungen innerhalb von 20 s, aus denen ein Mittelwert gebildet wird. Die Sensordaten wie z.B. Temperaturen, H_2 -Konzentrationen, Feuchtigkeit etc. werden dementsprechend über denselben Zeitraum gemittelt.

Die PIV-Messungen unterteilen sich in stationäre und instationäre Messungen. Stationäre Messpunkte werden diskontinuierlich über eine begrenzte Zeitdauer von einigen Sekunden durchgeführt. Üblicherweise werden die gewonnenen Daten pro Messung gemittelt, um einen stationären Betriebspunkt zu erhalten. Hierunter fallen z.B. alle Untersuchungen zum Betriebsverhalten des Rekombinators, die im Rahmen der Datenbasis für das Kaminmodell benötigt werden. Zum anderen werden instationäre Messungen durchgeführt, um z.B. Änderungen des Betriebsverhaltens zu untersuchen, wie sie u.a. während der Startphase auftreten. Hierbei werden kontinuierlich über einen längeren Zeitraum Bildpaare aufgenommen. Üblicherweise beträgt die Bildpaarfrequenz ein Bildpaar pro Sekunde, da hierbei keine gemittelten Werte über kurze Zeitintervalle, sondern langsame Geschwindigkeitsgradienten über längere Zeiträume betrachtet werden sollen. Jede Messung bzw. jedes Bildpaar wird als eigener Messpunkt ausgewertet. Auf diese Weise kann der Verlauf der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit untersucht werden.

Die Einstellungen mit denen die unterschiedlichen PIV-Messungen durchgeführt werden, sind in Tabelle 4.3 aufgelistet.

Unterschiedliche Einstellungswerte müssen zwar in der Auswertung beachtet werden bzw. haben einen Einfluss auf die Bildqualität, ändern jedoch nicht die Auswerterroutinen selbst. Die für die Messung benötigten DEHS-Partikel werden entweder bei noch

4 Versuchsbeschreibung

	Diskontinuierliche Messung		Kontinuierliche Messung	
	Quasi- stationäre Messung	Null- punkt- Messung	Startverhalten	R4-M-06
Laserleistung i.V. zu P_{\max}	20 - 60 %	20 - 60 %	20 - 60 %	ca. 26 - 28 %
Aufnahme- frequenz der Bildpaare	3 Hz	1 - 3 Hz	1 - 3 Hz	1 Hz
Zeit Δt_{PIV} zwischen Bildern eines Bildpaares	1000 - 3000 μs	1000 - 3000 μs	1000 - 3000 μs	1200 μs
Anzahl der Bildpaare	60	≥ 60	bis ca. 1200	1200
Zeitdauer eines PIV-Messpunkts	20 s	≥ 20 s	bis zu 1200 s = 20 min	6000 s = 100 min (5 Messungen)

Tabelle 4.3: Randbedingungen und Einstellungen der unterschiedlichen PIV-Messungen

geöffnetem Behälter mit Druckluft oder später zeitgleich mit Wasserstoff eingespeist. So wird eine homogene Verteilung der Tracerpartikel erreicht.

4.1.1 Auswertung eines diskontinuierlichen PIV-Messpunktes

Ein PIV-Messpunkt für eine quasi-stationäre Messung besteht aus 60 Einzelmessungen bzw. Bildpaaren innerhalb eines Zeitraums von 20 s, die anschließend im Rahmen der Versuchsauswertung gemittelt werden. Des Weiteren werden auch Nullpunkt-Messungen durchgeführt, die zur Analyse der Hintergrundgeschwindigkeit im Behälter verwendet werden. Hierbei handelt es sich um die Geschwindigkeiten, die bereits vor der Wasserstoffeinspeisung aufgrund sehr kleiner Temperaturunterschiede ($\Delta T < 2$ K) zwischen Behälteratmosphäre und Behälterwand induziert werden. Aufgrund der äußerst langsamen Geschwindigkeiten muss die Zeit zwischen den Bildpaaren t_{PIV} entsprechend groß gewählt werden. Diese Nullpunkt-Messungen werden zu Beginn des Versuches durchgeführt, um den Einfluss der Hintergrundgeschwindigkeit während der Rekombinationsreaktion einschätzen zu können.

Die Auswertung der diskontinuierlichen PIV-Daten zur Untersuchung einer quasi-stationären Messung und einer Nullpunkt-Messung ist weitgehend identisch. Einzig die Anzahl der Bildpaare, die ausgewertet werden, kann dabei variieren. Abbildung 4.2 (a)

4 Versuchsbeschreibung

zeigt das Geschwindigkeitsfeld bzw. die Geschwindigkeitsvektoren am Einlass des Rekombinators, die aus 60 Einzelmessungen (Bildpaaren) berechnet wurde und (b) schematisch die Aufteilung eines Vektors in eine horizontale x-Komponenten und eine vertikale y-Komponente. Die Lage des Koordinatensystems ist für alle Messungen im Rahmen dieser Arbeit identisch und ist ebenfalls in Abbildung 4.2 eingetragen. Das berechne-

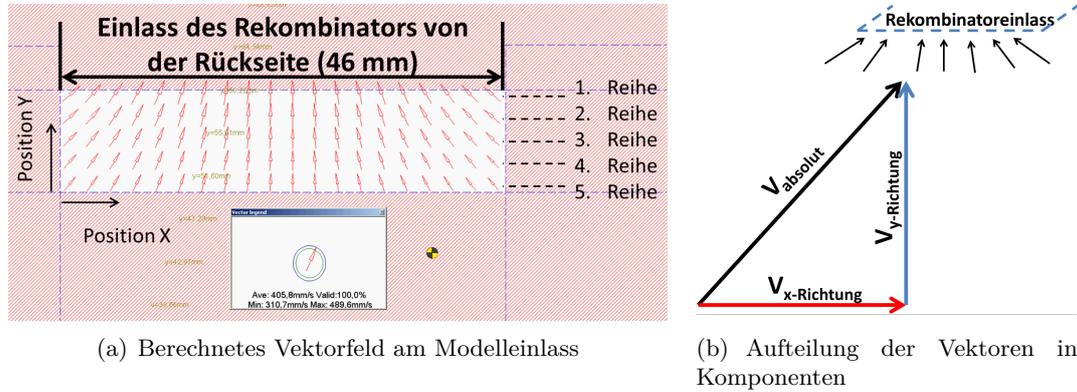


Abbildung 4.2: Auswertung des Vektorfelds am Einlass des Rekombinators

te Vektorbild zeigt in diesem Fall fünf verschiedene, horizontale Reihen, in denen die Geschwindigkeit berechnet und in Form von Vektoren dargestellt wird. Jeder Vektor repräsentiert dabei die durchschnittliche Geschwindigkeit eines Felds von in diesem Fall 32×32 Pixel. Eine feinere Auflösung führt nicht zu genaueren Ergebnissen, sondern resultiert vermehrt in Fehlern, da Anforderungen an die Partikeldichte z.T. nicht mehr eingehalten werden können.

Jeder Vektor besitzt eine Absolutgeschwindigkeit $\vec{v}_{abs,1V}$, die über die Definition eines kartesischen Koordinatensystems in eine x- und y-Komponente ($\vec{v}_{x,1V}$ bzw. $\vec{v}_{y,1V}$) der Geschwindigkeit mit

$$\text{(Summenvektor:)} \quad \vec{v}_{abs,1V} = \vec{v}_{x,1V} + \vec{v}_{y,1V} \quad (4.1)$$

aufgeteilt werden kann. Der Betrag des Vektors bzw. der Geschwindigkeit kann somit über

$$|\vec{v}_{abs,1V}| = v_{abs,1V} = \sqrt{(v_{x,1V})^2 + (v_{y,1V})^2} \quad (4.2)$$

bestimmt werden [Pap06]. Die Berechnung des Volumenstroms durch das Rekombinatorgehäuse erfolgt in erster Näherung über

$$\dot{V} = v_y \cdot A_e, \quad (4.3)$$

wobei nur y-Komponente berücksichtigt wird, die senkrecht zur Einlassfläche A_e ist.

Abbildung 4.3 zeigt zum einen die PIV-Ebene für die Geschwindigkeitsmessung von der Rückseite des Modells und zum anderen die vertikale Geschwindigkeitskomponente

4 Versuchsbeschreibung

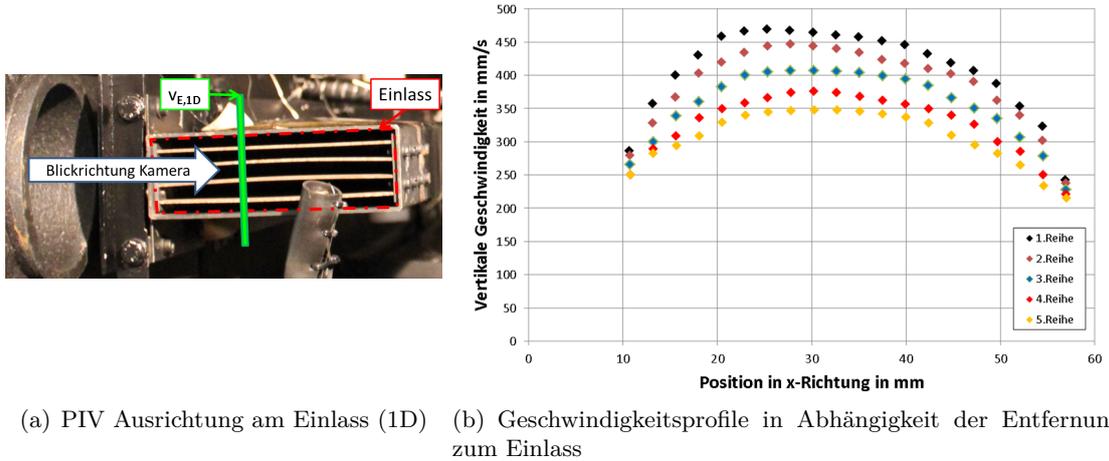


Abbildung 4.3: Vertikale Geschwindigkeitskomponente der Einlassströmung

jedes Vektors über der x -Position unterhalb des Rekombinators. Es sind wieder die fünf Reihen erkennbar, die sich in ihrem Abstand zum Rekombinatoreinlass unterscheiden. Die erste Reihe (schwarz) ist dabei unmittelbar unterhalb des Einlasses angeordnet. Die Form der Einlassströmung ist für alle Reihen identisch, wobei ein breites Maximum nahezu symmetrisch in der Mitte liegt. Je weiter sich die Reihen vom Einlass entfernen, desto geringer werden die Geschwindigkeiten. Diese Beobachtungen decken sich mit dem zu erwartenden Einströmprofil, das in erster Näherung bis zum Einlass dem Einströmprofil in eine gerade Röhre aus einem unendlich weit ausgedehnten Raum gleicht. Die Luft wird dabei aus der gesamten Umgebung in den Einlass angesogen. Durch diese trichterförmige Kontraktion der Strömung muss aus Gründen der Kontinuität die Geschwindigkeit steigen [Ide08]. Zur Berechnung des Volumen- bzw. Massenstroms ist die durchschnittliche vertikale Geschwindigkeit der 1. Reihe entscheidend, die daher für den Großteil der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche verwendet wird.

Abbildung 4.4 zeigt das gemessene Geschwindigkeitsprofil $\bar{v}_{E,1D}$ am Einlass entlang der x -Achse bei einer Einlasskonzentration von 4 Vol.-% H_2 . Zur Erklärung sei hier auf die von Abbildung 4.2 abweichende y_a -Komponente hingewiesen. Sie verläuft horizontal zur Einlassfläche entlang der Tiefe des Rekombinators und gibt somit nicht den Abstand zum Einlass an. Die y_a -Komponente wird nur zur Herleitung des Einlassprofils verwendet. Jeder Geschwindigkeitsmesspunkt eines Messfelds (32×32 Pixel) wird dabei entsprechend der x -/ y_a -Position als eigener Vektor orthogonal zur Einlassfläche dargestellt. Daraus folgt mit A_E als Eintrittsquerschnitt in das Rekombinatorgehäuse über

$$\dot{V}_{1D} = A_E \cdot \bar{v}_{E,1D} \quad (4.4)$$

der berechnete, eindimensionale Volumenstrom (entlang einer Positionssache) \dot{V}_{1D} bzw.

4 Versuchsbeschreibung

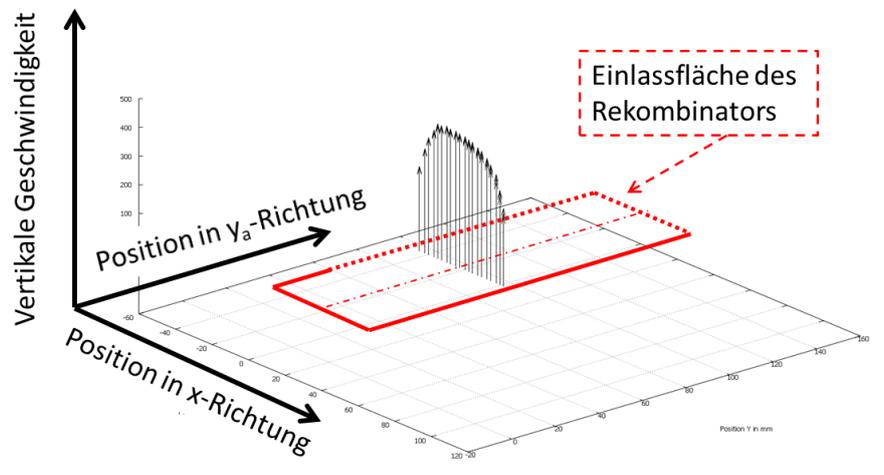
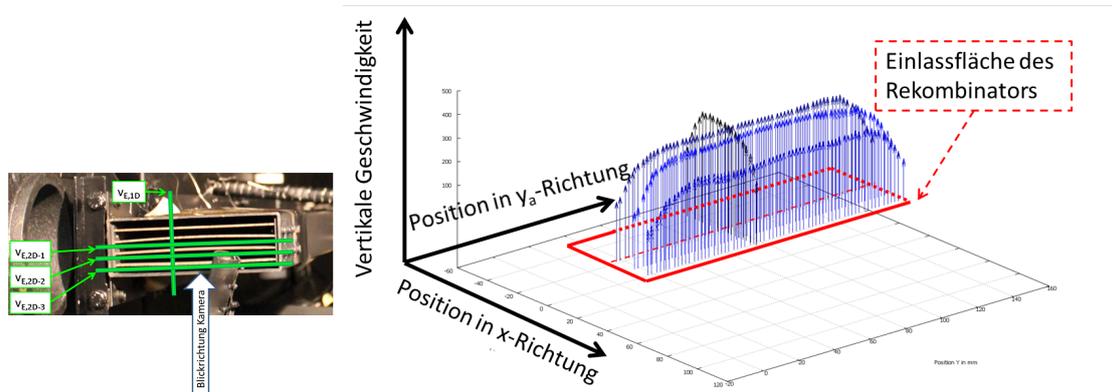


Abbildung 4.4: 1D-Volumenstrom durch den Einlass des Rekombinators bei 4 Vol.-% H_2



(a) PIV Ausrichtung am Einlass (2D)

(b) Geschwindigkeitsprofil in Abhängigkeit der Position

Abbildung 4.5: 2D-Volumenstrom durch den Einlass des Rekombinators bei 4 Vol.-% H_2

4 Versuchsbeschreibung

der zweidimensionale Volumenstrom \dot{V}_{2D} gemäß

$$\dot{V}_{2D} = A_E \cdot \bar{v}_{E,1D} \cdot \eta_{korr} \quad (4.5)$$

für diskontinuierliche Messungen. \dot{V}_{2D} berücksichtigt durch den Korrekturfaktor η_{korr} Wandreibungsverluste am Einlassrand, die zu einer Verringerung des Volumenstroms führen.

Gleichung 4.5 ermöglicht die Berechnung des Volumenstroms aus einer PIV-Messung, wobei sowohl das Profil in x-Richtung durch die reguläre Messung von der Rückseite des Rekombinators als auch das Profil in y_a -Richtung durch den Korrekturfaktor η_{korr} berücksichtigt wird. Zur Bestimmung dieses Korrekturfaktors wird die Versuchsreihe R4-N durchgeführt, die die Einlassströmung von der Seite des Rekombinators untersucht, und das Einströmprofil in y_a -Richtung berücksichtigt. Abbildung 4.5 zeigt anhand eines Fotos des Einlasses die untersuchten Ebenen, in denen die Geschwindigkeit gemessen wurde und das daraus entstehende, zweidimensional gemessene Profil am Einlass des Rekombinators. Jedes der vier Geschwindigkeitsprofile besteht selbst aus drei unterschiedlichen Messungen bei der gleichen Einlasskonzentration von ca. 4 Vol.-% H_2 , die übereinander gelegt werden. Die mittlere Ebene $v_{2D,1}$ liegt zwischen den zwei Mittelblechen und somit auf der Symmetrieachse des Rekombinators, während $v_{2D,2}$ zwischen Mittel- und Randblech bzw. $v_{2D,3}$ zwischen Randblech und Gehäuse liegt. Zum einen ist offensichtlich, dass sich die jeweils getrennt gemessenen Geschwindigkeitsprofile sehr gut decken, womit die Präzision der Messung gezeigt wird. Zum anderen stimmt die Höhe der Vektoren an den Schnittpunkten der Ebenen relativ gut überein. Dies zeigt, dass das Profil entlang der x-Achse weitgehend über die gesamte Länge (y_a -Achse) des Rekombinators konstant ist, wobei nur in der Nähe der Gehäusewand eine Verringerung der Geschwindigkeit zu erkennen ist. Ebenso wird deutlich, dass die Messungen von der Rückseite an einer Position durchgeführt werden, an der das seitliche Profil vom Einlassrand und somit von störenden Einflüssen hinreichend weit entfernt ist. Die Messung ist somit repräsentativ für den Großteil der gesamten Einlassströmung.

Der Korrekturfaktor η_{korr} , der die Abweichung zum Einlassrand berücksichtigt, lässt sich quantifizieren, indem die theoretisch über die gesamte Länge konstante Geschwindigkeit mit dem gemessenen Geschwindigkeitsprofil ins Verhältnis gesetzt wird (Abbildung 4.6).

Das Verhältnis der Flächen ergibt den Korrekturfaktor η_{korr} , der über

$$\eta_{korr} = \frac{A_N}{A_{theo}} = \frac{\int_0^{l_{RM}} v(y) dy}{\bar{v}_{10mm} \cdot l_{RM}} = \frac{\sum_{n=1}^i |\vec{v}_i| \cdot \frac{l_{RM}}{i}}{\bar{v}_{10mm} \cdot l_{RM}} \quad (4.6)$$

berechnet wird. Die Fläche A_N beschreibt dabei die gemessene Geschwindigkeit über die gesamte Länge l_{RM} des Rekombinators. Sie berechnet sich aus den mit PIV am Einlass äquidistant gemessenen Vektoren \vec{v}_i , die jeweils mit dem i -ten Teilstück von l_{RM} gewichtet werden. Die Fläche A_{theo} hingegen stellt die theoretische Geschwindigkeit dar, wenn keine Geschwindigkeitsreduzierung zur Gehäusewand berücksichtigt wird. Hierfür

4 Versuchsbeschreibung

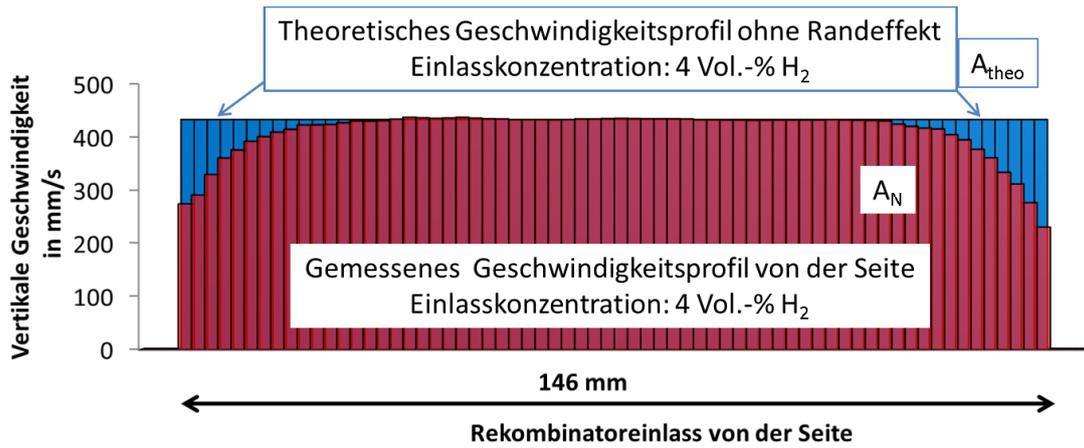


Abbildung 4.6: Vergleich des Geschwindigkeitsprofils mit und ohne Randeffekt

wird die Geschwindigkeit \bar{v}_{10mm} verwendet. Sie ist die mittig über 10 mm gemittelte Geschwindigkeit und somit hinreichend weit vom Einfluss des Rands entfernt. A_{theo} umfasst sowohl die rote als auch die blaue Fläche, so dass sie immer größer als A_N ist und η_{korr} somit immer kleiner 1. Abbildung 4.7 zeigt den berechneten Korrekturfaktor bei unterschiedlichen Wasserstoffkonzentrationen am Einlass und somit bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Aus diesem Diagramm wird deutlich, dass η_{korr} nahezu konstant

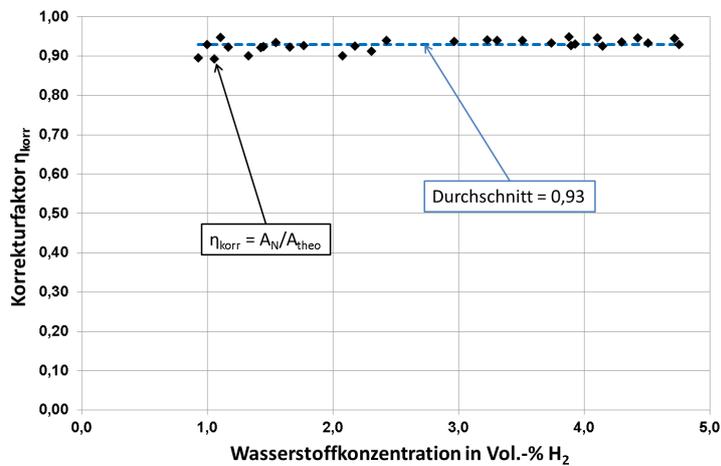


Abbildung 4.7: Korrekturfaktor η_{korr} in Abhängigkeit von der H₂-Konzentration

bzw. unabhängig von der Einlasskonzentration ist und mit

$$\eta_{korr} = 0,93 \quad (4.7)$$

4 Versuchsbeschreibung

abgeschätzt werden kann. Die Standardabweichung liegt dabei gemäß [Pap01]

$$S_{st} = \sqrt{S_{st}^2} := \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\eta_i - \eta_{korrr})^2} \quad (4.8)$$

bei $S_{st} = 0,015$.

4.1.2 Auswertung einer kontinuierlichen PIV-Messung

Die Untersuchung des Startverhaltens und der Versuch R4-M-06 werden als kontinuierliche PIV-Messungen durchgeführt. R4-M-06 wird im Rahmen dieser Arbeit benutzt, um sowohl den Versuchsverlauf zu erklären als auch eine Stoffmengenbilanz über den gesamten Versuchsbehälter während eines Versuchs zu analysieren.

Die Aufteilung der ermittelten Vektoren in horizontale bzw. vertikale Komponenten ist aus auswertetechnischen Gründen nur für diskontinuierliche Messungen sinnvoll durchzuführen. Für kontinuierliche Messungen muss auf diese Aufteilung verzichtet werden, da nur die absolute Geschwindigkeit des gesamten Messfelds $v_{abs,ges}$ exportiert werden kann. Diese setzt sich aus den Beträgen der Einzelvektoren $v_{abs,i}$ über

$$|\vec{v}_{abs,ges}| = \frac{\sum_{i=1}^n |\vec{v}_{abs,i}|}{N_i} \quad (4.9)$$

zusammen. Um dennoch aus der Absolutgeschwindigkeit den vertikalen Anteil ableiten zu können, wird in Anlehnung an η_{korrr} das Verhältnis zwischen Vertikal- und Absolutgeschwindigkeit untersucht. Hierzu wird der Korrekturfaktor η_{vert} über

$$\eta_{vert} = \frac{|\vec{v}_{y,ges}|}{|\vec{v}_{abs,ges}|} \quad (4.10)$$

definiert, wobei $|\vec{v}_{y,ges}|$ den Durchschnitt der vertikalen Geschwindigkeit und $|\vec{v}_{abs,ges}|$ den Durchschnitt der Absolutgeschwindigkeit bezeichnet. Die Ermittlung des Geschwindigkeitsverhältnisses wurde anhand der Versuchsreihe R4-M-03 durchgeführt, die aus diskontinuierlichen Messpunkten besteht und eine Aufteilung in die jeweiligen Komponenten zulässt. Abbildung 4.8 zeigt zum einen die unterschiedlichen Geschwindigkeiten für dieses Beispiel, zum anderen das daraus resultierende Geschwindigkeitsverhältnis η_{vert} über der Wasserstoffkonzentration. Auf der Primärordinate sind für jeweils die gleiche Wasserstoffkonzentration sowohl die vertikale Geschwindigkeitskomponente (gefüllte Punkte) als auch die Absolutgeschwindigkeit (schwarze, offene Kreise) aufgetragen. Jeweils das Verhältnis η_{vert} aus diesen beiden Geschwindigkeiten ist als schwarzes Kreuz auf der Sekundärordinate aufgetragen. Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass der Korrekturfaktor nahezu unabhängig von der Wasserstoffkonzentration bzw. der Geschwindigkeiten am Einfluss ist. Der Korrekturfaktor η_{vert} kann somit über den Durchschnitt zum konstanten Wert von

$$\eta_{vert} = 0,85 \quad (4.11)$$

4 Versuchsbeschreibung

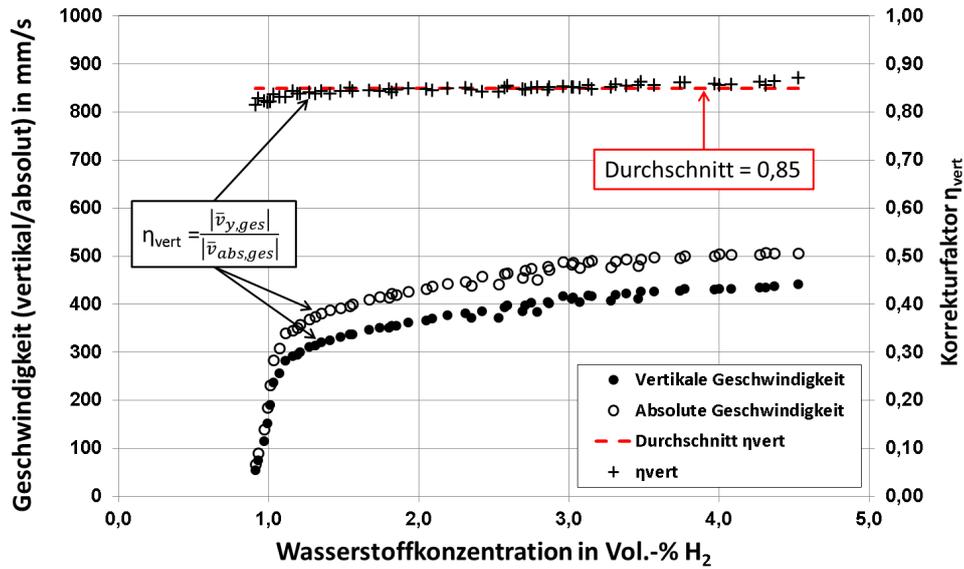


Abbildung 4.8: Korrekturfaktor η_{vert} in Abhängigkeit von der H_2 -Konzentration

bestimmt werden. Die Standardabweichung gemäß Gleichung 4.8 beträgt $S_{st} = 0,011$.

Unter Verwendung des Korrekturfaktors η_{vert} kann nun aus der absoluten Geschwindigkeit kontinuierlicher Messungen die vertikale Geschwindigkeit über

$$|\vec{v}_y| = |\vec{v}_{abs}| \cdot \eta_{vert} \quad (4.12)$$

berechnet werden.

Abbildung 4.9 zeigt am Beispiel des Startverhaltens der Versuchsreihe R4-L-03 die absolute und vertikale Geschwindigkeit am Einlass des Rekombinators im Vergleich. Die Genauigkeit der instationären Messung liegt unter der Genauigkeit der stationären Messung. Dies liegt u.a. daran, dass jedes Bildpaar als einzelner Messpunkt ausgewertet wird, wodurch keine Mittelung stochastischer Fehler über einen längeren Zeitraum erfolgt. Der Verlauf ab 500 s zeigt eine stetig steigende Geschwindigkeit am Einlass, die kausal mit der Temperaturzunahme auf den Katalysatorblechen und der damit verbundenen einsetzenden Naturkonvektion zusammenhängt. Vor dem Zeitpunkt von 500 s sind starke Schwankungen in der Geschwindigkeit erkennbar. Dies ist auf die laufende Einspeisung in den Versuchsbehälter zurückzuführen. Bis zum Zeitpunkt von 500 s erfolgt die Einspeisung noch beim großen Volumenstrom von $1,9 \text{ m}^3/\text{s}$, danach für 100 s bei dem reduzierten Strom von $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Hieraus wird deutlich, dass die Einspeisung im Bereich des Behälters zu Strömungen führen, die eine PIV-Messung stören. Insbesondere während der Einspeisephase mit großem Volumenstrom werden Geschwindigkeiten im Bereich von unter 400 mm/s stark beeinflusst. Daraus folgt, dass PIV-Messungen zu

4 Versuchsbeschreibung

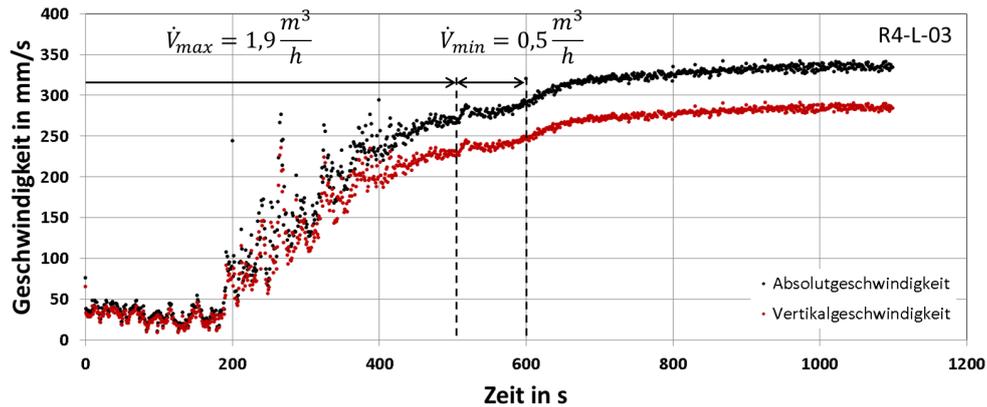


Abbildung 4.9: Absolute und vertikale Geschwindigkeit am Rekombinatoreinlass (Startverhalten R4-L-03)

stationären Messpunkten nicht während der Einspeisung von Wasserstoff durchgeführt werden können.

4.2 Vorversuche

Die Vorversuche umfassen die die Versuchsreihen R4-E und R4-F. Zuerst erfolgt eine theoretische Betrachtung der Einspeisevorgänge in den Versuchsbehälter, die anschließend mit experimentellen Daten verglichen wird. Danach wird die Wasserstoffverteilung im Behälter ohne Anwesenheit eines Rekombinators untersucht.

4.2.1 Theoretische Betrachtung der Einspeisung

Im Verlauf eines Versuches können bis zu vier unterschiedliche Komponenten in den Behälter eingespeist werden.

Wasserstoff Zum Starten und Aufrechterhalten der Rekombinationsreaktion wird diskontinuierlich Wasserstoff durch einen Massendurchflussregler in den Behälter eingespeist. Aufgrund des großen Dichteunterschieds zwischen Wasserstoff und Luft erfährt der Einspeisestrom eine vertikal nach oben gerichtete Auftriebskraft.

PIV-Partikel Für die PIV-Messungen werden Tracerpartikel (DEHS) in die Atmosphäre eingespeist (siehe Kap. 3.4). Die Partikel werden immer gleichzeitig mit Luft oder Wasserstoff injiziert, um eine homogenere Verteilung im Behälter zu erzielen.

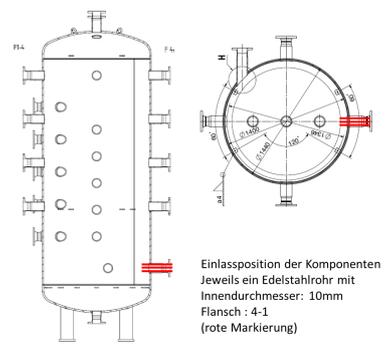
Luft Die Lufteinspeisung erfolgt manuell bei einer Druckdifferenz von ca. 4 bar ohne Steuerung über Massendurchflussregler.

Stickstoff Aus Sicherheitsgründen ist es jederzeit möglich, Stickstoff als Inertgas in den

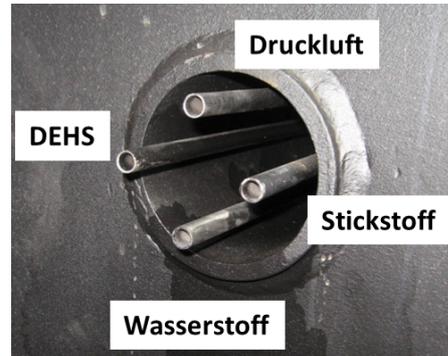
4 Versuchsbeschreibung

Behälter einzuspeisen.

Die Einspeisung der Komponenten in den Behälter findet jeweils durch ein separates Edelstahlrohr mit einem Innendurchmesser von 10 mm horizontal durch den Flansch 4-1 statt (Abb. 4.10). Die Rohre sind in einer Höhe von 200 mm über der unteren Traverse (Gitterrost) bzw. 450 mm über dem Behälterboden angebracht.



(a) Schematische Darstellung der Einspeiseposition



(b) Innenansicht der Einspeiseposition

Abbildung 4.10: Einspeisung in den Versuchsbehälter

Grundsätzlich kann man Einstromungsvorgänge von Gasen in eine ruhende Atmosphäre über das Verhältnis von Impuls zu Auftrieb charakterisieren [HGAB11]. Strömungen, in denen die Impulskräfte gegenüber den Auftriebskräften dominieren, werden „Jet“ genannt. Strömungen, bei denen die Impulskräfte eine untergeordnete Rolle spielen und die Verteilung hauptsächlich durch Dichteunterschiede hervorgerufen wird, werden hingegen als „Plume“ bezeichnet. Zur Identifizierung der jeweiligen Strömung wird im Folgenden die dimensionslose, dichtebezogene Froude-Zahl Fr_ρ mit

$$Fr_\rho = \frac{v_{ein}}{\sqrt{\left(g \cdot d_{ein} \cdot \frac{(\rho_\infty - \rho_{ein})}{\rho_{ein}}\right)}} \quad (4.13)$$

verwendet [HGAB11]. v_{ein} bezeichnet hierbei die Eintrittsgeschwindigkeit des Gases mit der Dichte ρ_{ein} , das durch das Einlassrohr mit dem Einlassdurchmesser d_{ein} in die Atmosphäre mit der Dichte ρ_∞ eingespeist wird. g ist die Gravitationskonstante. Strömungen mit Froude-Zahlen kleiner 10 gelten als auftriebsdominiert, während Strömungen mit Froude-Zahlen größer als 1000 als impulsdominiert gelten. Der Bereich dazwischen ($10 \leq Fr_\rho \leq 1000$) charakterisiert ein Übergangsbereich, in dem beide Phänomene die Strömung maßgeblich beeinflussen, siehe Abbildung 4.11 [HS08].

Anhand dieser theoretischen Betrachtung der zu erwartenden Strömungen kann nun das Einstromverhalten in den Versuchsbehälter abgeschätzt werden. Die Einlassgeschwin-

4 Versuchsbeschreibung

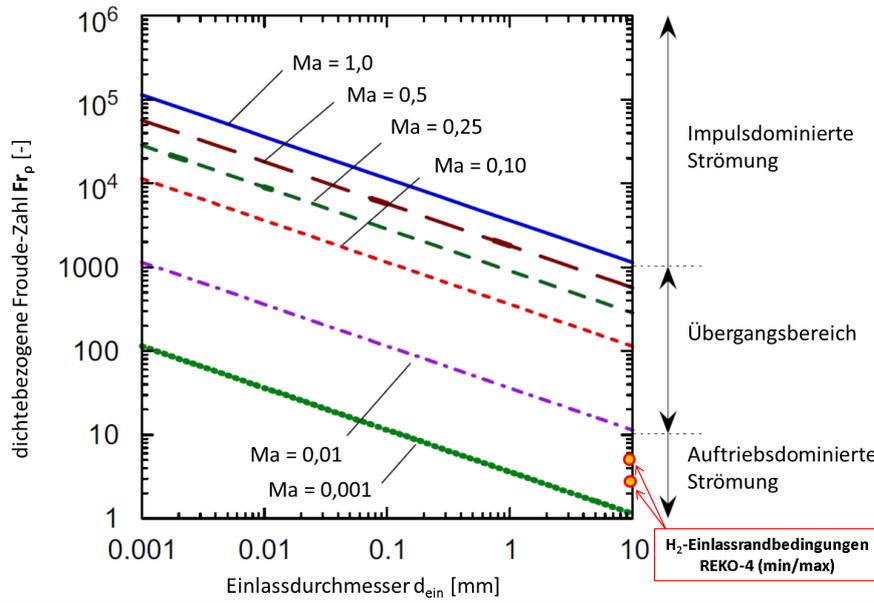


Abbildung 4.11: Unterscheidung von impuls-/auftriebsdominierten Strömungsgebieten in Abhängigkeit von d_{ein} und Fr_ρ [HS08]

digkeit von Wasserstoff berechnet sich dabei aus

$$v_{ein} = \frac{\dot{V}_{min/max}}{A_{ein}} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{min/max}}{\pi \cdot (d_{ein})^2}. \quad (4.14)$$

Zusammen mit den Einlassparametern und unter Annahme von Randbedingungen für die Umgebungsluft kann die Froude-Zahl für die H₂-Einlassströmung unter Verwendung von Gleichung 4.13 für die unterschiedlichen Volumenströme berechnet werden (siehe Tabelle 4.4).

Die die Wasserstoffeinspeisung charakterisierende Froude-Zahl liegt sowohl für den maximalen als auch für den minimalen Volumenstrom unter 10 (Abb. 4.11). Aufgrund der Dominanz der Auftriebskräfte ist daher zu erwarten, dass die Strömung bereits kurz nach der Einlassöffnung nach oben steigt.

Im Gegensatz dazu ist die Einspeisung von Luft impulsdominiert, da bis auf marginale Temperaturunterschiede zwischen der Einlassluft und der Behälteratmosphäre keine Dichteunterschiede zu erwarten sind. Somit divergiert Gleichung 4.13 mit $Fr \rightarrow \infty$, was die Strömung als reine Impulsströmung charakterisiert.

Diese ersten Abschätzungen der zu erwartenden Strömungen werden dazu verwendet, einen geeigneten Versuchsaufbau auszulegen, um die verschiedenen Strömungsbilder sowohl von Luft als auch von Wasserstoff mit PIV zu vermessen.

4 Versuchsbeschreibung

Bezeichnung	Variable	Wert
Maximaler H ₂ -Volumenstrom	\dot{V}_{max}	1,9 m ³ /h
Minimaler H ₂ -Volumenstrom	\dot{V}_{min}	0,5 m ³ /h
Innendurchmesser des Einlassrohres	d_{ein}	10 mm
Gravitationskonstante	g	9,81 m/s ²
Umgebungstemperatur	T_u	20 °C \cong 293 K
Dichte von Wasserstoff bei T_u	ρ_{H_2}	0,083 kg/m ³
Dichte von Luft bei T_u	ρ_{Luft}	1,184 kg/m ³
Froude-Zahl (\dot{v}_{max})	Fr _{max}	5,89
Froude-Zahl (\dot{v}_{min})	Fr _{min}	1,55

Tabelle 4.4: Berechnung der Froude-Zahl für die H₂-Einlassströmung

4.2.2 Einspeisung von Luft

Die Untersuchungen der Einspeisung von Luft in den Versuchsbehälter REKO-4 wurden von [Kla11] durchgeführt. Zur Vermessung der Einlassströmung wird die PIV-Messebene parallel zur Einlassrichtung senkrecht zur Einlassfläche angeordnet (Abb. 4.12). Die

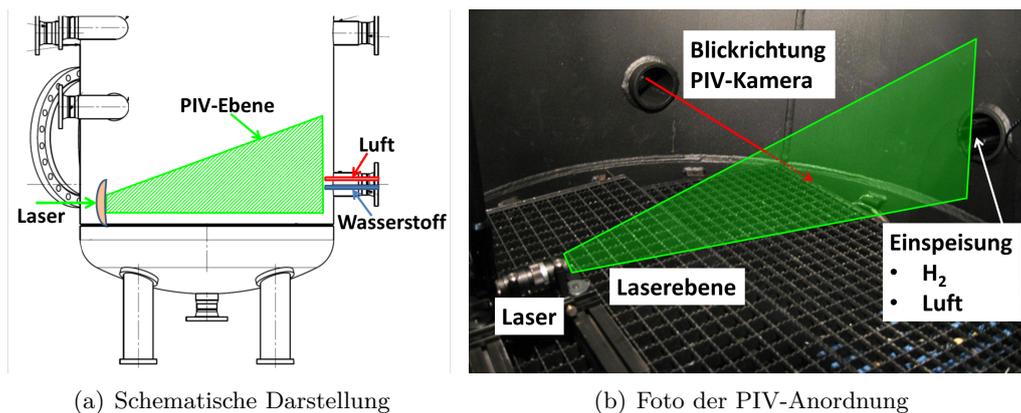


Abbildung 4.12: PIV-Vermessung der Gaseinspeisung für Luft und Wasserstoff

DEHS-Partikel werden vor der Messung in den Behälter eingespeist, so dass diese zu Beginn der PIV-Messung bereits homogen im Behälter verteilt sind. Die Einspeisung von Luft im Rahmen dieser Arbeit erfolgt ausschließlich bei einem Druck von 4 bar. Abbildung 4.13 zeigt das über mehrere Messungen gemittelte Geschwindigkeitsfeld bei 4 bar am Lufteinlass, wobei die x- bzw. x-Achse die jeweilige Position in mm wiedergibt. Die Strömung verläuft erwartungsgemäß horizontal und ist ausschließlich impulsdominiert. Die Geschwindigkeiten liegen z.T. über 30 m/s, wobei jedoch direkt am Einlass prinzipbedingt keine Geschwindigkeit bestimmt werden kann, da die Druckluft direkt

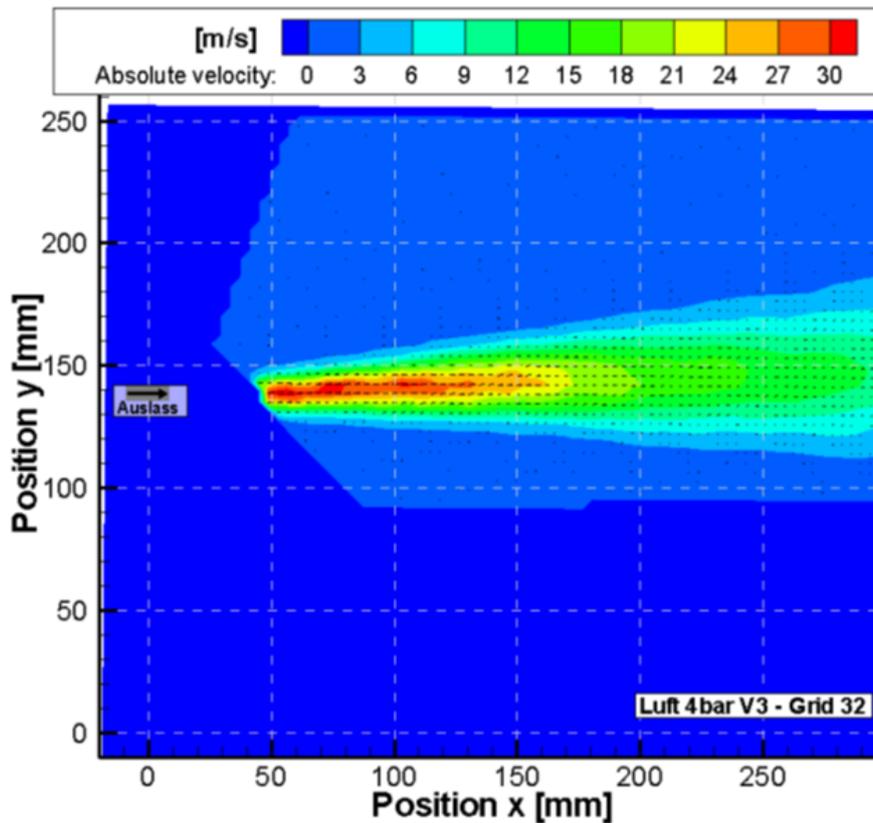


Abbildung 4.13: Geschwindigkeitsfeld am Lufteinlass bei 4 bar Einlassdruck [Kla11]

nach Verlassen des Rohres noch keine Partikel transportiert. Erst nach ca. 20 mm dringen Partikel durch Turbulenzen in den Jet ein [Kla11]. Die Genauigkeit der PIV-Messung ist aufgrund der hohen Geschwindigkeitsgradienten im Bereich von bis zu 6 % einzuordnen.

4.2.3 Einspeisung von Wasserstoff

Die PIV-Messung wird bei den beiden unterschiedlichen Volumenströmen gemäß Tabelle 4.4 durchgeführt. Die Ausrichtung der PIV-Messebene erfolgt dabei analog zur Vermessung des Lufteinlasses, wobei das Einlassrohr für Wasserstoff ca. 50 mm über dem Lufteinlass liegt (vgl. [Kla11]).

Im Gegensatz zur Einspeisung von Luft ist bei beiden Messungen die klar auftriebsdominierte Strömung aufgrund des Dichteunterschieds zwischen Wasserstoff und Luft erkennbar (Abb. 4.14). Der Volumenstrom mit $1,9 \text{ m}^3/\text{s}$ legt aufgrund des höheren Impulses noch eine Strecke von ca. 150 mm in horizontale Richtung zurück, während bei der geringeren Einspeiserate dieser Anteil aufgrund des fast um den Faktor vier geringeren Volumenstroms auf ca. 50 mm sinkt. Die maximale Geschwindigkeit im Bereich

4 Versuchsbeschreibung

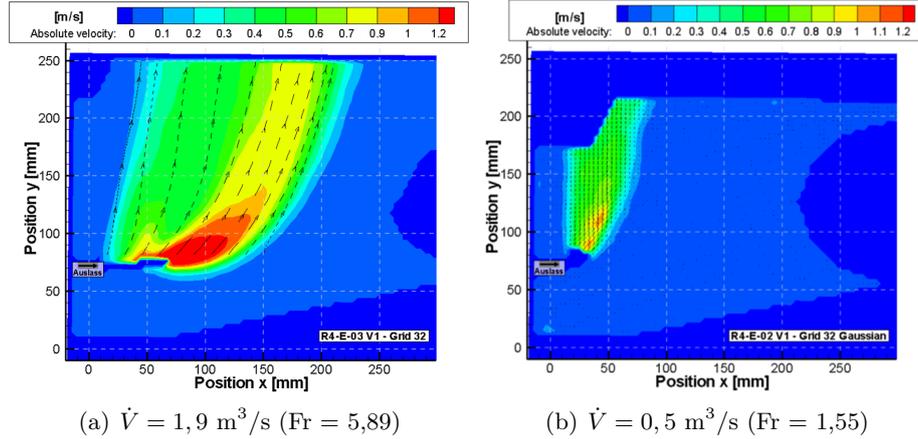


Abbildung 4.14: Messung der Geschwindigkeitsfelder am Wasserstoffeinlass bei zwei unterschiedlichen Volumenströmen

des Einlasses liegt dabei im Bereich von 1,2 m/s, wobei aber auch hier unmittelbar am Einlass aufgrund der zu geringen Partikeldichte im H_2 -Strom keine Auswertung mit PIV möglich ist. Die Genauigkeit dieser Messung liegt im Bereich zwischen 1,5 % und 6 %, da die Annahmen zur Messungengenauigkeit eingehalten werden (siehe Abschnitt 3.7.5). Diese Ergebnisse wurden im Rahmen einer vorherigen Arbeit zusätzlich mit dem Strömungssimulationsprogramm CFX (Ansys) nachgerechnet. Hierbei zeigen sich gute Übereinstimmungen von Theorie, experimenteller Untersuchung und Simulationsrechnung [Kla11].

4.2.4 Wasserstoffverteilung im Behälter

Das insgesamt eingespeiste Wasserstoffvolumen V_{H_2} wird anteilmäßig über x_{H_2} mit

$$x_{\text{H}_2} = \frac{V_{\text{H}_2}}{V_{\text{H}_2} + V_{\text{AV}}} \quad (4.15)$$

berechnet, wobei V_{H_2} das Wasserstoffvolumen und V_{AV} das Auslegungsvolumen des Versuchsbehälters REKO-4 beschreibt. Somit stellt x_{H_2} die mittleren Konzentrationen im Behälter bezogen auf das Auslegungsvolumen V_{AV} dar. Wie bereits in Abschnitt 3.1 erläutert, fällt jedoch das eigentliche freie Volumen V_{FV} durch Einbauten und Abweichungen in der Fertigung mit $5,317 \text{ m}^3$ geringer aus. Somit führt die eingespeiste Menge an Wasserstoff V_{H_2} aufgrund des leicht überschätzten Bezugsvolumens zu einer leicht erhöhten, mittleren Konzentration $x_{\text{H}_2, \text{m}}$ im Behälter. Dies ist für die Untersuchungen des Betriebsverhaltens nicht relevant, da die reale H_2 -Konzentration mit Katharometer in-situ bestimmt wird. Dennoch ist diese Abweichung bei der Betrachtung der Gesamtbilanz zu beachten. Unter Berücksichtigung von Gleichung 4.15 und der unterschiedlichen Volumina V_{AV} und V_{FV} ergibt sich die mittlere eingespeiste Wasserstoffkonzentration

4 Versuchsbeschreibung

$x_{H_2,m}$ zu

$$x_{H_2,m} = \frac{x_{H_2} \cdot V_{AV}}{V_{FV} + x_{H_2} \cdot V_{AV} - x_{H_2} \cdot V_{FV}}. \quad (4.16)$$

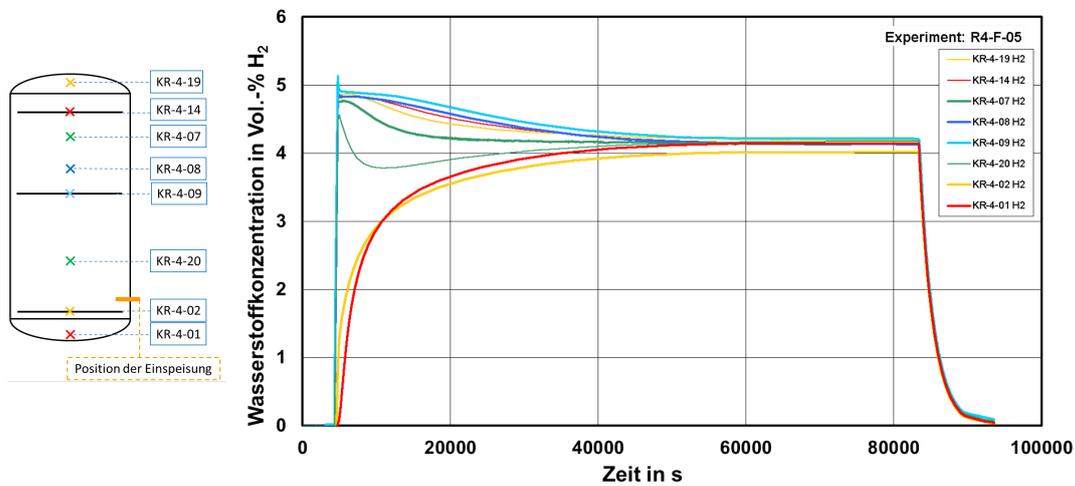
Dies bedeutet, dass eine Einspeisemenge von V_{H_2} entsprechend 4 Vol.-% H_2 des Auslegungsvolumens zu einer mittleren Konzentration im Behälter von $x_{H_2,m} = 4,096 \approx 4,1$ Vol.-% H_2 führt.

Tabelle 4.5 zeigt eine Übersicht der Vorversuche zur Wasserstoffverteilung im Behälter (Instrumentierung siehe Abb. 3.12 in Abschnitt 3.5.2). Zu Beginn wird der Versuchsbe-

Versuchsnummer	Eingespeiste Menge H_2 $x_{H_2,m}$
R4-F-01	Inbetriebnahme
R4-F-02	3,073 Vol.-%
R4-F-03	3,073 Vol.-%
R4-F-04	4,096 Vol.-%
R4-F-05	4,096 Vol.-%

Tabelle 4.5: Übersicht der Vorversuche (R4-F)

hälter druckdicht abgeschlossen und Wasserstoff eingespeist. Die Verteilung des Wasserstoffs in der Behälteratmosphäre wird über einen Zeitraum von knapp 24 Stunden erfasst.



(a) Position der Katharometer

(b) H_2 -Konzentration

Abbildung 4.15: Verlauf der H_2 -Konzentration über die Behälterhöhe (R4-F-05)

4 Versuchsbeschreibung

Abbildung 4.15 zeigt den auf der vertikalen Mittelachse gemessenen Verlauf der Wasserstoffkonzentration über die gesamte Versuchsdauer. Die zu Beginn eingespeiste Wasserstoffmenge entspricht einer mittleren Wasserstoffkonzentration im Behälter $x_{\text{H}_2, \text{m}}$ von 4,1 Vol.-%. Nach Beginn der Einspeisung ($t = 4320 \text{ s}$) steigen die gemessenen Konzentrationen oberhalb der Einspeisung unmittelbar auf Werte $> 4 \text{ Vol.-% H}_2$ (wegen $Fr < 10$), während sich die Werte unterhalb langsam dem stationären Endwert nähern. Nach etwas 50000 s ($\approx 14 \text{ h}$) ist eine homogene Verteilung im Behälter erreicht, die der eingespeisten, mittleren Wasserstoffkonzentration im Behälter $x_{\text{H}_2, \text{m}}$ entspricht. Die Genauigkeit liegt bei $\pm 0,1 \text{ Vol.-% H}_2$. Die Homogenisierung der Wasserstoffkonzentration im Behälter ist zum einen auf Diffusionseffekte zurückzuführen, zum anderen auf marginale Temperaturunterschiede zwischen Behälterwand und -atmosphäre, die zu sehr langsamen Strömungen im Bereich von unter 5 mm/s führen.

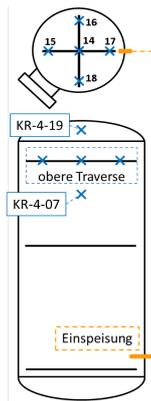
Abbildung 4.16 zeigt den Verlauf der H_2 -Konzentration im oberen (a-b), mittleren (c-d) und unteren (e-f) Behälterbereich während der Einspeisung. Im oberen und mittleren Bereich wird zeitgleich mit dem Einspeisebeginn eine steigende Wasserstoffkonzentration registriert, während die Werte im unteren Bereich erst leicht zeitversetzt folgen.

Die obere Abbildung zeigt die Katharometermesswerte der oberen Traverse (KR-4-14 bis KR-4-18, durchgehende Kurven). Zum anderen ist KR-4-19 (rot-unterbrochen) dargestellt, der an der höchsten Stelle des Behälters ca. 300 mm über der oberen Traverse hängt. KR-4-07 (schwarz-unterbrochen) liegt ca. 390 mm unterhalb der oberen Traverse. Da der Wasserstoff aufgrund der geringen Dichte direkt unter die Behälterdecke steigt, zeigt der dortige Sensor KR-4-19 tendenziell die höchsten Konzentrationswerte. Sensor KR-4-17 liegt ebenfalls im oberen Bereich des Messwertbandes, da er senkrecht über der Einspeisung liegt. Generell sind aber nach der Einspeisephase keine radialen Konzentrationsunterschiede erkennbar und die Katharometer nähern sich einem Messwert von 4,8 Vol.-% H_2 . Die Abweichungen in der Traversenebene betragen $\pm 0,05 \text{ Vol.-% H}_2$.

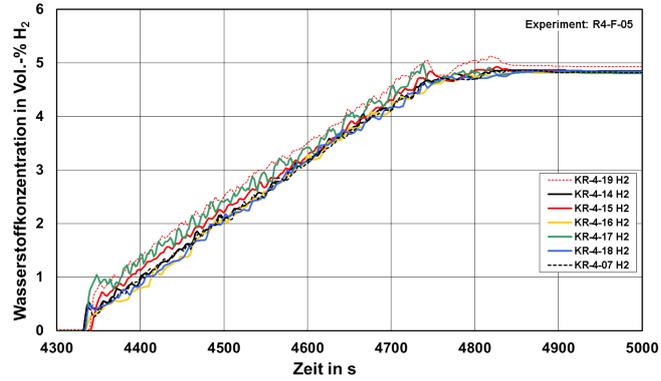
Die Wasserstoffverteilung für den mittleren Behälterbereich umfasst die Katharometer KR-4-09 bis KR-4-13 auf der mittleren Traverse bzw. der 390 mm darüber gelegene KR-4-08 (blau-unterbrochen) und der 800 mm darunter gelegene KR-4-20. Sie zeigen den nahezu gleichen Verlauf wie die Katharometer im oberen Behälterbereich. Einzig KR-4-12 misst während der Einspeisung Konzentrationen, die z.T. über 1 Vol.-% H_2 darüber liegen. Dieser Sensor ist vertikal über dem Einspeiserohr positioniert und liegt dementsprechend im Bereich der auftriebsdominierten Strömung. Nach der Einspeisung nähern sich sowohl die Katharometer der mittleren Traverse als auch KR-4-08 einem Wert von 4,8 Vol.-% H_2 , wobei die Abweichungen innerhalb der mittleren Traverse nach Ende der Einspeisung bei $\pm 0,05 \text{ Vol.-% H}_2$ liegen. KR-4-20 liegt während und kurz nach der Einspeisung aufgrund der höheren vertikalen Entfernung nahezu konstant 0,3 Vol.-% H_2 unterhalb der mittleren Traverse und erreicht einen Wert von 4,5 Vol.-% H_2 .

Der untere Behälterbereich wird mit den Katharometern KR-4-02 bis KR-4-06 der unteren Traverse und dem ungefähr 350 mm darunter positionierten KR-4-01 untersucht. Um die Konzentrationsunterschiede zum mittleren Bereich abschätzen zu können, ist zusätzlich noch KR-4-20 eingezeichnet, der 800 mm über der unteren Traverse hängt.

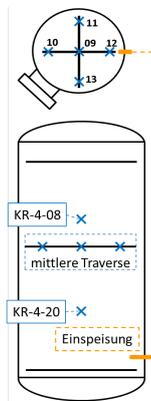
4 Versuchsbeschreibung



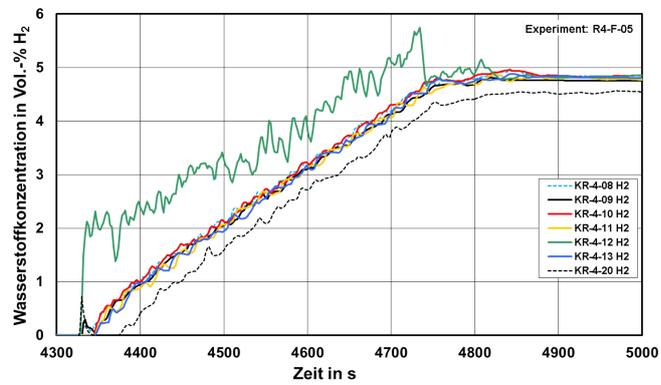
(a) Sensoren



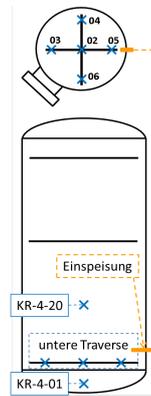
(b) H₂-Konzentration (oberer Bereich)



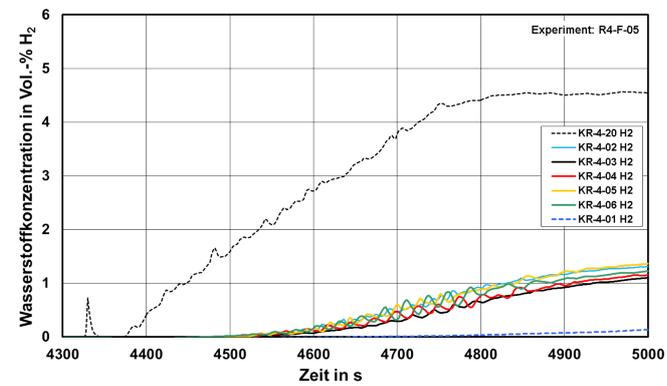
(c) Sensoren



(d) H₂-Konzentration (mittlerer Bereich)



(e) Sensoren



(f) H₂-Konzentration (unterer Bereich)

Abbildung 4.16: Verlauf der H₂-Konzentration während der Einspeisung im oberen /mittleren / unteren Behälterbereich

4 Versuchsbeschreibung

Der Ort der Wasserstoffeinspeisung liegt 200 mm über der unteren Traverse, so dass zu Beginn der Einspeisung kein Wasserstoff in den unteren Behälterbereich an die Sensoren gelangt. Erst nach einem Zeitraum von ungefähr 180 s messen die Sensoren KR-4-02 bis -06 einen Konzentrationsanstieg, der sich auch nach der Einspeisephase weiter fortsetzt. KR-4-01 als niedrigster Sensor im Versuchsstand registriert zuletzt steigende Konzentrationen, da es am längsten dauert bis Wasserstoff an die tiefste Stelle im Behälter gelangt. Die radiale Konzentrationsverteilung liegt im Vergleich zu den übrigen Traversen mit Δx_{H_2} 0,3 Vol.-% H_2 leicht höher. Der Konzentrationsunterschied zwischen Behälterboden und unterer Traverse beträgt während und kurz nach der Einspeisung über 1 Vol.-% H_2 .

Die Einspeisung und Verteilung von Wasserstoff wurde zusätzlich mit Simulationsrechnungen überprüft, die den Verlauf der Konzentrationsmessung bestätigen [Kla11]. Generell zeigen die Versuche, dass oberhalb der Einspeisestelle Konzentrationen gemessen werden, die über der mittleren eingespeisten Wasserstoffkonzentration $x_{H_2,m}$ liegen. Diese Schichtung löst sich durch Strömungs- und Diffusionsvorgänge erst nach mehreren Stunden auf.

Der Vollständigkeit halber wird in Abbildung 4.17 auf die Temperaturen während der Vorversuche eingegangen, auch wenn durch die Abwesenheit der Rekombinationsreaktion keine großen Temperaturunterschiede zu erwarten sind. Die Graphen zeigen sowohl die Gastemperaturen im oberen Bereich des Behälters, die mit zwei unterschiedlichen Messprinzipien arbeiten (Thermoelement/PT-1000-Sensor), als auch eine Wandtemperatur. Die Abbildung zeigt einen Zeitausschnitt von etwa drei Stunden. Ebenso ist der Überdruck auf der Sekundärachse eingezeichnet (schwarz-unterbrochen), der während der Einspeisephase steigt.

Die Temperaturen sind erwartungsgemäß sowohl vor als auch nach der Einspeisung konstant. Die Wandtemperatur TR-4-76 WO, die Gastemperaturen TR-4-01 GO (Thermoelement) und HR-4-01 T (Pt-1000) weichen weniger als 1 K voneinander ab. Mit Beginn der Wasserstoffeinspeisung steigen die Gastemperaturen um ca. 0,7 K, da durch die Gaseinspeisung der Druck im abgeschlossenen Behälter steigt. Nach der Einspeisephase sinkt die Temperatur wieder auf das Temperaturniveau vor der Einspeisung. Die Wandtemperatur bleibt hingegen über den gesamten Zeitraum nahezu konstant, da die Behälterwandtemperatur aufgrund der Behälterwandmasse nur marginal beeinflusst wird. Nach der Einspeisung kann dennoch ein minimaler Temperaturanstieg registriert werden, da das Gas die Temperatur an die Behälterwand abgibt. Die Temperaturerhöhung aufgrund der Druckzunahme führt ebenfalls zu einer minimalen Zunahme der relativen Feuchte, die aber im Bereich der Messungenauigkeit liegt. Die absolute Feuchte ist unabhängig von der Temperatur und dementsprechend konstant.

Die Vorversuche zeigen, dass die eingespeiste Wasserstoffmenge durch Diffusion und langsame Strömungseffekte zu einer homogenen Verteilung im Behälter führt, die mit den Katharometern gemessen werden kann. So kann unter der Annahme der stationären, homogenen Verteilung von dem durchschnittlichen Messwert der Katharometer auf die enthaltene Wasserstoffkonzentration geschlossen und mit der eingespeisten Menge ver-

4 Versuchsbeschreibung

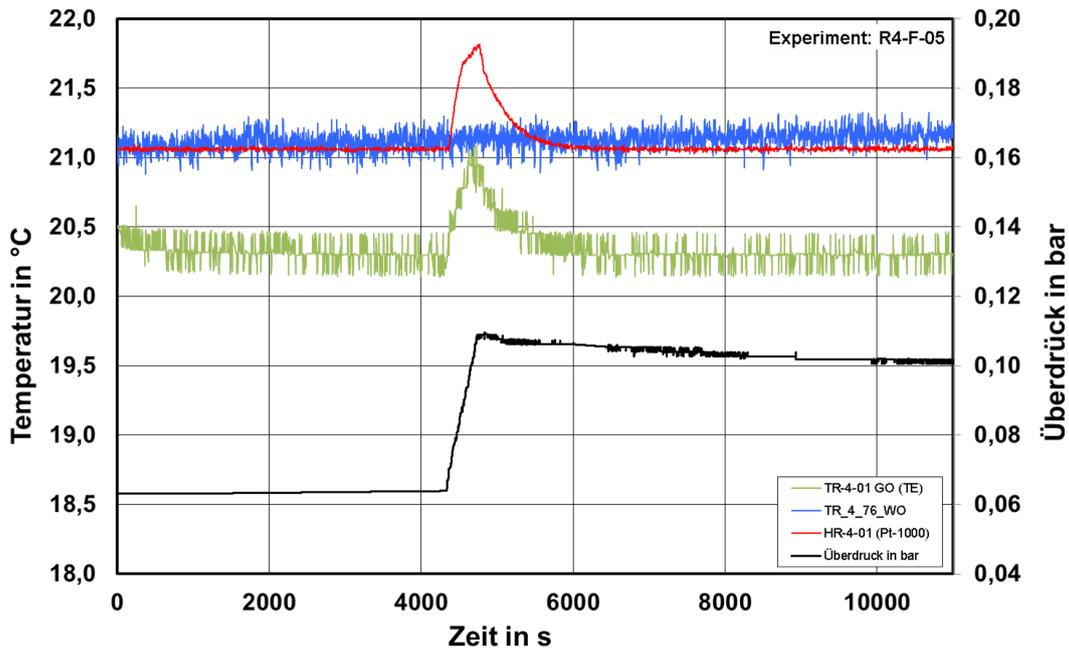


Abbildung 4.17: Temperaturverlauf von Atmosphäre und Wand im oberen Behälterbereich während der Vorversuche (Thermoelement/Pt-1000-Sensor)

glichen werden. Dies soll für die instationären Bedingungen während und nach der Einspeisephase unter Entwicklung eines Bilanzmodells für den Versuchsbehälter überprüft werden. Hierzu wird der Versuchsbehälter, wie in Abbildung 4.18 dargestellt, vertikal in sieben Schichten eingeteilt, die sich in ihrem Volumen unterscheiden.

An jeder Schichtgrenze ist ein Katharometer positioniert, der die Konzentration auf dieser Grenze erfasst. Tabelle 4.6 gibt die Schichtvolumina an und den jeweils verwendeten Katharometer an der oberen und unteren Grenzschicht. Unter Annahme einer radial homogenen Verteilung kann die Wasserstoffkonzentration jeder Schicht durch Mittelung des jeweiligen Sensorwerts oberhalb (o) und unterhalb (u) über

$$x_{H_2,i} = \frac{x_{H_2,o} + x_{H_2,u}}{2} \quad (4.17)$$

bestimmt werden. Mit Hilfe des idealen Gasgesetzes

$$n_{H_2,i} = \frac{p \cdot V_i}{R \cdot T_i} \quad (4.18)$$

ist nun zu jedem Zeitpunkt die Berechnung der in jeder Schicht vorhandenen mittleren Wasserstoffmenge $n_{H_2,i}$ möglich. Durch Addition aller Schichten folgt über

$$n_{H_2,ges} = \sum_i n_{H_2,i} \quad (4.19)$$

4 Versuchsbeschreibung

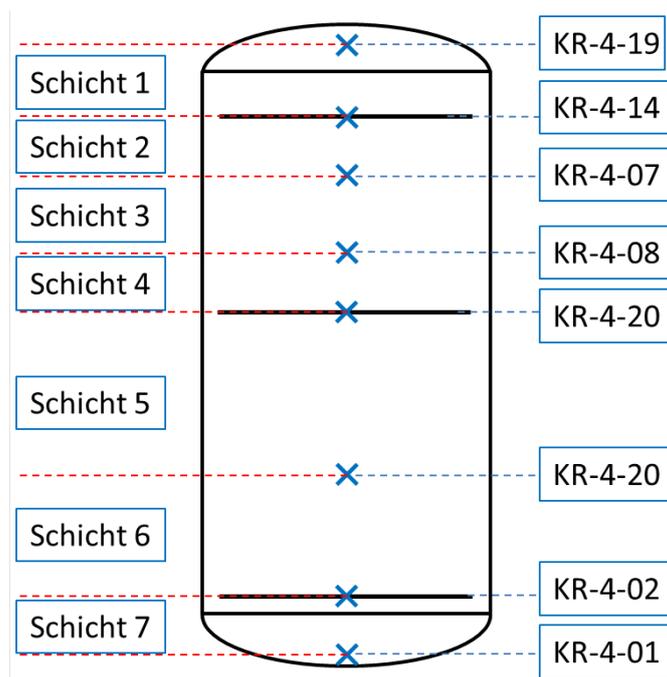


Abbildung 4.18: Einteilung des Versuchsbehälters in Schichten

Nr.	Volumen v_i	H ₂ -Messung obere Schichtgrenze	H ₂ -Messung untere Schichtgrenze
Schicht 1	480,32 dm ³	KR-4-19	KR-4-14
Schicht 2	603,08 dm ³	KR-4-14	KR-4-07
Schicht 3	604,62 dm ³	KR-4-07	KR-4-08
Schicht 4	604,62 dm ³	KR-4-08	KR-4-09
Schicht 5	1243,47 dm ³	KR-4-09	KR-4-20
Schicht 6	1319,00 dm ³	KR-4-20	KR-4-02
Schicht 7	461,85 dm ³	KR-4-02	KR-4-01
ΣV_{ges}	5316,96 dm³		

Tabelle 4.6: Schichtvolumen und Angabe der jeweils verwendeten Katharometer an den Schichtgrenzen

4 Versuchsbeschreibung

die gesamte im Behälter gemessene Wasserstoffmenge $n_{H_2, ges}$. Die eingespeiste Menge resultiert aus dem aufsummierten Ist-Wert des Massendurchflussreglers über Gleichung

$$n_{H_2, MFC} = \frac{p_{MFC, n} \cdot V_{MFC}}{R \cdot T_{MFC, n}} \quad (4.20)$$

$$\text{mit } p_{MFC, n} = 101325 \text{ Pa}$$

$$T_{MFC, n} = 293,15 \text{ K}$$

Abbildung 4.19 zeigt die eingespeiste Menge (schwarz) im Vergleich zur gemessenen Wasserstoffmenge (rot) unter Verwendung des Schichtenmodells für eine Zeitdauer von 2000 s nach dem Zeitpunkt der Einspeisung.

Zu erkennen ist eine gute Übereinstimmung von eingespeister und gemessener Wasserstoffmenge. Die Sensordaten zeigen dabei eine leichte Verzögerung von 20 - 30 s, da der Wasserstoff nach der Einspeisung nicht unmittelbar von allen Sensoren registriert wird. Diese Verzögerung ist u.a. darauf zurückzuführen, dass der eingespeiste Wasserstoff noch den Weg bis zu den Sensoren zurücklegen muss. Dennoch ist sowohl die Einspeisung des großen Volumenstroms (4324 - 4732 s) als auch des geringen Volumenstroms (4732 - 4816 s) in der Berechnung erkennbar. Bereits zum Zeitpunkt bei 5000 s weicht die gemessene H_2 -Menge um weniger als 1,5 % von der eingespeisten Menge ab.

Abbildung 4.20 erweitert die Zeitspanne von Abbildung 4.19 auf ca. 2 h. Nach ungefähr 6000 s überschätzt das Schichtenmodell die Wasserstoffmenge im Behälter, wobei die Abweichungen kleiner als 1,5 % sind.

In Bezug auf die Genauigkeit muss dabei beachtet werden, dass schon eine Variation des zur Berechnung verwendeten Behälterdrucks von 10 mbar zu einer Abweichung von knapp 1 % bzw. 0,1 mol H_2 führt. Daher sind die erzielten Ergebnisse der Sensorberechnung gerade unter Berücksichtigung des relativ groben Schichtenmodells und der Genauigkeit der verwendeten Messtechnik in sehr guter Übereinstimmung mit den Werten basierend auf den Daten des Massendurchflussreglers für Wasserstoff.

4.3 Versuchsverlauf am Beispiel R4-M-06

In diesem Versuch wird die Einlassgeschwindigkeit kontinuierlich über 100 Minuten gemessen. Dies umfasst den Zeitraum vom Beginn der H_2 -Einspeisung und dem Starten des Rekombinators über den Betrieb bis hin zum Erliegen der Rekombinationsreaktion aufgrund des fortgeschrittenen Wasserstoffabbaus. Dieser Versuch wird im Folgenden dazu verwendet, um exemplarisch den Verlauf eines Experiments über die gesamte Zeitdauer zu beschreiben und darüber hinaus die Plausibilität anhand einer Stoffmengenbilanz stellvertretend für alle Versuche zu überprüfen.

4 Versuchsbeschreibung

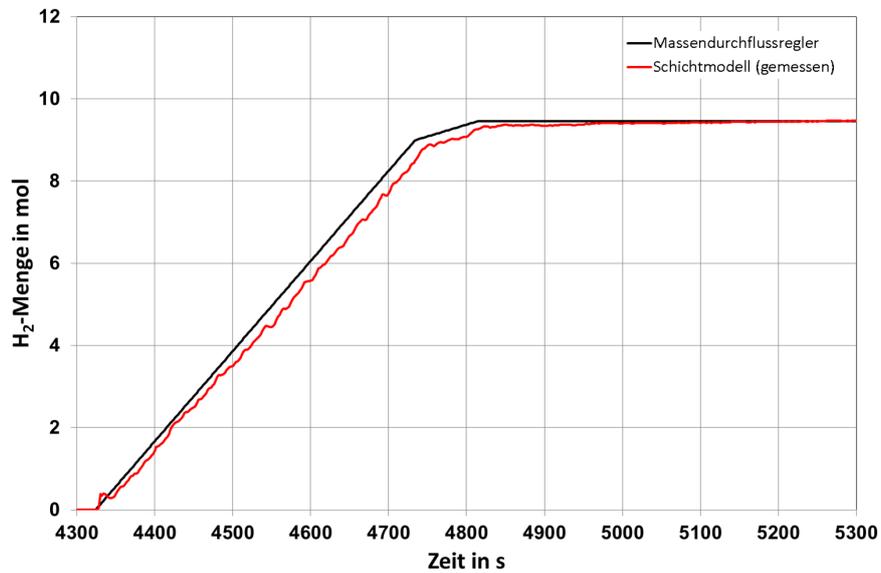


Abbildung 4.19: Vergleich der eingespeisten und anhand der Sensoren gemessenen H₂-Menge im Versuchsbehälter (~ 15 min)

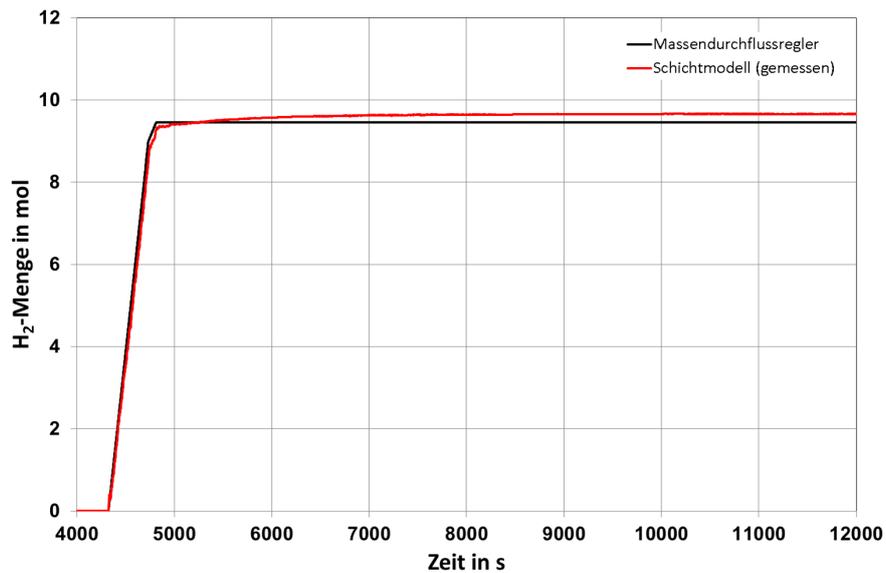


Abbildung 4.20: Vergleich der eingespeisten und anhand der Sensoren gemessenen H₂-Menge im Versuchsbehälter (~ 2 h)

4.3.1 Randbedingungen von R4-M-06

Der Rekombinator ist in diesem Versuch mit dem längsten Kamin bestückt, der im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird (850 mm). Das Druckniveau liegt mit ca. 1,5 bar_{abs} um 0,5 bar über normalem Atmosphärendruck. Die Behälteratmosphäre hat Umgebungstemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit liegt zu Beginn bei ungefähr 25 % rH.

Die eingespeiste Wasserstoffmenge führt unter der Annahme, dass keine Rekombinationsreaktion statt findet, nominell zu einer mittleren H₂-Konzentration im Behälter von 7,28 Vol.-%. Abbildung 4.21 zeigt die Einspeisung von Wasserstoff und den Druckverlauf von R4-M-06 über den gesamten Zeitraum. Auf der Primärordinate ist die auf

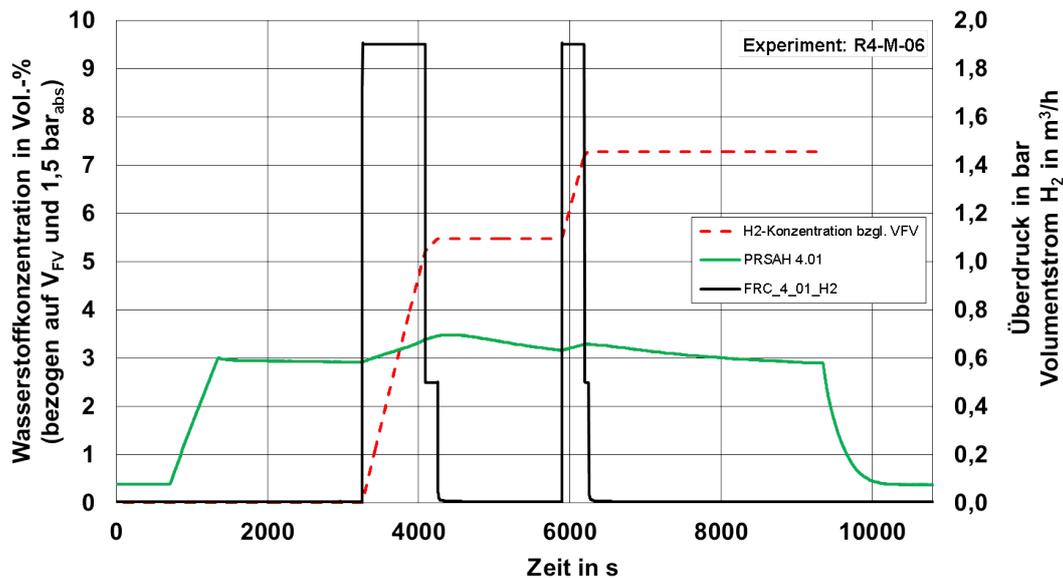


Abbildung 4.21: Einspeisung von Wasserstoff und Druckverlauf während des Versuchs R4-M-06

das Volumen V_{FV} und den Absolutdruck von 1,5 bar bezogene H₂-Konzentration $x_{H_2,m}$ dargestellt (rote, unterbrochene Linie). Auf der Sekundärordinate ist der Einspeisevolumenstrom (Massendurchflussregler FRC_4_01_H2) in schwarz und der Überdruck im Behälter (PRSAH 4.01) in grün dargestellt.

Im Zeitraum von ca. 700 - 1400 s wird Druckluft in den Versuchsbehälter geleitet, um das Druckniveau von 1,5 bar_{abs} bzw. 0,5 bar Überdruck zu erreichen. Anschließend wird eine hinreichend lange Zeit gewartet (hier 1800 s = 30 min), bis sich die Strömungszustände und die Temperaturerhöhung aufgrund der Lufteinspeisung wieder ausgeglichen haben.

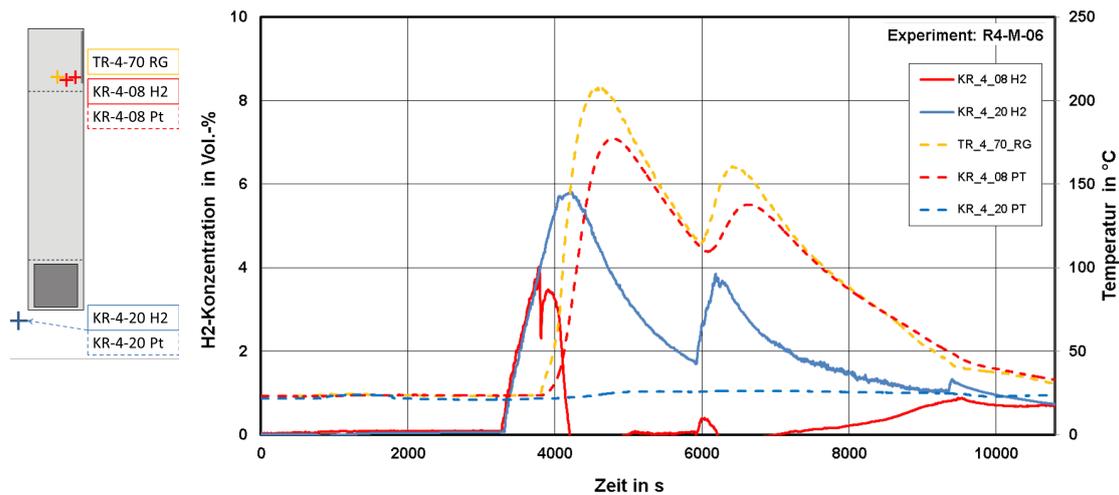
Die erste H₂-Einspeisung erstreckt sich von 3256 s bis 4254 s, während die zweite Einspeisung von 5896 s bis 6250 s läuft. Insgesamt werden 0,627 m³ H₂ bezogen auf Normbe-

4 Versuchsbeschreibung

dingungen in zwei Phasen in den Versuchsbehälter eingespeist. Im Diagramm sind auch wieder die zwei unterschiedlichen Einspeisevolumina von $1,9 \text{ m}^3/\text{h}$ und $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ jeder Einspeisung zu erkennen. Ab dem Zeitpunkt $t=9350 \text{ s}$ wird der Behälter geöffnet und gespült, so dass der Druck dementsprechend wieder sinkt.

4.3.2 Betriebsverhalten des Rekombinators

Abbildung 4.22 zeigt die Einlass- und Auslassbedingungen des Rekombinators während des Versuchs R4-M-06. Die Wasserstoffkonzentrationen sind dabei auf der Primärordina-



(a) Messstellen

(b) H_2 -Konzentration

Abbildung 4.22: Verlauf der H_2 -Konzentration und Temperatur am Rekombinatoreinlass und -auslass

te als durchgehende Graphen, die Temperaturen auf der Sekundärordinate als unterbrochene Graphen aufgetragen. Die Konzentration steigt ab ungefähr 3300 s am Einlass und am Auslass gleichzeitig an. Ab Zeitpunkt 3780 s bei 4 Vol.-% H_2 bricht die Auslasskonzentration ein und zeigt die einsetzende Wasserstoffrekombination. Aufgrund der sehr instationären Verhältnisse am Rekombinatorauslass ergeben sich trotz Temperaturkorrektur zeitweise negative Konzentrationswerte. Sowohl das Pt-100-Element des Katharometers als auch TR-70-RG zeigen in dieser Zeit hohe Temperaturen mit einem jeweiligen Maximum von ca. $175 \text{ }^\circ\text{C}$ bzw. über $200 \text{ }^\circ\text{C}$ an. Dieser Temperaturunterschied entsteht dadurch, dass das Thermoelement schon relativ früh durch Wärmestrahlung beeinflusst wird, während das Pt-100-Element auf dem Katharometer aufgrund der höheren Sensor-masse (Sensor, Kappe, Sockel, Kabel etc.) träger reagiert. Daher kann die reale Auslasstemperatur zwischen diesen beiden Werten angenommen werden. Die Einlasstemperatur hingegen zeigt nur marginale Temperaturänderungen an. Die Einlasskonzentration steigt

4 Versuchsbeschreibung

bis auf 5,8 Vol.-% H_2 an, sinkt jedoch zügig wieder, da durch die Rekombinationsreaktion an den Katalysatorblechen der Wasserstoff im Behälter abgebaut wird.

Die exotherme Reaktion führt zu einem Temperaturprofil auf den Katalysatorblechen. Abbildung 4.23 und Abbildung 4.24 zeigen dieses Temperaturprofil separat für Blech 1 und Blech 2. Die Temperaturprofile beider Bleche verlaufen dabei ähnlich. Die Temperaturen beider Bleche beginnen ungefähr zeitgleich ab ca. 3500 s an der Oberkante zu steigen. Beide Bleche erreichen ihr jeweiliges Maximum bei ca. 4350 s, wenn die Wasserstoffkonzentration am Einlass und demzufolge auch die Rekombinationsrate am höchsten ist. Danach sinken die Temperaturen wieder, da die H_2 -Konzentration abfällt. Nach Erreichen des Maximums bildet sich ein quasistationäres Temperaturprofil auf den Katalysatorblechen mit maximalen Temperaturen an der Unterkante und minimalen Temperaturen an der Oberkante aus (Abb. 4.23 und 4.24). Dieses Temperaturprofil dauert auf beiden Blechen ca. 3600 s bis knapp 8000 s an und ist auch während der zweiten Einspeisung und dem damit verbundenen erneuten Temperaturanstieg stabil. Diese quasistationären Zustände, mit Ausnahme der Nachspeisung bzw. der erneuten Aufwärmphase, werden im Rahmen dieser Arbeit dazu verwendet, das Betriebsverhalten des Rekombinators zu analysieren. Nach 8000 s sinken sämtliche Temperaturen unter $200\text{ }^\circ\text{C}$, wobei die Unterkante schneller abkühlt, so dass sich das Profil umkehrt. Bei Eintritt dieses Zustands wird der Versuch abgebrochen.

In Abbildung 4.25 ist der Vergleich des Temperaturverlaufs beider Bleche dargestellt, wobei Blech 1 mit einer durchgehenden Linie und Blech 2 mit einer unterbrochenen Linie dargestellt wird. Die Temperaturen an der Unterkante sind in rot und an der Oberkante in blau dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die jeweiligen Temperaturen an der Ober- und Unterkante des zweiten Bleches permanent bis zu $50\text{ }^\circ\text{C}$ unter den jeweiligen Temperaturen des ersten Bleches liegen. Dies kann mit der unterschiedlichen Positionierung erklärt werden. Blech 1 ist als Mittelblech und Blech 2 als Randblech installiert. Das bedeutet, dass sich das Mittelblech auf beiden Seiten im Strahlungsaustausch mit einem anderen Katalysatorblech befindet, während Blech 2 mit einer Seite Richtung Gehäusewand zeigt, an der keine katalytische Reaktion stattfindet. Letzteres führt zu höheren Wärmeverlusten des zweiten Bleches und somit zu den stets niedrigeren Temperaturen im Vergleich zu Blech 1.

Die Start- oder Aufwärmphase der Katalysatorbleche (3400 s bis 4400 s) ist in Abbildung 4.26 dargestellt. Hier ist auf der Abszisse die Temperatur und auf der Ordinate die Höhe des jeweiligen Thermoelements aufgetragen, die sich auf die Unterkante (0 mm) bezieht. Der Wasserstoff strömt somit über das Blech von unten (0 mm) nach oben zur Oberkante (143 mm). Das Temperaturprofil besteht dabei aus der jeweiligen Thermoelementmessung (TR-50- bis -59-RG), dessen Positionierung sowohl in Abbildung 4.23 - 4.24 als auch im Rahmen der Versuchsbeschreibung in Abschnitt 3.6 erklärt ist. Zur besseren Erklärung wird ebenfalls der Zeitpunkt $t^* = 0\text{ s} \hat{=} t = 3400\text{ s}$ eingeführt, der den Beginn der Temperaturerhöhung auf Blech 1 markiert.

Zum Zeitpunkt t^* liegen alle Temperaturwerte noch bei ca. $23\text{ }^\circ\text{C}$. In den darauf folgenden 400 s beginnt an der Oberkante die Temperatur langsam zu steigen und er-

4 Versuchsbeschreibung

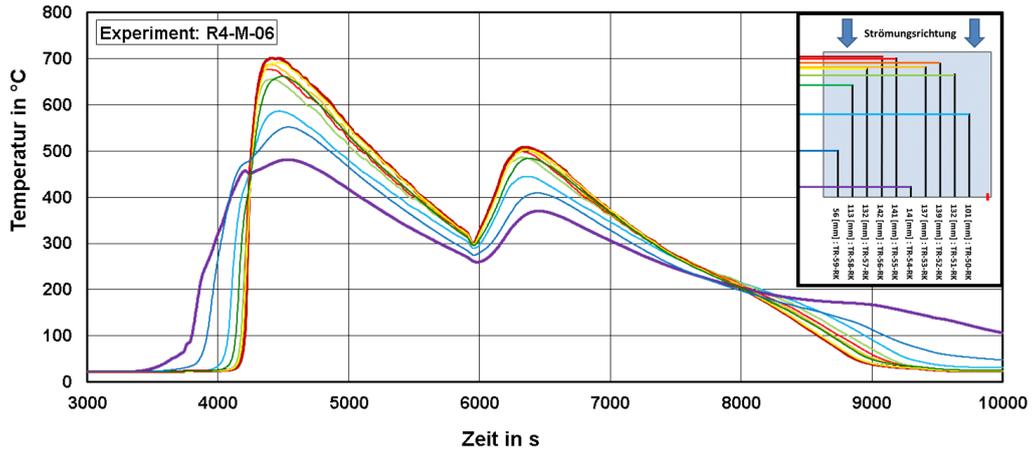


Abbildung 4.23: Temperaturprofil auf Katalysatorblech 1

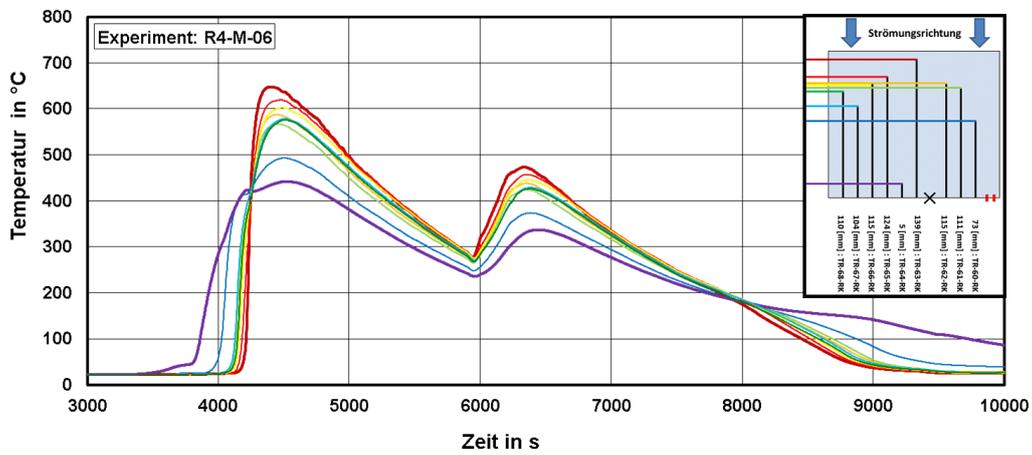


Abbildung 4.24: Temperaturprofil auf Katalysatorblech 2

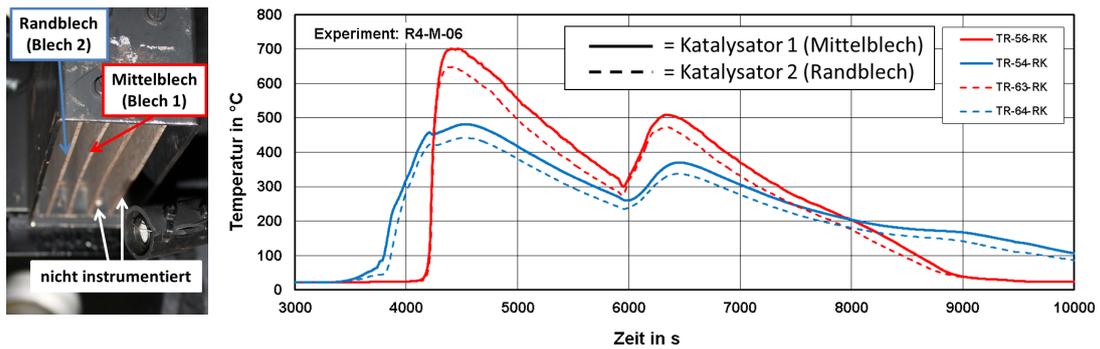


Abbildung 4.25: Vergleich des Temperaturprofils zwischen Blech 1 und Blech 2 (rot: Unterkante, blau: Oberkante)

4 Versuchsbeschreibung

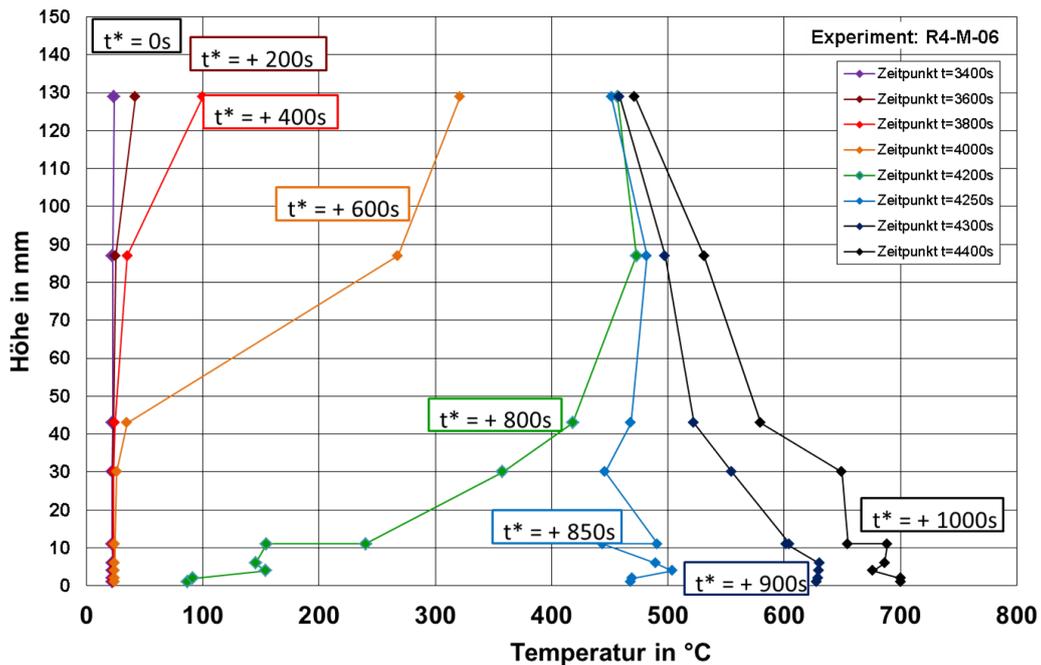


Abbildung 4.26: Ausbildung des Temperaturprofils auf Katalysatorblech 1 während der Startphase

reicht 100 °C. Die angrenzenden, tieferen Thermoelemente zeigen ebenfalls einen geringfügigen Anstieg, während die Unterkante noch unverändert ist. Zwischen 400 s und 800 s ist der Temperaturanstieg der Oberkante beschleunigt, so dass hier Temperaturen von 450 °C gemessen werden, die damit bereits nahezu ihr Maximum (480 °C) erreicht haben. Zu diesem Zeitpunkt zeigt die Unterkante zwar auch schon leicht erhöhte Werte an, die aber noch unter 100 °C liegen. Dies ändert sich rasch, wobei die Temperaturen an der Unterkante nun innerhalb von 50 s auf über 450 °C bzw. über 600 °C in 100 s steigen. 1000 s nach dem ersten Temperaturanstieg an der Oberkante erreicht auch die Unterkante mit 700 °C das Maximum dieses Versuchs.

In Anlehnung an die in Abbildung 4.1 erwähnte Korrelation der Betriebsparameter zeigt Abbildung 4.27 sowohl die Absolutgeschwindigkeit (schwarz) als auch die unter Verwendung von Gleichung 4.12 berechnete Vertikalgeschwindigkeit (rot) in den Rekombinatoreinlass. Zum Vergleich dazu ist auf der Sekundärordinate die Wasserstoffkonzentration des Einlasskatharometers KR-4-20 als blaue Linie angegeben. Zum Zeitpunkt bis 3200 s liegt die Wasserstoffkonzentration im Behälter bei 0 Vol.-% und die Geschwindigkeit am Rekombinatoreinlass unter 10 mm/s. Die Einspeisung von Wasserstoff erfolgt 60 s nach dem Start der PIV-Messung zum Zeitpunkt $t=3256$ s. Dies führt zum Anstieg der H_2 -Konzentration und zu Geschwindigkeiten am Rekombinatoreinlass von bis zu 70 mm/s, die ausschließlich durch den Impuls der Einspeisung verursacht wird. Eine

4 Versuchsbeschreibung

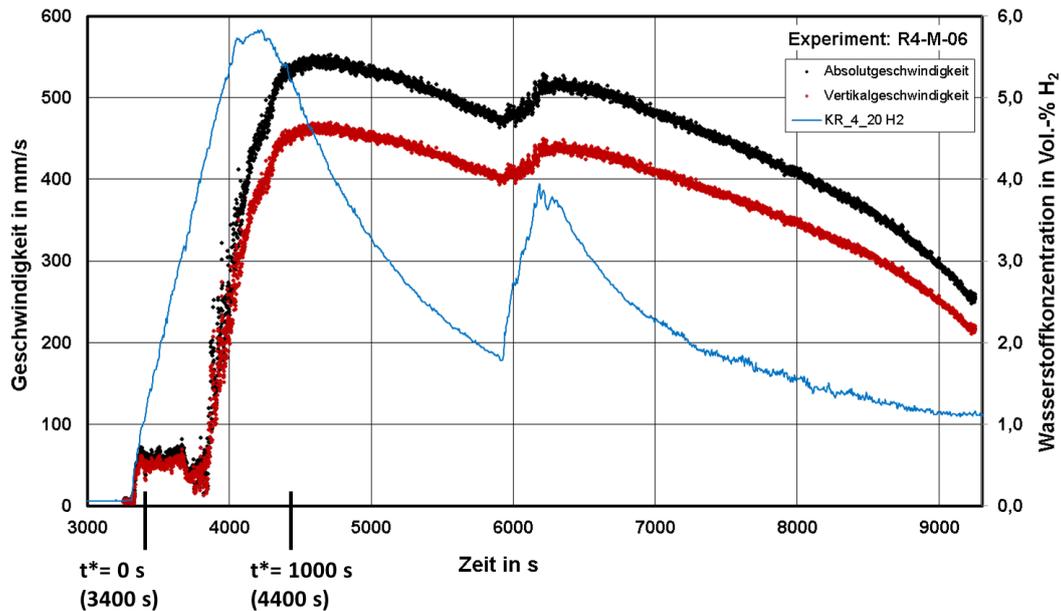


Abbildung 4.27: Einlassgeschwindigkeit und -konzentration (R4-M-06)

Analyse der Vektorrichtung (nicht dargestellt) ergibt ebenfalls ungeordnete Geschwindigkeitsfelder, die keinen Einfluss auf die Wasserstoffrekombinationsrate haben und daher nicht weiter berücksichtigt werden. Ab ca. 3800 s beginnt die Ausbildung einer aufwärtsgerichteten Strömung durch das Rekombinatorgehäuse. Die Einlasskonzentration steigt bis kurz nach 4000 s auf Werte von maximal 5,8 Vol.-% H₂. Die Einlassgeschwindigkeit nimmt 500 s nach dem Konzentrationsanstieg ebenfalls zu und erreicht zum Zeitpunkt von ca. 4600 s ihr Maximum von ca. 550 mm/s absolut bzw. 470 mm/s in vertikaler Richtung durch das Rekombinatorgehäuse.

Im Folgenden wird nur noch die Vertikalgeschwindigkeit betrachtet, da sie maßgeblich für die Rekombinationsrate verantwortlich ist. Mit Erreichen der Maximalgeschwindigkeit ist die Rekombinationsrate maximal. Folglich sinkt die Einlasskonzentration aufgrund des Wasserstoffabbaus. Dadurch verringert sich wiederum die Rekombinationsrate und dementsprechend die Naturkonvektion durch das Gehäuse, wodurch folglich die Geschwindigkeiten sinken.

Zum Zeitpunkt $t=5900$ s beginnt die zweite H₂-Einspeisung, worauf sowohl die Konzentration als auch die Geschwindigkeit wieder steigen. Aufgrund der geringeren Einspeisemenge liegen die Maximalwerte unterhalb der Werte nach der ersten Einspeisung. Dennoch fällt auf, dass die Maximalgeschwindigkeit nur leicht niedriger ist, obwohl die Einlasskonzentration über 2 Vol.-% H₂ geringer ausfällt. Dies liegt insbesondere daran, dass zu Beginn des Versuchs bzw. zum Zeitpunkt der ersten Einspeisung der Rekombinator noch Umgebungstemperatur hat. Folglich wird die Energie der exothermen Reaktion

4 Versuchsbeschreibung

nicht nur in den Auftrieb respektive Naturzug umgewandelt, sondern führt zu einer Aufheizung der Strukturen wie z.B. der Katalysatorbleche und des Rekombinatorgehäuses. Zum Zeitpunkt der zweiten Einspeisung sind diese Einbauten aber schon auf Betriebstemperatur, so dass die Energie nun ausschließlich in den Naturzug einfließt und somit zu höheren Geschwindigkeiten führt.

Abbildung 4.28 zeigt die äußeren Gehäusetemperaturen des Rekombinators über den gesamten Versuchszeitraum. Das Thermoelement TR-88-RG, das direkt außen auf dem

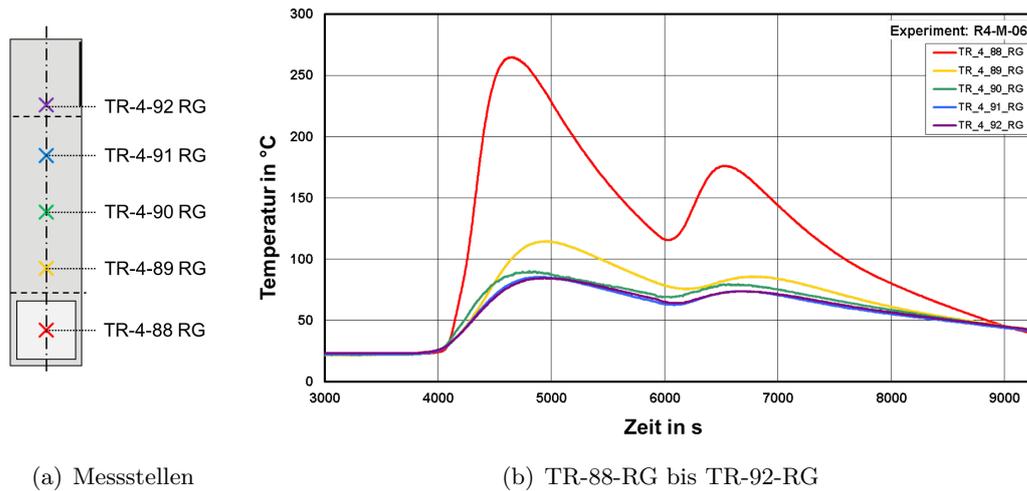


Abbildung 4.28: Äußere Gehäusetemperaturen des Rekombinators (R4-M-06)

Katalysatoreinschub angebracht ist, misst mit ca. 270 °C die höchsten Temperaturen während der ersten Einspeisung. Die innere Gehäusefläche an dieser Stelle steht in direktem Strahlungsaustausch mit einem Katalysatorrandblech und zeigt somit sehr viel höhere Temperaturen an als die übrigen Gehäusetemperaturen, die oberhalb von TR-88-RG am Kaminaufsatz bzw. auf der Hutze angebracht sind. Deren Temperaturen steigen ebenfalls mit der ersten Einspeisung an, wobei jedoch nur Temperaturen von bis zu 120 °C erreicht werden. Zusätzlich wird deutlich, dass die maximalen Temperaturen umso niedriger sind, je höher die Thermoelemente vom Katalysatoreinschub entfernt sind. Dies ist sowohl auf die Aufwärmvorgänge während der Startphase als auch auf Wärmeverluste entlang des Kamins zurückzuführen. Nach der zweiten Einspeisung sind diese Differenzen niedriger und bewegen sich im Bereich von bis zu 15 °C, wobei hier auch Wärmeverluste durch das Kamingehäuse zu berücksichtigen sind, die ebenfalls teilweise zu dem beobachteten Temperaturprofil über die Kaminhöhe führen. Eine genaue Betrachtung zu den Wärmeverlusten im Kamin findet sich in [Kub13].

Abbildung 4.29 verdeutlicht dieses anhand der Gehäusetemperaturen für einen stark verkleinerten Zeitraum von 7000 s bis 7100 s. Die Temperaturen ändern sich während des Zeitraums von 100 s nur geringfügig. Selbst für TR-88-RG, das den größten Gradienten aufweist, ist die absolute Temperaturabweichung über den betrachteten Zeit-

4 Versuchsbeschreibung

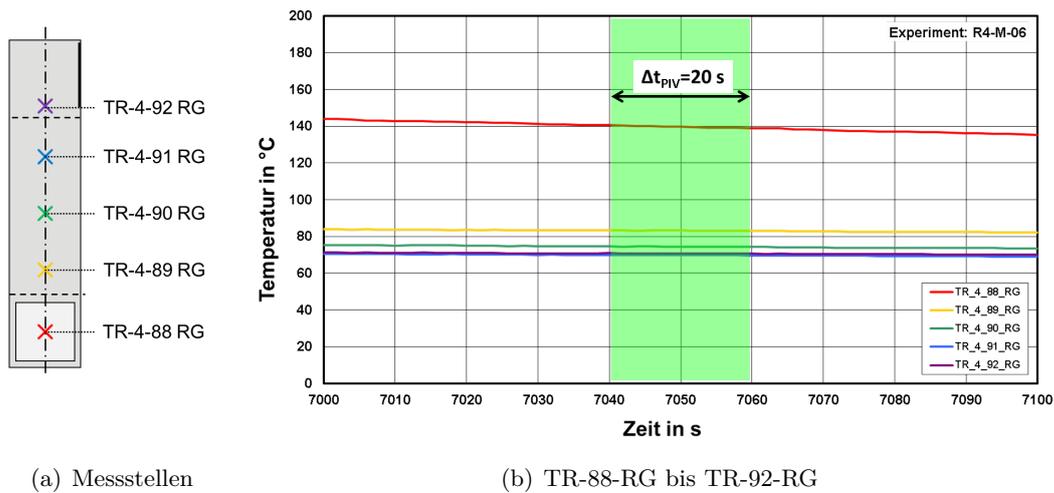


Abbildung 4.29: Erklärung einer quasistationären PIV-Messung (R4-M-06)

raum kleiner 10 K. Die Temperaturänderung innerhalb des Zeitraums eines stationären PIV-Messpunkts von 20 s ist noch geringer und liegt mit unter 2 K im Bereich der Messgenauigkeit der Thermoelemente.

Im Rahmen dieser Arbeit werden daher immer mindestens zwei Einspeisungen durchgeführt, bevor PIV-Messungen zur Untersuchung des stationären Betriebsverhaltens durchgeführt werden. Ebenso wird immer darauf geachtet, dass die Temperatur- und Konzentrationsgradienten negativ sind. Ein stationärer Messpunkt für die REKO-4 Datenbasis besteht somit aus der über 20 s gemittelten PIV-Messung und den dazu gehörigen Sensordaten, die ebenfalls über den gleichen Zeitraum gemittelt werden.

4.3.3 Untersuchung der Behälteratmosphäre und -wand

Aufgrund der katalytischen Rekombinationsreaktion findet ein Wasserstoffabbau statt, der sich in den gemessenen Wasserstoffkonzentrationen im gesamten Behälter widerspiegelt. Abbildung 4.30 zeigt sowohl die Messwerte der Katharometer KR-4-09 bis KR-4-19, die im oberen und mittleren Bereich des Versuchsbehälters positioniert sind, als auch die berechnete Wasserstoffkonzentration (rote, unterbrochene Linie). Alle Kurven starten gleichzeitig mit der Einspeisung von Wasserstoff in den Behälter. Die Messwerte der Katharometer steigen dabei schneller, da der Wasserstoff auftriebsbedingt erst in den oberen und mittleren Bereich gelangt, während die berechnete Kurve die Konzentration unter Annahme einer homogenen Verteilung zeigt (siehe Kap. 4.2.4). Ab ungefähr 4000 s sinken die gemessenen Konzentrationen, da Wasserstoff in der Rekombinationsreaktion abgebaut wird. Dabei steigt das rekombinierte und somit warme, wasserstoffarme Gas nach oben unter die Behälterdecke, weswegen die oberen Sensoren durchgängig bis zu 0,5 Vol.-% H_2 niedrigere Messwerte anzeigen.

4 Versuchsbeschreibung

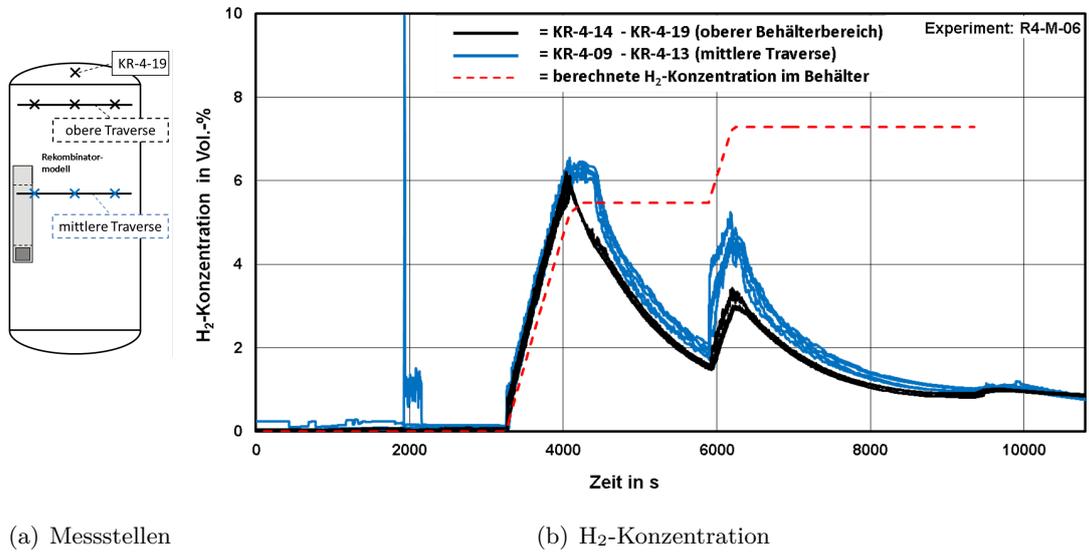


Abbildung 4.30: Verlauf der H_2 -Konzentration (oberer und mittlerer Behälterbereich)

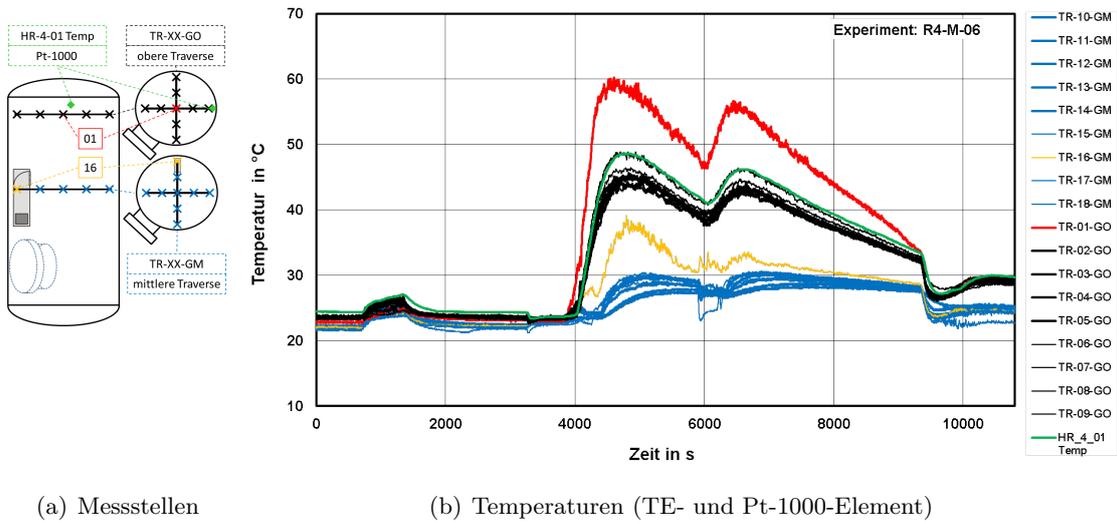
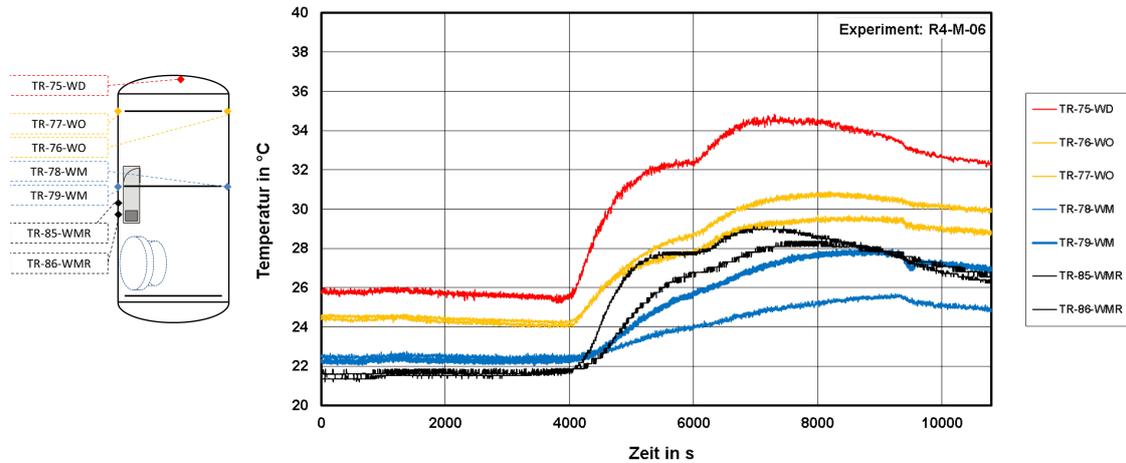


Abbildung 4.31: Verlauf der Gastemperaturen (oberer und mittlerer Behälterbereich)

4 Versuchsbeschreibung

Dies wird ebenfalls an den Temperaturen in Abbildung 4.31 deutlich. Die Tempera-



(a) Messstellen

(b) Wandtemperaturen

Abbildung 4.32: Verlauf der Wandtemperaturen (oberer und mittlerer Behälterbereich)

turen im oberen Behälterbereich (schwarze, rote und grüne Linien) liegen ohne Ausnahme über den Temperaturen in der Mitte (blau und gelb). Das mittlere Thermoelement der oberen Traverse (TR-01-GO, rot) registriert hierbei die höchsten Werte mit bis zu 60 °C und liegt somit 10 - 15 °C über den übrigen TE-Sensoren in derselben Höhe, die im Maximum nur Werte zwischen 40 °C und 50 °C erreichen. Die diversitäre Temperaturmesstechnik mit Pt-1000-Element deckt sich mit der Messung der Thermoelemente. Die Temperaturen in der mittleren Schicht erreichen maximal 30 °C. Eine Ausnahme bildet hierbei TR-16-GM, das direkt neben dem Rekombinator positioniert ist und dementsprechend höhere Temperaturen bis zu 40 °C anzeigt.

Die Temperaturdifferenzen zwischen oberer und mittlerer Traverse zeigen somit zum einen, dass das warme, wasserstoffarme Gas aus dem Rekombinatorauslass unter die Decke steigt und dort für niedrigere H₂-Konzentrationen als in der Mitte sorgt. Die Temperaturen steigen dabei fast zeitgleich mit jeder Wasserstoffeinspeisung, da diese direkt zu einer erhöhten Wasserstoffrekombination und somit zu einem höheren Wärmeeintrag in den Behälter aufgrund der exothermen Reaktion führt. Zum anderen wird deutlich, dass die Temperaturen jeweils nach Ende der Einspeisung zügig sinken. Dies liegt am Wärmeübergang zwischen dem warmen Gas und der verhältnismäßig kühlen Behälterwand, der zu einer raschen Abkühlung des Gases führt.

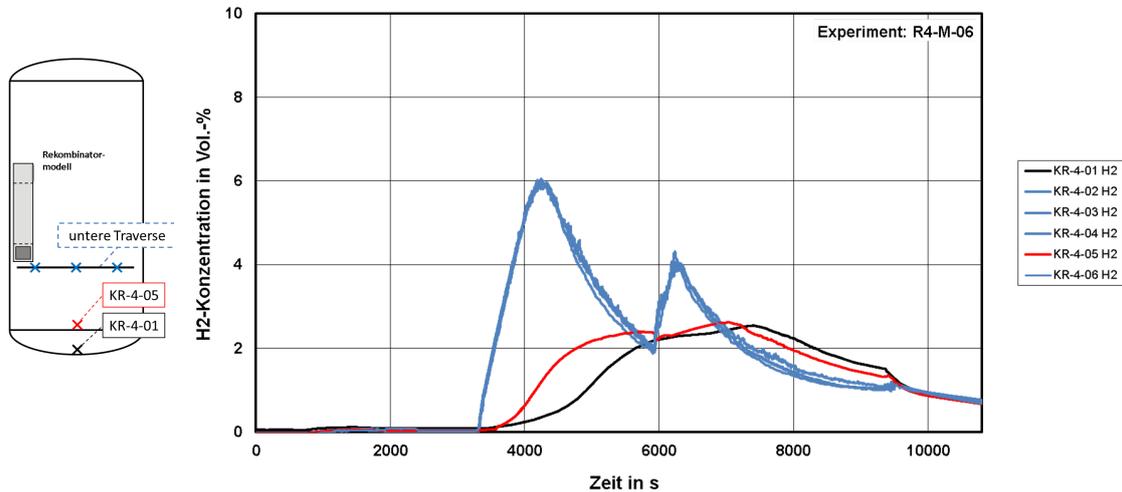
Die Wandtemperaturen steigen zum Zeitpunkt von ungefähr 4000 s zusammen mit den Gastemperaturen im Behälter, wobei die Gradienten der Wandsensoren aufgrund der hohen Masse bzw. Wärmekapazität des Wandmaterials verhältnismäßig niedrig sind (Abb. 4.32). Ebenso ist die zweite Einspeisung bei ca. 6000 s zu erkennen, ab der der Temperaturgradient noch einmal zunimmt. Erwartungsgemäß erreicht die Wandtempe-

4 Versuchsbeschreibung

ratur unter der Behälterdecke mit über 34 °C die höchsten Werte, da hier die wärmsten Gastemperaturen vorliegen. Die übrigen Wandtemperaturen (ohne -WMR) liegen darunter, wobei eine klare Korrelation zwischen der Höhe der Sensorposition und der Temperatur erkennbar ist. Mit zunehmender Höhe steigen die gemessenen Temperaturen aufgrund der bereits gezeigten thermischen Schichtung im Behälter, so dass sie im oberen Behälterbereich ihr Maximum erreichen.

Eine Besonderheit bilden die TE-Sensoren TR-85-WMR und TR-86-WMR, die direkt hinter dem Rekombinator an der Wand angebracht sind. An dieser Stelle wird die Wand zusätzlich durch Wärmestrahlung des Katalysatoreinschubs erwärmt, so dass die Temperaturen zeitweise über den Temperaturen der mittleren Behälterhöhe liegen. Da hier eine Wandtemperatur und keine Gastemperatur gemessen wird, spiegelt dieser Einfluss der Strahlung eine reale Temperaturerhöhung der Wand wider, auch wenn die Fehlerabweichung aufgrund der begrenzten Einbautiefe höher sein kann.

Im unteren Behälterbereich bzw. unterhalb des Rekombinators verlaufen die Wasserstoffkonzentrationen unterschiedlich (Abb. 4.33). Die untere Traverse ist mit den Ka-



(a) Messstellen

(b) H₂-Konzentration

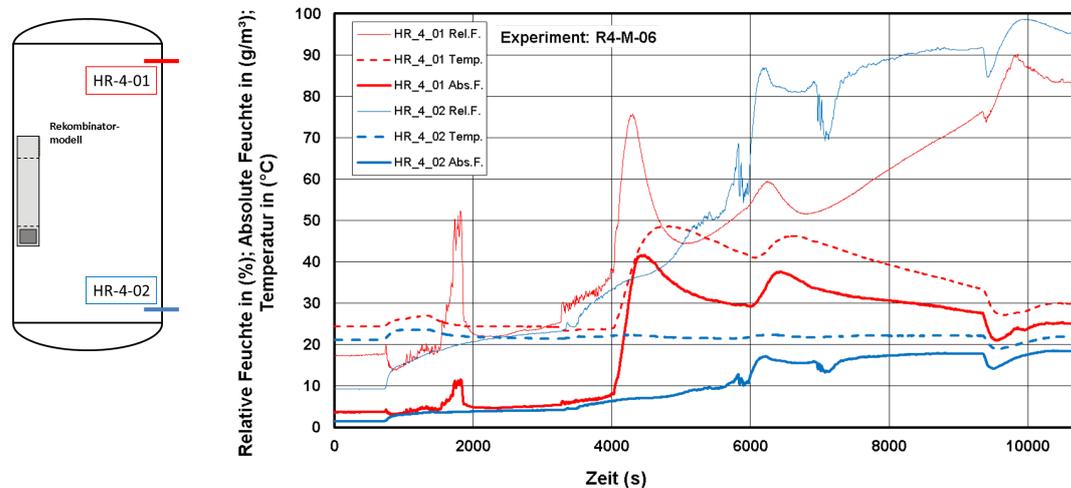
Abbildung 4.33: Verlauf der H₂-Konzentration im unteren Behälterbereich

tharometern KR-4-02/ -03/ -04 und -06 in der Höhe des Rekombinatoreinlasses positioniert. Katharometer KR-4-05 ist auf der ursprünglichen Höhe von 346 mm geblieben, während KR-4-01 an der niedrigsten Stelle im Behälter liegt. Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass die Konzentration in Höhe des Einlasses aufgrund des Wasserstoffabbaus ebenso schwankt wie im mittleren und oberen Behälterbereich, wobei jedoch keine radialen Konzentrationsunterschiede zu erkennen sind (vgl. Abb. 4.30). Die beiden übrigen Katharometer KR-4-05 und -01 zeigen ein davon abweichendes Verhalten. Beide Katharometer werden durch die Vorgänge im Bereich des Rekombinators nur geringfügig

4 Versuchsbeschreibung

beeinflusst. Sie steigen relativ langsam im Bereich zwischen 3500 s bis 6000 s auf bis zu 2,5 Vol.-% H_2 , wobei die zweite Einspeisung nur schwach erkennbar ist. Hierbei fällt auf, dass ab dem Zeitpunkt bei 7000 s die Wasserstoffkonzentration im unteren Bereich z.T. bis zu 1 Vol.-% höher ist als am Rekombinatoreinlass. Hierbei ist wieder eine eindeutige Korrelation zwischen Sensorhöhe und Wasserstoffkonzentration zu erkennen. Die Dichte des wasserstoffreichen, aber kalten Gasgemisches ist offenbar höher und somit schwerer als die des rekombinierten, warmen Gases. Das nicht rekombinierte Gas sammelt sich dementsprechend im unteren Behälterbereich und führt so zu der beobachteten Schichtung.

Der Unterschied zwischen der Atmosphäre im oberen und unteren Bereich des Behälters wird zudem anhand der Feuchtemesstechnik deutlich. Abbildung 4.34 zeigt den Verlauf der absoluten und relativen Feuchte über die gesamte Versuchsdauer. Jeder



(a) Messstellen

(b) HR-4-01 und HR-4-02

Abbildung 4.34: Feuchtemesstechnik im oberen und unteren Behälterbereich

Feuchtesensor gibt dabei drei Messwerte aus, die miteinander in Verbindung stehen. Hierbei wird die relative Feuchte (dünne Linie) über die Messung der Temperatur (unterbrochene Linie) in die absolute Feuchte umgerechnet (dicke Linie). Die roten Graphen stehen dabei für den Sensor im oberen Behälterbereich, während die blauen Graphen den unteren Bereich widerspiegeln. Die Temperatur von HR-4-01 (oben) ist erwartungsgemäß immer höher als von HR-4-02. Ebenso steigen im oberen Bereich die absolute und relative Feuchte mit Beginn der H_2 -Rekombination mit Wasser als Reaktionsprodukt an. Im unteren Bereich steigt die absolute Feuchte nur langsam, da sich hier hauptsächlich das nicht rekombinierte Frischgemisch sammelt, was nur einen geringen Wasserdampfanteil beinhaltet. Dennoch führt der geringe Anstieg der absoluten Feuchte, der z.T. über 30 g/m^3 unterhalb der Feuchte im oberen Bereich liegt, aufgrund der verhältnismäßig geringen Temperatur zu einem rapiden Anstieg der relativen Feuchte. Daher ist

ab 5000 s die relative Feuchte im unteren Behälterbereich höher als im oberen. Ab ca. 6000 s ist an kälteren Stellen, wie z.B. der Wand, mit Kondensation zu rechnen.

4.3.4 Bilanzierung des Versuchs R4-M-06

Anhand der kontinuierlichen Messung der Einlassgeschwindigkeit kann das Betriebsverhalten des Rekombinators bzw. die Rekombinationsrate über die gesamte Versuchsdauer abgeschätzt werden. Andererseits ist es möglich die Atmosphärenbedingungen durch die umfangreichen Temperatur- und Konzentrationsmessstellen im Behälter mit den eingespeisten Volumenströmen zu vergleichen. Da der Behälter während des gesamten Versuchs abgeschlossen ist bzw. die eingespeisten Massenströme bekannt sind, kann eine Massen- bzw. Stoffmengenbilanz gemäß

$$\underbrace{\int_t n_{H_2, MFC} dt}_{\text{ingespeist}} = \underbrace{n_{H_2, ges}}_{\text{gemessen}} + \underbrace{\int_t \dot{n}_{H_2, E} dt}_{\text{rekombiniert}} \quad (4.21)$$

erstellt werden. Hierzu muss die Wasserstoffmenge ermittelt werden, die durch die Rekombinationsreaktion zu Wasser reagiert.

Zur Abschätzung der in der Behälteratmosphäre enthaltenen Wasserstoffmenge wird der Behälter in ein Zonen- bzw. Schichtenmodell unterteilt, das zwar an das Modell im Rahmen der Vorversuche angelehnt ist, sich aber aufgrund der Katharometerpositionen unterscheidet. Die Volumina werden dabei entsprechend der Katharometerpositionen wieder so gewählt, dass die Wasserstoffkonzentration an den Grenzflächen bestimmt werden kann. Abbildung 4.35 zeigt die Einteilung des Versuchsbehälters in die unterschiedlichen Schichten mit den darin enthaltenen Katharometern. Die unterschiedlichen

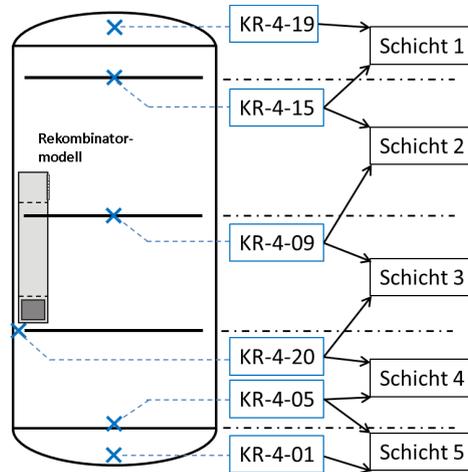


Abbildung 4.35: Einteilung des Versuchsbehälters in Schichten (R4-M-06)

Volumina der jeweiligen Schicht sind in Tabelle 4.7 aufgelistet. Die Berechnung erfolgt

4 Versuchsbeschreibung

Nr.	Volumen v_i	H ₂ -Messung obere Schichtgrenze	H ₂ -Messung untere Schichtgrenze
Schicht 1	483,88 dm ³	KR-4-19	KR-4-15
Schicht 2	1798,12 dm ³	KR-4-15	KR-4-09
Schicht 3	929,91 dm ³	KR-4-09	KR-4-20
Schicht 4	1639,66 dm ³	KR-4-20	KR-4-05
Schicht 5	465,40 dm ³	KR-4-05	KR-4-01
$\sum V_{\text{ges}}$	5316,79 dm³		

Tabelle 4.7: Schichtvolumen und Angabe der jeweils verwendeten Katharometer an den Schichtgrenzen

dabei anhand der Unterteilung in den zylindrischen Behälterteil und die Klöpperböden im Boden- und Deckenbereich gemäß DIN 28011 [Nor12][Häf12]. Das Mannlochvolumen wird vollständig der Schicht 4 zugeordnet, während die übrigen Volumina der Flansche und Einbauten gleichmäßig auf alle Schichten aufgeteilt werden. Das Gesamtvolumen entspricht dabei dem freien Volumen V_{FV} (siehe Abschnitt 3.1).

Jede Schicht als Grenze verfügt über einen Katharometer, dessen gemessene Wasserstoffkonzentration repräsentativ für die gesamte Schichtfläche angenommen wird. Auf die Messung eines radialen Konzentrationsprofils unter Verwendung mehrerer Katharometer z.B. innerhalb der Höhe einer Traverse wird dabei verzichtet, da die Vorversuche gezeigt haben, dass nur marginale radiale Konzentrationsunterschiede auftreten. Die Positionen der gewählten Katharometer sind dabei so gewählt, dass sie nicht durch die auftriebsdominierte Strömung des Wasserstoffeinlasses oder durch die Abluftfahne des Rekombinators beeinflusst werden.

Das in jeder Schicht i vorhandene Wasserstoffpartialvolumen v_{i,H_2} wird unter Verwendung des jeweiligen Katharometers an der oberen und unteren Schichtgrenze (oG/uG) mit dem in der Schicht enthaltenen Gesamtvolumen $v_{i,ges}$ zu

$$v_{i,H_2} = \frac{x_{oG} + x_{uG}}{2} \cdot v_{i,ges} \quad (4.22)$$

abgeschätzt. Unter Verwendung der Randbedingungen von R4-M-06 bzw. einem Umgebungsdruck von 1013 mbar zu Berechnung des absoluten Drucks im Behälter, lassen sich aus den Partialvolumina die Stoffmengen der jeweiligen Schicht $n_{H_2,i}$ bzw. des gesamten Behälters $n_{H_2,ges}$ über

$$n_{H_2,i} = \frac{p \cdot V_i}{R \cdot T_i} \quad (4.23)$$

$$n_{H_2,ges} = \sum_i n_{H_2,i} \quad (4.24)$$

bestimmen. Die Temperatur der Schicht i ist dabei der Mittelwert des Pt-100-Elements des jeweiligen Katharometers an der oberen und unteren Schichtgrenze.

4 Versuchsbeschreibung

Zur Abschätzung der Rekombinationsrate wird zunächst der in den Rekombinator einströmende Gesamtvolumenstrom aus der durchschnittlichen Geschwindigkeit über dem Einlassbereich \bar{v}_E und dem Einlassquerschnitt A_E des Rekombinators berechnet. Hierbei müssen sowohl der Faktor η_{korr} für die Berücksichtigung des Einlassprofils in y-Richtung als auch η_{vert} zur Berechnung des vertikalen Geschwindigkeitsanteils aus der Absolutgeschwindigkeit berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 4.1.1 bzw. 4.1.2). Der Massenstrom durch den Rekombinator wird mit

$$\dot{m}_E = \dot{V}_{2D} \cdot \rho_E \quad (4.25)$$

$$\dot{m}_E = \bar{v}_{E,1D} \cdot \eta_{korr} \cdot \eta_{vert} \cdot A_E \cdot \rho_E \quad (4.26)$$

mit $\eta_{korr} = 0,93$

und $\eta_{vert} = 0,85$

kontinuierlich über die gesamte Versuchsdauer bestimmt. Der absolute H_2 -Mengenstrom ergibt sich daraus unter Berücksichtigung des idealen Gasgesetzes zu

$$\dot{n}_{H_2,E} = \underbrace{\bar{v}_{E,1D} \cdot \eta_{korr} \cdot \eta_{vert} \cdot A_E \cdot x_{H_2,E}}_{\dot{V}_{H_2,E}} \cdot \frac{p}{T_E \cdot R} \quad (4.27)$$

Zur Messung der Einlasskonzentration und -temperatur werden die Werte des Katharometers KR-4-20 verwendet. Im Rahmen dieser Bilanzierung wird angenommen, dass die durch den Rekombinator strömende Wasserstoffmenge $\dot{n}_{H_2,E}$ vollständig umgewandelt wird, wie für Strömungsgeschwindigkeiten bis 0,5 mm/s in [Sch11] gezeigt wurde.

Die in den Versuchsbehälter eingespeiste H_2 -Masse $m_{H_2,MFC}$ ist durch die Verwendung des Massendurchflussreglers FRC-4.01 bekannt und kann über die Molmassen mit

$$n_{H_2,MFC} = \frac{m_{H_2,MFC}}{M_{H_2}} \quad (4.28)$$

in die Wasserstoffmenge $n_{H_2,MFC}$ umgerechnet werden. Die gesamte H_2 -Menge folgt dann gemäß der Stoffmengenbilanz aus Gleichung 4.21 und ist in Abbildung 4.36 dargestellt.

Die schwarze Kurve beschreibt dabei die eingespeiste Wasserstoffmenge des Massendurchflussreglers. Die Einspeisung beginnt zum Zeitpunkt 3256 s und verläuft in zwei Stufen bis zur Zielmenge von 26,05 mol, die einer Gesamtkonzentration von 7,3 Vol.-% H_2 unter Vernachlässigung der Rekombinationsrate entspricht. Zeitgleich mit der Einspeisung steigt die im Behälter gemessene Wasserstoffkonzentration, die gemäß dem Schichtenmodell berechnet wird (blaue Kurve). Ab ungefähr $t=3800$ s beginnt der Naturzug durch den Rekombinator und der damit verbundene Abbau von Wasserstoff (rote Kurve). Dieser Abbau resultiert in einer sinkenden Wasserstoffkonzentration im Behälter bis zur zweiten Einspeisung zum Zeitpunkt von $t=5896$ s. Nach der zweiten Einspeisung sinkt die Konzentration wieder, während der absolute Wasserstoffabbau weiterhin steigt.

Die Summe der im Behälter gemessenen und im Rekombinator umgewandelten Wasserstoffmenge ist als grüne Kurve dargestellt und ist nahezu deckungsgleich mit der

4 Versuchsbeschreibung

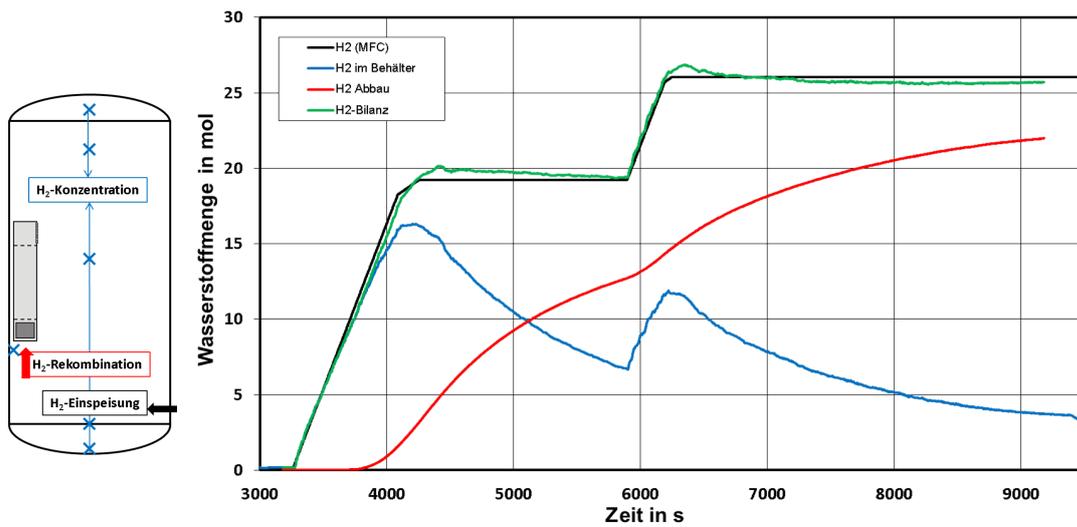


Abbildung 4.36: H₂-Bilanz während des Versuchs R4-M-06

eingespeisten Menge des Massendurchflussreglers (siehe Diagramm 4.36). Einzig kurz nach Ende der ersten und zweiten Einspeisung wird die bilanzierte Wasserstoffmenge im Behälter leicht überschätzt, wobei die maximale Abweichung immer unterhalb einer Stoffmenge von einem 1 mol bzw. 5 % liegt. Diese Abweichungen können auf das relativ grobmaschige Schichtenmodell in Verbindung mit starken Konzentrationsgradienten zwischen dem H₂-Einspeisestrom und der Behälterkonzentration zurückgeführt werden, die sich mit der Zeit wieder angleichen. Die Abweichungen kurz nach der zweiten Einspeisung bis zum Ende des Versuchs liegen immer unterhalb von 2 %.

Die beispielhafte H₂-Bilanz zeigt die Plausibilität der im Versuchsstand REKO-4 durchgeführten Versuche. Sie belegt zudem die hohe Genauigkeit der verwendeten Messtechnik. Sowohl die H₂-Konzentrationsmessung mit Katharometern als auch die Messung der Einlassgeschwindigkeit mit PIV gibt Messwerte, die einer Nachrechnung standhalten.

5 Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse umfassen die Auswertung der Kaminhöhenvariation und des Betriebsverhaltens bei unterschiedlichen Drücken. Anschließend erfolgt ein Vergleich mit Ergebnissen des Versuchsstands REKO-3. Danach wird die Untersuchung der Rekombinatorauslassströmung dargestellt.

5.1 Untersuchungen zur Kaminhöhenvariation

Im Folgenden werden die Versuchsreihen unter Verwendung verschiedener Kaminhöhen dargestellt und anschließend untereinander verglichen. Die Kaminhöhenvariation umfasst insgesamt zwölf Versuchsreihen, die fünf verschiedene Kaminhöhen bei 1,0 bar untersuchen. Die Ergebnisse von Versuchen, die unter denselben Randbedingungen durchgeführt wurden, werden nachfolgend zusammengefasst. Die mit PIV ermittelte Geschwindigkeit \bar{v}_{10mm} beschreibt dabei wie schon zuvor in Abschnitt 4.1.1 die über 10 mm gemittelte Einlassgeschwindigkeit. Sie bildet in diesem Fall genau den Kanal zwischen den beiden Mittelblechen ab. Die maximale bzw. minimale Katalysatortemperatur wird als Maximum bzw. Minimum aller Katalysatormesswerte bestimmt. Das Temperaturmaximum liegt dabei üblicherweise an der Unterkante des mittleren Blechs (TR-56-RK) und das Minimum an der Oberkante des Randblechs (TR-64-RK).

5.1.1 R4-H: Kaminhöhe 0 mm, 1,0 bar

Mit R4-H-02 wurde nur eine Versuchsreihe mit 14 Messpunkten durchgeführt, die das Betriebsverhalten eines Rekombinators ohne Kamin und ohne Hutze untersucht. Sie ermöglicht eine Analyse der Widerstandsverluste bzw. -beiwerte im Katalysatoreinschub für die Kaminmodelloptimierung. Abbildung 5.1 zeigt die maximale/minimale Katalysatorblechtemperatur (rot/blau gefüllte Raute) und die Auslasstemperatur (schwarzer, offener Kreis) über der Wasserstoffkonzentration am Rekombinatoreinlass. Die Auslasstemperatur wird hierbei mit dem Thermoelement TR-71-RG gemessen, das 30 mm über den Katalysatorblechen mittig in der Auslassfahne angebracht ist.

Die 14 Messpunkte umfassen eine Einlasskonzentration von 1,5 bis 5,4 Vol.-% H_2 . Hierbei ist ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Einlasskonzentration und der Katalysatortemperatur im Bereich von 1,5 bis 4 Vol.-% H_2 zu erkennen. Der Verlauf der minimalen Katalysatortemperatur ist erwartungsgemäß ähnlich, liegt jedoch ca. 100 - 300 K niedriger.

5 Versuchsergebnisse

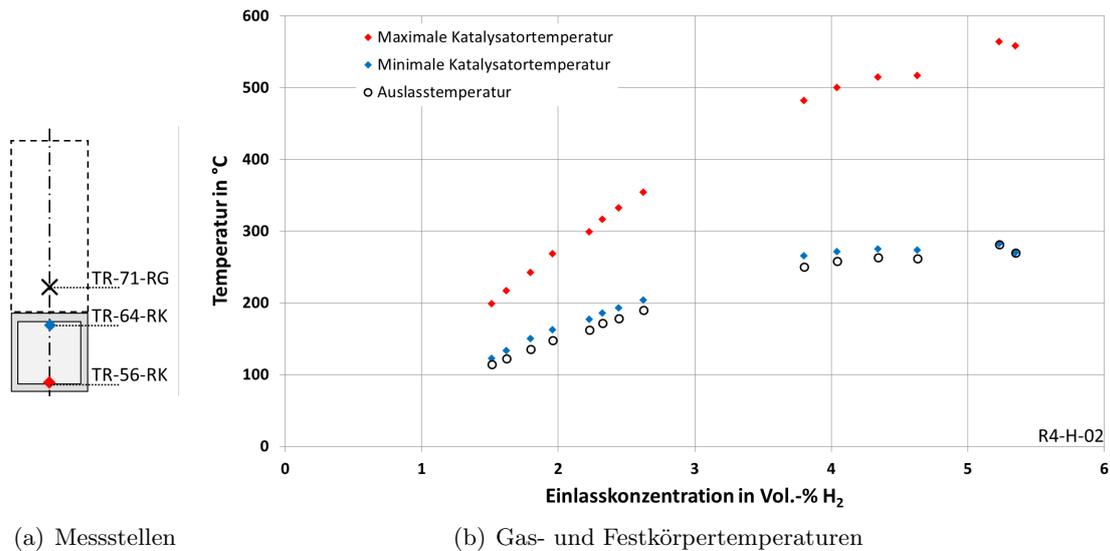


Abbildung 5.1: Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstemperatur über der H₂-Einlasskonzentration (R4-H)

Die Temperatur am Auslass steigt erwartungsgemäß mit der des Katalysators. Hierbei ist auffällig, dass die Auslasstemperatur immer unterhalb der minimalen Katalysatorblechtemperatur an der Oberkante liegt, die Differenz mit $\Delta T = 15 \text{ K}$ jedoch sehr gering ist und bei Konzentrationen über 5 Vol.-% H₂ scheinbar ganz verschwindet.

Abbildung 5.2 zeigt die sich am Modelleinlass einstellende Geschwindigkeit $\bar{v}_{10\text{mm}}$ über der Wasserstoffkonzentration. Die Geschwindigkeit korreliert nur schwach mit der Wasserstoffkonzentration. So steigt sie von 130 mm/s bei 1,5 Vol.-% H₂ nach einer Verdreifachung der Einlasskonzentration auf lediglich 170 mm/s an. Zusätzlich scheint sich eine Art Grenzwert zwischen 160 - 180 mm/s einzustellen.

Abbildung 5.3 zeigt neben TR-71-RG die übrigen Auslasstemperaturen und die Außentemperatur des Katalysatoreinschubs. Zum Vergleich ist nochmals die maximale Katalysatorblechtemperatur (rote, gefüllte Symbole) eingezeichnet. Die Thermoelemente TR-73-RG und TR-74-RG (Dreieck/Rechteck, weiß gefüllt) sind ebenfalls über dem Auslass angebracht, wobei jedoch aufgrund der hohen Entfernung von 95 mm bzw. 160 mm nur ein geringer Einfluss der Wasserstoffkonzentration erkennbar ist. Beide Temperatursensoren zeigen identisch zwischen 33 - 37 °C an, wobei jedoch keine Steigung bei höheren Konzentrationen erkennbar ist. Die heiße Abluftfahne scheint sich bis zum Erreichen der Thermoelemente soweit mit der kalten Behälteratmosphäre vermischt zu haben, dass nur leicht erhöhte Werte registriert werden. Die Außentemperatur des Gehäuses (schwarze Kante / gelb gefüllt) hingegen steigt erwartungsgemäß mit der Wasserstoffkonzentration. Das Gehäuse wird durch Wärmestrahlung der Katalysatorbleche und über Konvektion erwärmt. Die maximalen Temperaturen bei 5,4 Vol.-% H₂ liegen aber mit ca. 180 °C im-

5 Versuchsergebnisse

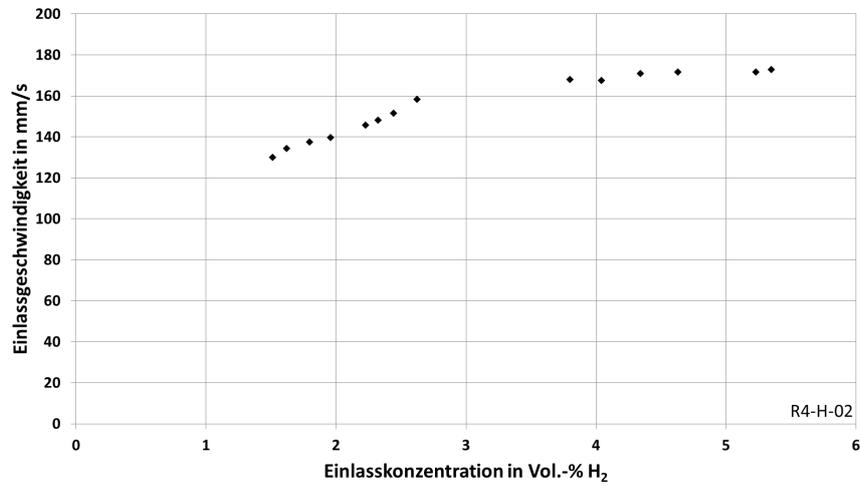
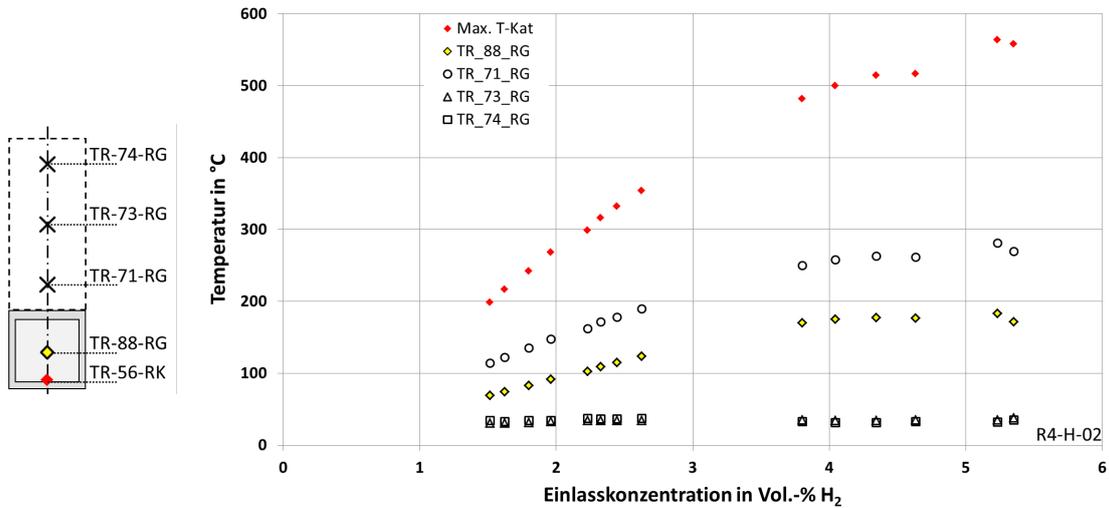


Abbildung 5.2: Einlassgeschwindigkeit über der H₂-Einlasskonzentration (R4-H)



(a) Messstellen

(b) Gas- und Festkörpertemperaturen

Abbildung 5.3: Gehäuse- und Auslasstemperaturen über der H₂-Konzentration (R4-H)

mer noch 100 K unter den Temperaturen am Auslass.

5.1.2 R4-G: Kaminhöhe 150 mm, 1,0 bar

Insgesamt wurden drei Versuche mit einer Kaminaufsatzhöhe von 150 mm bei einem Behälterdruck von 1,0 bar durchgeführt. Sie umfassen 54 Messpunkte in einem Konzentrationsbereich zwischen 1,2 - 5,7 Vol.% H_2 .

Dieser Rekombinator ist die kleinste im Rahmen dieser Arbeit getestete Variante mit Kamin und Hutze. Abbildung 5.4 zeigt wieder die maximale/minimale Katalysatorblechtemperatur (rot/blau gefüllte Raute) und die Auslasstemperatur TR-70-RG (schwarzer, offener Kreis) über der Wasserstoffkonzentration.

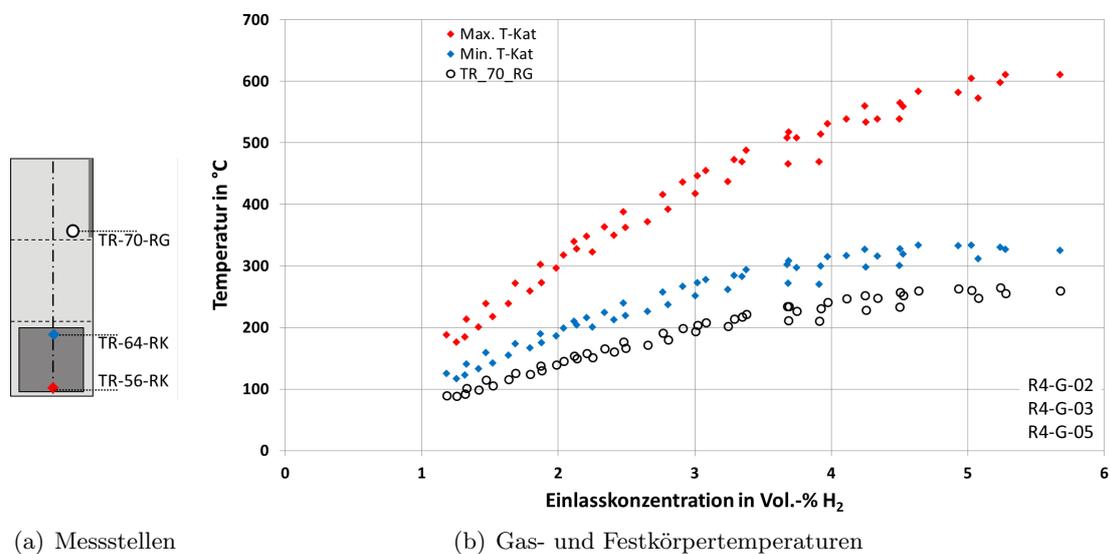


Abbildung 5.4: Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstemperatur über der H_2 -Einlasskonzentration (R4-G)

Die Messpunkte zeigen die bereits beobachtete Korrelation zwischen der Einlasskonzentration und den Temperaturen auf den Katalysatorblechen bzw. am Auslass des Rekombinators. Während die Temperatur an der Unter- und Oberkante des Bleches bei niedrigen Konzentrationen von knapp über 1 Vol.-% H_2 in einem Bereich zwischen 100 - 200 °C liegt, steigt sie bei Konzentrationen über 5 Vol.-% H_2 an der Unterkante auf Werte von über 600 °C. Die Temperaturdifferenz zur Oberkante beträgt dabei knapp 300 K. Auch wenn der Temperaturgradient sichtlich abnimmt, scheint noch kein Grenzwert erreicht zu sein. Insbesondere die Temperatur an der Unterkante steigt vermutlich mit höherer Wasserstoffkonzentration noch weiter an. Die Temperatur am Auslass liegt wieder ohne Ausnahme unter der Temperatur an der Oberkante und erreicht einen Ma-

5 Versuchsergebnisse

ximalwert von 280 °C. Hier sind die Temperaturdifferenz zwischen Blechoberkante und Auslasstemperatur größer als bei der Versuchsreihe R4-H-02 und liegen bei knapp 100 K.

Abbildung 5.5 zeigt die Kamin- und Auslasstemperaturen im Vergleich zur Oberkante des Katalysatorblechs. Auch hier wird deutlich, dass sämtliche Gastemperaturen

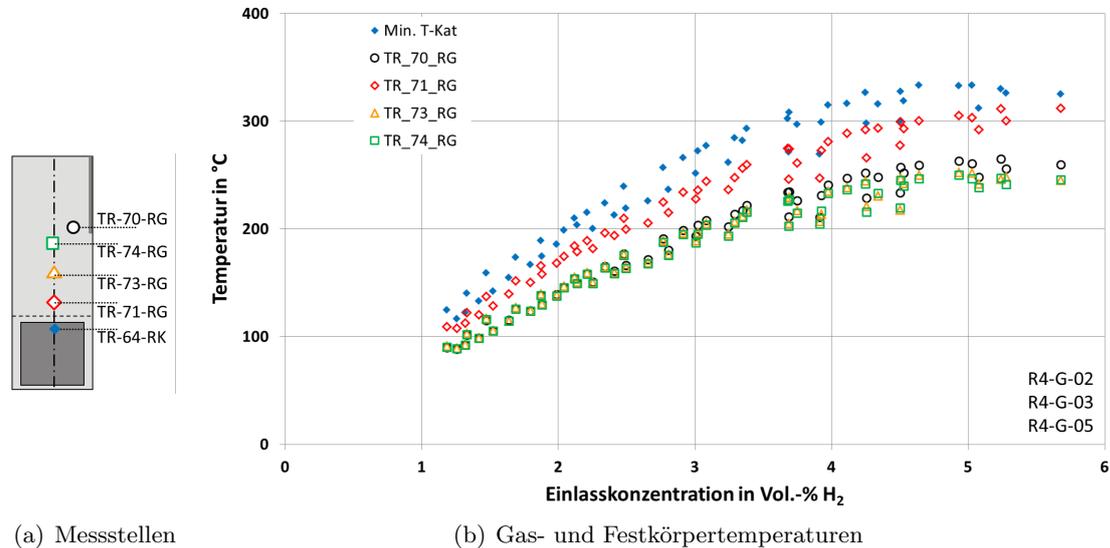


Abbildung 5.5: Kamin- und Auslasstemperaturen im Vergleich zur Unterseite des Katalysatorblechs (R4-G)

unterhalb der Minimaltemperatur auf den Katalysatorblechen liegen. TR-71-RG, das den geringsten Abstand zu den Blechoberkanten aufweist, zeigt hier vergleichsweise die höchsten Temperaturen. Diese Messwerte scheinen konsistent zu sein, auch wenn ein geringer Fehler durch Wärmestrahlung zu berücksichtigen ist. Des Weiteren zeigen aber auch die übrigen Thermoelemente Temperaturen an, die nur bis zu 100 °C unterhalb der Temperaturen an der Oberkante liegen, obwohl hier der Einfluss der Wärmestrahlung aufgrund der größeren Entfernung zur Oberkante abnimmt. Das bedeutet, dass die Wärmestrahlung durch eine Temperaturdifferenz von maximal ca. 100 K verursacht wird. Sie liegt somit um ein Vielfaches unterhalb der Wärmestrahlung, die am Einlass berücksichtigt werden muss.

Dennoch zeigen die Thermoelemente TR-73-/74- und /70-RG bei Wasserstoffkonzentrationen über 3 Vol.-% H_2 ein geringfügig inkonsistentes Bild der Temperaturen im Kamin. So scheint die Temperatur im Kamin (grünes Rechteck / orangenes Dreieck) unterhalb der Auslasstemperatur zu liegen. Da im Kamin keine Wärme freigesetzt wird, müssten die Wärmeverluste über das Kamingehäuse zu geringeren Temperaturen am Auslass führen. Dieser Fehler kann möglicherweise auf die nur eingeschränkt genaue Positionierung der TE-Sensoren im Kamin zurückgeführt werden. Zudem können Berührungen mit den Thermoleitungen der Katalysatorbleche nicht ausgeschlossen werden, so

5 Versuchsergebnisse

dass zusätzliche Wärmeleitungseffekte eine Rolle spielen können.

Zur Untersuchung der Wärmeverluste über das Kamingehäuse werden die äußeren Gehäusetemperaturen betrachtet (Abbildung 5.6). Zum Vergleich ist zusätzlich die mi-

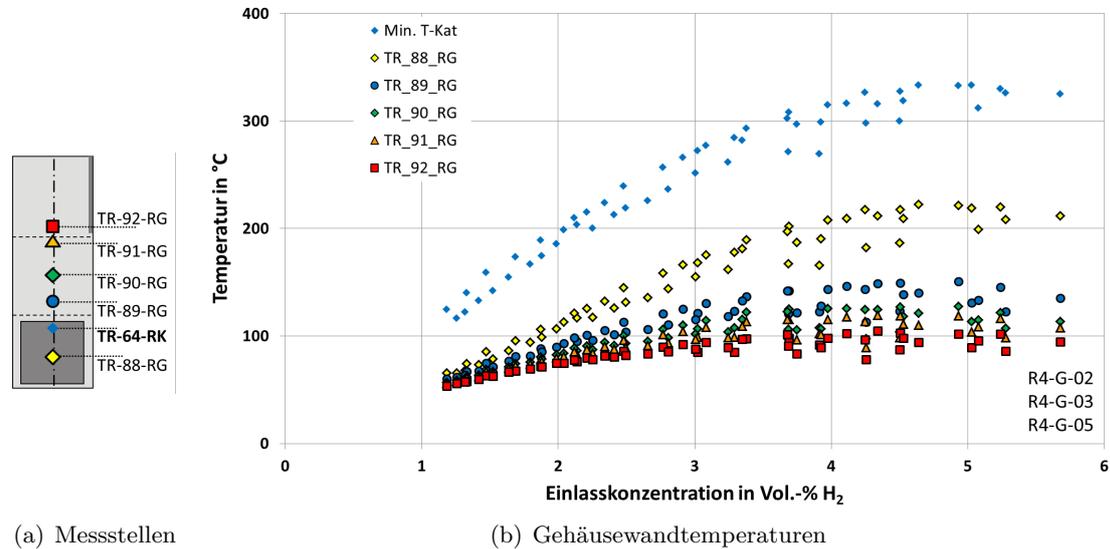


Abbildung 5.6: Kamingehäusetemperaturen im Vergleich zur Oberkante des Katalysatorblechs (R4-G)

nimale Blechtemperatur als Referenz dargestellt.

Sämtliche äußeren Gehäusetemperaturen (Symbole mit scharfer Kante) liegen unterhalb der Blechtemperaturen. Selbst das Thermoelement TR-88-RG, das direkt auf dem Katalysatoreinschub positioniert ist und von den Außenmessstellen die höchsten Temperaturen anzeigt, liegt konstant rund 100 K unterhalb TR-64-RK. Der Verlauf der Temperaturen korreliert wieder erwartungsgemäß mit der Wasserstoffkonzentration. Der Vergleich der Gehäusetemperaturen untereinander zeigt zudem, dass die gemessenen Temperaturen aufgrund von Wärmeverlusten umso niedriger sind, je höher die Thermoelemente auf dem Gehäuse angebracht sind. Während die Außentemperaturen am Katalysatoreinschub bei einer Einlasskonzentration von 5 Vol.-% H_2 Werte von über 200 °C erreichen, liegen sie am obersten Thermoelement TR-92-RG, das auf Höhe der Auslassunterkante angebracht ist, nur noch bei 100 °C.

In Abbildung 5.7 werden die Gasttemperaturen im Kamin mit den Gehäusetemperaturen außen bereichsweise verglichen. Neben der Blechtemperatur an der Oberkante werden hier vor allem zwei Bereiche gesondert betrachtet. Zum einen werden die Kamin- und Gehäusetemperaturen im Bereich des Katalysatoreinschubs betrachtet (rot), zum anderen im Bereich des Auslasses (blau). Gasttemperaturen sind dabei als offene Symbole, Gehäusetemperaturen als gefüllte Symbole dargestellt.

5 Versuchsergebnisse

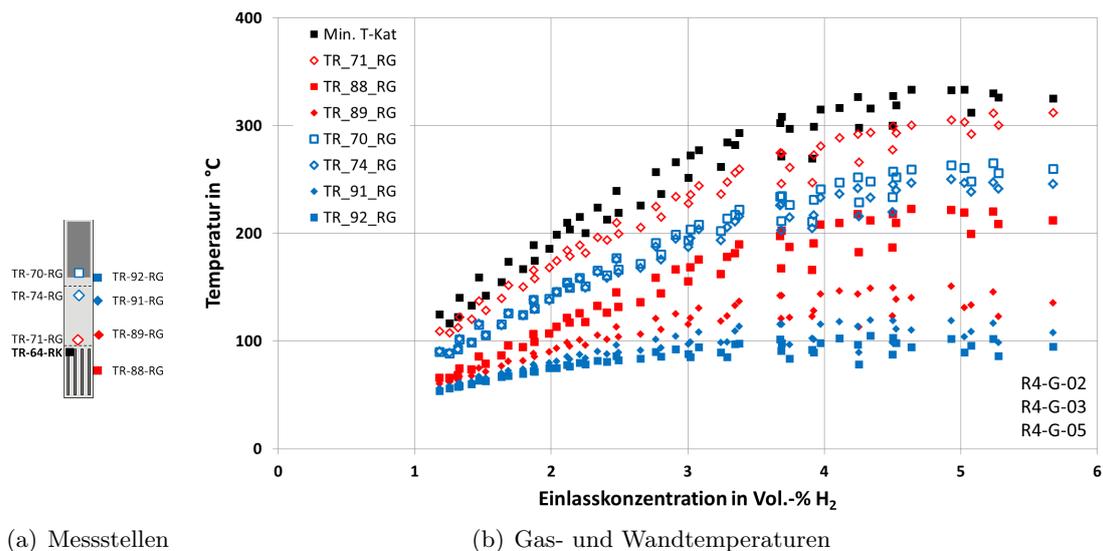


Abbildung 5.7: Vergleich der inneren Kamin- und äußeren Gehäusetemperaturen (R4-G)

Bei der Betrachtung des Diagramms wird deutlich, dass die Kamintemperaturen oberhalb der äußeren Gehäusetemperaturen liegen. So sind die Temperaturdifferenzen in beiden Bereichen bei niedrigen Wasserstoffkonzentrationen mit ca. 50 K zwar noch relativ gering, sie steigen jedoch mit der Konzentration. So liegen im roten Bereich zwischen der Kamintemperatur (TR-71-RG) und der äußeren Gehäusetemperatur ca. 100 K (TR-88-RG) bzw. 200 K (TR-89-RG). Für den blauen Bereich ergibt sich ein ähnliches Bild, wobei die äußeren Gehäusetemperaturen nicht so weit auseinander liegen wie im roten Bereich. Dennoch treten auch hier Temperaturdifferenzen zwischen Kamin- und Gehäusetemperaturen von ca. 150 K bei einer Wasserstoffkonzentration von 5 Vol.-% H_2 auf.

Abbildung 5.8 zeigt die Einlassgeschwindigkeit \bar{v}_{10mm} über der Einlasskonzentration. Auch hier ist wieder die typische Korrelation zwischen der Wasserstoffkonzentration und der Geschwindigkeit erkennbar. Zusätzlich wird nun der Einfluss des Kamins deutlich. Die Geschwindigkeiten liegen im gesamten Konzentrationsbereich oberhalb der Werte des Versuchs R4-H-02. Während die Maximalgeschwindigkeit für R4-H unterhalb 180 mm/s liegt, erreicht der Rekombinator mit 150-mm-Kamin Geschwindigkeiten von 250 mm/s. Der abnehmende Gradient der Kurve lässt in diesem Wert wieder eine Art Grenzwert vermuten.

5.1.3 R4-J: Kaminhöhe 300 mm, 1,0 bar

Die Versuchsreihe R4-J umfasst wie die Reihe R4-G drei Versuchsreihen bei einem Druck von 1,0 bar (R4-J-01 /-02 /-06). Die übrigen Versuche bei unterschiedlichen Drücken

5 Versuchsergebnisse

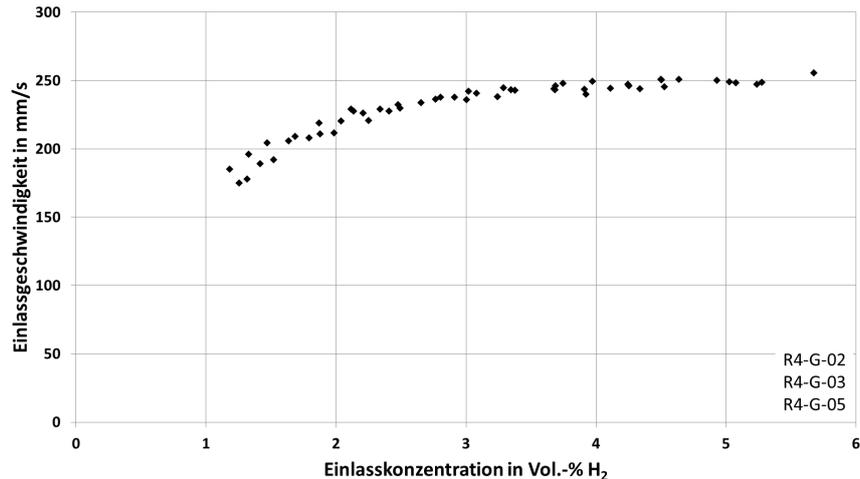


Abbildung 5.8: Einlassgeschwindigkeit über der H₂-Einlasskonzentration (R4-G)

werden in Abschnitt 5.2 betrachtet. Insgesamt werden in den Versuchen 139 Messpunkte in einem Konzentrationsbereich von 0,9 - 5,4 Vol.-% H₂ aufgenommen.

Zur Untersuchung des Betriebsverhaltens dieser Rekombinatorvariante ist in Abbildung 5.9 zunächst wieder die Katalysatorblechtemperatur über der H₂-Einlasskonzentration aufgetragen. Der Verlauf der Kurven ist nahezu identisch zur Versuchsreihe R4-G. Auch die maximalen Werte liegen im gleichen Bereich bzw. nur leicht darüber. Die Temperaturen an der Blechunter- bzw. oberkante steigen mit der Einlasskonzentration von unter 100 °C bei 0,9 Vol.-% H₂ auf bis zu 625 °C bzw. 460 °C. Auch bei diesem Modell liegt die gemessene Auslasstemperatur konstant unter der Temperatur der Blechoberkante. Diese Temperaturdifferenz nimmt ebenfalls mit steigender Wasserstoffkonzentration zu und erreicht bei 5,4 Vol.-% H₂ am Einlass einen Unterschied von über 100 K. Die maximale Auslasstemperatur liegt bei ca. 250 °C. Die übrigen Temperaturmessstellen im Kamin sind in Abbildung 5.10 dargestellt. Sämtliche im Kamin gemessenen Gastemperaturen liegen unterhalb der Temperatur der Blechoberkante.

Die vertikal im Kamin angeordneten TE-Sensoren (TR-71-RG /-73-RG und -74-RG) zeigen hierbei im Gegensatz zur Versuchsreihe R4-G ein konsistenteres Bild der Temperaturverteilung entlang des Kamins. Die heißesten Gastemperaturen werden mit TR-71-RG (rot) gemessen. Diese liegen 80 K unterhalb der Blechtemperatur und erreichen Werte von knapp 300 °C. Das oberhalb dieser Position angebrachte Thermoelement TR-73-RG (orange) misst zum Großteil Temperaturen, die bei niedrigen Wasserstoffkonzentrationen nur geringfügig, bei hohen Konzentrationen ca. 10 K unterhalb von TR-71-RG liegen. Ebenso zeigt TR-74-RG Temperaturen, die tendenziell unterhalb der Messwerte von TR-73-RG liegen. Die unterste Messkurve ist die Auslasstemperatur TR-70-RG. Diese Verteilung der Temperaturen bzw. die Abnahme über die Kaminhöhe ist mit Wärmeverlusten über das Gehäuse zu erklären. Somit ergeben die Messungen plausible Ergebnisse in Bezug auf die Vorgänge im Rekombinatorgehäuse.

5 Versuchsergebnisse

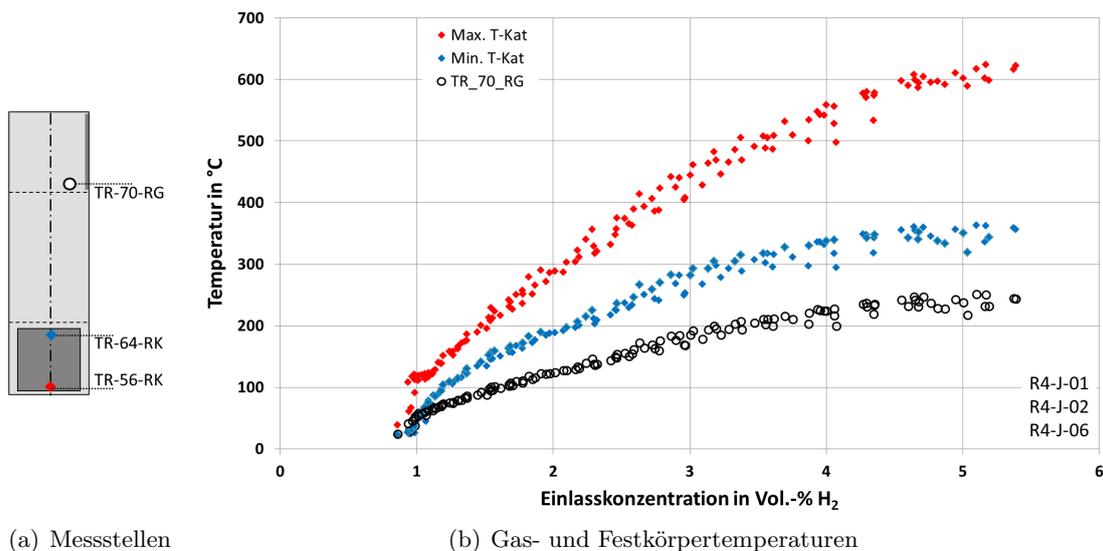


Abbildung 5.9: Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstemperatur über der H₂-Einlasskonzentration (R4-J)

Die äußeren Gehäusetemperaturen des Rekombinators sind in Abbildung 5.11 dargestellt und zeigen ebenfalls den erwarteten Verlauf. Zudem wird im Vergleich mit Abbildung 5.10 deutlich, dass die Temperaturen außen am Gehäuse ebenfalls unterhalb der Gastemperaturen im Kamin liegen. Da die Außentemperaturen hauptsächlich über Wärmeleitung durch die Kamingehäusewand beeinflusst werden, ist das Temperaturgefälle konsistent mit der theoretischen Betrachtung. Die oberen Thermoelemente TR-90-RG /91-RG und /92-RG liegen relativ dicht beieinander, was speziell bei den zwei Thermoelementen am Übergang Kamin/Hutze mit der geringen Entfernung untereinander begründet werden kann. Generell liegen die Gehäusetemperaturen in der Nähe des Auslasses in einem Bereich um 100 °C.

Abbildung 5.12 zeigt die Einlassgeschwindigkeit über der H₂-Konzentration. Auch hier wird der Einfluss des Kamins deutlich. Der Verlauf der Kurve ist zwar identisch mit den vorherigen Versuchsreihen, allerdings liegen die Geschwindigkeiten bis zu 100 mm/s höher. Die Geschwindigkeit steigt ab ca. 3 Vol.-% H₂ nur noch sehr schwach mit der Wasserstoffkonzentration und erreicht einen Grenzwert, der ungefähr zwischen 350 - 370 mm/s liegt.

5.1.4 R4-L: Kaminhöhe 450 mm, 1,0 bar

Die Versuchsreihe R4-L umfasst nur Versuche bei 1,0 bar mit einer Kaminhöhe von 450 mm. Insgesamt wurden in drei Versuchen 139 Messpunkte aufgenommen und ausgewertet. Zur Messung der H₂-Einlasskonzentration während des Versuchs R4-L-02 wird

5 Versuchsergebnisse

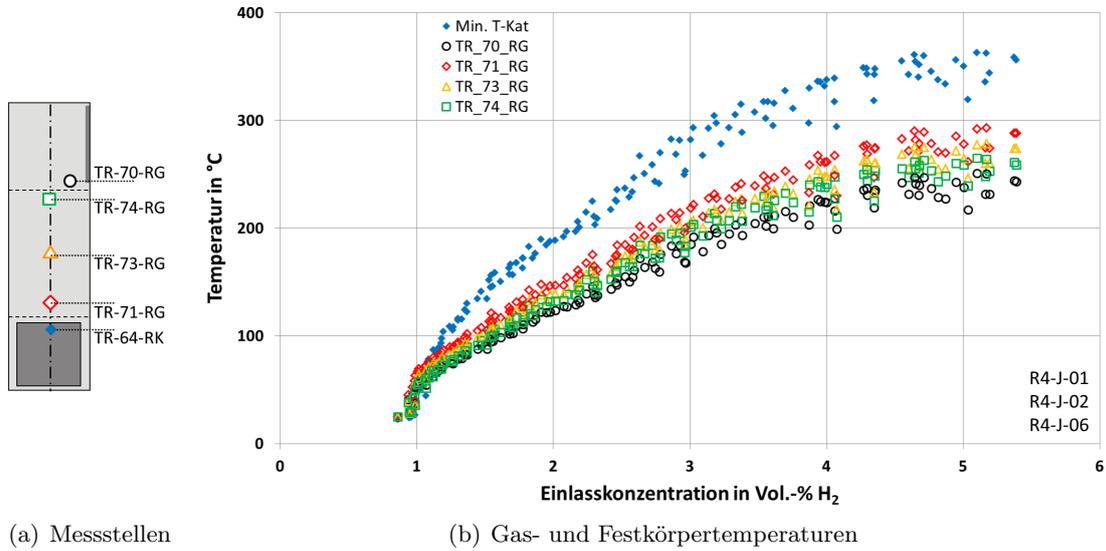


Abbildung 5.10: Kamin- und Auslasstemperaturen im Vergleich zur Oberkante des Katalysatorblechs (R4-J)

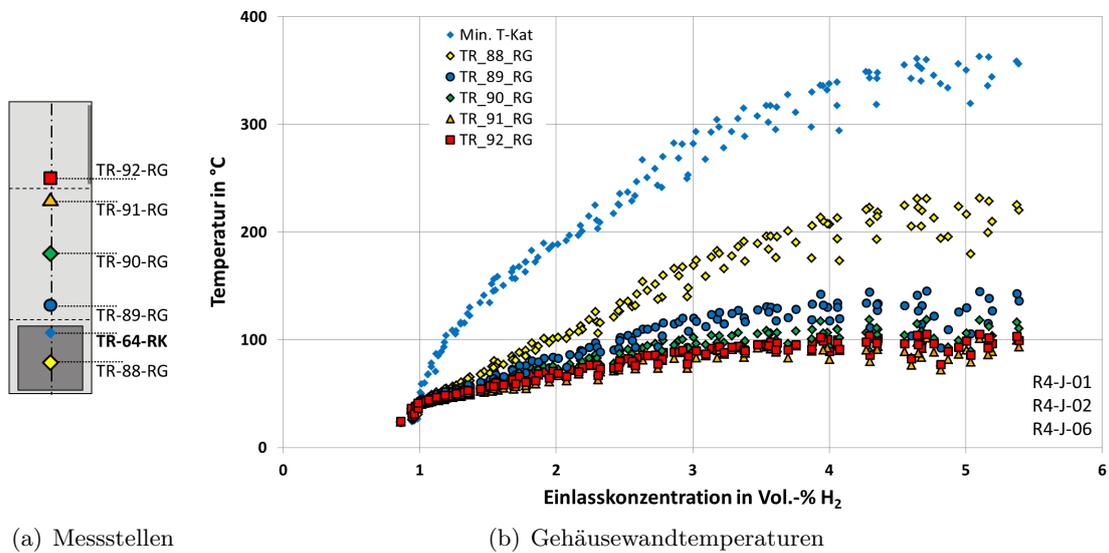


Abbildung 5.11: Kamingehäusetemperaturen im Vergleich zur Oberkante des Katalysatorblechs (R4-J)

5 Versuchsergebnisse

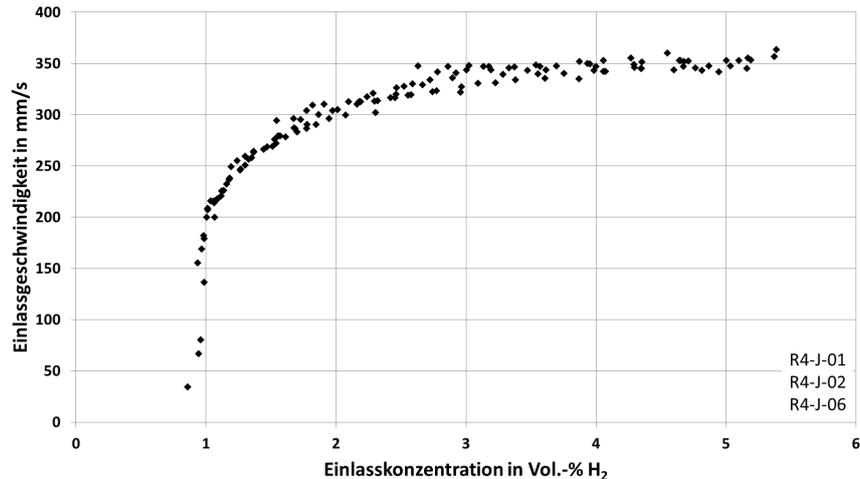


Abbildung 5.12: Einlassgeschwindigkeit über der H₂-Einlasskonzentration (R4-J)

abweichend nicht der Katharometer KR-4-20 verwendet, sondern KR-4-06. Dieser liegt 70 mm vom Modelleinlass entfernt, so dass auch hier der Einfluss durch Wärmestrahlung vernachlässigt werden kann. Da KR-4-06 ansonsten keinen Unterschied in Bezug auf Messgenauigkeit zu KR-4-20 o.ä. besitzt (siehe Kap. 3.7.4) und somit für die Einlasskonzentrationsmessung genauso gut geeignet ist (siehe Kap. 3.5.2), wird im Folgenden auf eine Unterscheidung der Versuchsreihen verzichtet.

Abbildung 5.13 zeigt die minimalen und maximalen Katalysatortemperaturen an der Blechober- und -unterkante über der Wasserstoffkonzentration am Einlass und vergleicht sie mit der Austrittstemperatur. Auch hier zeigt sich wieder der typische Kurvenverlauf wie in den Versuchsreihen R4-G und R4-J. Die Maximaltemperaturen liegen jedoch sowohl auf den Blechen als auch am Auslass höher. So erreicht die Blechoberkante Temperaturen von knapp 700 °C bei einer Einlasskonzentration von über 6 Vol.-% H₂. Zwischen Blechober- und -unterkante (min/max) liegen Temperaturunterschiede von knapp 300 °C. Die Temperaturen am Auslass steigen auf fast 300 °C. Andererseits ist bei Wasserstoffkonzentrationen unter 1,5 Vol.-% H₂ zu sehen, dass die Temperaturen stark fallen. Die Auslasstemperatur liegt unterhalb von ca. 1,3 Vol.-% H₂ im Bereich der Blechoberkante und übersteigt sie sogar. Hierbei befindet sich der Rekombinator in einem Betriebspunkt, in dem die Wasserstoffrekombination aufgrund des niedrigen Durchsatzes fast zum Erliegen gekommen ist.

Abbildung 5.14 und 5.15 zeigen die Kamintemperaturen und die äußeren Gehäus Temperaturen für die Versuchsreihe R4-L. Die Verläufe der Kurven stimmen mit denen der anderen Versuchsreihen überein. Die Temperaturen im Kamin liegen in einem Bereich von 200 - 300 °C, während sie am Gehäuse mit Ausnahme von TR-88-RG nur 100 - 150 °C erreichen. Das Thermoelement misst Werte bis knapp 250 °C, da der Katalysatoreinschub durch den Strahlungsaustausch mit den Blechen stärker erwärmt wird. Dennoch ist in Abbildung 5.14 auffällig, dass TR-70-RG, das zur Messung der Aus-

5 Versuchsergebnisse

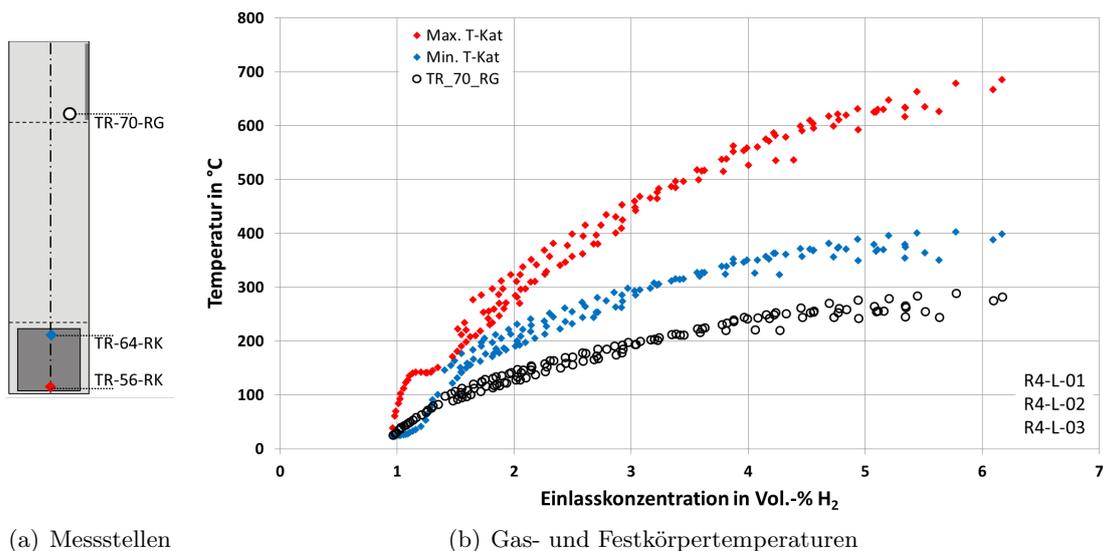


Abbildung 5.13: Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstemperatur über der H₂-Einlasskonzentration (R4-L)

lasstemperatur eingesetzt wird, verhältnismäßig hohe Werte anzeigt. Insbesondere die Temperaturen von TR-74-RG liegen mit 50 K deutlich unterhalb der übrigen Kaminsensoren. Wie schon bei Versuch R4-G wird hierfür die eingeschränkte Positionierbarkeit als Ursache vermutet. Die äußeren Gehäusetemperaturen zeigen, dass die Temperaturverteilung auch bei dem 450-mm-Kamin entlang der Höhe keine größeren Differenzen zu den anderen Kaminen aufweist. So liegt die Temperaturdifferenz zwischen TR-89-RG und TR-92-RG, die in einem Abstand von 450 mm auf dem Kamingehäuse angebracht sind, nur bei ca. 50 K. Dies liegt in der gleichen Größenordnung wie bei den Messungen mit Kaminhöhen von 150 mm und 300 mm.

Die Geschwindigkeit am Einlass hingegen wird wieder maßgeblich durch die Kaminhöhe beeinflusst (Abb. 5.16). Die Geschwindigkeit nimmt in Abhängigkeit von der Einlasskonzentration bis ca. 3 Vol.-% H₂ zu und liegt dabei bei ca. 350 mm/s. Danach ist der Kurvenanstieg gering, so dass wieder ein scheinbarer Grenzwert erreicht wird, der in diesem Fall knapp 400 mm/s beträgt.

5.1.5 R4-M: Kaminhöhe 850 mm, 1,0 bar

Mit dieser Kaminhöhe werden wieder Versuche bei unterschiedlichen Drücken durchgeführt, wobei in diesem Abschnitt nur die Versuche bei 1,0 bar_{abs} betrachtet werden (R4-M-01 /-02). Die Messreihe umfasst 143 Messpunkte in einem Konzentrationsbereich zwischen 0,9 - 5,3 Vol.-% H₂. Dabei wird mit 850 mm der höchste Kaminaufsatz verwendet, der im Rahmen dieser Arbeit untersucht wird.

5 Versuchsergebnisse

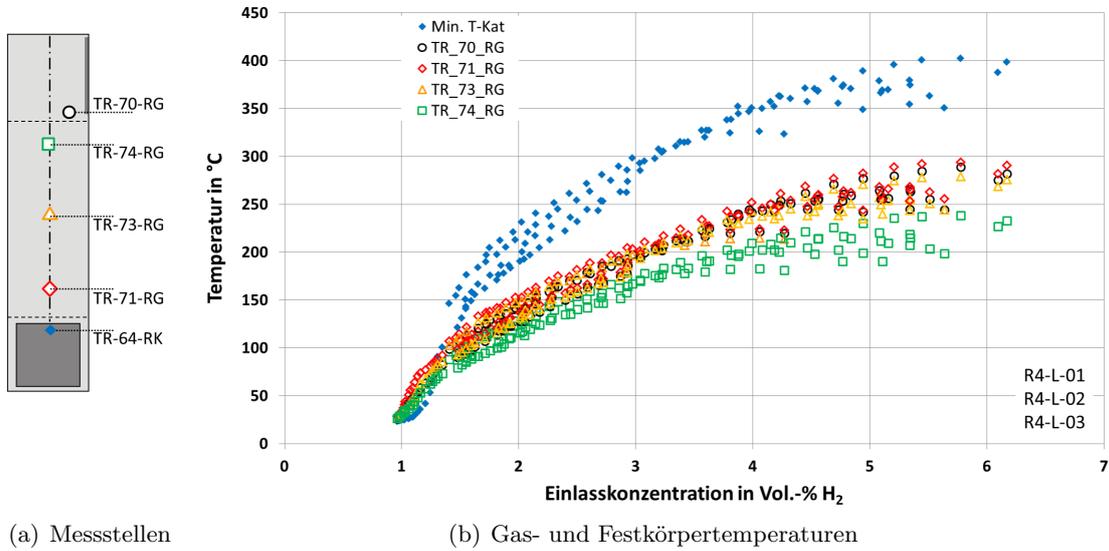


Abbildung 5.14: Kamin- und Auslasstemperaturen im Vergleich zur Oberkante des Katalysatorblechs (R4-L)

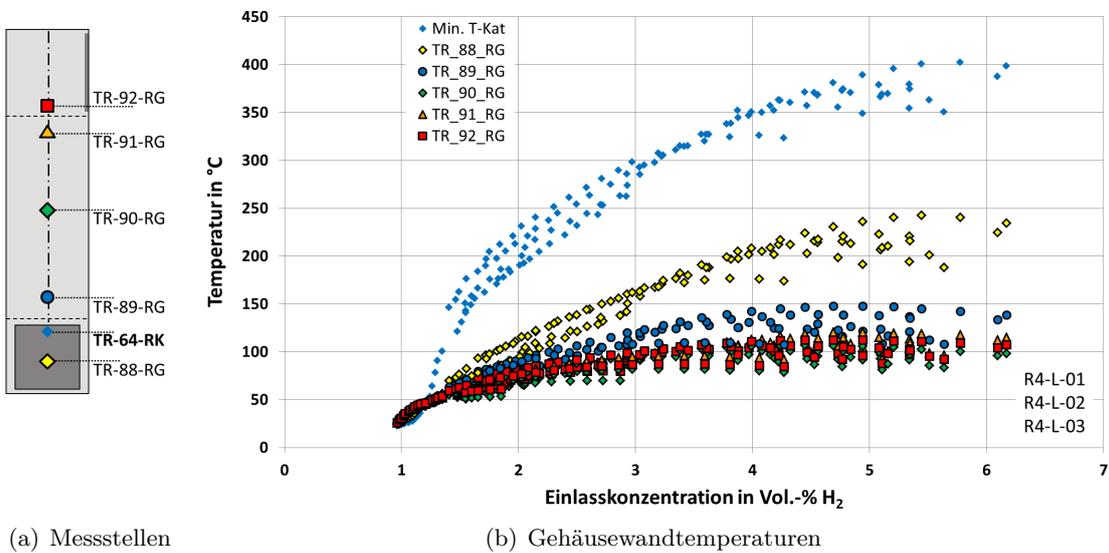


Abbildung 5.15: Kamingehäusetemperaturen im Vergleich zur Oberkante des Katalysatorblechs (R4-L)

5 Versuchsergebnisse

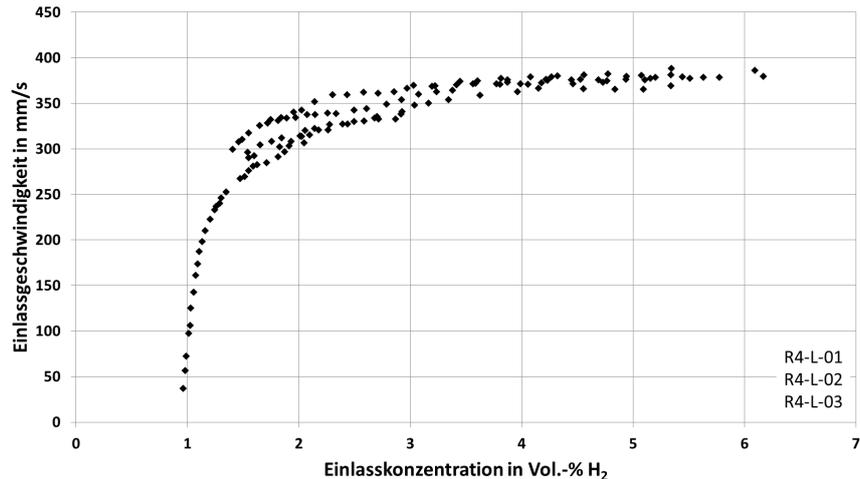


Abbildung 5.16: Einlassgeschwindigkeit über der H₂-Einlasskonzentration (R4-L)

Abbildung 5.17 zeigt wieder die Blech- und Auslasstemperaturen über der Einlasskonzentration. Die Temperaturen erreichen Werte von knapp 650 °C bei einer Konzentration von 5 Vol.-% H₂ und liegen somit über den Messergebnissen der übrigen Versuchsreihen bei 1,0 bar. Im Vergleich mit den Ergebnissen der Versuchsreihe R4-L muss beachtet werden, dass die Versuche nur bis zu einer Einlasskonzentration von 5,3 Vol.-% H₂ durchgeführt werden, um unerwünschte H₂-Verbrennungen zu vermeiden. Die Auslasstemperaturen liegen mit 200 °C unterhalb der Temperaturen anderer Versuchsreihen. Aufgrund der Höhe des Kamins, der mit 850 mm fast doppelt so groß ist wie in der Versuchsreihe R4-L, spielen hier die Wärmeverluste über die Kaminwand eine größere Rolle. Die übrigen Temperaturmesswerte stützen diese Vermutung.

Abbildung 5.18 und 5.19 zeigen die Kamintemperaturen und die äußeren Gehäusetemperaturen der Versuche R4-M-01 und R4-M-02. Sämtliche Temperaturen liegen unter denen der Blechoberkante. Die maximale Kamintemperatur liegt bei ca. 230 °C, die jedoch vom mittleren Thermoelement im Kamin (TR-73-RG) registriert wird. TR-71-RG (rote Raute), das aufgrund der geringeren Entfernung zu den Blechoberkanten normalerweise höhere Temperaturen messen müsste, liegt mit ca. 150 °C um fasst 80 K niedriger. Selbst die TE-Sensoren in der Nähe des Auslasses liegen mit 200 °C um 50 K höher. Wie bei den Versuchsreihen R4-G und R4-L wird davon ausgegangen, dass TR-71-RG in diesem Fall in Kontakt mit der Kaminwand und den Thermoelementleitungen der Katalysatormessstellen steht. Allerdings zeigen auch die übrigen Thermoelemente Messwerte in einem Bereich von 150 - 230 °C an, die unter denen der Versuchsreihe R4-L liegen. Ein genauer Vergleich folgt in Abschnitt 5.1.6.

Bei Betrachtung der Gehäusetemperaturen außerhalb des Kamins wird wieder deutlich, dass die Wandtemperaturen mit steigender Höhe abnehmen. Während die untere Kamingehäusetemperatur (TR-89-RG) mit 120 - 130 °C noch relativ hohe Werte aufweist, sinken die Messwerte von TR-90-RG /-91-RG und TR-92-RG ausnahmslos unter

5 Versuchsergebnisse

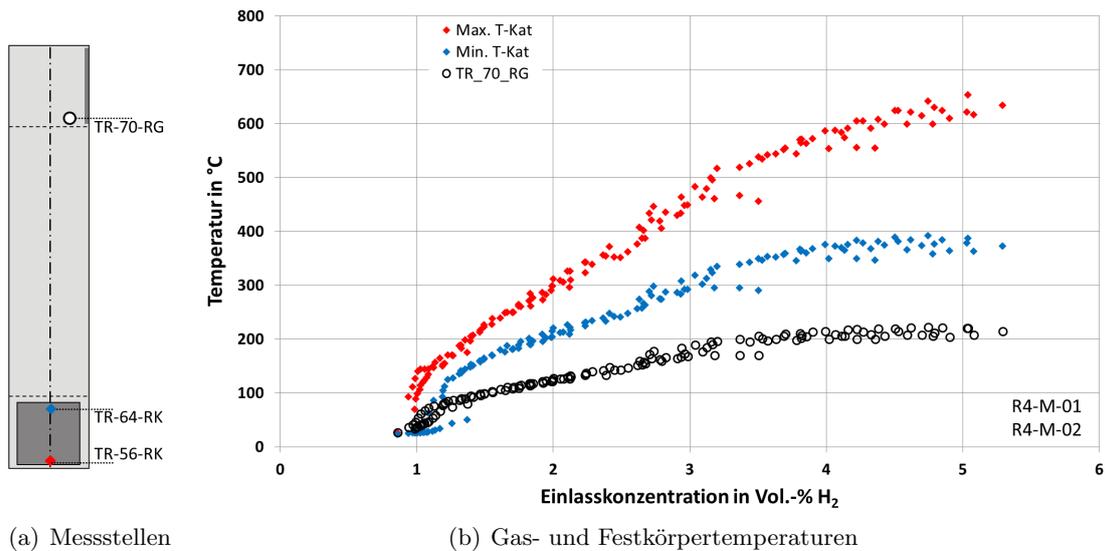


Abbildung 5.17: Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstemperatur über der H₂-Einlasskonzentration (R4-M)

100 °C. Zudem wird deutlich, dass TR-71-RG trotz der nicht optimalen Positionierung im Kamin höhere Temperaturen misst als das in vergleichbarer Höhe außerhalb angebrachte Thermoelement TR-89-RG. Das Kaminthermoelement liegt dabei in vertikaler Richtung 20 mm über der Messstelle auf dem Kamingehäuse. Dies bestätigt die Annahme, dass TR-71-RG nicht geeignet ist, um in der Versuchsreihe als Gastemperatur im Kamin verwendet zu werden, da die Position nicht optimal ist. Dennoch sind die Temperaturmesswerte im Vergleich zu den äußeren Gehäusetemperaturen plausibel, so dass ein Defekt des Thermoelements ausgeschlossen werden kann.

Abbildung 5.20 zeigt den Vergleich zwischen innerer Kamintemperatur und äußerer Gehäusetemperatur über die Höhe des Rekombinators. Dazu werden wieder drei Bereiche definiert. Rot umfasst die Thermoelemente dicht oberhalb der Katalysatorbleche, orange den Bereich der mittleren Kaminhöhe und blau die Thermoelemente im Bereich des Auslasses. Kamintemperaturen werden dabei durch offene Symbole, Gehäusetemperaturen durch gefüllte Symbole dargestellt.

Zum einen ist im roten Bereich wieder das Temperaturgefälle von innen nach außen zu erkennen. In dieser Darstellung wird zudem deutlich, dass die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen mit ca. 50 K relativ gering ausfällt, was erneut auf die unzureichende Positionierung zurückzuführen ist. Die Temperaturdifferenzen in den übrigen Bereichen sind dabei ungefähr doppelt so hoch. So liegen zwischen den Kamin- und den Gehäusetemperaturen im Bereich des Auslasses 100 - 120 K, während im mittleren Bereich sogar 150 K erreicht werden. Auch hier führen die mit der Höhe steigenden Wärmeverluste dazu, dass die Temperaturdifferenzen niedriger werden.

5 Versuchsergebnisse

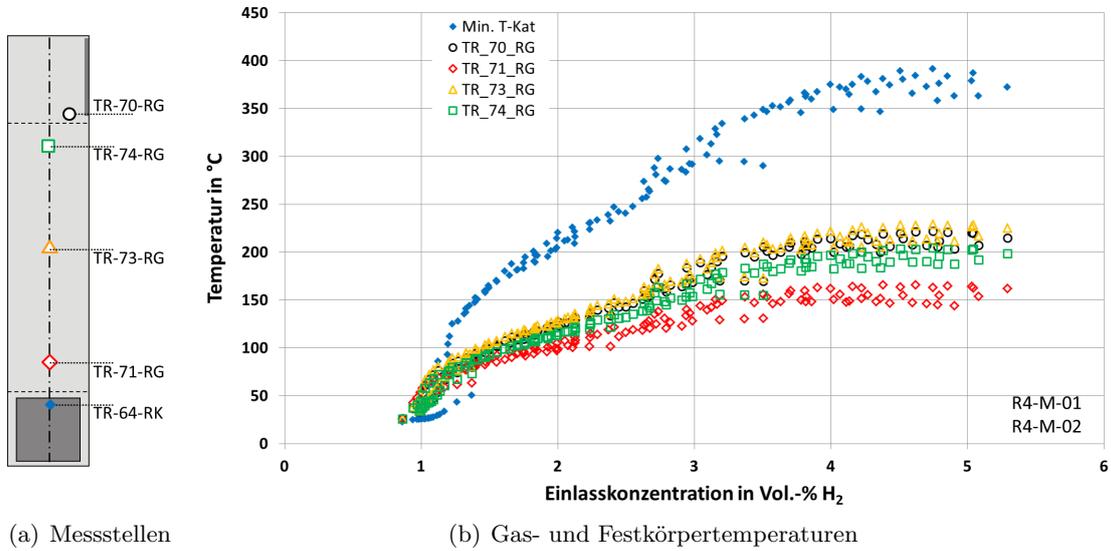


Abbildung 5.18: Kamin- und Auslasstemperaturen im Vergleich zur Oberkante des Katalysatorblechs (R4-M)

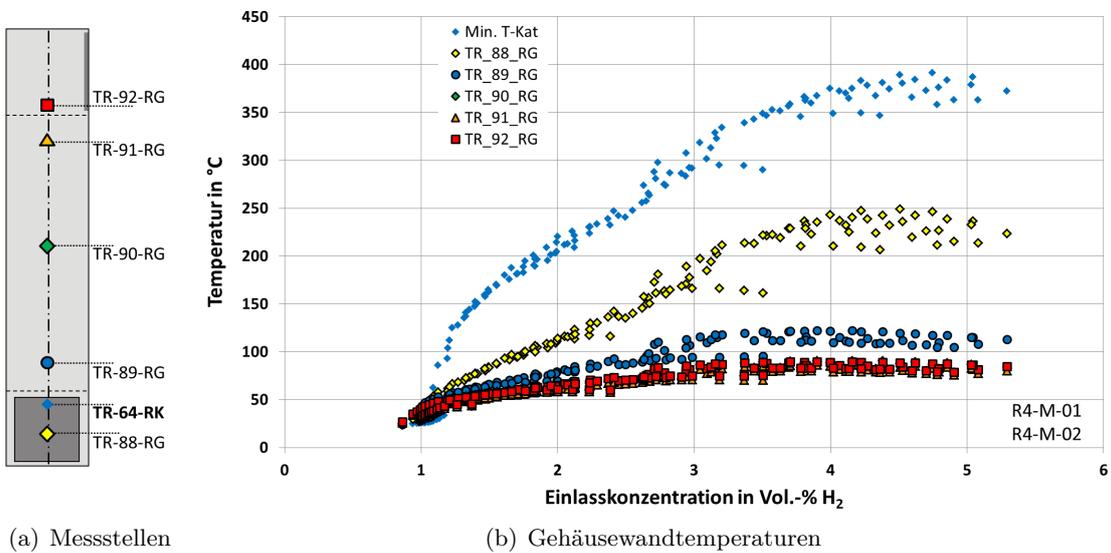


Abbildung 5.19: Kamingehäusetemperaturen im Vergleich zur Oberkante des Katalysatorblechs (R4-M)

5 Versuchsergebnisse

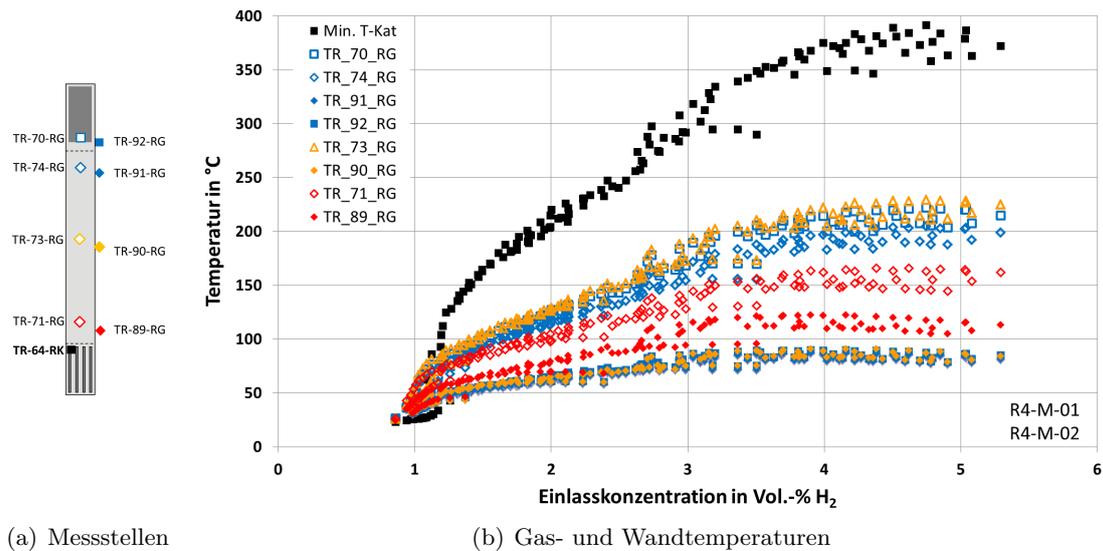


Abbildung 5.20: Vergleich der inneren Kamin- und äußeren Gehäusetemperaturen (R4-M)

Abbildung 5.21 zeigt die Einlassgeschwindigkeit über der Einlasskonzentration für den 850-mm-Kaminaufsatz. Der Verlauf der Kurve deckt sich mit den übrigen Versuchsreihen. Die Geschwindigkeit steigt zu Beginn bei einer Wasserstoffkonzentration von ca. 1 Vol.-% H_2 stark an, wobei der Gradient ab ca. 3 Vol.-% H_2 stagniert. Danach nähert sich die Einlassgeschwindigkeit wieder einem bereits zuvor beobachteten Grenzwert. Dieser erreicht im Vergleich zu den anderen Versuchsreihen erwartungsgemäß den höchsten Wert von ca. 460 - 470 mm/s.

5.1.6 Vergleich der Kaminvariation

Zum Vergleich der Ergebnisse bei unterschiedlichen Kaminhöhen sind in Abbildung 5.22 und 5.23 die maximalen und minimalen Katalysatorblechtemperaturen der jeweiligen Versuchsreihe über der Wasserstoffkonzentration aufgetragen. Sämtliche Messwerte liegen unabhängig von der Kaminhöhe in einem relativ schmalen Messwertband. So liegen die Maximaltemperaturen bei 1 Vol.-% H_2 bei ca. 120 °C und steigen auf ca. 600 °C bei 5 Vol.-% H_2 . Die Messpunkte liegen innerhalb einer Bandbreite von ± 30 K im unteren Konzentrationsbereich bis 3 Vol.-% H_2 und ± 50 K im oberen Bereich bis 6 Vol.-% H_2 . Für die Minimaltemperaturen ergibt sich ein ähnliches Bild, wobei die Temperaturen zwischen 50 - 400 °C liegen. Bei genauerer Betrachtung der beiden Abbildungen führt eine geringe Kaminhöhe tendenziell zu geringeren Temperaturen. So liegen die niedrigeren Kaminhöhen mehrheitlich im unteren Bereich des Messwertbandes. Dies ist z.B. an der Versuchsreihe R4-H ersichtlich, da sie sowohl bei den maximalen als auch minima-

5 Versuchsergebnisse

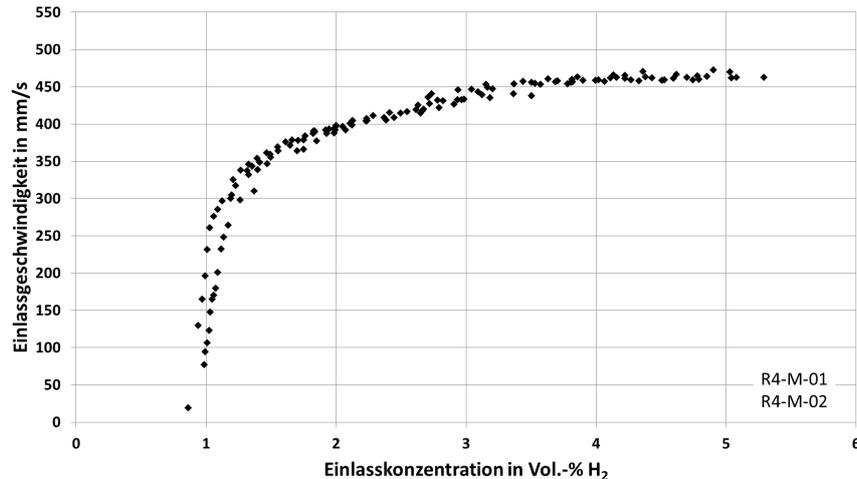


Abbildung 5.21: Einlassgeschwindigkeit über der H₂-Einlasskonzentration (R4-M)

len Temperaturen die niedrigsten Werte aufweist. Bei den übrigen Kaminhöhen sind die Temperaturdifferenzen geringer, aber dennoch erkennbar.

Dementsprechend unterscheiden sich auch die Gastemperaturen am Auslass nur geringfügig (Abbildung 5.24). Auch diese Messwerte liegen in einem Messwertband, das bei hohen Wasserstoffkonzentrationen die höchsten Temperaturdifferenzen im Bereich von ± 40 K aufweist. Dabei ist eine Korrelation zwischen Kaminhöhe und Auslasstemperatur zu erkennen. Je höher der Kaminaufsatz desto höher sind die Wärmeverluste, was zu niedrigeren Auslasstemperaturen führt. Eine Ausnahme bilden hier die Messpunkte der Reihe R4-H (schwarze Quadrate), deren Rekombinatorvariante weder über einen Kamin noch über eine Auslasshutze verfügt. Hier können die Thermolemente nur in die vertikale Abluftfahne gehängt werden, wobei sich das rekombinierte Gas frühzeitig mit der kälteren Behälteratmosphäre mischt und so zu niedrigen Temperaturen im Vergleich z.B. zur Messreihe R4-G (150-mm-Kamin) führt.

Abbildung 5.25 zeigt den Einfluss der Kaminhöhe auf die Geschwindigkeit \bar{v}_{10mm} am Rekombinatoreinlass. Hieraus ist eine deutliche Korrelation zwischen der Kaminhöhe und der Einlassgeschwindigkeit erkennbar. Mit zunehmender Kaminhöhe steigt auch die Geschwindigkeit am Einlass, da der Naturzug durch das Rekombinatorgehäuse verstärkt wird. Bei allen Kaminhöhen stellt sich ab ca. 3 - 4 Vol.-% H₂ eine Art Grenzwert in Bezug auf die Geschwindigkeit ein, der aber für jede Kaminhöhe unterschiedlich ist. Während das Rekombinatormodell ohne Kamin und Hutze (R4-H) nur eine Geschwindigkeit von bis zu 170 mm/s aufweist, liegt die Maximalgeschwindigkeit der übrigen Kaminhöhen darüber und erreicht für die maximale Höhe (850 mm) Werte von bis zu 470 mm/s.

Dieser Zusammenhang kann anhand der Kaminumlaufgleichung erklärt werden. Hierfür genügt an dieser Stelle die Betrachtung für den reibungslosen Fall aus Abschnitt 2.2.2. Der sich aufgrund einer temperaturabhängigen Dichteänderung einstellende Massen-

5 Versuchsergebnisse

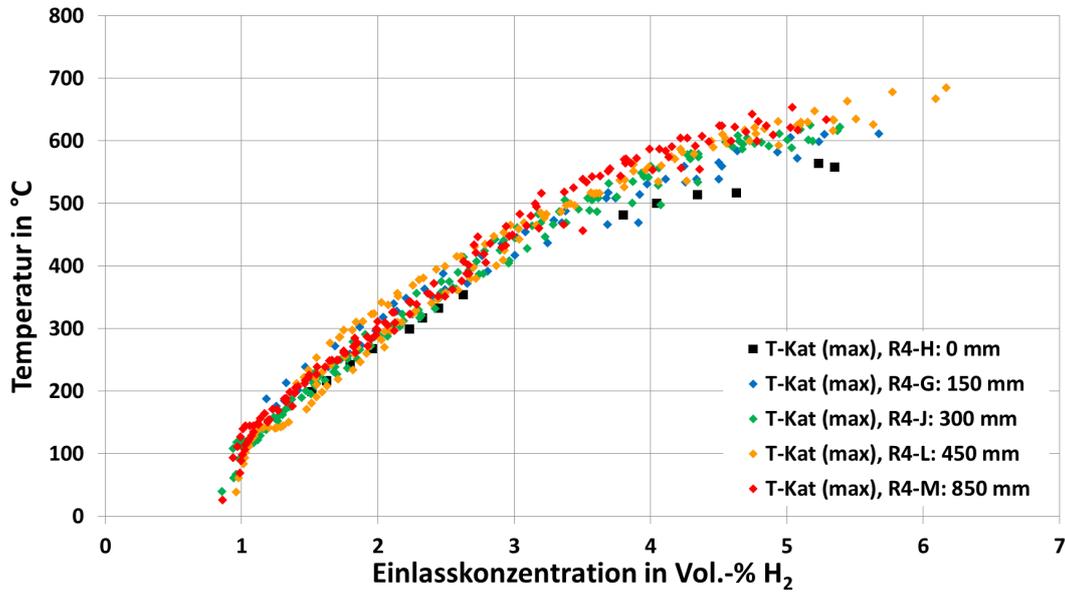


Abbildung 5.22: Vergleich der maximalen Katalysatorblechtemperaturen in Abhängigkeit von der H₂-Konzentration

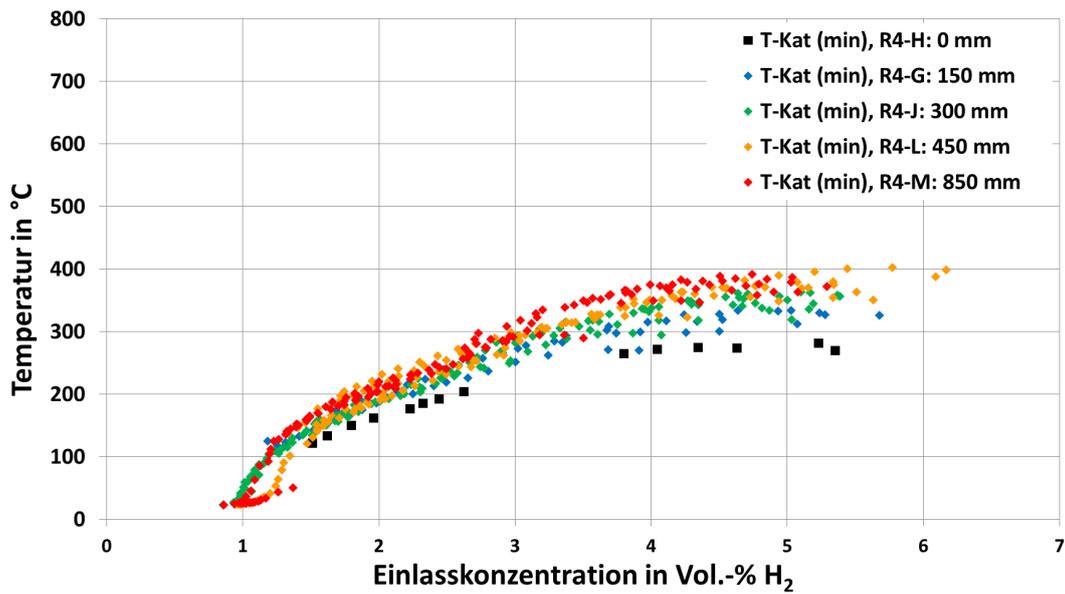


Abbildung 5.23: Vergleich der minimalen Katalysatorblechtemperaturen in Abhängigkeit von der H₂-Konzentration

5 Versuchsergebnisse

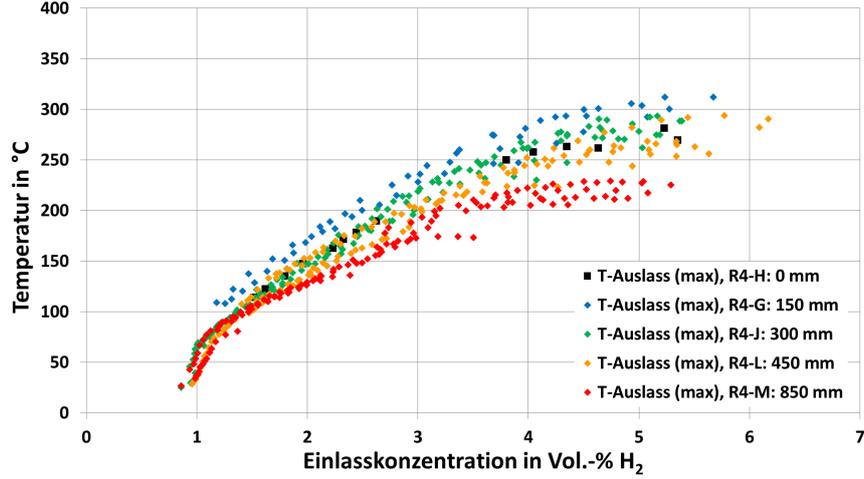


Abbildung 5.24: Auslasstemperatur (TR-70-RG) über der H_2 -Einlasskonzentration

strom in einem Kamin kann gemäß Gleichung 2.22 über

$$\frac{\dot{m}}{A} = \sqrt{\frac{g \cdot (\rho_{Umg} - \rho_{Kam})}{\frac{1}{\rho_{Kam}} - \frac{1}{2 \cdot \rho_{Umg}}} \cdot H_{Kam}} \quad (5.1)$$

berechnet werden. Unter Berücksichtigung der Kontinuität muss der Massenstrom am Einlass der gleiche sein wie im Kamin, so dass sich die Geschwindigkeit am Einlass mit Gleichung 5.1 zu

$$\frac{\dot{m}_{ein}}{A_{ein}} = v_{ein} \cdot \rho_{Umg} = \sqrt{\frac{g \cdot (\rho_{Umg} - \rho_{Kam})}{\frac{1}{\rho_{Kam}} - \frac{1}{2 \cdot \rho_{Umg}}} \cdot H_{Kam}} \quad (5.2)$$

$$\Rightarrow v_{ein} = f(\text{Geometrie}, g, \rho_i) \cdot \sqrt{H_{Kam}} \quad (5.3)$$

berechnet. Aus Gleichung 5.3 wird deutlich, dass die Geschwindigkeit am Einlass neben der Gravitationskonstante, geometrischen Größen und den unterschiedlichen Dichten in der Umgebung und im Kamin nur noch von der Wurzel der Kaminhöhe abhängt. Das bedeutet, dass der Einfluss niedriger Kamine auf die Geschwindigkeit relativ ausgeprägt ist, wobei der Einfluss von noch höheren Kaminen zu einer nur noch moderaten Steigerung der Geschwindigkeit führt. Dies ist in Abbildung 5.26 für zwei unterschiedliche Einlasskonzentrationen dargestellt. Auf der Abszisse ist die Höhe des Kaminaufsatzes i aufgetragen und auf der Ordinate die relative Zunahme der Geschwindigkeit Δv_i im Vergleich zur Versuchsreihe R4-H (0 mm), die über

$$\Delta v_i = (v_i - v_{0mm}) \quad (5.4)$$

bestimmt wird. Somit gibt Δv_i die Differenz wieder, um den sich die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Kaminhöhe im Vergleich zum Katalysatoreinschub ohne Kaminaufsatz vergrößert. Die Messpunkte einer Einlasskonzentration werden jeweils mit einer

5 Versuchsergebnisse

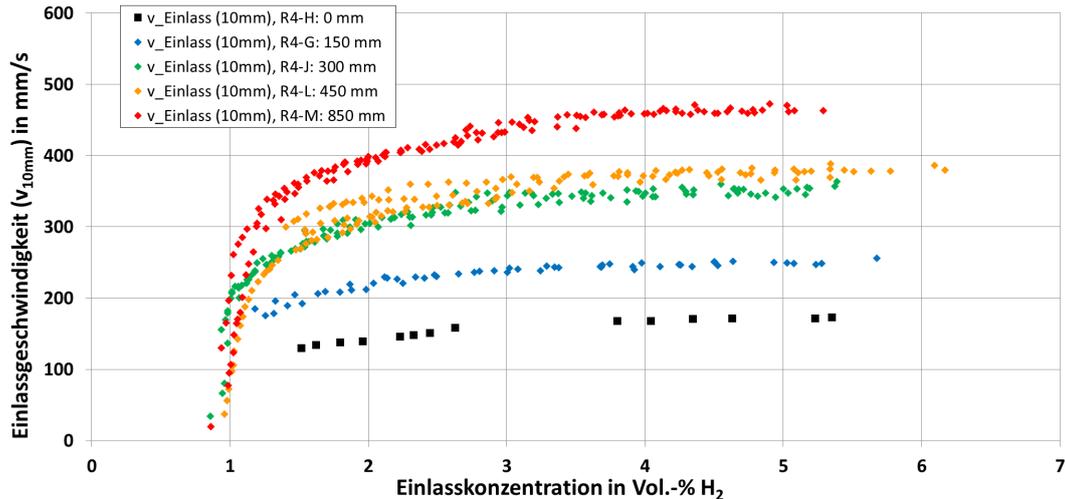


Abbildung 5.25: Einlassgeschwindigkeit \bar{v}_{10mm} über der H₂-Einlasskonzentration

Wurzelfunktion gemäß Gleichung 5.3 angenähert, die die wurzelförmige Abhängigkeit des Geschwindigkeitsgradienten verdeutlicht.

Die Versuchsreihe R4-G (150-mm-Kamin) führt bei einer Einlasskonzentration von 2 Vol.-% H₂ zu einer Geschwindigkeitszunahme von ca. 70 - 80 mm/s und der Kamin der Reihe R4-J mit der doppelten Höhe zu einer Geschwindigkeitszunahme von 160 - 170 mm/s. Dazu im Vergleich ist die Geschwindigkeitssteigerung der hohen Kamine geringer. So führt der um den Faktor 5 - 6 größere Kaminaufsatz aus der Versuchsreihe R4-M nur zu einer Geschwindigkeitszunahme von 290 mm/s bei 4 Vol.-% H₂. Bei niedrigeren Einlasskonzentrationen ist die Geschwindigkeitssteigerung sogar noch geringer. Dies zeigt, dass die experimentellen Untersuchungen mit der theoretischen Betrachtung einer Kaminströmung übereinstimmen. Eine erweiterte Betrachtung folgt im Rahmen der Kaminmodelloptimierung in Kapitel 6.

Abschließend zeigt Abbildung 5.27 die Abhängigkeit der Einlassgeschwindigkeit von der maximalen Katalysatortemperatur. Im unteren Temperaturbereich bis ca. 150 °C ist eine deutliche Korrelation zur Einlassgeschwindigkeit erkennbar. Temperaturen im Bereich von 50 - 100 °C führen zu Geschwindigkeiten von ca. 70 - 100 mm/s, während Temperaturen von 100 - 150 °C Geschwindigkeiten zwischen 100 - 200 mm/s induzieren. Dieser Bereich spiegelt sehr niedrige Wasserstoffkonzentrationen wider und stellt somit einen Betriebspunkt dar, in dem die Rekombinationsreaktion gerade startet bzw. zum Erliegen kommt. Ab Temperaturen über 150 °C nimmt der Gradient stark ab und es ist eine nur noch schwache Abhängigkeit der Einlassgeschwindigkeit von der Katalysatortemperatur zu erkennen. So führt eine Temperaturerhöhung von 200 °C auf 600 °C zu einem Geschwindigkeitsanstieg von nur noch 50 - 100 mm/s. Der Verlauf der Kurven folgt dabei aus den bereits gezeigten Ergebnissen. Die Messpunkte in Abbildung 5.27 zeigen einen ähnlichen Verlauf wie in Abbildung 5.25. Mit steigender Katalysatorblechtempe-

5 Versuchsergebnisse

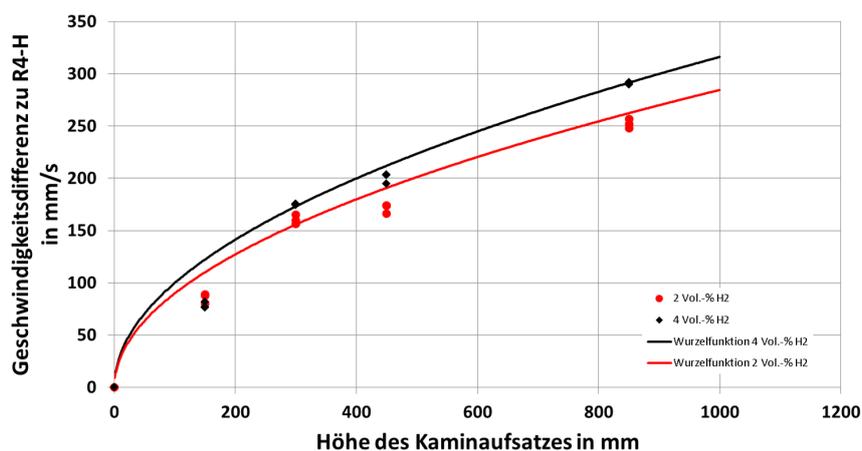


Abbildung 5.26: Einfluss der Kaminhöhe auf die Geschwindigkeitssteigerung am Einlass

ratur steigt aufgrund der stärkeren Naturkonvektion die Geschwindigkeit am Rekombinatoreinlass.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich die Korrelation zwischen der Einlasskonzentration, der Einlassgeschwindigkeit und der Katalysatortemperatur zusammenfassen. Die Einlasskonzentration definiert mit der Einlassgeschwindigkeit die absolute Menge an Wasserstoff, die in den Rekombinatoreinlass einströmt und an die Katalysatorbleche gelangt. Die Wasserstoffmenge definiert somit die freiwerdende Wärmeenergie aus der Rekombinationsreaktion, aus der sich die Katalysatortemperatur ableitet. Eine höhere Einlasskonzentration führt aufgrund der höheren Wasserstoffmenge zu einer steigenden Rekombinationsrate und somit zu einer höheren Temperatur auf den Katalysatorblechen. Ein höherer Kamin führt bei konstanter Einlasskonzentration bzw. konstanter Katalysatortemperatur zu höheren Einlassgeschwindigkeiten, da bei gleicher Dichtedifferenz der Naturzug verstärkt wird. Eine höhere Geschwindigkeit führt zwar zu einer höheren absoluten Menge an Wasserstoff und somit höheren Rekombinationsraten, jedoch nicht zu einer steigenden Temperatur auf den Blechen. Die zusätzliche Wärmeenergie in diesem Fall wird durch den zusätzlichen Massenstrom abgeführt. Hier stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der erhöhten Wärmefreisetzung und dem erhöhten Massenstrom durch das Rekombinatorgehäuse ein.

5.2 Betriebsverhalten bei unterschiedlichen Drücken

Aufgrund der zulässigen Betriebsdaten des Druckbehälters beschränken sich die Untersuchungen bei unterschiedlichen Druckbedingungen auf Drücke von 1,0 bar, 1,5 bar und 2,0 bar absolut. Diese Versuche werden unter Verwendung zweier unterschiedlicher Kaminaufsätze durchgeführt (R4-J: 300 mm-Kamin, R4-M: 850 mm-Kamin, siehe Tabel-

5 Versuchsergebnisse

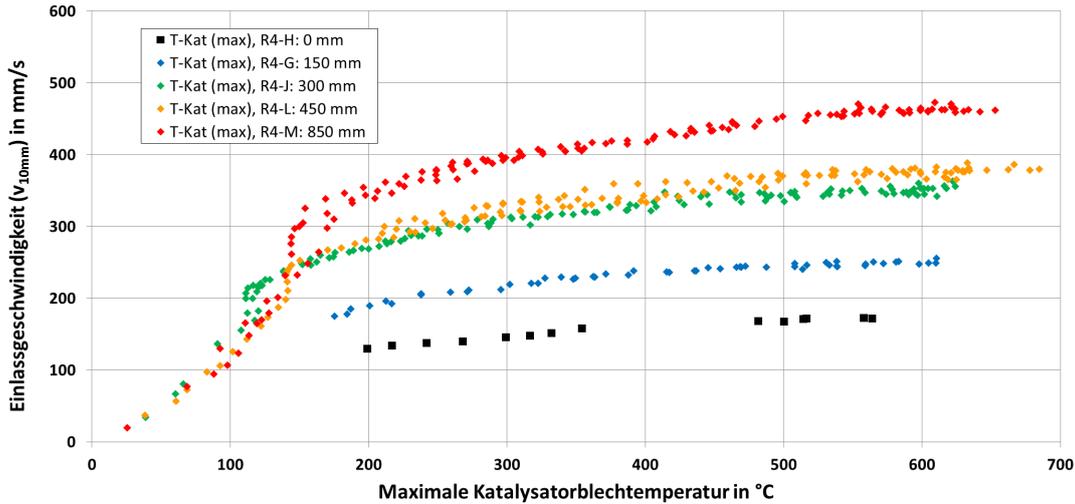


Abbildung 5.27: Einlassgeschwindigkeit \bar{v}_{10mm} über der maximalen Katalysatorblechtemperatur

le 4.1), wobei die bei 1,0 bar erzielten Ergebnisse in Abschnitt 5.1.3 und 5.1.5 dargestellt werden. Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse bei höheren Drücken betrachtet. Die mit PIV ermittelte Geschwindigkeit \bar{v}_{10mm} bzw. die maximalen und minimalen Katalysatortemperaturen werden in gleicher Weise wie in Abschnitt 5.1 bestimmt.

5.2.1 R4-J: Kaminhöhe 300 mm, 1,5 bar

Die Versuchsreihe R4-J beinhalten zwei Versuche mit insgesamt 100 Messpunkten bei einem Druck von 1,5 bar (R4-J-04 und R4-J-07). Der gemessene Konzentrationsbereich liegt zwischen 1,0 - 5,5 Vol.-% H_2 . Abbildung 5.28 zeigt die maximale/minimale Katalysator- und Auslasstemperatur und die mit dem Thermolement TR-70-RG gemessene Auslasstemperatur. Die Verläufe der Katalysator- und Auslasstemperaturen unterscheiden sich nicht von den Versuchen bei Umgebungsdruck. Die maximalen Temperaturen an der Unterkante des Katalysatorblechs erreichen Werte von knapp 700 °C und 400 °C an der Oberkante. Die Auslasstemperaturen liegen immer unterhalb der Katalysatortemperaturen und erreichen maximale Werte von ca. 250 °C. Auch die Kamin- bzw. Auslasstemperaturen zeigen keine Abweichungen (Abbildung 5.29). Sie befinden sich innerhalb eines Messwertbands, das ebenfalls unterhalb der minimalen Katalysator-temperatur liegt. Der Temperaturunterschied zur minimalen Blechtemperatur beläuft sich dabei bei höheren Einlasskonzentrationen auf über 100 K. Innerhalb des Messwertbands sind die Temperaturen zudem von der Höhe der Thermolementposition abhängig. So liegen die Temperaturen dicht über der Blechoberkante im oberen Bereich des Messwertbands, während die Temperaturen am Auslass eher im unteren Bereich angesiedelt sind. Dies ist, wie schon während in Abschnitt 5.1 diskutiert, auf Wärmeverluste im Kaminsegment

5 Versuchsergebnisse

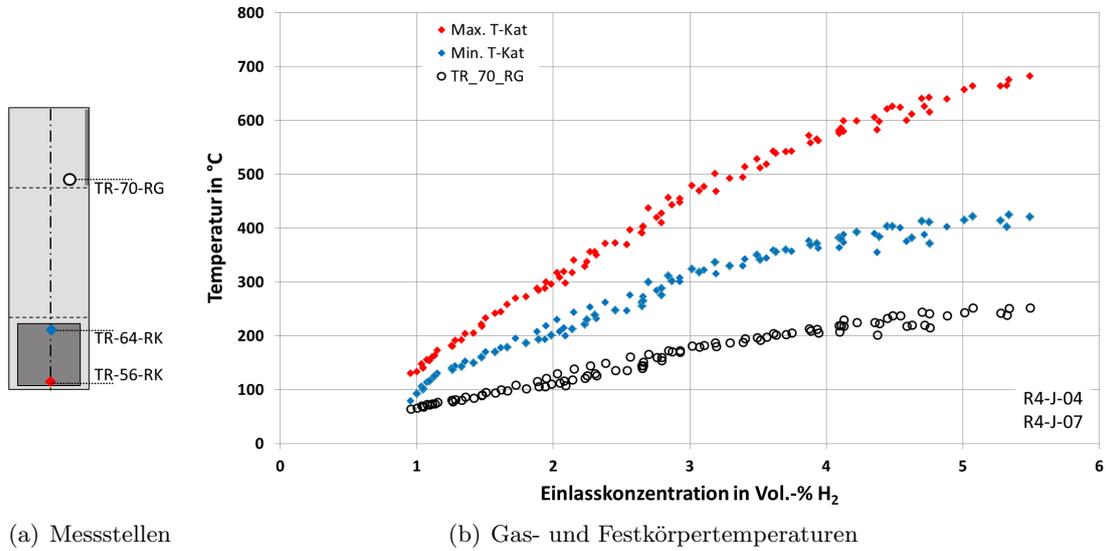


Abbildung 5.28: Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstemperatur über der H_2 -Einlasskonzentration bei 1,5 bar

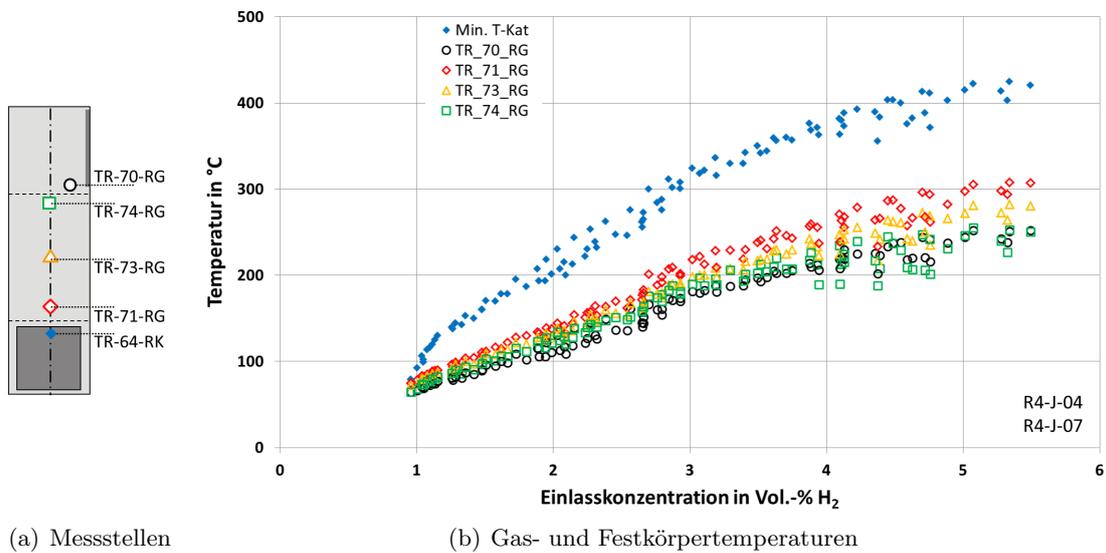


Abbildung 5.29: Kamin- und Auslasstemperaturen über der H_2 -Einlasskonzentration bei 1,5 bar

5 Versuchsergebnisse

zurückzuführen.

Der Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit \bar{v}_{10mm} am Einlass und der Einlasskonzentration ist in Abbildung 5.30 dargestellt. Die Geschwindigkeit liegt bei einer

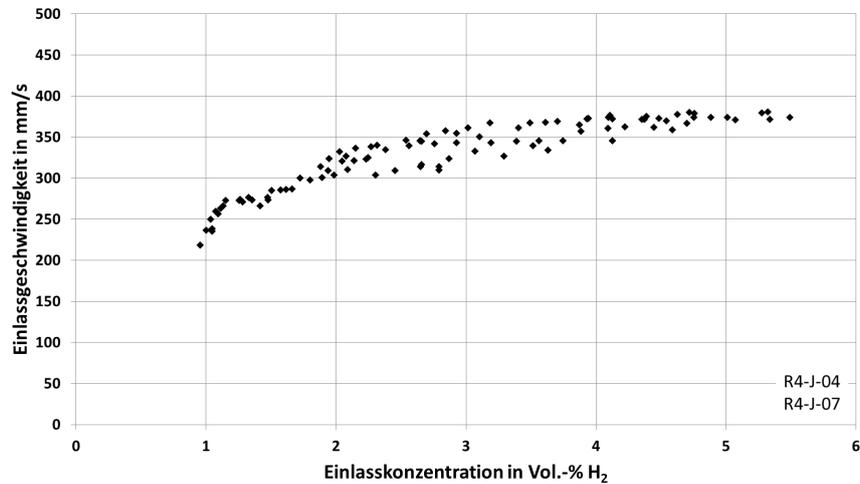


Abbildung 5.30: Einlassgeschwindigkeit über der H₂-Einlasskonzentration bei 1,5 bar

Einlasskonzentration von 1 Vol.-% H₂ zwischen 200 - 250 mm/s und steigt auf ca. 370 - 380 mm/s an. Diese Art Grenzwert wird ab einer Einlasskonzentration von 4 Vol.-% H₂ erreicht.

Die Wandtemperaturen sind bei Betrachtung der Versuchsergebnisse nahezu druckunabhängig und werden daher im Rahmen der Druckvariation nicht weiter betrachtet.

5.2.2 R4-J: Kaminhöhe 300 mm, 2,0 bar

Die Versuche R4-J-05 und R4-J-08 werden bei einem Behälterdruck von 2,0 bar_{abs} durchgeführt. Sie umfassen 99 Messpunkte in einem Konzentrationsbereich von 1,0 - 6,0 Vol.-% H₂. Abbildung 5.31 zeigt die Katalysatortemperaturen und die resultierenden Temperaturen am Auslass. Die maximalen Temperaturen an der Unterkante des Katalysatorblechs erreichen bei hohen Einlasskonzentrationen Werte von über 700 °C. Die Oberkantentemperatur liegt zwischen 450 - 470 °C. Hierbei muss beachtet werden, dass der betrachtete Konzentrationsbereich im Gegensatz zu den Versuchen bei 1,5 bar höhere Wasserstoffkonzentrationen beinhaltet.

Die Einlassgeschwindigkeit erreicht ab ca. 4 Vol.-% H₂ einen Grenzwert, der ungefähr bei 400 mm/s liegt (Abbildung 5.32). Im unteren Konzentrationsbereich zwischen 1 - 2 Vol.-% H₂ liegen die Geschwindigkeiten zwischen 230 - 330 mm/s. Auf die Darstellung der Kamin- und Auslasstemperaturen bei 2,0 bar wird hier im Einzelnen verzichtet, da sie keine neuen Erkenntnisse liefern und für die weitere Modellentwicklung nur von untergeordneter Bedeutung sind.

5 Versuchsergebnisse

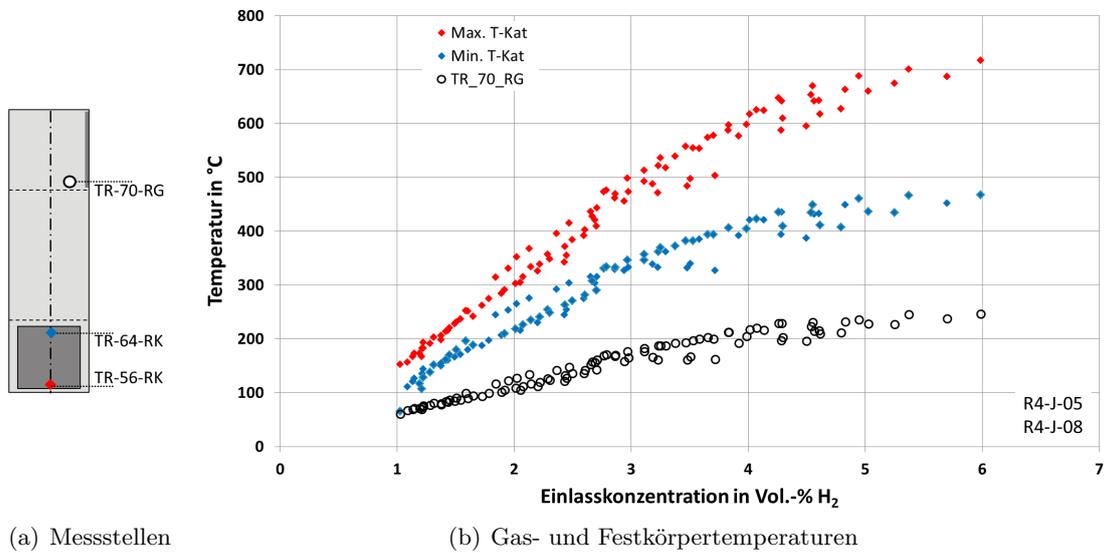


Abbildung 5.31: Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstemperatur über der H₂-Einlasskonzentration bei 2,0 bar

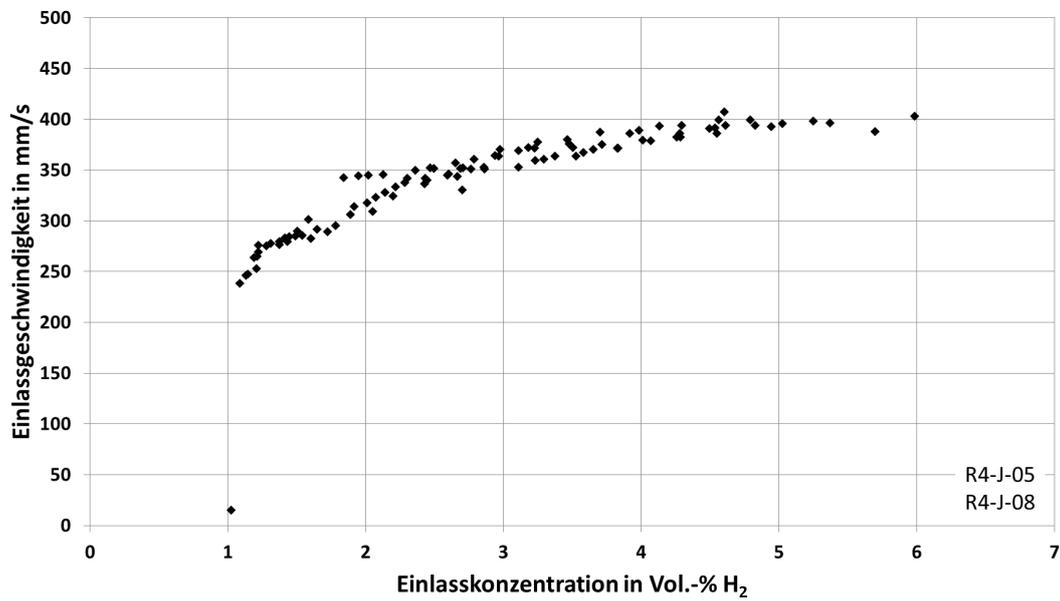


Abbildung 5.32: Einlassgeschwindigkeit über der H₂-Einlasskonzentration bei 2,0 bar

5.2.3 R4-M: Kaminhöhe 850 mm, 1,5 bar

Die Versuche R4-M-03 und R4-M-06 werden mit einer Kaminhöhe von 850 mm und einem Behälterdruck von 1,5 bar durchgeführt. R4-M-06 beinhaltet keine stationären Messpunkte, sondern eine kontinuierliche PIV-Messung der Einlassgeschwindigkeit, die im Rahmen der H₂-Bilanzierung in Abschnitt 4.3 verwendet wird. Die 95 Messpunkte im Konzentrationsbereich von 0,9 - 4,5 Vol.-% H₂ stammen daher ausschließlich aus Versuch R4-M-03. Der untersuchte Konzentrationsbereich ist aufgrund technischer und sicherheitsrelevanter Randbedingungen des Versuchsbehälters wie z.B. die maximal zulässige Einspeiserate und -menge eingeschränkt, so dass keine höheren stationären Versuchsbedingungen erreicht werden können.

Die Temperaturen an der Ober- und Unterkante der Katalysatorbleche erreichen aufgrund der im Verhältnis zu den übrigen Messreihen niedrigeren Konzentrationen nur Werte von 650 °C bzw. 420 °C (Abbildung 5.33). Dementsprechend fallen die Auslasstemperaturen mit maximal 200 °C ebenfalls geringer aus. Eine Darstellung der Kamin- und Auslasstemperaturen im Vergleich mit den anderen im Rahmen dieser Arbeit behandelten Druckniveaus wird in Abschnitt 5.2.5 behandelt.

Am Einlass des Rekombinators werden maximal Geschwindigkeiten von knapp 500 mm/s erreicht (Abb. 5.34). Dabei ist ein eindeutiger Grenzwert noch nicht zu erkennen, auch wenn der Gradient schon relativ gering ist. Während bei einer Einlasskonzentration von 1,5 Vol.-% H₂ noch Geschwindigkeiten von 350 mm/s erreicht werden, fallen diese für niedrigere Konzentrationen steil ab, so dass sie unterhalb von 1 Vol.-% H₂ nur Werte von bis 40 - 100 mm/s aufweisen.

5.2.4 R4-M: Kaminhöhe 850 mm, 2,0 bar

Die Versuche R4-M-04 und R4-M-05 umfassen 182 Messpunkte bei 2,0 bar. Der untersuchte Konzentrationsbereich ist mit 0,9 - 4,6 Vol.-% H₂ wie auch schon im Falle von R4-M-03 (1,5 bar) leicht eingeschränkt. Bei den durchgeführten Einspeisevorgängen handelt es sich um die größten Wasserstoffmengen, die im Rahmen dieser Arbeit in den Versuchsbehälter geleitet werden.

Abbildung 5.35 zeigt die Temperaturen der Katalysatorbleche und die Auslasstemperatur. Die Temperaturen an der Unter- bzw. Oberkante erreichen Werte von 680 °C bzw. 480 °C. Die Auslasstemperatur hingegen erreicht nur Temperaturen bis zu 200 °C. Auch wenn die Gradienten der Temperaturen abnehmen, so ist noch kein eindeutiger Grenzwert zu erkennen, dem sich die Temperaturen nähern.

Die Eintrittsgeschwindigkeit hat bei 4,5 Vol.-% H₂ offenbar ebenfalls noch keinen Grenzwert erreicht (Abb. 5.36). Trotz des nach oben eingeschränkten Konzentrationsbereichs werden in den Versuchen R4-M bei einem Atmosphärendruck von 2,0 bar erstmals Geschwindigkeiten gemessen, die oberhalb von 500 mm/s liegen. Diese Geschwindigkeiten erreicht die Rekombinatorvariante mit 850 mm-Kamin bei einer Einlasskonzentration

5 Versuchsergebnisse

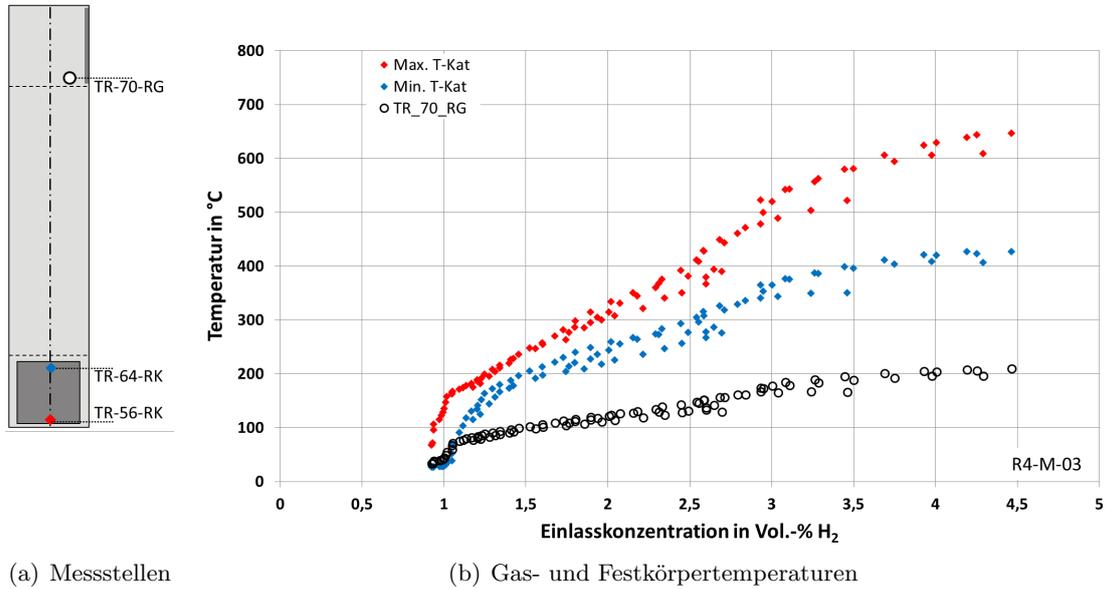


Abbildung 5.33: Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstemperatur über der H₂-Einlasskonzentration bei 1,5 bar

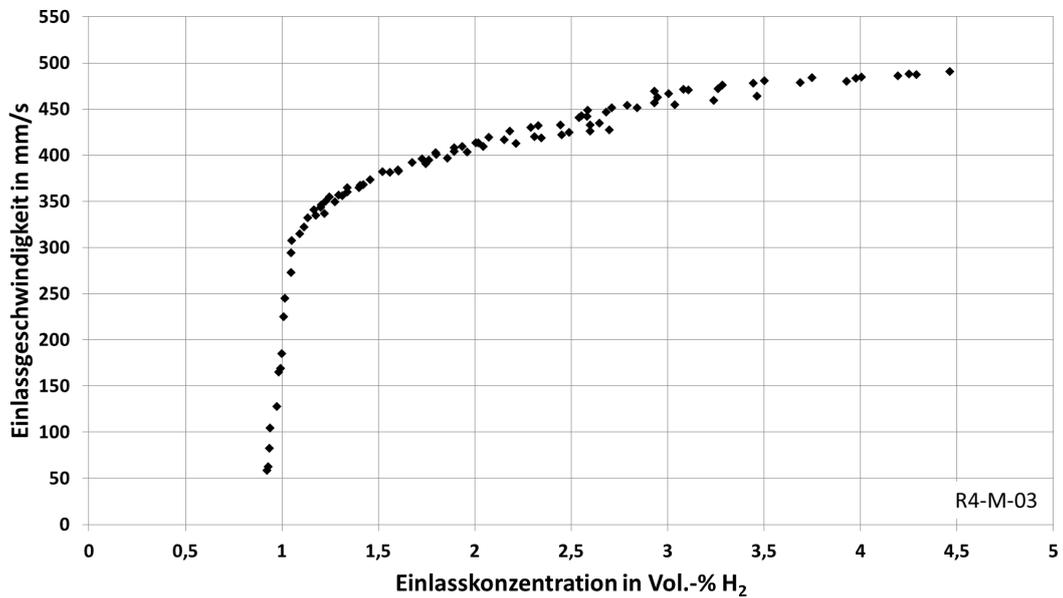


Abbildung 5.34: Einlassgeschwindigkeit über der H₂-Einlasskonzentration bei 1,5 bar

5 Versuchsergebnisse

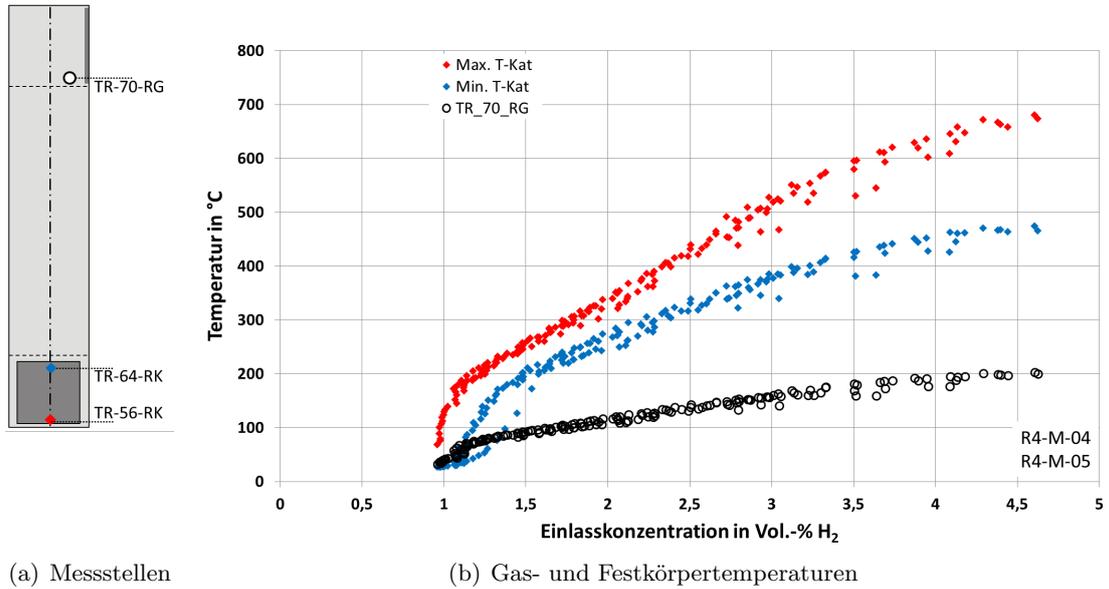


Abbildung 5.35: Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstemperatur über der H₂-Einlasskonzentration bei 2,0 bar

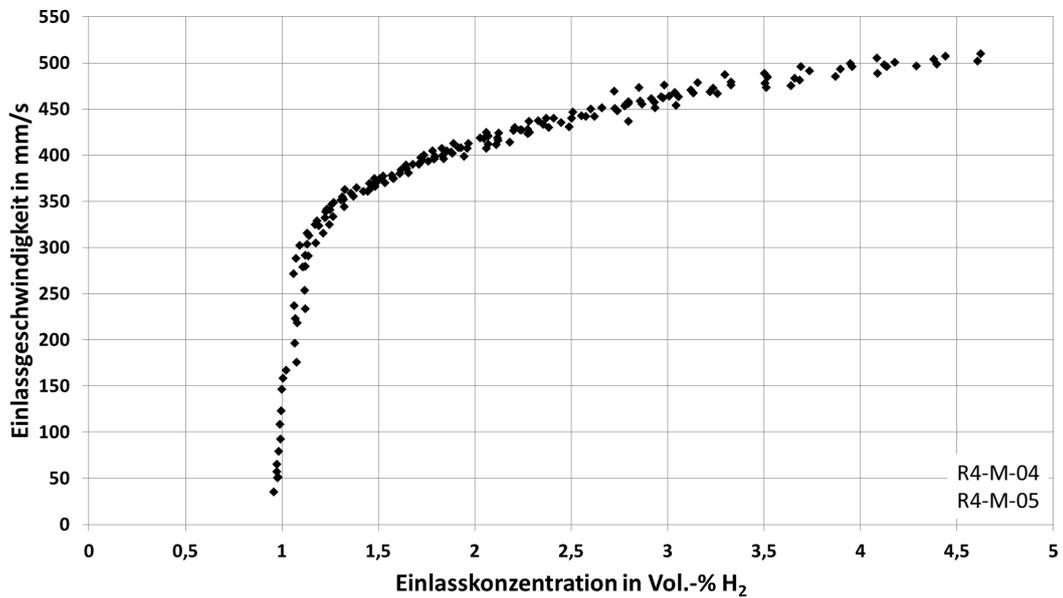


Abbildung 5.36: Einlassgeschwindigkeit über der H₂-Einlasskonzentration bei 2,0 bar

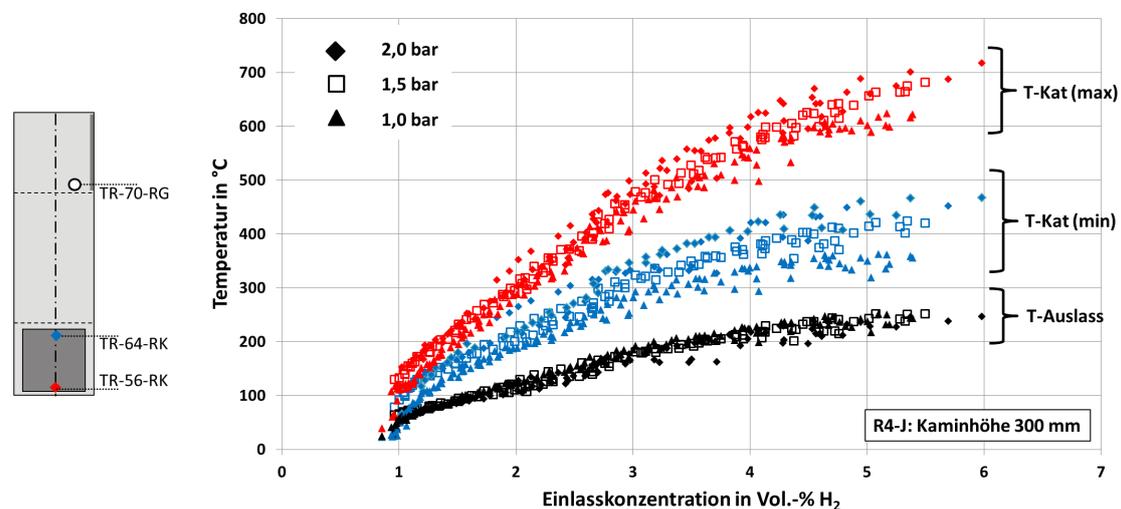
von 4,0 Vol.-% H_2 . Im unteren Konzentrationsbereich wird bei Konzentrationen unter 1,5 Vol.-% H_2 wieder das typische, steile Abfallen der Geschwindigkeit beobachtet. Unter 1 Vol.-% H_2 stagniert die Geschwindigkeit und fällt auf Werte unterhalb von 100 mm/s.

5.2.5 Vergleich der Versuche bei unterschiedlichen Drücken

Im Folgenden werden die Versuche mit gleichem Kaminaufsatz bei unterschiedlichen Drücken miteinander verglichen.

Kaminhöhe 300 mm: Versuchsreihe R4-J

Abbildung 5.37 vergleicht die Messpunkte der Katalysatorblech- und der Auslasstemperaturen für alle durchgeführten Versuche der Reihe R4-J. Die maximalen Katalysator-



(a) Messstellen

(b) Gas- und Festkörpertemperaturen

Abbildung 5.37: Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstemperatur über der H_2 -Einlasskonzentration

blechtemperaturen liegen in einem Messwertband von ca. ± 50 K. Die Temperaturen an der Katalysatoroberkante streuen mit ± 80 K etwas weiter, liegen aber dennoch klar innerhalb eines zusammenhängenden Felds. Innerhalb dieser Messfelder ist erkennbar, dass mit steigendem Druck tendenziell die Temperaturen auf den Katalysatorblechen steigen. So liegen die Messwerte der Versuche bei 2,0 bar mehrheitlich am oberen Rand, während die Versuche bei 1,0 bar das Messfeld nach unten begrenzen. Dieser Effekt ist bei den Temperaturen an der Blechoberkante etwas stärker ausgeprägt als an der Unterkante.

Dahingegen sind die Temperaturdifferenzen der Auslasstemperatur mit ± 20 K nur gering, so dass die einzelnen Druckniveaus kaum unterschieden werden können. Der

5 Versuchsergebnisse

Vergleich zeigt, dass die Katalysator- und Auslasstemperaturen vom Atmosphärendruck abhängig sind. Dies gilt ebenfalls für die Temperaturen innerhalb des Kaminaufsatzes. Auf deren Darstellung wird im Rahmen dieser Betrachtung verzichtet.

Abbildung 5.38 zeigt den Vergleich der Einlassgeschwindigkeit \bar{v}_{10mm} für die unterschiedlichen Drücke. Auch hier ist ab Einlasskonzentrationen von über 2 Vol.-% H_2 die

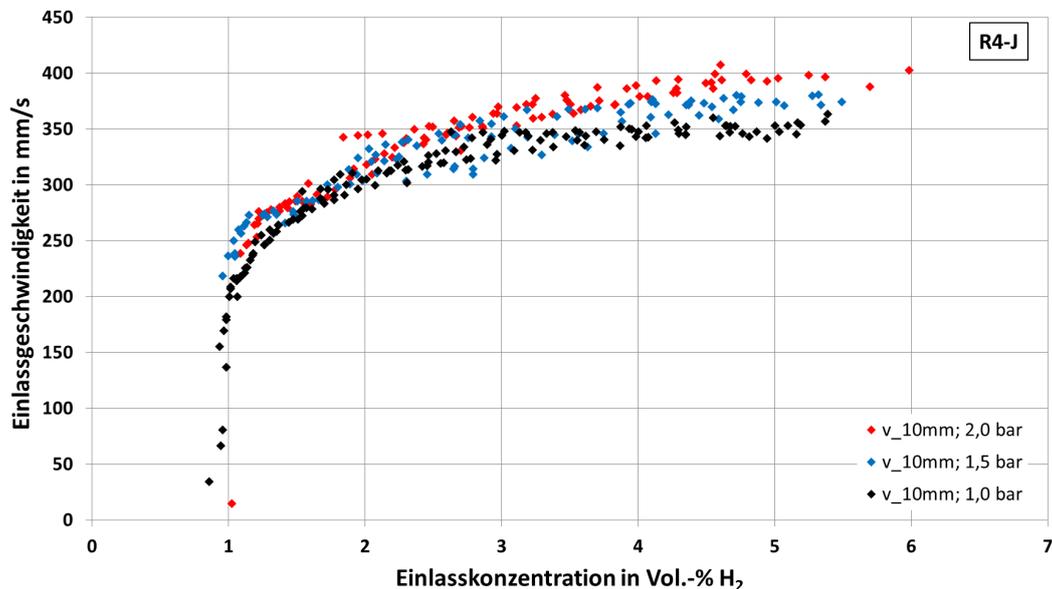


Abbildung 5.38: Einlassgeschwindigkeit über der H_2 -Einlasskonzentration bei verschiedenen Drücken (Kaminhöhe 300 mm)

Korrelation zwischen steigender Einlassgeschwindigkeit und steigendem Druck erkennbar. Dabei liegen die Versuche mit niedrigeren Drücken mit einem Grenzwert von ca. 350 mm/s im unteren Bereich des Messwertbands, während in den Versuchen bei höheren Drücken Geschwindigkeitswerte bis zum Maximalwert von 400 mm/s gemessen werden. Bei einer Einlasskonzentration von 5 Vol.-% H_2 führt ein Druckunterschied von 1,0 bar zu einer Geschwindigkeitszunahme von ca. 15 %.

Kaminhöhe 850 mm: Versuchsreihe R4-M

In Abbildung 5.39 werden die Katalysator- und Auslasstemperaturen der Druckvariation verglichen. Hier ist wie schon bei der Druckvariation der Reihe R4-J (300 mm-Kamin) der Einfluss des Drucks auf die Blechtemperaturen zu erkennen. Die Temperaturen an der Unterkante liegen im unteren Konzentrationsbereich wieder in einem Messwerteband von ungefähr ± 50 K, ab 4 Vol.-% H_2 auch leicht darüber. Die Temperaturen erreichen bei einem Behälterdruck von 2,0 bar Maximalwerte von ca. 700 °C, während bei 1,0 bar nur 600 °C gemessen werden. Die Blechoberkante streut mit knapp ± 70 K stärker und liegt im Maximum zwischen 350 - 480 °C. Innerhalb der Messwertbänder liegen die unter

5 Versuchsergebnisse

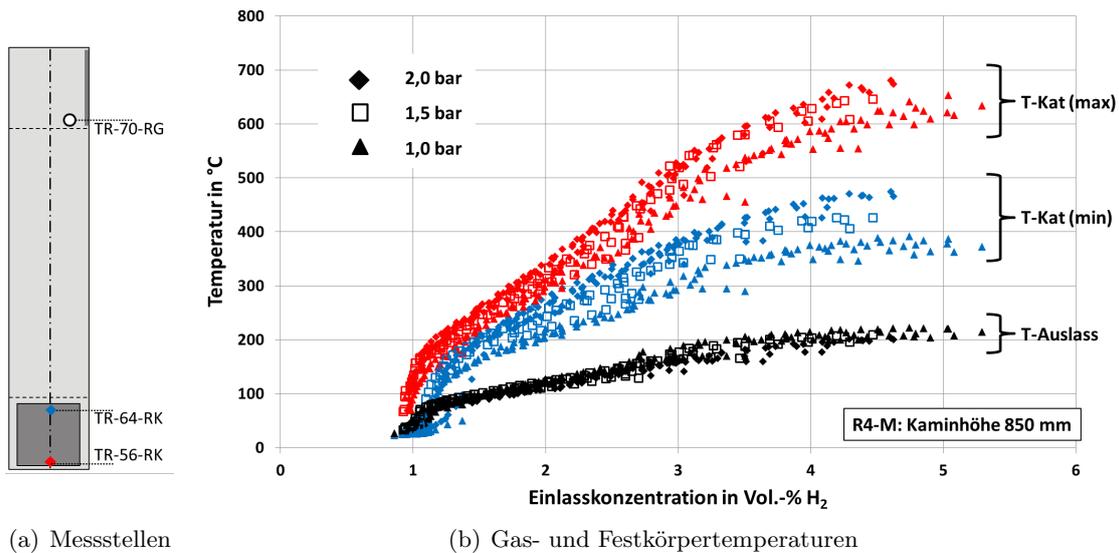


Abbildung 5.39: Max./Min. Katalysatorblech- und Auslasstemperatur über der H₂-Einlasskonzentration

höherem Druck gewonnenen Messwerte wieder im oberen Bereich, die anderen darunter. Am Auslass herrschen nahezu unabhängig vom Druck Temperaturen, die bei 1 Vol.-% H₂ unter 100 °C liegen und nahezu linear auf 200 - 220 °C bei 5 Vol.-% H₂ ansteigen. Das bedeutet, dass die Auslasstemperatur nur einem geringen Einfluss des Drucks unterliegt.

Abbildung 5.40 zeigt die Geschwindigkeiten, die sich am Einlass des Rekombinators einstellen. Ebenso wie die Temperaturen zeigt die Geschwindigkeit \bar{v}_{10mm} sowohl die typische Abhängigkeit von der Einlasskonzentration als auch eine klar erkennbare Abhängigkeit vom Druckniveau. Während die Messwerte bis zu einer Einlasskonzentration von ca. 3 Vol.-% H₂ um weniger als ± 20 mm/s voneinander abweichen, liegen sie im oberen Konzentrationsbereich in einem Messwertbereich von ± 30 mm/s. Bei einer Einlasskonzentration von 4 Vol.-% H₂ ergeben die Versuche Geschwindigkeiten von ca. 460 mm/s (1,0 bar) und 500 mm/s (2,0 bar). Die gemessenen Geschwindigkeiten des mittleren Druckniveaus liegen dementsprechend dazwischen.

In Abbildung 5.41 ist die Geschwindigkeit über der maximalen Katalysatorblechtemperatur aufgetragen. In dem Temperaturbereich bis ca. 400 °C liegen die Geschwindigkeiten übereinander, so dass eine nur geringe Abhängigkeit vom Druckniveau zu erkennen ist. Im unteren Temperaturbereich, der das Ende der Rekombinationsreaktion widerspiegelt, bricht die Geschwindigkeit bei höheren Drücken eher ein. Zudem erreichen diese Versuche im oberen Temperaturbereich höhere Maximalgeschwindigkeiten. So werden bei 600 °C Geschwindigkeiten von 460 - 470 mm/s bei 1,0 bar gemessen, während bei 1,5 bar und 2,0 bar \bar{v}_{10mm} Werte von 480 mm/s bzw. 500 mm/s erreicht. Das bedeutet, dass die Geschwindigkeiten der unterschiedlichen Druckniveaus bei hohen

5 Versuchsergebnisse

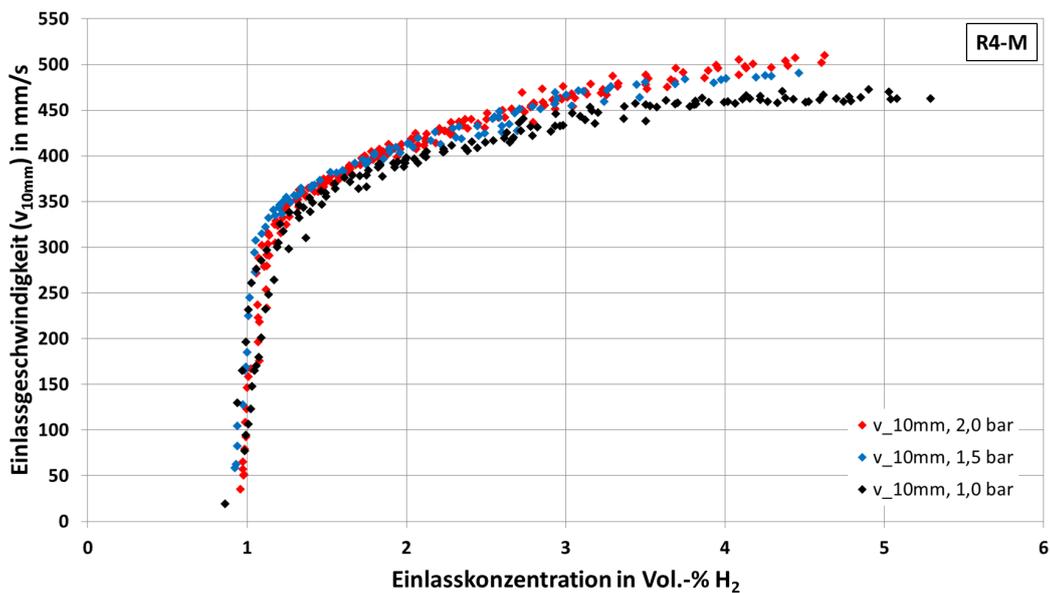


Abbildung 5.40: Einlassgeschwindigkeit über der H_2 -Einlasskonzentration bei verschiedenen Drücken (Kaminhöhe: 850 mm)

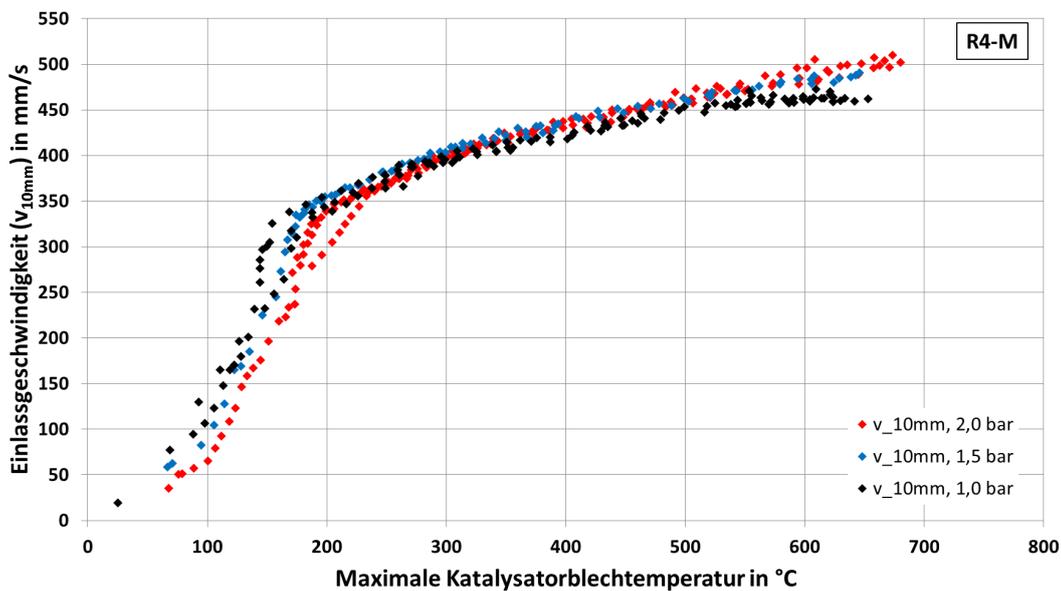


Abbildung 5.41: Einlassgeschwindigkeit über der maximalen Katalysatorblechtemperatur bei verschiedenen Drücken (Kaminhöhe: 850 mm)

5 Versuchsergebnisse

Temperaturen um ca. 10 % voneinander abweichen, so dass auch hier eine Abhängigkeit der Geschwindigkeit vom Druckniveau festgestellt werden kann.

Abschließend werden in Abbildung 5.42 die Gehäusetemperaturen des Rekombinators bei verschiedenen Drücken dargestellt. Hierbei werden aus Gründen der Übersicht nur

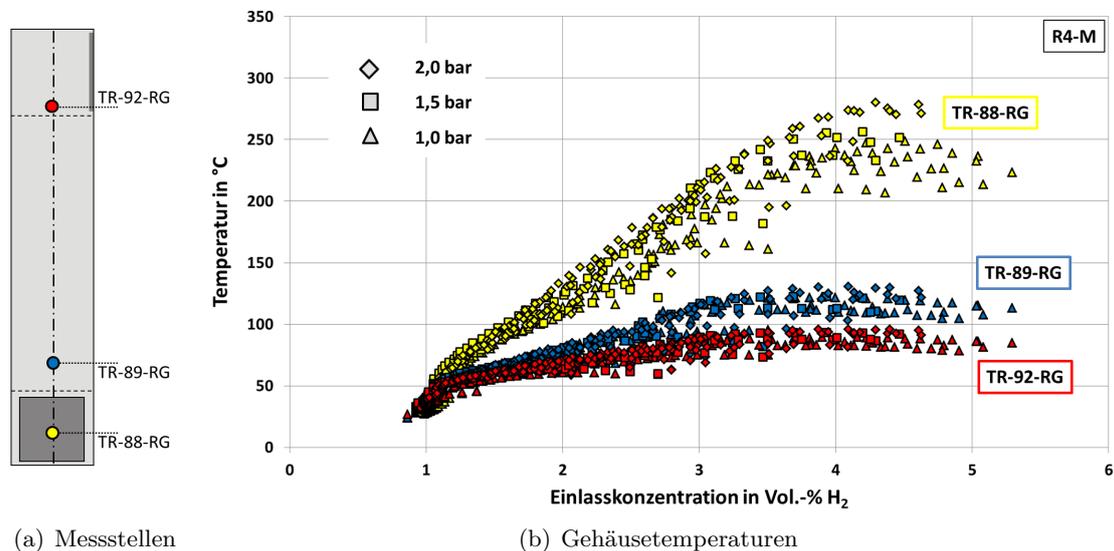


Abbildung 5.42: Vergleich der äußeren Gehäusetemperaturen über der Wasserstoffeinlasskonzentration bei verschiedenen Drücken

drei Thermoelemente repräsentativer Messstellen miteinander verglichen. In dem Diagramm sind drei Messwertbereiche zu erkennen, die sich jeweils auf eine Messposition beziehen. Die Thermoelemente TR-89-RG und TR-92-RG zeigen Temperaturwerte von bis zu 140 °C bzw. 90 °C. Die Breite des Messwertfeldes ist dabei mit ± 15 K relativ gering. Innerhalb dieser Bereiche ist der Einfluss unterschiedlicher Drücke schwach erkennbar. TR-88-RG zeigt Temperaturen zwischen 200 - 300 °C. Bei höheren Einlasskonzentrationen liegen die Versuche mit niedrigeren Drücken tendenziell im unteren Bereich des Messwertbands. Insbesondere bei Einlasskonzentrationen von ca. 4,5 Vol.-% H_2 erreichen die Versuche unter 1,0 bar Temperaturen von nur knapp 250 °C, während bei 2,0 bar Werte von bis zu 275 °C auftreten. Dies wird darauf zurückgeführt, dass das Gehäuse in der Nähe von TR-88-RG durch die Wärmestrahlung der Katalysatorbleche beeinflusst wird, die ebenfalls eine geringfügig höhere Temperatur bei höheren Drücken aufweisen. Dieser Effekt ist aber aufgrund der geringen Temperaturdifferenzen nur von untergeordneter Bedeutung.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass höhere Drücke während der Versuche einen Einfluss auf die Temperaturen im Bereich des Rekombinators aufweisen. Bei glei-

cher Einlasskonzentration führt ein höherer Druck über

$$\dot{n}_{H_2} = \dot{n}_{ges} \cdot x_{H_2} \quad (5.5)$$

$$\Leftrightarrow \dot{n}_{H_2} = p \cdot \frac{\dot{V}}{R \cdot T} \cdot x_{H_2} \quad (5.6)$$

zu einer dementsprechend höheren absoluten Menge an Wasserstoff, die in den Einlass des Rekombinators strömt. Folglich erhöht sich die Wasserstoffrekombinationsrate an den Katalysatorblechen. Dennoch führt dies nur zu verhältnismäßig geringen höheren Temperaturen (10 - 15 %), da auch der gesamte Massenstrom durch den Rekombinator zunimmt, der einen dementsprechend größeren Anteil der freiwerdenden Wärmeenergie abführt.

5.3 Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen früherer Arbeiten

Die in der vorliegenden Arbeit erzielten experimentellen Daten werden im Folgenden mit Ergebnissen verglichen, die in der Versuchsanlage REKO-3 unter Zwangskonvektion gewonnen wurden (siehe Abschnitt 2.1.1). Hierbei werden zum einen das stationäre Betriebsverhalten der Katalysatorbleche untersucht, zum anderen das Startverhalten bzw. die Aufwärmphase.

Abbildung 5.43 zeigt den Vergleich der Katalysatorblechtemperaturen unter stationären Bedingungen. Auf der Ordinate ist die Messposition aufgetragen, wobei sich 0 mm auf die Unterkante des Blechs am Einlass bezieht.

Die REKO-3-Daten umfassen in diesem Diagramm zwei Datensätze, die als offene Symbole dargestellt sind. Beide Temperaturverläufe beziehen sich auf eine Einlasskonzentration von 4 Vol.-% H₂, unterscheiden sich aber im Volumenstrom bzw. der Geschwindigkeit (0,25 mm/s und 0,5 mm/s) unterscheiden. Die Geschwindigkeit und die Wasserstoffkonzentration sind in diesem Fall die Versuchsparameter. Im Vergleich dazu sind zwei REKO-4-Datensätze dargestellt, die bei der gleichen Einlasskonzentration und ungefähr der gleichen Einlassgeschwindigkeit gemessen wurden (gefüllt Symbole). Bei der Einlasskonzentration von 4 Vol.-% H₂ führt eine Kaminhöhe von 150 mm (R4-G) zu einer Geschwindigkeit von ungefähr 0,25 mm/s bzw. eine Kaminhöhe von 850 mm (R4-M) zu einer Geschwindigkeit von 0,5 mm/s (vgl. Abb. 5.25). Die Ergebnisse beider Versuchsstände liegen gut übereinander, wobei die Temperaturen von REKO-3 gerade an der Unterkante mit z.T. $\Delta T = 50$ K stärker streuen. Nichtsdestotrotz wird deutlich, dass für beide Geschwindigkeiten sowohl der Verlauf des Temperaturprofils als auch die Maximaltemperaturen übereinstimmen.

Abbildung 5.44 zeigt den Vergleich der in beiden Versuchsanlagen gemessenen Katalysatortemperaturen bei gleicher Geschwindigkeit (0,25 m/s), aber unterschiedlichen Einlasskonzentrationen im Bereich zwischen 2 - 5 Vol.-% H₂. Die Ergebnisse von REKO-4 beziehen sich dabei vollständig auf die Versuche mit 150 mm-Kamin (R4-G). Auch hier

5 Versuchsergebnisse

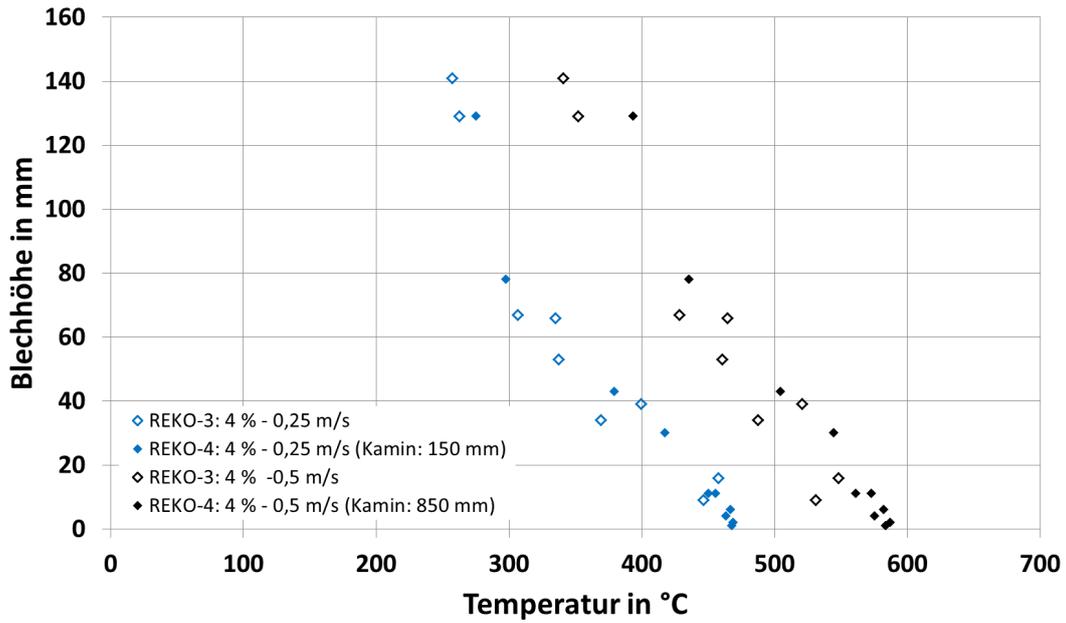


Abbildung 5.43: Vergleich der Daten von REKO-3 und REKO-4 bei unterschiedlichen Eintrittsgeschwindigkeiten (4 % H₂ stationär)

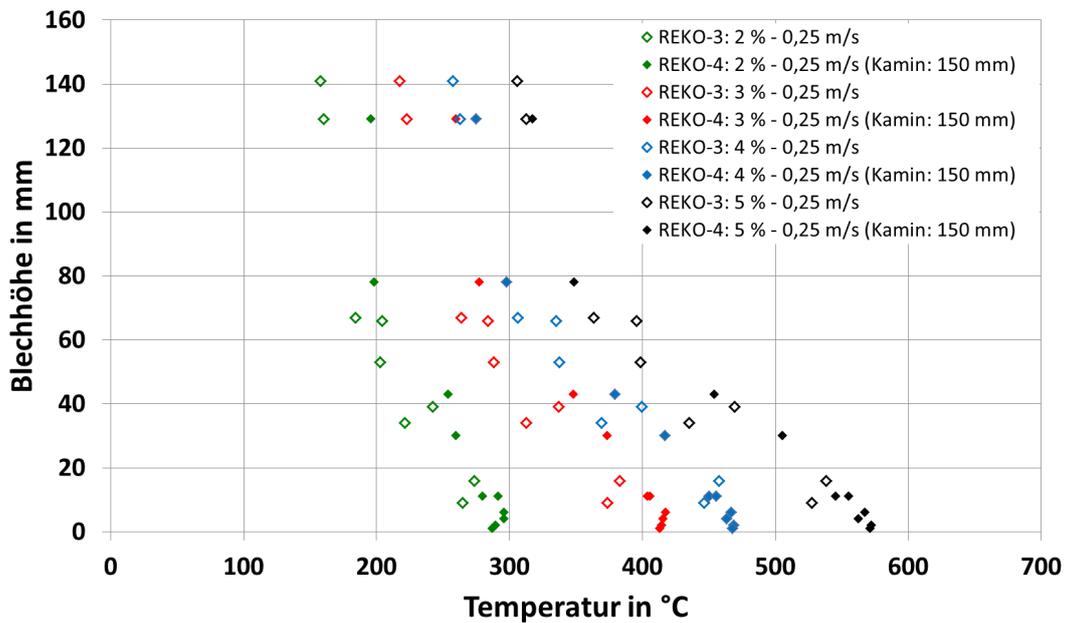


Abbildung 5.44: Vergleich der Daten von REKO-3 und REKO-4 bei unterschiedlichen H₂-Eintrittskonzentrationen (ca. 0,25 m/s)

stimmen sowohl der Verlauf der Temperaturprofile als auch die Maximalwerte gut überein. Die stationären Ergebnisse unter Zwangskonvektionsbedingungen (REKO-3) werden somit mit den Ergebnissen unter Naturkonvektionsbedingungen (REKO-4) bestätigt.

Abbildung 5.45 zeigt die Ausbildung des Temperaturprofils während der Startphase eines REKO-3-Experiments. Zum Vergleich dazu ist in Abbildung 5.46 die Ausbildung des Temperaturprofils in REKO-4 dargestellt, die bereits in Abschnitt 4.3.2 diskutiert wurde (vgl. Abb. 4.26). Abbildung 5.45 zeigt das sich über fünf Minuten ausbildende Temperaturprofil, wobei jeweils eine Momentaufnahme in einem Zeitabstand von 30 s dargestellt ist. Der Zeitpunkt „0“ bezieht sich hierbei wieder auf den Zeitpunkt, zu dem noch keine Temperaturerhöhung der Katalysatorbleche registriert wird.

Daraus ist deutlich zu erkennen, dass die Temperaturen an der Unterkante zuerst steigen und zum Ende des betrachteten Zeitraums Werte von ca. 400 °C erreichen, wobei streng genommen noch keine stationären Verhältnisse vorhanden sind. Dieses Verhalten deckt sich nicht mit den Ergebnissen von REKO-4, in der die erste Temperaturerhöhung an der Oberkante der Bleche registriert wird. Zudem unterscheiden sich die Zeitspannen, in denen sich die Profile ausbilden. Während in REKO-3 nach 300 s schon Temperaturen von 400 °C auftreten, vergehen in den Versuchen von REKO-4 über 800 s, bevor eine signifikante Temperaturerhöhung an der Unterkante zu erkennen ist. Auch an der Oberkante, wo die katalytische Reaktion in diesen Versuchen zuerst startet, werden zu diesem Zeitpunkt nur Temperaturen von knapp über 300 °C gemessen. Dieser Unterschied wird auf die unterschiedlichen Versuchsbedingungen (Zwangskonvektion/Naturkonvektion) bzw. den Antransport von Wasserstoff an die Katalysatoroberfläche zurückgeführt. In Bezug auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit dem Startverhalten kommerzieller Rekombinatoren sind die experimentellen Daten der REKO-4 Anlage repräsentativer, da die Randbedingungen der freien Konvektion dem realen Verhalten besser entsprechen. Eine tiefergehende Betrachtung des Startverhaltens wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

5.4 Untersuchung der Auslassströmung (R4-O)

Im Rahmen der Versuchsreihe R4-O wird ein Versuch bei einem Absolutdruck von 1,0 bar durchgeführt, der die Auslassströmung des Rekombinators mit PIV untersucht (R4-O-01). Der Rekombinator ist in derselben Konfiguration wie in Versuchsreihe R4-M und R4-N mit dem höchsten Kaminaufsatz (850 mm) und Hutze ausgestattet. In Abschnitt 3.4.1 wird erläutert, dass die verwendeten DEHS-Partikel aufgrund der niedrigen Verdampfungstemperatur nur sehr eingeschränkt für Messungen am Rekombinatorauslass geeignet sind. Trotzdem lassen sich auch im Fall hoher Auslasstemperaturen, die zur Verdampfung der Partikel führen, qualitative Aussagen zur Auslassströmung anhand der Kameraaufnahmen treffen. In diesem Fall ist eine quantitative Geschwindigkeitsbestimmung jedoch nicht möglich.

R4-O-01 umfasst 56 Messpunkte in einem Konzentrationsbereich von 0,85 - 3,51 Vol.-%

5 Versuchsergebnisse

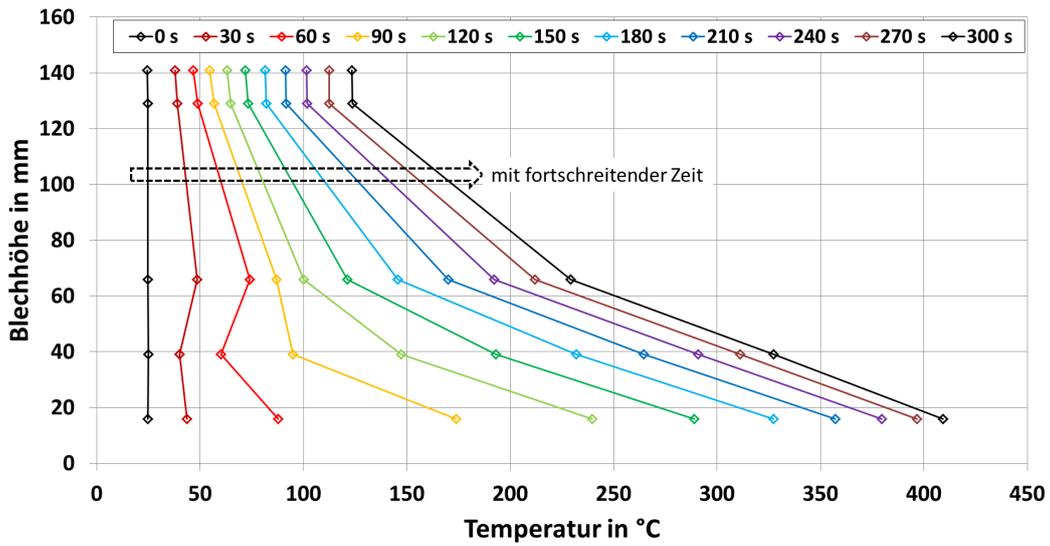


Abbildung 5.45: Ausbildung des Temperaturprofils unter Zwangskonvektionsbedingungen (Startverhalten REKO-3)

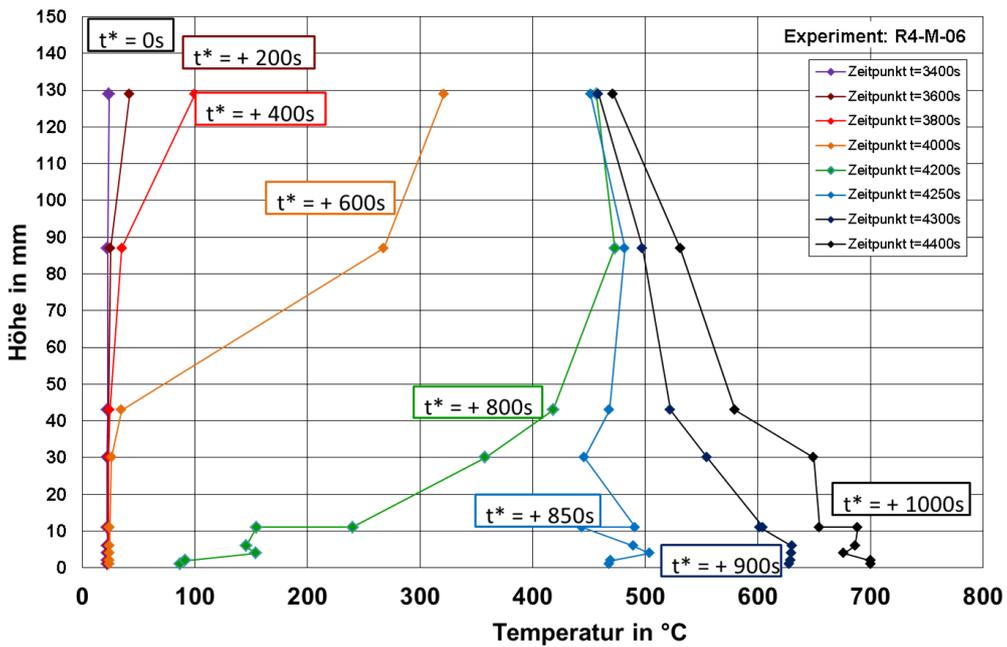


Abbildung 5.46: Ausbildung des Temperaturprofils unter Naturkonvektionsbedingungen (Startverhalten REKO-4)

5 Versuchsergebnisse

H₂. Die Reaktionstemperaturen führen bei Einlasskonzentrationen oberhalb von 1,2 Vol.-% H₂ zur vollständigen Verdampfung der DEHS-Partikel im Auslass oder zumindest zu einer geringeren Partikeldichte, die nicht ausreicht, um die Geschwindigkeit belastbar zu bestimmen.

Abbildung 5.47 zeigt vier PIV-Kameraaufnahmen (unbehandelte Rohbilder) bei unterschiedlichen Einlasskonzentrationen, in denen zur Verdeutlichung der Rekombinator (orangefarbenes Gehäuse mit Auslassöffnung in grün) und der Flanschzugang (rot-schraffierter Ring) künstlich hervorgehoben sind. Das Sichtfenster bzw. die Bildaufnahme beschränkt sich auf den inneren Teil des rot-schraffierten Rings. Die Unterkante des Rekombinatorschlusses schließt dabei mit dem unteren Rand des Sichtrings ab und befindet sich somit noch im Messfeld. Flächen auf oder außerhalb des roten Rings werden von der PIV-Kamera nicht erfasst.

In allen vier Bildern ist die Auslassfahne zu erkennen, die aus der Rekombinatoröffnung nach oben rechts strömt. Anhand Abbildung 5.47 (a) und (b) wird deutlich, dass bei höheren Einlasskonzentrationen keine Tracer-Partikel mehr vorhanden sind (schwarzer Bereich der Auslassfahne). Dennoch ist eine wirbelförmige Mischungszone zu erkennen, in der sich die Partikel außerhalb des Modells mit dem rekombinierten Gasstrom aus dem Auslass mischen. Anhand dieser Grenzflächen ist die klar aufwärtsgerichtete Form der Auslassfahne zu erkennen. Das bedeutet, dass die Auftriebskräfte des heißen Gases gegenüber dem horizontalen Impuls überwiegen. Somit handelt es sich hierbei eindeutig um eine auftriebsdominierte Strömung.

In Abbildung 5.47 (c) und (d) sind aufgrund der vergleichsweise niedrigen Gastemperaturen in der Auslassströmung ausreichend Partikel vorhanden. Abbildung 5.48 zeigt die ermittelte durchschnittliche Absolutgeschwindigkeit über der Wasserstoffkonzentration. Hierbei ist zu beachten, dass für die Mittelung das gesamte Strömungsfeld berücksichtigt wurde.

Die Geschwindigkeit steigt für geringe Wasserstoffkonzentrationen bis ca. 1,1 Vol.-% H₂ linear an und erreicht dort Werte von knapp 700 mm/s. Für höhere Konzentrationen bricht sie jedoch unerwartet ein und zeigt Geschwindigkeiten zwischen 300 - 500 mm/s. Dies stellt einen Widerspruch zur Theorie dar. Eine höhere Wasserstoffkonzentration führt zu einer höheren Temperatur im Kamin und dementsprechend zu einem höheren Massenstrom durch den Kamin. Folglich muss sich die Geschwindigkeit im Auslass und aus Kontinuitätsgründen auch am Einlass erhöhen. Letzteres ist u.a. bei den PIV-Messungen zur Einlassgeschwindigkeit der Versuchsreihe R4-M-06 gezeigt worden (Abschnitt 4.3). Diese Diskrepanz ist auf die noch unzureichende Qualität der Bildpaare zurückzuführen. Das Programm führt zwar zu Ergebnissen, die jedoch aufgrund der noch relativ geringen Partikeldichte einen hohen Messfehler beinhalten. Somit sind die PIV-Messungen am Auslass nur bis zu einer Eintrittskonzentration von bis zu 1,1 Vol. % H₂ unter diesen Bedingungen quantitativ nutzbar.

Abbildung 5.49 verdeutlicht dieses anhand der Geschwindigkeit am Auslass für zwei unterschiedliche Einlasskonzentrationen, sowohl als Vektorbild (a) und (b) als auch als

5 Versuchsergebnisse

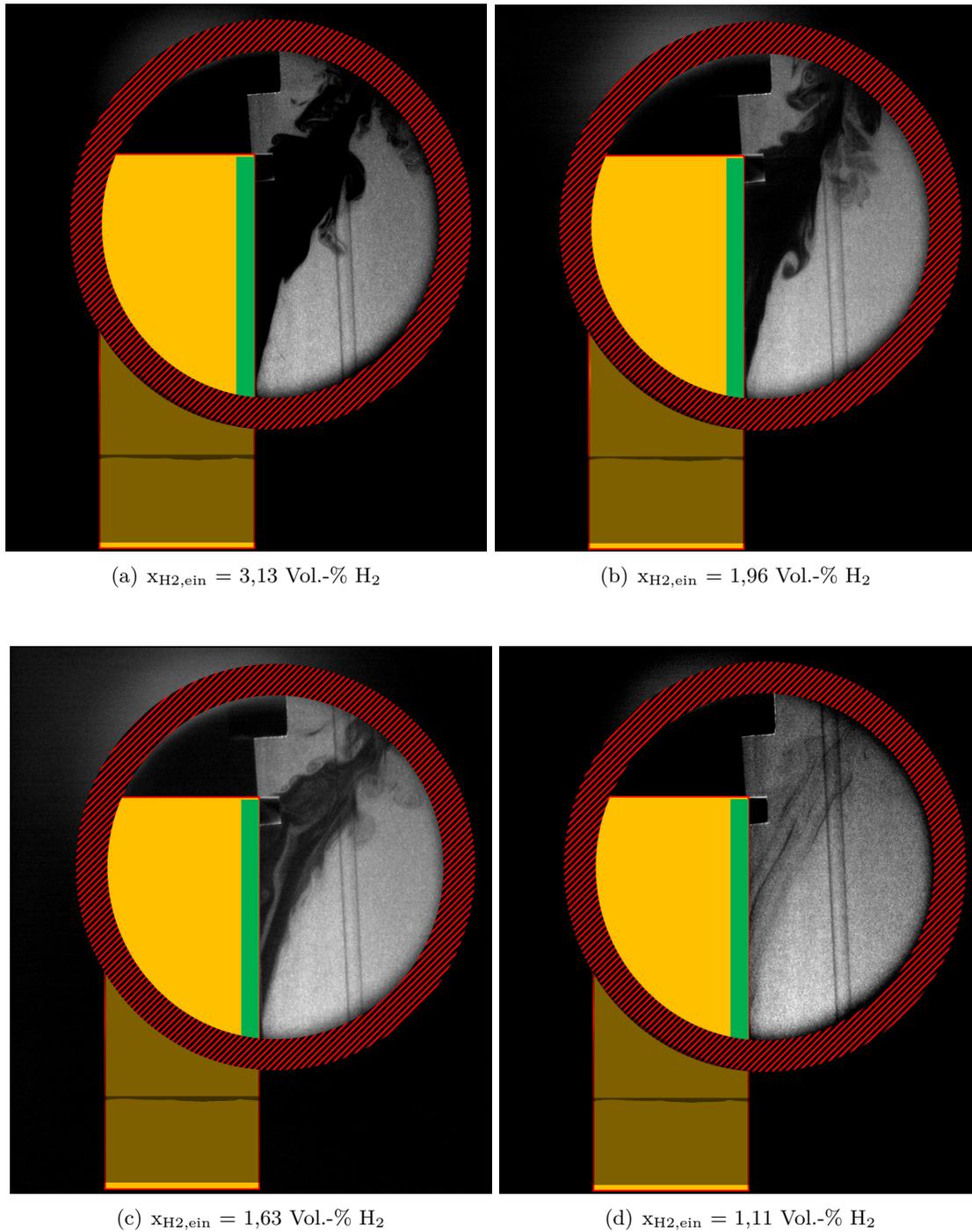


Abbildung 5.47: Einzelne PIV-Aufnahmen der Rekombinatorauslasströmung bei unterschiedlichen H_2 -Einlasskonzentrationen

5 Versuchsergebnisse

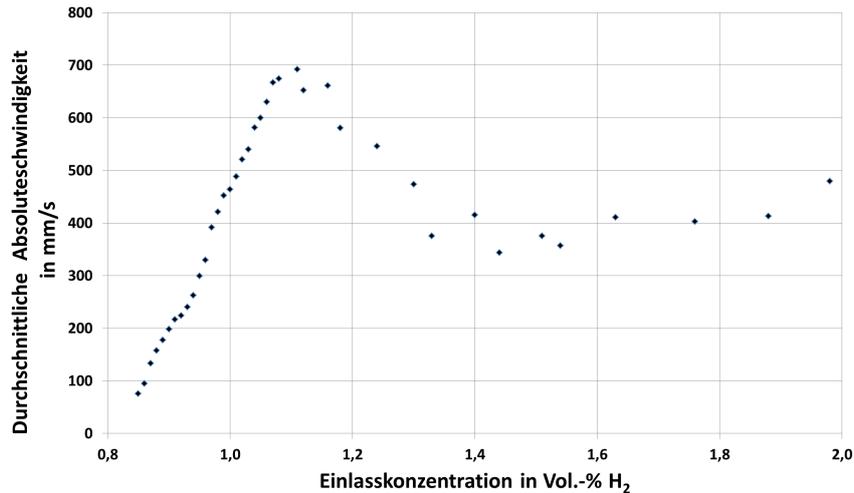


Abbildung 5.48: Durchschnittliche Absolutgeschwindigkeit am Auslass in Abhängigkeit von der Wasserstoffkonzentration

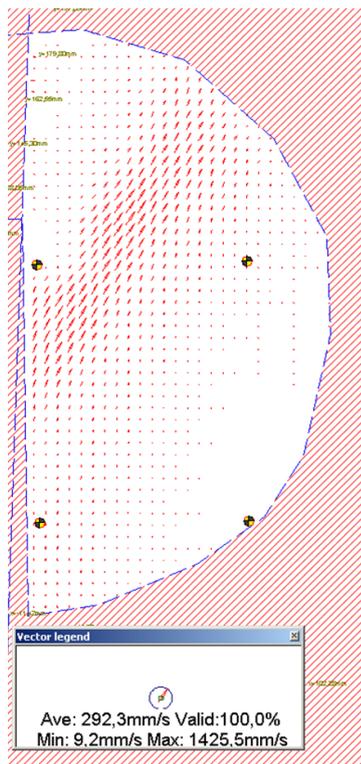
farbiges Geschwindigkeitsfeld (c) und (d). Die Blende in den Teilbildern (c) und (d) bezieht sich dabei auf ein Blech, das aufgrund von direkten Reflektionen des Lasers an der Oberkante installiert werden musste. Diese hängt nicht in der Messebene und beeinflusst somit auch nicht die Strömung. An dieser Stelle ist jedoch keine PIV-Messung möglich und wird im Zuge der Auswertung nicht ausgewertet.

Die gemessene Auslassgeschwindigkeit bei einer Einlasskonzentrationen von 1,63 Vol.-% H₂ ist langsamer als bei 1,11 Vol.-% H₂. Dies ist zum einen aus dem Vektorbild ersichtlich, in dem die Geschwindigkeiten der höheren Konzentration mit $v_{\text{ave}}=292,3$ mm/s und $v_{\text{max}}=1425,5$ mm/s niedriger sind als die Werte für die niedrigere Konzentration. Zum anderen ist dies auch aus dem Geschwindigkeitsplot unter Berücksichtigung der farbigen Skala abzulesen. Dies steht, wie bereits erwähnt, im Widerspruch sowohl zur Theorie als auch den im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Versuchsergebnissen und verdeutlicht die Einschränkungen der PIV-Messungen unter den Bedingungen am Auslass.

Andererseits scheinen die PIV-Messungen für Einlasskonzentrationen unterhalb von 1,1 Vol. % H₂ plausible Ergebnisse zu liefern (Abb. 5.49). Trotz des relativ schmalen Konzentrationsbereichs, der abgedeckt wird, ist die eindeutige Korrelation zwischen der Wasserstoffkonzentration am Einlass und der Auslassgeschwindigkeit erkennbar. Aus Abbildung 5.49 wird deutlich, dass die Auslassgeschwindigkeiten in der Auslassfahne über 1000 mm/s liegen. Im Maximum werden Werte von fast 1500 mm/s erreicht.

Um diese Ergebnisse zu überprüfen, wird eine Bilanz für den Massenstrom durch den Rekombinator erstellt. Hierbei gilt, dass der Massenstrom durch den Rekombinatorein-

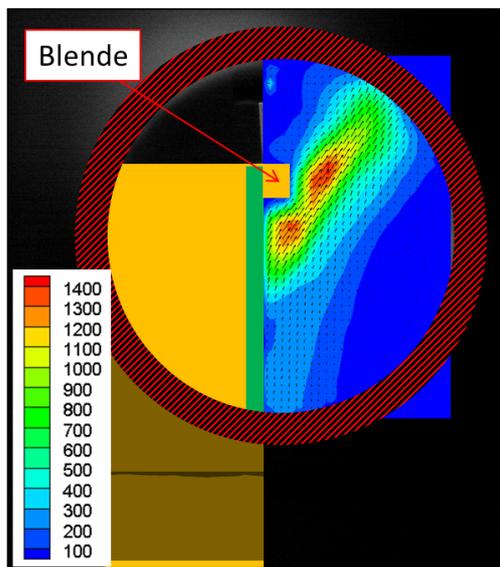
5 Versuchsergebnisse



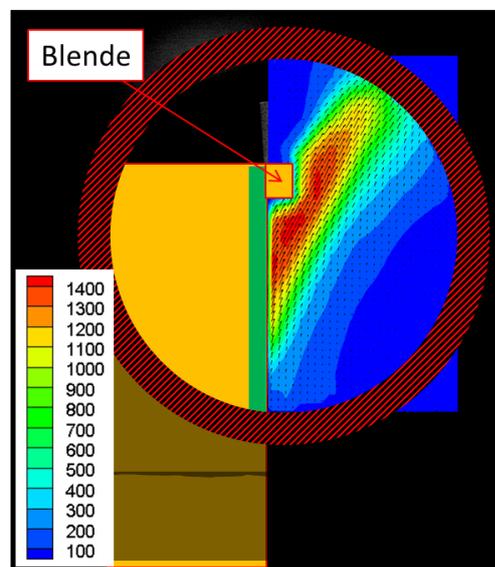
(a) $x_{\text{H}_2,\text{ein}} = 1,63 \text{ Vol.-% H}_2$



(b) $x_{\text{H}_2,\text{ein}} = 1,11 \text{ Vol.-% H}_2$



(c) $x_{\text{H}_2,\text{ein}} = 1,63 \text{ Vol.-% H}_2$



(d) $x_{\text{H}_2,\text{ein}} = 1,11 \text{ Vol.-% H}_2$

Abbildung 5.49: Vektorbild und farbig codiertes Geschwindigkeitsfeld bei unterschiedlichen H_2 -Einlasskonzentrationen

5 Versuchsergebnisse

lass und -auslass gemäß der Massenerhaltung

$$\dot{m}_{ein} = \dot{m}_{aus} \quad (5.7)$$

gleich sein muss. Hierzu wird der Massenstrom am Auslass \dot{m}_{aus} über

$$\dot{m}_{aus} = v_{aus} \cdot A_{aus} \cdot \rho_{aus} \quad (5.8)$$

$$= v_{aus} \cdot A_{aus} \cdot \frac{p}{T_{aus}} \cdot \frac{M_{gem,aus}}{R} \quad (5.9)$$

berechnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass sämtlicher Wasserstoff umgewandelt wird. Demzufolge wird die Molmasse $M_{gem,aus}$ des Auslassgemisches sowohl aus Luft als auch Wasser berechnet. Die Auslasstemperatur T_{aus} wurde während R4-O-01 nicht gemessen, da diese die PIV-Messung gestört hätte. Stattdessen wird die entsprechende Auslasstemperatur des Versuchs R4-M-01 bei gleicher Eintrittskonzentration verwendet, da es sich in diesem Fall um denselben Rekombinator handelt. Die Geschwindigkeit v_{aus} folgt aus der PIV-Messung bzw. einer Geschwindigkeitsbilanz im Bereich des Auslasses.

Der Auslassmassenstrom wird nun ins Verhältnis zum Massenstrom am Einlass gesetzt. Dieser berechnet sich analog zu Gleichung 5.9 über

$$\dot{m}_{ein} = v_{ein} \cdot A_{ein} \cdot \frac{p}{T_{ein}} \cdot \frac{M_{gem,ein}}{R}, \quad (5.10)$$

wobei $M_{gem,ein}$ die Einlasskonzentration von Wasserstoff berücksichtigt. Die Einlassgeschwindigkeit v_{ein} wird dabei aus \bar{v}_{10mm} und dem Korrekturfaktor η_{kor} ebenfalls anhand des Versuchs R4-M-01 bei gleicher Einlasskonzentration bestimmt.

Abbildung 5.50 zeigt den gemessenen Einlass- und Auslassmassenstrom über der Wasserstoffkonzentration. Jeder Messpunkt stellt dabei einen berechneten Massenstrom dar (schwarze Raute). Der Einlassmassenstrom ist zum Vergleich als schwarze Kurve dargestellt, die die Messpunkte der Versuchsreihe R4-M-01 linear verbindet.

Die Messpunkte des Auslassmassenstroms stimmen mit dem Einlassmassenstrom relativ gut überein. Im unteren und oberen Konzentrationsbereich wird der Auslassmassenstrom leicht überschätzt. Andererseits stellt der beobachtete Konzentrationsbereich wieder einen Extrembereich im Betriebsverhalten dar, in dem die Rekombinationsreaktion zum Erliegen kommt und Schichtungseffekte die Messwerte beeinflussen. Vor diesem Hintergrund sind die Messungen für niedrige Einlasskonzentrationen als verhältnismäßig gut einzuordnen und zeigen, dass die Geschwindigkeitsmessung am Auslass unter Berücksichtigung eines größeren Messfehlers aufgrund der schlechteren Partikelbilder tendenziell richtige Ergebnisse liefert. Andererseits zeigen sowohl die qualitativen als auch quantitativen Ergebnisse, dass die auftriebsdominierte Strömung auch zum Ende eines Versuchs immer noch aufwärtsgerichtet ist. Dies deckt sich mit dem beobachteten Effekt, dass das warme, rekombinierte Gas unter die Behälterdecke steigt und das kalte, wasserstoffreiche Gasgemisch nach unten Richtung Behälterboden drückt.

5 Versuchsergebnisse

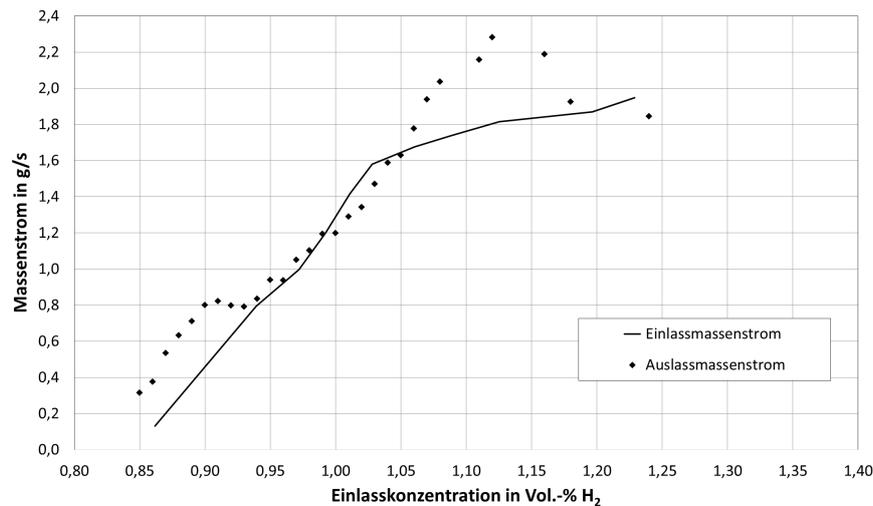


Abbildung 5.50: Vergleich des Einlass- und Auslassmassenstroms

5.5 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Versuchsergebnisse analysieren das Betriebsverhalten eines Rekombinatormodells unter Naturkonvektionsbedingungen. Ein zentraler Punkt ist hierbei die Korrelation zwischen der H₂-Einlasskonzentration, der Temperatur der Katalysatorbleche und die Geschwindigkeit am Einlass des Rekombinators. Die Versuche wurden bei einer Einlasskonzentration von 0 - 6,5 Vol.-% H₂ durchgeführt. Hierbei wurden unterschiedliche Kaminhöhen des Rekombinators verwendet, wodurch der Einfluss der Kaminhöhe auf den Naturzug quantitativ bestimmt werden konnte. Zudem wurde der Einfluss des Umgebungsdrucks in einem Bereich 1 - 3 bar_{abs} auf das Betriebsverhalten des Rekombinators gemessen.

In den Versuchen bildete sich ein stationäres Temperaturprofil auf den Katalysatorblechen aus, das bereits in vorherigen Arbeiten u.a. in REKO-3 unter Zwangskonvektionsbedingungen beobachtet worden ist. Das Startverhalten unter realitätsnahen Naturkonvektionsbedingungen hingegen unterscheidet sich von Versuchen, die unter Zwangskonvektionsbedingungen durchgeführt worden sind.

Die gewonnenen Ergebnisse bilden eine Datenbasis mit der das Simulationsprogramm REKO-DIREKT weiterentwickelt werden kann. Insbesondere die Modellierung der Kaminströmung kann nun anhand der Versuchsergebnisse optimiert und validiert werden.

Im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurde besonderer Wert auf die Plausibilität der Versuchsdaten gelegt. So zeigen zum einen die vergleichenden Messungen der Einlass- bzw. Auslassströmung des Rekombinators ein geschlossenes Bild. Zum anderen ergibt die Bilanzierung eines gesamten Versuchsverlaufs, die die in den Versuchsstand eingespeiste Wasserstoffmenge mit der gemessenen

5 Versuchsergebnisse

und der rekombinierten Menge ins Verhältnis setzt, eine Abweichung von unter 2 %. Dies bestätigt den geringen Messfehler der verwendeten Messtechnik und die Plausibilität der gewonnenen Versuchsdaten.

6 Kaminmodelloptimierung für REKO-DIREKT

Das in REKO-DIREKT implementierte Kaminmodell ist noch nicht ausreichend an experimentellen Daten validiert. Zwar basiert die bisherige Implementierung auf dem physikalischen Modell der Umlaufgleichung, doch stand bisher keine experimentell ermittelte Datenbasis zu Verfügung, an die die Berechnung angepasst werden konnte. Insbesondere bei unterschiedlichen geometrischen Variationen oder Drücken zeigt das Modell Schwächen, wie die Nachrechnungen von Experimenten aus der THAI-Versuchsanlage gezeigt haben [RSSA10]. Daher wird im Folgenden das Kaminmodell anhand der im Rahmen dieser Arbeit erstellen Datenbasis optimiert.

6.1 Optimierte Kaminmodell für REKO-DIREKT

Das Kaminmodell, das im Rahmen dieser Arbeit optimiert wird, beruht auf derselben Umlaufgleichung, die in Kapitel 2.2.2 hergeleitet wird. Unterschiede gibt es aber in der Definition einiger Variablen und Bezugspunkte wie z.B. die Dichten im Katalysatoreinschub, im Kamin oder in der umgebenden Atmosphäre. Daher wird im Folgenden zunächst auf die Berechnung der Umlaufgleichung eingegangen.

Die reibungsbehaftete Umlaufgleichung wird in Abschnitt 2.2.2 hergeleitet und berechnet den Massenstrom \dot{m} durch den Kamin gemäß Gleichung 2.20 und 2.21

$$\dot{m} = A_K \cdot \sqrt{\frac{g \cdot H \cdot (\rho_0 - \rho_k)}{\left(\frac{1}{\rho_k} - \frac{1}{2 \cdot \rho_0} + \underbrace{\frac{\xi \cdot H}{2 \cdot d_h \cdot \rho_k}}_{\omega_r} \right)}} \quad (6.1)$$

$$\omega_r = \sum \omega_i = \omega_e + \omega_k + \omega_a + \dots \quad (6.2)$$

in der Einheit $\omega_r, \omega_i = \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right],$

wobei die Indizes e/k/a wieder für Einlass, Kamin und Auslass stehen. Die Bestimmung der Reibungskoeffizienten wird ebenfalls im Rahmen der Optimierung behandelt.

Die Variablen, die für die Berechnung des Massenstroms benötigt werden, teilen sich

in geometrische Größen des Rekombinators und in physikalische Größen wie die unterschiedlichen Dichten auf. Abbildung 6.1 zeigt schematisch die Größen, die verwendet werden, und den Bereich, auf den sie sich beziehen.

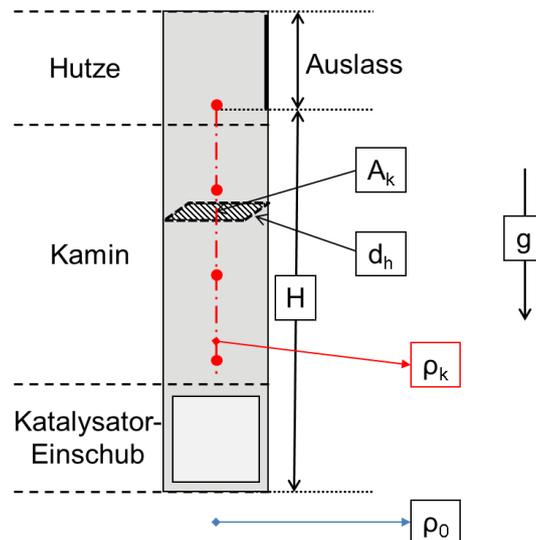


Abbildung 6.1: Größen des optimierten Kaminmodells

A_k ist die Querschnittsfläche im Kamin.

d_h ist der hydraulische Durchmesser des Kamins, der nach Gleichung 2.8 berechnet wird.

H ist die gesamte Höhe von Rekombinatoreinlass bis zur Unterkante des Auslasses. Zu einem mit Kaminaufsatz und Hutze ausgerüsteten Rekombinator kommen neben der Höhe des Kamins selbst noch sowohl die Höhe des Katalysatoreinschubs als auch der Hutzenmanschette. Dies entspricht der in Abschnitt 3.6 eingeführten „durchströmten Höhe“ (siehe Tabelle 3.8).

ρ_0 entspricht der Dichte am Rekombinatoreinlass. Sie berechnet sich aus dem idealen Gasgesetz und den dort herrschenden physikalischen Größen (T_e , x_{H_2} , M_i , p).

ρ_k entspricht der Dichte im Kamin. Sie berechnet sich ebenso wie die Dichte ρ_0 aus dem idealen Gasgesetz bzw. den dortigen physikalischen Größen, wobei die maximale Temperatur im Kamin bzw. Auslass verwendet wird ($T_k = \text{Maximum von TR-70/-71/-73/-74-RG}$).

ξ bezeichnet den Druckverlustbeiwert.

g ist die Gravitationskonstante mit dem Wert $9,81 \text{ m/s}^2$.

Für die Versuchsreihe R4-H mit der Rekombinatorvariante ohne Kamin und Hutze, die zur Abschätzung der Reibungsverluste am Einlass und zwischen den Blechen durchgeführt wird, ergeben sich die folgenden Größen (Abb. 6.2).

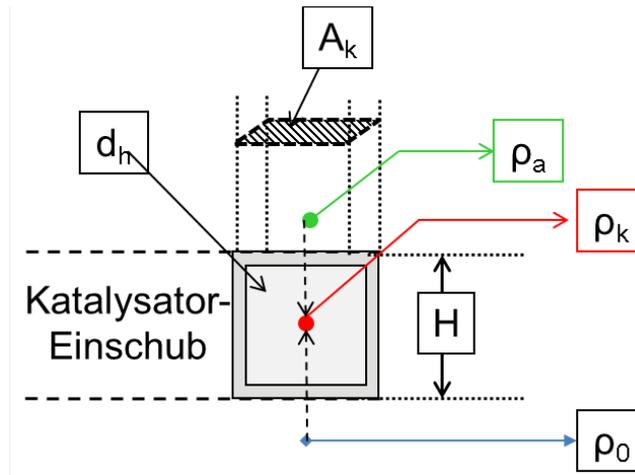


Abbildung 6.2: Benötigte Größen für das optimierte Kaminmodell (R4-H)

A_k ist die Querschnittsfläche des gesamten Katalysatoreinschubs. Sie entspricht der Fläche im Kamin der vorigen Definition.

d_k ist der hydraulische Durchmesser zwischen den Katalysatorblechen.

H ist die Höhe des Katalysatoreinschubs.

ρ_0 entspricht der Dichte am Rekombinatoreinlass.

ρ_k entspricht der mittleren Dichte zwischen den Katalysatorblechen. Sie berechnet sich aus dem Mittelwert der Temperatur und der Wasserstoffkonzentration am Einlass und am Auslass. Letztere wird anhand des Thermoelements TR-71-RG bestimmt.

ξ bezeichnet den Druckverlustbeiwert.

g ist die Gravitationskonstante.

6.1.1 Bestimmung des Reibungskoeffizienten am Einlass

Für den Reibungskoeffizienten bei einer Rohreinlaufströmung sind vor allem zwei Parameter von entscheidender Bedeutung. Zum einen ist dies das Verhältnis der Wanddicke des Rohrs zum Durchmesser des Einlasses (δ_r/D_e) und zum anderen die Entfernung des Einlasses von der Wand zum Durchmesser des Einlasses (a_w/D_e) [Ide08]. Abbildung 6.3 verdeutlicht diese Parameter anhand einer schematischen Darstellung (links) und zeigt die Übertragung auf die Rekombinatorvariante in REKO-4 (rechts). Der Einlasskoeffizient nimmt dabei in Abhängigkeit vom jeweiligen Parameter (Par. 1 / Par. 2) maximale

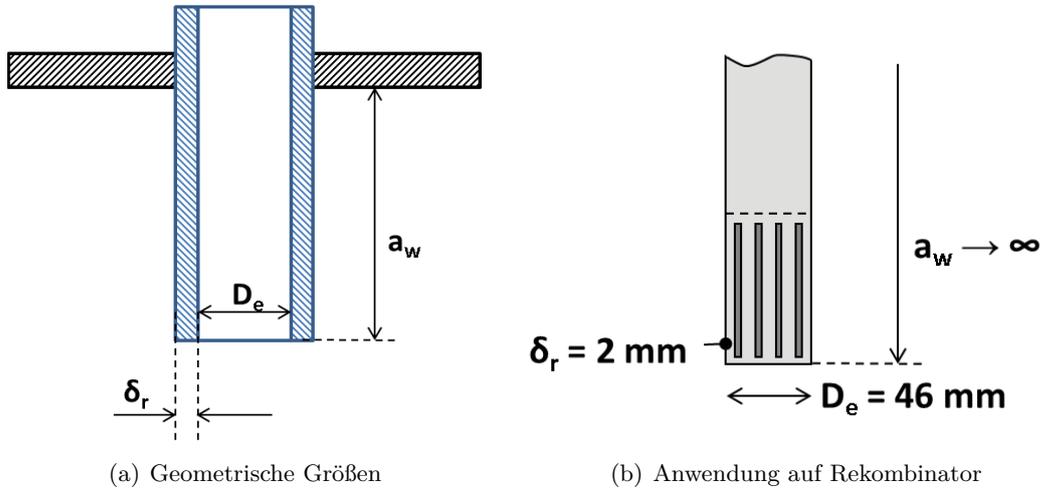


Abbildung 6.3: Schematische Darstellung der relevanten geometrischen Einlassgrößen (vgl. [Ide08])

bzw. minimale Werte an, die zwischen $0,5 \leq \xi_e \leq 1,0$ liegen.

$$\text{Par. 1: } \xi_{e,min} = 0,5 : \frac{\delta_r}{D_e} \rightarrow \infty \text{ (dickes Rohr)} \quad (6.3)$$

$$\text{Par. 2: } \xi_{e,min} = 0,5 : \frac{a_w}{D_e} \rightarrow 0 \text{ (Rohr bündig mit Wand)} \quad (6.4)$$

$$\text{Par. 1: } \xi_{e,max} = 1,0 : \frac{\delta_r}{D_e} \rightarrow 0 \text{ (scharfe Kante)} \quad (6.5)$$

$$\text{Par. 2: } \xi_{e,max} = 1,0 : \frac{a_w}{D_e} \rightarrow \infty \text{ (weit entfernte Wand)} \quad (6.6)$$

Bezogen auf den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Rekombinator ergeben sich die beiden Parameter unter Berücksichtigung der entsprechenden geometrischen Größen zu:

$$\text{Par. 1: } \frac{\delta_r}{D_e} = \frac{2 \text{ mm}}{46 \text{ mm}} \approx 0,043 \text{ Breite des Gehäuses} \quad (6.7)$$

$$\text{Par. 1: } \frac{\delta_r}{D_e} = \frac{2 \text{ mm}}{146 \text{ mm}} \approx 0,014 \text{ Tiefe des Gehäuses} \quad (6.8)$$

$$\text{Par. 2: } \frac{a_w}{D_e} \rightarrow \infty \quad (6.9)$$

Hierbei geht $a_w \rightarrow \infty$, da der Rekombinatoreinlass bzw. das Rekombinatorgehäuse nicht als Verlängerung eines Rohrstücks anzunehmen ist, das mit einer Länge a_w aus einer

Wand ragt (vgl. Abb. 6.3). Aus [Ide08] folgt damit, dass ξ_e zwischen 0,5 und 0,54 bezogen auf die Breite und zwischen 0,77 und 0,83 bezogen auf die Tiefe des Rekombinatorgehäuses ist.

Im Gegensatz zu den aus der Literatur bestimmten Reibungsbeiwerten kann der Reibungsbeiwert für den Katalysator ξ_{kat} unter Verwendung der Daten aus der Versuchsreihe R4-H explizit bestimmt werden. Dieser Reibungsbeiwert umfasst sowohl die Druckverluste im Einlass als auch die Verluste zwischen den Blechen und am Auslass. Zur Berechnung von ξ_{kat} wird die reibungsbehaftete Umlaufgleichung 2.20 herangezogen und für den Katalysatoreinschub mit dem Index „kat“ zu

$$\dot{m}_{kat} = A_{kat} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot H_{kat} \cdot (\rho_0 - \rho_{kat})}{\left(\frac{1}{\rho_{kat}} - \frac{1}{2 \cdot \rho_0} + \frac{\xi_{kat} \cdot H_{kat}}{2 \cdot d_h \cdot \rho_{kat}}\right)}} \quad (6.10)$$

erweitert. Sämtliche Größen bis auf den Reibungsbeiwert sind aus Versuchen bekannt. ρ_{kat} folgt dann aus dem idealen Gasgesetz, wobei die Temperatur und die Wasserstoffkonzentration über

$$T_k = \frac{T_e + T_a}{2} \quad (6.11)$$

und

$$x_{H2} = \frac{x_{H2,e} + \overbrace{x_{H2,a}}^{\approx 0}}{2} \quad (6.12)$$

berechnet werden. Die Auslasskonzentration wird dabei wieder mit $x_{H2} \approx 0$ angenommen, was bereits in der Bilanzierung von R4-M-06 überprüft wurde (siehe Abschnitt 4.3).

Der Massenstrom ist dabei über die gemessene Einlassgeschwindigkeit \bar{v}_{10mm} , ρ_e und den Einlassquerschnitt definiert. Dies lässt über

$$\xi_{kat} = \left[g \cdot H_{Kat} \cdot (\rho_e - \rho_{kat}) \cdot \left(\frac{A_{kat}}{\dot{m}_{kat}} \right)^2 + \frac{1}{2 \cdot \rho_e} - \frac{1}{\rho_{kat}} \right] \cdot \frac{2 \cdot d_h \cdot \rho_{kat}}{H_{kat}} \quad (6.13)$$

bzw.

$$\xi_{kat} = \left[\frac{g \cdot H_{Kat} \cdot (\rho_e - \rho_{kat})}{(\bar{v}_{10mm} \cdot \rho_e)^2} + \frac{1}{2 \cdot \rho_e} - \frac{1}{\rho_{kat}} \right] \cdot \frac{2 \cdot d_h \cdot \rho_{kat}}{H_{kat}} \quad (6.14)$$

eine explizite Lösung für den Reibungsbeiwert ξ_{kat} zu.

Um den Druckverlust am Einlass separat zu bestimmen, wird im Folgenden angenommen, dass sich der gesamte Reibungsbeiwert des Katalysatoreinschubs ξ_{kat} aus zwei Anteilen zusammensetzt. So besteht ξ_{kat} sowohl aus dem Beiwerte am Einlass ξ_e als auch aus dem Beiwert zwischen Blechen ξ_{bl} , der analog zum Reibungsbeiwert ξ des alten

6 Kaminmodelloptimierung für REKO-DIREKT

Kaminmodells berechnet wird (siehe Kap. 2.2.2). ξ_{bl} ist somit ebenfalls von der Geschwindigkeit bzw. der Reynolds-Zahl abhängig und folgt aus Gleichung 2.25 (laminar) oder 2.27 (turbulent). ξ_{kat} kann somit aus

$$\xi_{kat} = \xi_e + \xi_{bl} \quad (6.15)$$

bzw. ξ_e über

$$\xi_e = \xi_{kat} - \xi_{bl} \quad (6.16)$$

berechnet werden. Abbildung 6.4 zeigt für jeden Messpunkt der Versuchsreihe R4-H den berechneten Reibungsbeiwert ξ_e über der Einlassgeschwindigkeit \bar{v}_{10mm} .

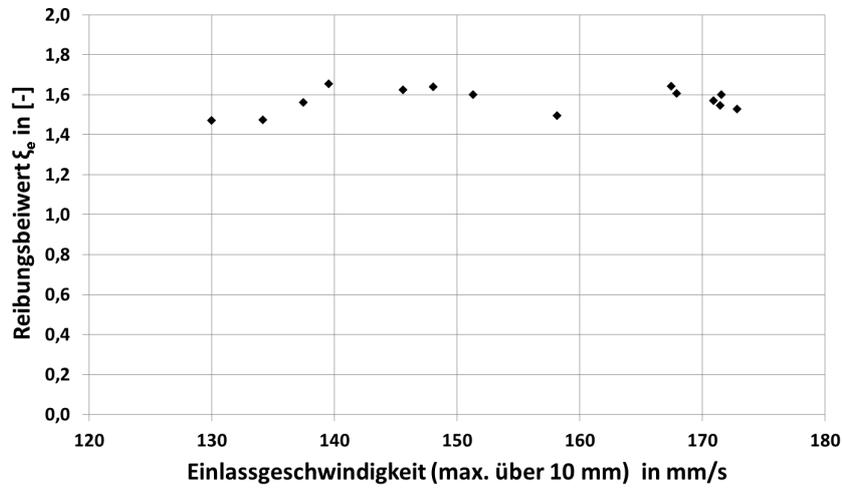


Abbildung 6.4: Bestimmung des Reibungsbeiwertes ξ_e aus R4-H

Der Reibungsbeiwert ist nahezu konstant und der Mittelwert kann zu $\xi_e = 1,57$ bestimmt werden. Somit kann der Reibungsverlust am Katalysatoreinschub ξ_{kat} bzw. der Reibungsterm durch die zwei Reibungsverlustbeiwerte ξ_e und ξ_{bl} über

$$\omega_{r,kat} = \frac{(\xi_e + \xi_{bl}) \cdot H_{kat}}{2 \cdot d_h \cdot \rho} \quad (6.17)$$

mit

$$\xi_e = 1,57 \quad (6.18)$$

für die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Rekombinatorgeometrie berechnet werden.

6.1.2 Bestimmung des Reibungskoeffizienten im Kamin

Eine alternative Berechnungsmethode von ξ_{lam} , ohne den Reibungskoeffizienten für Kreisrohre mit Hilfe des Korrekturfaktors $\varphi(S)$ für rechteckige Querschnitte anzupassen, ist die Annahme eines ebenen Spalts. Sie stellt eine exakte Lösung der Navier-Stokesschen Bewegungsgleichung dar [Tru96]. Dies ermöglicht die Berechnung der Spaltreibungszahl $\xi_{lam,s}$ (vgl. hierzu die Rohrreibungszahl $\xi_{lam,k}$) über

$$\xi_{lam,s} = \frac{96}{Re} \quad (6.19)$$

In Anlehnung daran kann für eine voll ausgebildete turbulente Strömung in einem glatten Rohr die Spaltreibungszahl $\xi_{turb,s}$ über

$$\frac{1}{\sqrt{\xi_{turb,s}}} = 2,0 \cdot \lg \left(Re \cdot \sqrt{\xi_{turb,s}} \right) - 1,0 \quad (6.20)$$

iterativ bestimmt werden. Die Unterschiede belaufen sich im Vergleich zur Berechnung eines kreisrunden Rohrs ohne Korrekturfaktor $\varphi(s)$ auf einen ca. 1,5-fach höheren Reibungskoeffizienten im laminaren Bereich. Im turbulenten Bereich sind keine großen Abweichungen zu erkennen [Tru96]. Zudem ist auch die Annahme eines „geraden Spalts“ nur bedingt anwendbar für das Kamingehäuse. Daher wird auch im neuen Kaminmodell mit den bereits hergeleiteten Reibungstermen gemäß Gleichung 2.25 und 2.27 gerechnet, die in Abschnitt 2.2.2 erläutert werden.

Im Kamin des Rekombinators verlaufen sowohl die Thermoleitungen der Rekombinatorbleche als auch die Kaminsensoren sowie deren Vorrichtung zur Positionierung im Kamin. Daher wird für den Kamin ein zusätzlicher Reibungskoeffizient $\xi_{kam,zus}$ eingeführt, der den zusätzlichen Druckverlust aufgrund der Einbauten im Kamin berücksichtigt. Die Addition dieser Koeffizienten führt über

$$\xi_{kam,ges} = \xi_{kam} + \xi_{kam,zus} \quad (6.21)$$

zum Reibungskoeffizienten $\xi_{kam,ges}$, der für das Kaminmodell verwendet wird. Eine Optimierung anhand ausgewählter Daten der REKO-4 Datenbank zeigt, dass der druckunabhängige Reibungskoeffizient $\xi_{kam,zus}$ mit

$$\xi_{kam,zus} = 0,3 \quad (6.22)$$

anzunehmen ist.

6.1.3 Bestimmung des Reibungskoeffizienten am Auslass

Bei der Ausströmung einer Fluidströmung ins Freie geht die gesamte kinetische Energie des austretenden Strahls verloren. Im Falle einer laminaren Strömung nimmt der Auslasskoeffizient dabei Werte von $\xi_{a,lam} \approx 2$ an, für turbulente Strömungen $\xi_{a,turb} \approx 1$,

wobei beide Fälle als Ausströmung in einen großen Raum interpretiert werden [Tru96]. In [Wil00] wird die Ausströmung ebenfalls als Grenzfall einer „plötzlichen Erweiterung (engl.: sudden expansion)“ diskutiert, wobei ebenfalls $\xi_a \approx 1$ angenommen wird. Dennoch scheinen diese Annahmen für den Rekombinator nicht immer vollständig erfüllt zu sein. Auch bei der Bestimmung des Auslasskoeffizienten ξ_a nach [Ide08] ist kein eindeutiger Vergleich mit den dortigen Modellbeispielen möglich. Für den Auslass des Rekombinators können hierbei verschiedene Modelle herangezogen werden, um den Koeffizienten zu bestimmen. Tabelle 6.1 zeigt eine Liste der anwendbaren Modellbeispiele und gibt somit einen Bereich an, in dem der Auslasskoeffizient unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen angenommen werden kann.

Modell	Positive Annahme	Negative Einschränkung	Auslasskoeffizient
Gleichförmige Geschwindigkeitsverteilung	Anwendbar bei turbulenten Strömungen	Einschränkungen bei laminaren Strömungen	$\xi_a = 1,0$ ([Ide08]: Diag. 11-1)
Asymetrische Geschwindigkeitsverteilung	Anwendbar bei laminaren Strömungen	Nur bedingt vergleichbar mit Auslassströmung (siehe Abschn. 5.4)	$\xi_a = 3,67$ ([Ide08]: Diag. 11-1)
Auslass aus rechtwinkligem Krümmer	Berücksichtigung der 90°-Umlenkung „Plane Elbow“	Grenzfall bzgl. des Auslasskanals	$\xi_a = 2,7$ $l_1/b_0 = 0$ $b_1/b_0 = 1$ ([Ide08]: Diag. 11-16)
Dünnwandiger Verteiler mit perforiertem seitlichen Auslass	Berücksichtigung der 90°-Umlenkung	Grenzfall bzgl. der Perforation am Auslass	$\xi_a = 2,92$ $F_{or}/F_o = 1$ ([Ide08]: Diag. 11-19)

Tabelle 6.1: Bestimmung des Reibungskoeffizienten für die Auslassströmung nach [Ide08]

Aus den Quellen [Tru96], [Wil00] und [Ide08] wird deutlich, dass der Reibungskoeffizient in einem weiten Bereich zwischen 1 - 3,67 liegen kann. Vor diesem Hintergrund zeigen Berechnungen im Vergleich mit der REKO-4-Datenbank, dass für einen Reibungsbeiwert von $\xi_a = 3,0$ mit den Experimenten übereinstimmende Ergebnisse erzielt werden. Dieser liegt innerhalb der in [Ide08] genannten Grenzen. Im Vergleich zu den Angaben in [Tru96] und [Wil00] ist der Reibungskoeffizient am Auslass allerdings höher. Dies wird damit erklärt, dass in den dortigen Annahmen z.B. keine 90°-Umlenkung im Bereich des Auslasses berücksichtigt wird, die jedoch zu einem zusätzlichen Druckverlust führt.

6.2 Validierung des neuen Kaminmodells anhand der Datenbasis REKO-4

Die aus dem Massenstrom berechnete Geschwindigkeit des neuen Kaminmodells wird mit der experimentell bestimmten Geschwindigkeit \bar{v}_{10mm} verglichen. Der Vergleich wird dabei wieder separat für die verschiedenen Versuchsreihen bzw. Kaminhöhen und Versuchsdrücke durchgeführt. Zuerst werden sämtliche Kaminhöhen bei 1,0 bar miteinander verglichen. Anschließend folgt der Vergleich bei 1,5 bar und 2,0 bar mit dem 300-mm- und 850-mm-Kamin.

6.2.1 Kaminmodellvalidierung für 1,0 bar

Abbildung 6.5 zeigt den Vergleich zwischen den berechneten und den experimentell gewonnenen Ergebnissen für die Versuchsreihen R4-J, R4-L und R4-M bei einem Behälterdruck von 1,0 bar_{abs}. Die experimentell gemessene Einlassgeschwindigkeit (Abszisse) ist

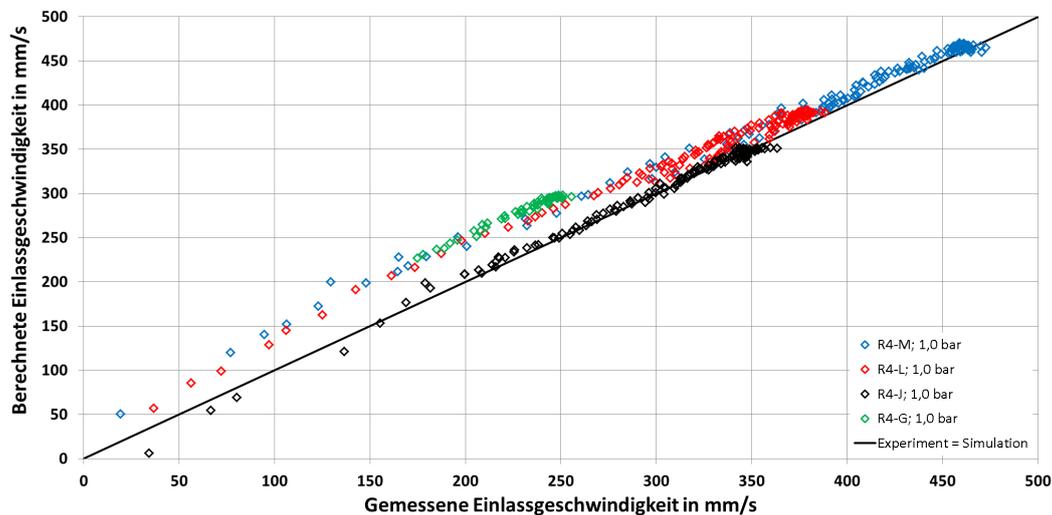


Abbildung 6.5: Vergleich zwischen gemessener und berechneter Einlassgeschwindigkeit (R4-G: 150 mm/ -J: 300 mm/ -L: 450 mm/ -M: 850 mm)

gegen die mit dem Kaminmodell berechnete Einlassgeschwindigkeit (Ordinate) aufgetragen. Auf der durch den Ursprung verlaufenden Gerade sind die beiden Geschwindigkeiten identisch. Das Diagramm zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation, wobei unterhalb von 250 mm/s die Abweichungen etwas größer sind. Diese sind erneut auf die Bedingungen zurückzuführen, die kurz vor Ende der Rekombinationsreaktion vorliegen. Zudem fällt auf, dass die Abweichungen für den kleinsten Kamin (R4-G, grün) am größten sind. Hier ergeben sich über den gesamten Messbereich maximale Abweichungen von ca. 50 mm/s, was einer Abweichung der berechneten Daten zum Experiment von 25 % entspricht. Diese Abweichung wird damit erklärt, dass für

den 150-mm-Kamin die Modellannahmen bzgl. der Umlaufgleichung ungenau werden. Hierbei muss beachtet werden, dass das neue Kaminmodell die Höhe des Kamins vom Einlass bis zur Unterkante des Auslasses berechnet. Dabei wird aber vernachlässigt, dass die Temperatur des Gasgemisches am Einlass noch ungefähr der Umgebungstemperatur bzw. der Dichte ρ_0 entspricht. Erst zwischen den Katalysatorblechen erwärmt sich das Gas durch Konvektion, was folglich zum Auftrieb oder Naturzug führt. Das Kaminmodell berechnet aber die Dichtedifferenz ($\rho_0 - \rho_k$) direkt vom Einlass des Rekombinators an. Somit ist die Kaminhöhe im berechneten Modell leicht höher und dementsprechend die Geschwindigkeit überschätzt. Bei den höheren Kaminaufsätzen sinkt dieser Einfluss, so dass die Auswirkungen auf die berechneten Geschwindigkeiten marginal sind. Im Folgenden wird dies anhand einer Optimierung in Bezug auf Kaminmodelle mit kleinem Kamin untersucht.

6.2.2 Optimiertes Kaminmodell für R4-G (1 bar)

Hierfür wird das bereits in Abbildung 6.2 diskutierte Modell mit leicht geänderten Parametern bzw. Bezugsgrößen verwendet. Insbesondere die Dichte ρ_k im Kamin wird hierbei wieder aus den Mittelwerten der Einlass- und Auslassgrößen (Temperatur und Gaszusammensetzung) am Rekombinator berechnet. Die daraus resultierende mittlere Dichte zwischen den Blechen ist somit in erster Näherung die treibende Dichte über die gesamte Katalysatoreinschubhöhe.

Abbildung 6.6 zeigt die experimentell ermittelte Geschwindigkeit gegen die berechnete Geschwindigkeit des modifizierten Kaminmodells, das für kleine Kaminhöhen optimiert wurde. Daraus wird deutlich, dass die Daten der Versuchsreihe R4-G besser wiederge-

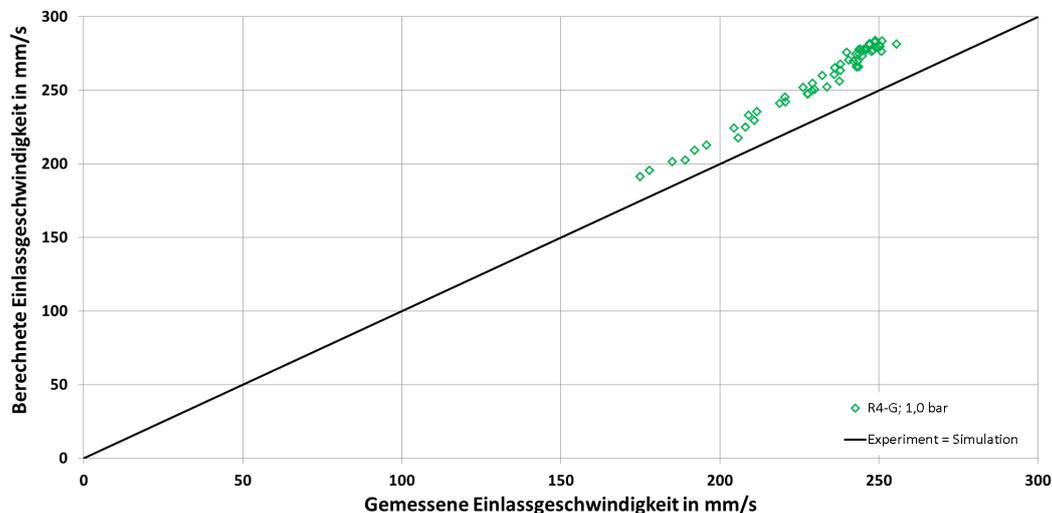


Abbildung 6.6: Vergleich zwischen gemessener und berechneter Einlassgeschwindigkeit (R4-G: 150 mm)

geben werden. Die Abweichungen können mit bis zu 30 mm/s zwar fast halbiert, jedoch nicht vollständig eliminiert werden.

6.2.3 Vergleich bei 1,5 bar und 2,0 bar

Der Vergleich bei unterschiedlichen Drücken wird für die Versuche mit dem 300-mm-Kamin (R4-J) und dem 850-mm-Kamin (R4-M) durchgeführt. Abbildung 6.7 und 6.8 zeigen die gemessene Einlassgeschwindigkeit gegen die berechnete Einlassgeschwindigkeit bei Behälterdruck von 1,5 bar und 2,0 bar.

Der Vergleich bei 1,5 bar zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem Kaminmodell und den gemessenen Werten. Die größten Abweichungen treten wieder im unteren Geschwindigkeitsbereich kurz vor Versuchsende auf. Hier sind Abweichungen von bis zu 80 mm/s zu erkennen. Im oberen Geschwindigkeitsbereich wird deutlich, dass das Kaminmodell die Geschwindigkeit für beide Kaminhöhen leicht unterschätzt. So liegen die Abweichungen bei hohen Wasserstoffkonzentrationen sowohl bei R4-J als auch R4-M im Bereich von ca. 30 mm/s. Bezogen auf die experimentellen Ergebnisse liegt die Abweichung somit immer noch unter 10 %.

Die Abweichungen bei steigendem Versuchsdruck wurden ebenfalls untersucht und konnten unter Verwendung eines zusätzlichen, druckabhängigen Reibungsbeiwerts noch weiter reduziert werden. Da dieser Ansatz rein empirisch ist und nicht auf einem physikalischen Modell beruht, wird auf die Verwendung einer solchen Korrektur im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

6.3 Berechnung eines Versuchspunktes der THAI-Versuchsanlage

Die Anwendbarkeit des optimierten Kaminmodells wird anhand von Messdaten aus der THAI-Anlage an einem kommerziellen Rekombinator überprüft (siehe Abschnitt 2.1.2). Das neue Kaminmodell wird dabei anhand eines Messpunktes des Versuchs HR-2 überprüft. Diese Untersuchungen verwenden einen Rekombinator des Typs FR-380 der Fa. AREVA. Aus messtechnischen Gründen wurde der THAI-Rekombinator mit zusätzlichen Modifikationen versehen, die das Betriebsverhalten beeinflussen (Abb. 6.9). In Tabelle 6.2 sind zudem die geometrischen Größen aufgelistet, die zur Berechnung im Kaminmodell benötigt werden bzw. berücksichtigt werden müssen. Der Rekombinator ist durch eine Trennwand im Gehäuse halbiert, so dass nur 50 % der Querschnittsfläche aktiv ist. Die Katalysatorbleche im abgetrennten Teil des Rekombinators wurden entfernt. Dennoch muss beachtet werden, dass die Masse des Gehäuses nach wie vor der Masse des originalen Rekombinators entspricht und somit die Erwärmung des Gehäuses mit beeinflusst. Zudem ist der Einlasstutzen auffällig, der zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit Hilfe eines Flügelradanemometers installiert worden ist.

6 Kaminmodelloptimierung für REKO-DIREKT

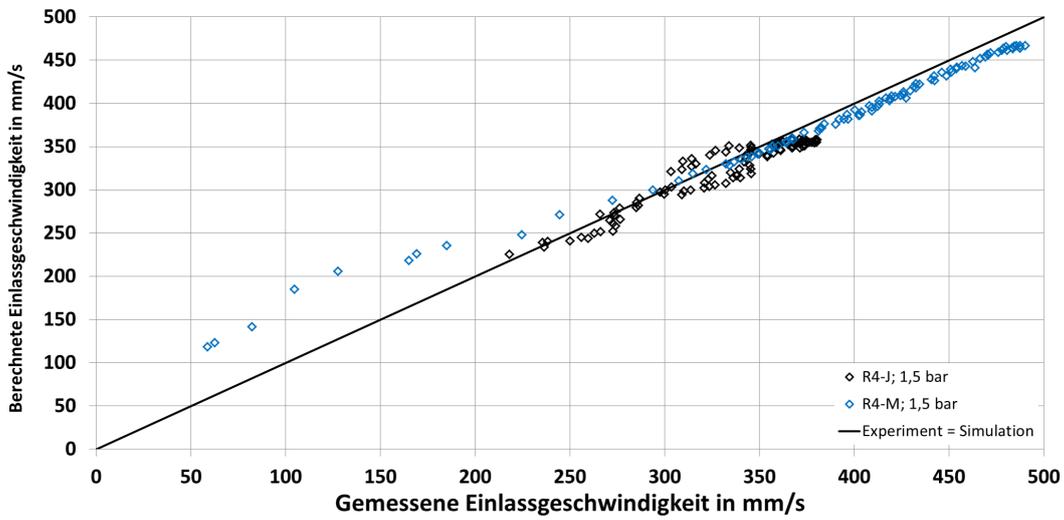


Abbildung 6.7: Vergleich zwischen gemessener und berechneter Einlassgeschwindigkeit bei 1,5 bar (R4-J: 300 mm/ -M: 850 mm)

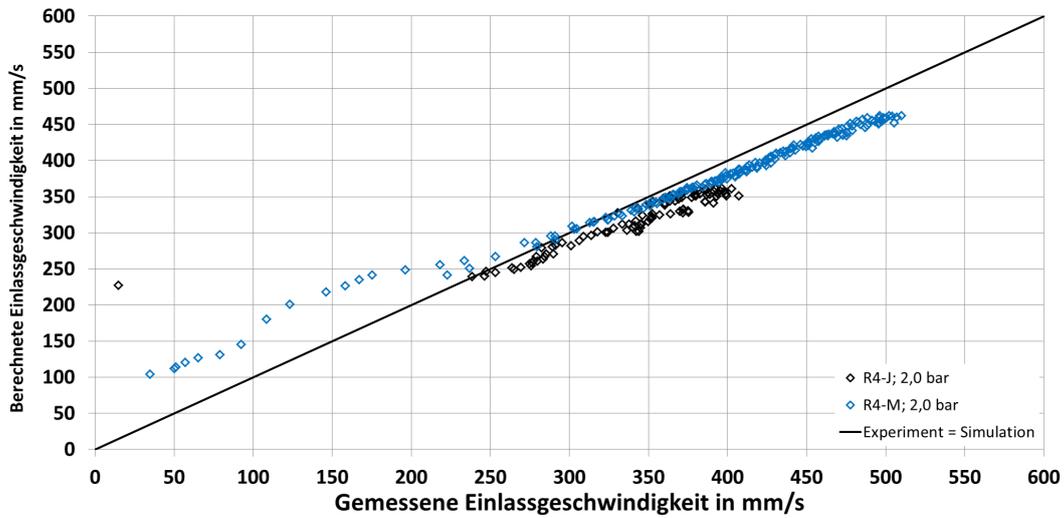


Abbildung 6.8: Vergleich zwischen gemessener und berechneter Einlassgeschwindigkeit bei 2,0 bar (R4-J: 300 mm/ -M: 850 mm)

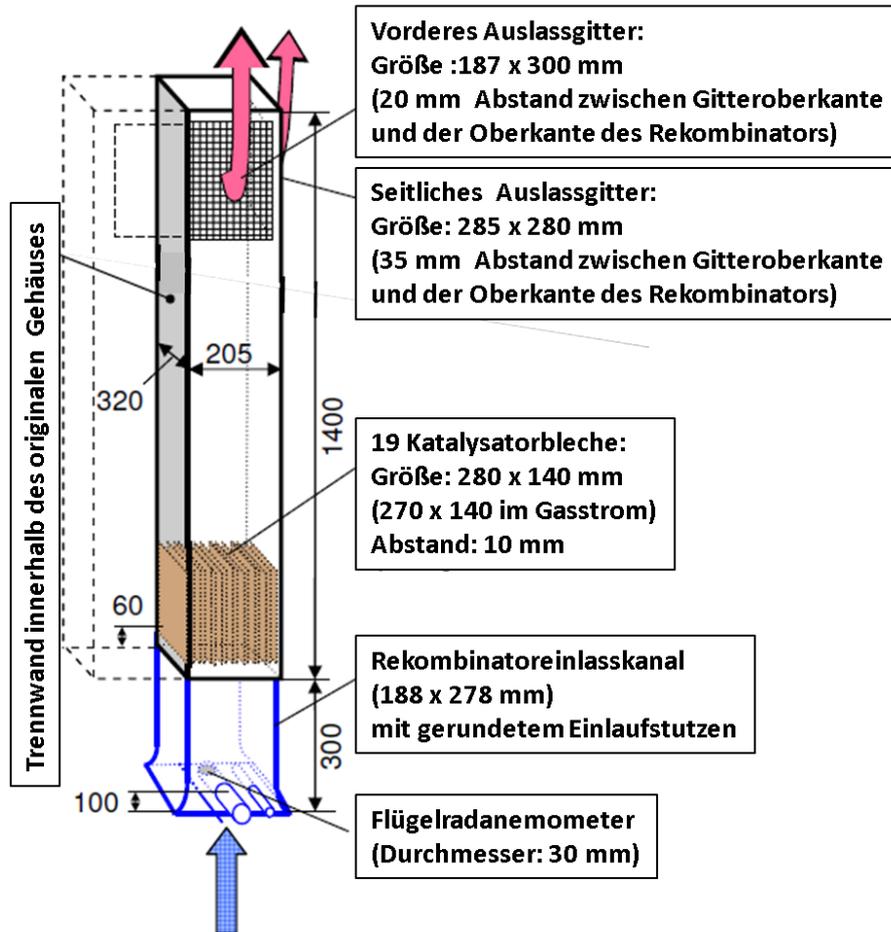


Abbildung 6.9: Im Rahmen des Versuches HR-2 in der THAI-Anlage verwendeter Rekombinator [Kan09]

Die Unterschiede zwischen diesem Rekombinator und der in REKO-4 verwendeten Rekombinatorvariante werden gesondert in Abschnitt 6.3.1 diskutiert. Der Gasaustritt des THAI-Rekombinators erfolgt zudem über einen vorderen und einen seitlichen Auslass, die sich auch in ihrer jeweiligen Größe unterscheiden. Dies hat Auswirkungen auf die Auslassbedingungen bzw. die dortigen Druckverluste.

Der Versuch HR-2 unterteilt sich in mehrere Phasen, in denen unterschiedliche Mengen an Wasserstoff in die THAI-Anlage eingespeist wurden und die Wasserstoffrekombination untersucht wurde. Der betrachtete Messpunkt, der mit dem neuen Kaminmodell im Rahmen dieser Arbeit nachgerechnet werden soll, liegt zeitlich mit $t = 1700 \text{ s} = 28,5 \text{ min}$ innerhalb der zweiten Testphase. Die Wasserstoffeinspeisung in den Versuchsbekälter der THAI-Anlage ist seit ca. 8 min beendet und im Rekombinator läuft die Rekombinationsreaktion bereits seit einem längeren Zeitraum, so dass sich die Betriebs-

Abmessungen des Rekombinators	FR-380 (halbiert)
Gesamthöhe des Rekombinators (ohne Einlassstutzen)	1400 mm
Breite des Gehäuses	205 mm
Tiefe des Gehäuses	320 mm
Höhe des Kamins (Oberkante Blech bis Unterkante Auslass)	880 mm
Blechtiefe	280 mm
Blechhöhe	280 mm
Abstand der Bleche	9,8 mm
Höhe des vorderen Auslasses	300 mm
Breite des vorderen Auslasses	187 mm
Höhe des seitlichen Auslasses	285 mm
Breite des seitlichen Auslasses	280 mm
Anzahl der Katalysatoren	19 Bleche
Höhe des Einlassstutzens	300 mm
Höhe Einlassstutzen bis zur Blechunterkante	360 mm

Tabelle 6.2: Stationäre Daten und geometrische Größen des Rekombinators [Kan09]

bedingungen einem quasistationären Verhalten annähern. Die Versuchsbedingungen, die zu diesem Zeitpunkt am Behälter bzw. am Rekombinator herrschen, sind in Tabelle 6.3 aufgelistet. Die stationären Daten dieses THAI-Versuchs, wie z.B. die Temperaturen im Auslass, entsprechen denen, die bereits in den Versuchen in REKO-4 beobachtet worden sind. Nur die Einlassgeschwindigkeit, die mit dem Flügelradanemometer im Einlassstutzen gemessen wurde, ist doppelt so hoch wie die Einlassgeschwindigkeiten, die am Jülicher Rekombinator herrschen.

Im neuen Kaminmodell wird die Kaminhöhe als die Entfernung zwischen dem Einlass des Rekombinators und der Unterkante des Auslasses definiert. Die Dichte im Einlassstutzen entspricht bis zur Unterkante der Rekombinatorbleche jedoch noch ungefähr der Umgebungsdichte und unterstützt somit kaum einen Naturzug. Dieser Teil des Gehäuses wird daher nicht auf die effektive Kaminhöhe angerechnet, so dass diese nur 1020 mm beträgt.

Zeitpunkt	t = 1700 s
Druck p_0	1,098 bar
Temperatur T_0	31,97 °C
Eintrittsgeschwindigkeit v_e	1129 mm/s
H ₂ -Konzentration am Einlass	4,04 Vol.-% H ₂

Tabelle 6.3: Randbedingungen des verwendeten Messpunkts während des Versuchs HR-2 in der THAI-Anlage [Kan09]

6.3.1 Vergleich der Rekombinatorvarianten (THAI und REKO-4)

Der in der THAI-Anlage verwendete Rekombinator im AREVA-Design ist vom grundsätzlichen Aufbau her gleich mit der Rekombinatorvariante in REKO-4. Daher kann der Ansatz, der zur Berechnung des Massenstroms mit Hilfe der Umlaufgleichung verwendet wird, auch für den stationären Messpunkt der THAI-Anlage verwendet werden. Doch unterscheiden sich die beiden Rekombinatorvarianten in Einzelheiten, die den Massenstrom beeinflussen. Hierunter fallen z.B. der Einlass- und Auslassbereich oder der Strömungsweg im Inneren des Kamins. Dies hat Auswirkungen auf die Reibungskoeffizienten in dem jeweiligen Bereich und muss dementsprechend angepasst werden. Im Folgenden werden diese Aspekte diskutiert, um das neue Kaminmodell so auf die Randbedingungen des THAI-Rekombinators anzupassen.

Der Einlass der beiden Rekombinatoren (THAI und REKO-4) unterscheidet sich sowohl in der Form als auch in der Entfernung bis zur Unterkante der Katalysatoren. Während die Blechunterkante im REKO-4-Modell nahezu mit der Einlasskante abschließt, ist am THAI-Rekombinator der bereits angesprochene Einlassstützen installiert. Zwar wird die Stützhöhe nicht zur effektiven Kaminhöhe hinzugerechnet, doch führt der gut gerundete Einlasstrichter im Gegensatz zum eher scharfkantigen Einlass in REKO-4 zu erheblich niedrigeren Druckverlusten. Dadurch ist eine Reduktion des Widerstandsbeiwerts ξ_e von 1,0 bis auf 0,04 - 0,05 möglich [Ide08]. Dies gilt allerdings nur für kreisrunde Einlässe. Zudem ist im Einlass das Flügelradanemometer installiert, das ebenfalls einen Druckverlust verursacht. Aus diesem Grund ist die Reduktion der Druckverluste am Einlass in Form eines Reibungsbeiwerts ξ_{kat} , wie er anhand der Versuchsreihe R4-H bestimmt worden ist, für die THAI-Versuche nicht zulässig. Daher wird der Druckverlust zwischen den Blechen gemäß dem alten Modell berechnet und zusätzlich ein Druckverlust für den Einlass angenommen. In Bezug auf die THAI-Versuche wird im Rahmen dieser Arbeit davon ausgegangen, dass sich der Reibungsbeiwert für einen gut gerundeten, rechteckigen Einlass durch die Einbauten vergrößert und mit $0,04 \leq \xi_e \leq 0,5$ angenommen werden kann.

Im Kamin sind keine messtechnischen Einbauten vorhanden, die die Strömung durch das Gehäuse stören können. Daher ist hier auch kein zusätzlicher Verlustterm nötig und der Reibungsbeiwert für den Kamin wird durch die in Abschnitt 2.2.2 hergeleiteten

Druckverlustterme ausreichend beschrieben.

Die zwei Auslassöffnungen des THAI-Modells führen ebenfalls zu einem geringeren Druckverlust im Vergleich zum REKO-4-Modell, da eine sehr viel größere Auslassfläche vorhanden ist. Insbesondere der seitliche Auslass, der flächenmäßig sogar größer ist als der Frontauslass, führt zu geringeren Ausströmverlusten, die jedoch nicht kleiner $\xi_{a,min} = 1$ werden (vgl. hierzu Tabelle 6.1). Daher wird im Rahmen des neuen Kaminmodells mit einem Reibungsbeiwert bzw. Auslasskoeffizienten mit $\xi_a > 1$ gerechnet.

Tabelle 6.4 fasst die Diskussion der Reibungsbeiwerte zusammen und gibt sowohl Maximal- als auch Minimalwerte an, die in der Berechnung mit dem neuen Kaminmodell verwendet werden.

Reibungsbeiwert ξ	Minimum - Maximum	Bemerkung
Einlass	0,04 - 0,5	gerundeter Einlass
Kamin	ohne $\xi_{kam,zus}$ in Abhängigkeit von Re	keine Einbauten im Kamin, siehe Herleitung 2.2.2
Auslass	1 - 3	vordere und seitliche Auslassöffnung

Tabelle 6.4: Minimale und maximale Werte für die Reibungskoeffizienten des THAI-Rekombinators

6.3.2 Berechnung des THAI-Rekombinators mit neuem Kaminmodell

Die Literaturwerte für die Reibungskoeffizienten geben einen Bereich an, in dem die Druckverluste liegen können. Daher wird nun die Geschwindigkeit am Einlass sowohl unter Verwendung der Extremwerte für ξ_e bzw. ξ_a gerechnet als auch mit optimierten Parametern, so dass die berechnete Geschwindigkeit mit den experimentellen Daten übereinstimmt. Anschließend werden die optimierten Reibungsbeiwerte in Bezug auf die Angaben in der Literatur hin verglichen und auf Plausibilität hin überprüft. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.5 für die unterschiedlichen Annahmen bzgl. der Reibungskoeffizienten angegeben.

Die Geschwindigkeiten, die in der THAI-Anlage gemessen worden sind, liegen zwischen den berechneten Werten des neuen Kaminmodells, die anhand der Extremwerte aus der Literatur ermittelt worden sind. Die maximalen Reibungsbeiwerte führen also zu niedrigeren, die minimalen zu höheren Geschwindigkeiten. Das bedeutet, dass die Reibungsbeiwerte so optimiert werden können, dass sie innerhalb des in der Literatur genannten Bereichs liegen. Hierbei wird aber auch deutlich, dass die experimentellen Daten sich nur um ca. 2 % vom Kaminmodell unter Verwendung der minimalen Annahmen für die Reibung unterscheiden. Anscheinend führen die Anbauten wie z.B. der

Experimentelle Daten		Gemessene Geschwindigkeit	
THAI-Versuch	HR-2 (t = 1700s)	1129 mm/s	
Modellannahmen	Werte für Reibungsbeiwert ξ_e/ξ_a	Berechnete Geschwindigkeit	Relative Abweichung
Minimale Reibungskoeffizienten	$\xi_e = 0,04$ $\xi_a = 1,0$	1153 mm/s	+ 2,1 %
Maximale Reibungskoeffizienten	$\xi_e = 0,5$ $\xi_a = 3,0$	708 mm/s	- 37,3
Definierter Schätzwert	$\xi_e = 0,1$ $\xi_a = 1,2$	1056 mm/s	-6,5 %
Optimierung (1) $\xi_{e,min} = 0,04$	$\xi_e = 0,04$ $\xi_a = 1,1$	1130 mm/s	< 0,1 %
Optimierung (2) $\xi_{a,min} = 1,0$	$\xi_e = 0,06$ $\xi_a = 1,0$	1133 mm/s	< 0,4 %

Tabelle 6.5: Vergleich zwischen den berechneten Geschwindigkeiten und den experimentellen Daten (THAI)

Einlaufstutzen dazu, dass die Druckverluste im THAI-Rekombinator minimiert werden.

Im Rahmen der Annahme „definierter Schätzwert“ in Tabelle 6.5 ist der Reibungsbeiwert ξ_e für den Einlass mit 0,1 mehr als verdoppelt worden, um den Einfluss des Anemometers und dem rechteckigen Querschnitt Rechnung zu tragen. Ebenso wurde der Auslass geringfügig angehoben, da auch hier trotz der großen Auslassfläche mit höheren Strömungswiderständen gerechnet werden muss. Diese Annahmen sind nicht empirisch belegbar und stellen nur eine Vermutung für den hypothetischen Fall dar, dass die Einlassgeschwindigkeit, die in diesem Fall experimentell gemessen worden ist, nicht bekannt sein sollte. Das Ergebnis zeigt, dass diese „geschätzte“ Annahme die Geschwindigkeit leicht unterschätzt.

Dahingegen wurden die Reibungsbeiwerte anschließend so optimiert, dass die experimentellen Daten bestmöglich wiedergegeben werden. Dabei wurde der Reibungsbeiwert nur auf die Nachkommastelle genau bestimmt, wie dieser in der Literatur auch angegeben wird (ξ_e/ξ_a : 2 bzw. 1 Nachkommastellen). Die erste Optimierung geht von einem minimalen Reibungskoeffizienten am Einlass aus und passt den Koeffizienten am Auslass an. Die zweite Optimierung verfährt dementsprechend umgekehrt. Somit kann das neue Kaminmodell, das anhand der REKO-4 Datenbank entwickelt worden ist, auch für experimentelle Ergebnisse verwendet werden, die anhand eines modifizierten, handelsüblichen

Rekombinator im AREVA-Design in der THAI-Anlage gewonnen worden sind.

Beide Optimierungsvarianten liefern vertretbare Werte für ξ_e bzw. ξ_a , da sie in Bereichen liegen, die ebenfalls in der Literatur zu finden sind. Dennoch ist der Einfluss des Stutzens nicht restlos geklärt. So ist es z.B. denkbar, dass durch Wärmeleitungs- und Strahlungseffekte Teile des Stutzens erwärmt werden, die das einströmende Gas schon vor Erreichen der Katalysatorbleche erhitzen. Abbildung 6.10 verdeutlicht dies anhand einer Skizze. Eine Erwärmung des Gasgemisches schon vor den Katalysatorblechen würde

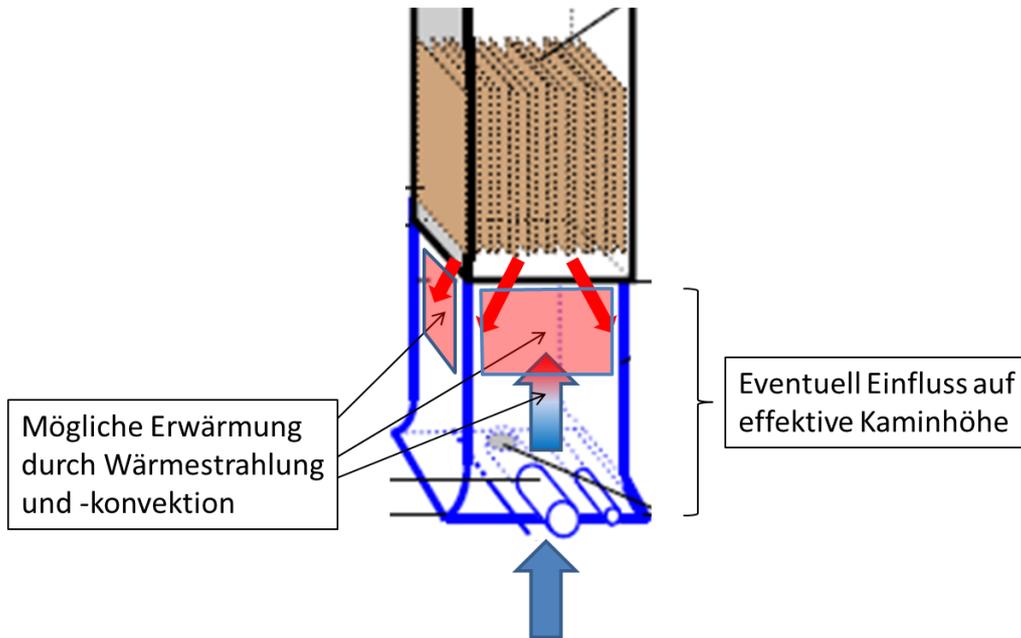


Abbildung 6.10: Möglicher Einfluss von Wärmestrahlung und -konvektion auf die effektive Kaminhöhe (vgl. [Kan09])

zu einer dementsprechenden Dichteverringering führen, so dass der Stutzen z.T. als Kamin wirkt. Hierdurch würde die effektive Kaminhöhe steigen und aufgrund dessen auch die gemessene Geschwindigkeit am Einlass. Dies könnte die niedrigen Reibungsbeiwerte erklären.

6.4 Nachrechnung von OECD/NEA-THAI-Experimenten

Das erweiterte und optimierte Kaminmodell aus Kap. 6.1 wurde nach Abschluss der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Validierungsrechnungen in das Programm REKO-DIREKT (siehe Kap. 2.2.1) implementiert. REKO-DIREKT wurde anschließend dazu verwendet, die im Rahmen des OECD/NEA-THAI Projekts durchgeführten Experimente in der THAI-Anlage (siehe Kap. 2.1.2) nachzurechnen [RKS⁺14]. Diese Nachrechnungen beinhalten insgesamt 35 Versuche, die sowohl bei unterschiedlichen Drücken (1 - 3

bar_{abs}) als auch bei unterschiedlichen Dampfkonzentrationen (0 - 60 Vol. %) durchgeführt worden sind. Zudem wurden zwei unterschiedliche Rekombinatorgeometrien (AREVA-Design und AECL-Design) verwendet. Der Rekombinator im AREVA-Design, in dessen Anlehnung der im Rahmen dieser Arbeit verwendete kleinskalige Rekombinator ausgeführt ist, wurde bereits in Kap. 2.1 beschrieben. Der AECL-Rekombinator hingegen unterscheidet sich deutlich in der konstruktiven Ausführung des Gehäuses und der Katalysatoranordnung. Zum einen verfügt die Version über eine geringere Kaminhöhe (30 cm statt 88 cm) und eine breitere Auslassöffnung als das AREVA-Design (33,5 cm statt 19 cm). Zum anderen ist der Abstand zwischen den AECL-Katalysatorblechen mit ca. 2 cm doppelt so groß.

Alle Nachrechnungen wurden mit identischen Modellparametern durchgeführt, so dass nur die jeweilige Rekombinatorgeometrie an den im Experiment verwendeten Rekombinator angepasst wurde. Für die transiente Berechnung sind somit der Behälterdruck sowie die Gaszusammensetzung und -temperatur am Rekombinatoreinlass die einzigen variablen Eingabegrößen. Die Ergebnisse werden nachfolgend zusammengefasst, wobei aufgrund vertragsrechtlicher Vorgaben des OECD/NEA-Projektes nur qualitative Verläufe gezeigt werden dürfen.

In Abbildung 6.11 ist beispielhaft für zwei Versuche der Vergleich zwischen dem gemessenen und dem mit REKO-DIREKT berechneten Geschwindigkeitsverlauf für beide Rekombinatorgeometrien dargestellt. Sowohl für den AREVA-Rekombinator (links) als auch für den AECL-Rekombinator (rechts) wird der gemessene Verlauf (blau) durch den berechneten Verlauf (schwarz) gut wiedergegeben. Zwar kann die Startverzögerung des AECL-Rekombinators zu Beginn der Rekombinationsreaktion in Test HR-19 vom Simulationsprogramm aus modelltechnischen Gründen nicht wiedergegeben werden, jedoch ist die Übereinstimmung während des darauf folgenden Rekombinatorbetriebs wieder sehr gut.

Abbildung 6.12 bis 6.14 zeigen eine Gesamtübersicht aller Validierungsrechnungen. Hierzu werden die Maximalwerte der Messgrößen miteinander verglichen, die zum Ende der jeweiligen H₂-Einspeisung auftreten. Der dementsprechende Zeitpunkt während der Versuche ist im linken Diagramm mit einer vertikalen Linie gekennzeichnet. Hierbei treten die größten Abweichungen zwischen Experiment und Berechnung auf, so dass die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse abgeschätzt werden kann.

Das im Rahmen dieser Arbeit optimierte Kaminmodell gibt die gemessene Strömungsgeschwindigkeit sehr gut wieder (Abb. 6.12). Die Berechnungsergebnisse weichen bis auf zwei Ausnahmen um weniger als $\pm 10\%$ von den im Experiment gemessenen Werten ab. Zudem werden die unterschiedlichen Geschwindigkeiten, die auf die verschiedenen Geometrien der beiden Rekombinatorgeometrien zurückzuführen sind, vom Modell überzeugend reproduziert. REKO-DIREKT liefert für die übrigen Betriebsdaten der Rekombinatoren ebenfalls sehr gute Ergebnisse. Hierbei sind vor allem die Wasserstoffkonzentration am Rekombinatorauslass (Abb. 6.13) und die maximale Katalysatortemperatur (Abb. 6.14) von besonderem Interesse. Die Abweichungen zwischen Rechnung und Experiment liegen großteils unter $\pm 10\%$, aber immer unter $\pm 15\%$. In Bezug auf die

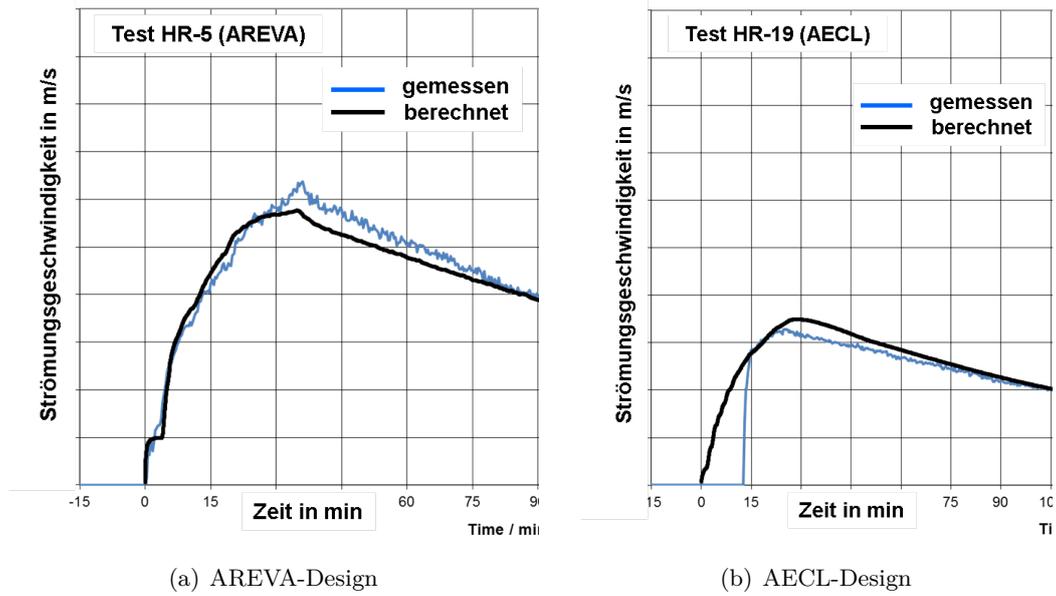
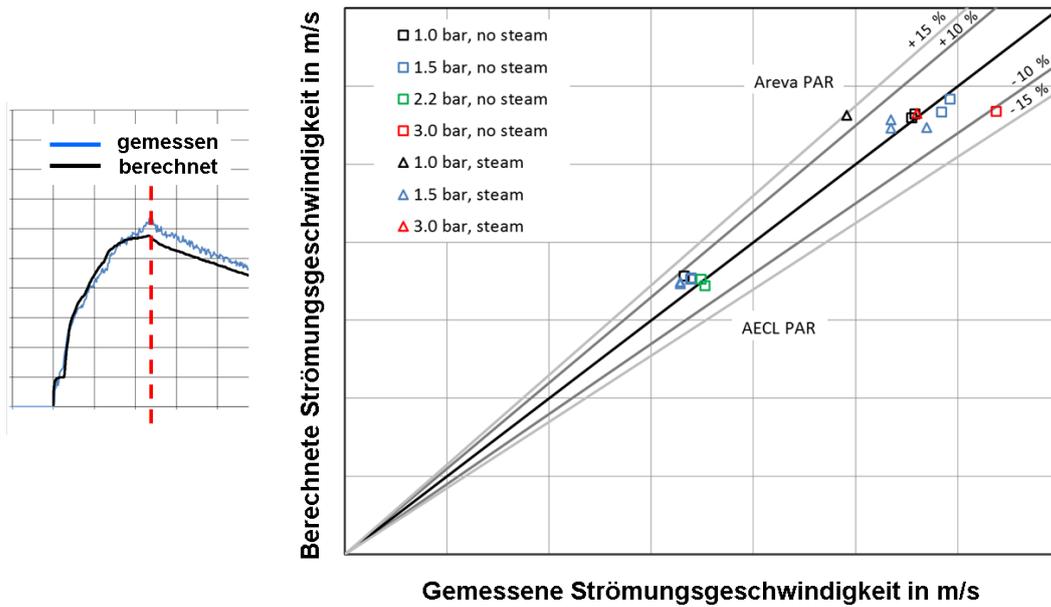
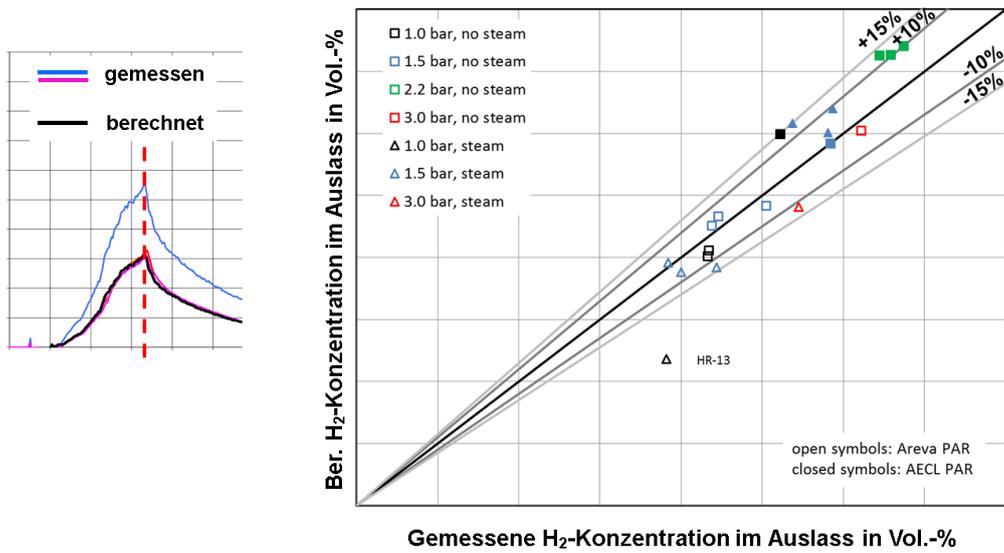


Abbildung 6.11: Zeitlicher Verlauf des gemessenen und des mit REKO-DIREKT berechneten Geschwindigkeitsprofil am Rekombinatoreinlass [RKS⁺14]



(a) Peak-Werte (b) Vergleich zwischen Berechnung (REKO-DIREKT) und Messung für zwei unterschiedliche Rekombinator-Typen

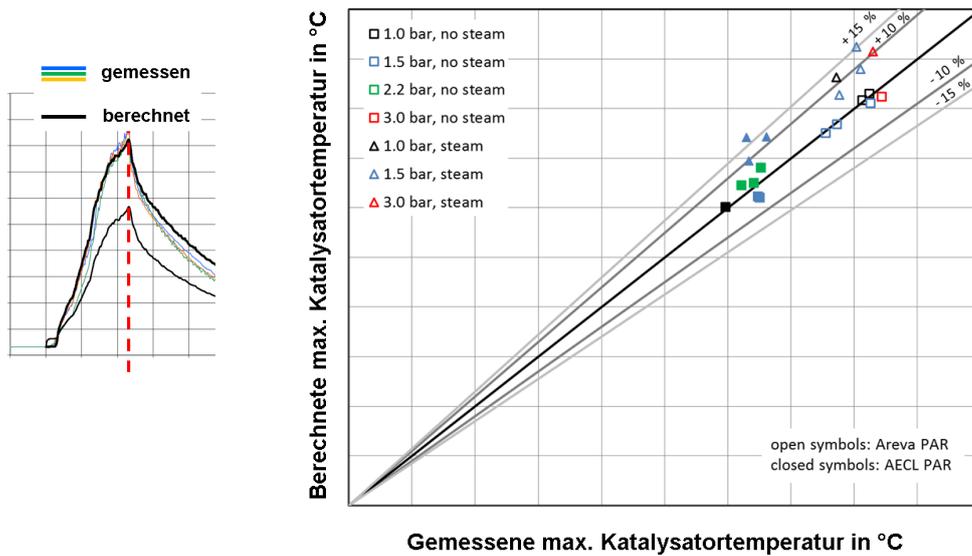
Abbildung 6.12: Vergleich zwischen der gemessenen und der berechneten Strömungsgeschwindigkeit am Rekombinatoreinlass [RKS⁺14]



(a) Peak-Werte

(b) Vergleich zwischen Berechnung (REKO-DIREKT) und Messung für zwei unterschiedliche Rekombinator-Typen

Abbildung 6.13: Vergleich zwischen der gemessenen und der berechneten H₂-Konzentration am Rekombinatorsauslass [RKS⁺14]



(a) Peak-Werte

(b) Vergleich zwischen Berechnung (REKO-DIREKT) und Messung für zwei unterschiedliche Rekombinator-Typen

Abbildung 6.14: Vergleich zwischen der berechneten und der gemessenen Katalysatortemperatur [RKS⁺14]

6 Kaminmodelloptimierung für REKO-DIREKT

Katalysatortemperaturen fällt auf, dass sie insbesondere für Versuche, die mit einem erhöhten Dampfanteil durchgeführt wurden (Dreieck-Symbole), systematisch für beide Rekombinatorvarianten überschätzt werden (vgl. [RKS⁺14]).

Die Eignung des im Rahmen dieser Arbeit optimierten Kaminmodells ist somit zum einen an kleinskaligen REKO-4-Experimenten, zum anderen an großskaligen THAI-Experimenten für einen breiten Bereich sowohl geometrischer Parameter als auch thermophysikalischer, störfallrelevanter Randbedingungen belegt.

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung

Die Randbedingungen einer möglichen, abwärts gerichteten Strömung, die während eines schweren Störfalls innerhalb des Reaktorgebäudes auch entstehen kann, wurden bereits in Abschnitt 2.2.3 charakterisiert. Im Folgenden werden die Modifikationen im Behälter und der Messtechnikpositionierung des Versuchsstands REKO-4 erklärt, die die Realisierung einer solchen Gegenströmung im Behälter zulassen. Danach werden die Versuchsvorbereitung und -durchführung genauer erklärt. Darauf aufbauend wird der Einfluss der Gegenströmung auf das Betriebsverhalten von Rekombinatoren experimentell untersucht und analysiert. Das Kapitel schließt mit einer Einschätzung der gewonnenen Ergebnisse vor dem Hintergrund der Vergleichbarkeit der Strömungsvorgänge im realen Störfall und den Strömungsverhältnissen im Versuchsstand REKO-4.

7.1 Aufbau, Instrumentierung und Durchführung der Versuche

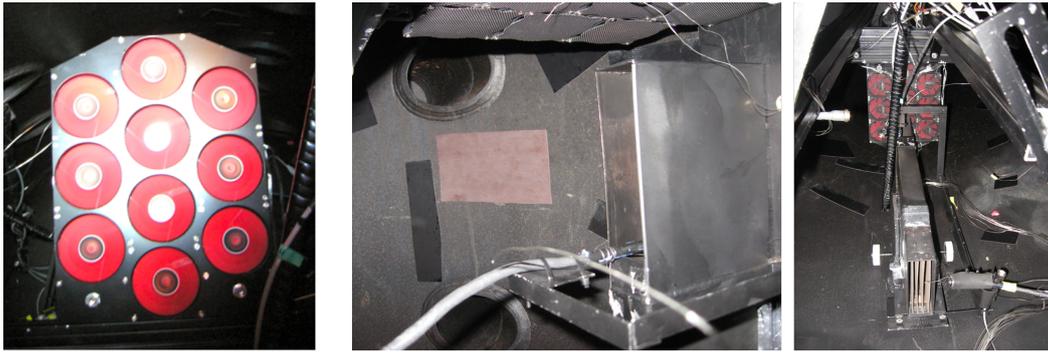
Zur Untersuchung dieser Fragestellung wird im Versuchsstand REKO-4 eine Vorrichtung installiert, die eine wandnahe, abwärts gerichtete Gegenströmung realisiert, in der das Rekombinatormodell positioniert werden kann. Im Zuge von Auslegungsrechnungen wurden unterschiedliche Varianten zur Realisierung einer Gegenströmung untersucht [Häf12]. U.a. wurde ein Konzept erarbeitet, in dem eine abwärts gerichtete, wandnahe Strömung eines H_2 /Luft-Gemisches unter Verwendung von Axialventilatoren erzielt wird. Diese Variante wird im Rahmen dieser Arbeit verwendet und im Folgenden erläutert.

7.1.1 Realisierung einer abwärts gerichteten Strömung

Zur Realisierung der Gegenströmung im Versuchsstand REKO-4 werden zehn Axialventilatoren bzw. -lüfter in gleicher Ausrichtung auf einer ebenen Lüfterplatte montiert. Jeder Lüfter kann dabei separat angesteuert und in einem Drehzahlbereich zwischen 1000 bis 2300 1/min mit einer Abstufung von 100 1/min betrieben werden. Zusätzlich befindet sich vor jedem Ventilator ein Lüftergitter, das der Homogenisierung der Ventilatorströmung dient. Abbildung 7.1 zeigt die Lüfterplatte mit den installierten Axialventilatoren. Zudem ist die Positionierung oberhalb des Rekombinators in REKO-4 dargestellt.

Im Rahmen von Vorversuchen (Versuchsreihe R4-K) wurde die mit den Axialventilatoren erzielte Gegenströmung charakterisiert. Mittels PIV-Messungen wurde dazu die

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung

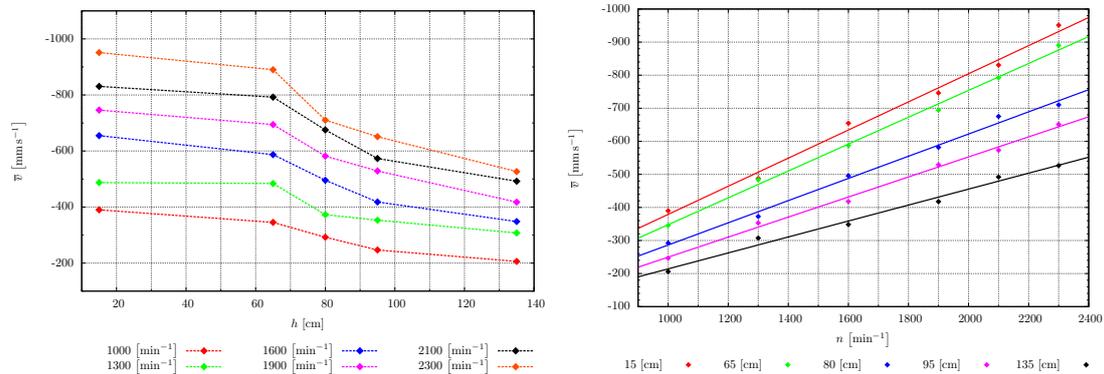


(a) Lüfterplatte mit Axialventilatoren

(b) Installation oberhalb des Rekombinators

Abbildung 7.1: Lüfterplatte zur Realisierung einer Abwärtsströmung innerhalb REKO-4 [Häf12]

mittlere Geschwindigkeit sowie die Homogenität der Geschwindigkeitsverteilung analysiert. Diese Untersuchungen wurden in unterschiedlichen Entfernungen zum Lüftergitter und bei verschiedenen Lüfterdrehzahlen durchgeführt. In Abbildung 7.2 ist die durchschnittliche Geschwindigkeit unterhalb des Gitters in Abhängigkeit von der Entfernung zum Lüftergitter und der Drehzahl der Axialventilatoren dargestellt. Die Ergebnisse zei-



(a) Durchschnittliche Geschwindigkeit über der Entfernung zum Lüftergitter

(b) Durchschnittlicher Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Drehzahl

Abbildung 7.2: Vermessung der Gegenströmung mit Axialventilatoren [Häf12]

gen, dass die Axialventilatoren Geschwindigkeiten von durchschnittlich über 950 mm/s in einer Entfernung von 150 mm zum Lüftergitter ermöglichen. Bei einer Entfernung von 800 mm sinkt die Geschwindigkeit auf ca. 700 mm/s, während sie bei 135 mm noch bei über 500 mm/s liegt. Somit sind die im Versuchsstand REKO-4 erreichbaren Geschwindigkeiten vergleichbar mit den abwärts gerichteten, wandnahen Strömungen, die unter

Berücksichtigung der Ergebnisse aus [RRB⁺00] in Kernkraftwerken erwartet werden.

7.1.2 Aufbau und Instrumentierung des Rekombinators

Der verwendete Rekombinator ist weitgehend identisch mit dem Modell, das für die Untersuchungen unter Naturkonvektionsbedingungen eingesetzt wird (siehe Abschnitt 3.6). Die Untersuchungen zur Gegenströmung werden mit zwei unterschiedlichen Kaminhöhen realisiert (Kaminsegmente mit einer Höhe von 850 mm und 300 mm). Die Untersuchungen mit dem 300 mm hohen Kamin werden zusätzlich mit und ohne Kaminhutze durchgeführt, um eine direkte Durchströmung des Rekombinators zu ermöglichen. Der Tausch des Kamins führt dazu, dass sowohl der Rekombinatorsauslass als auch das Lüftergitter nach unten verschoben werden müssen. Der Einlass hingegen bleibt für alle Versuche fix auf derselben Höhe.

Die Instrumentierung des Rekombinators umfasst sowohl die Thermoelemente TR-50-RK bis TR-68-RK innerhalb der Katalysatorbleche als auch Thermoelemente in der Nähe des Einlasses und des Auslasses. Die Wasserstoffkonzentration wird am Einlass mit drei Katharometern (KR-4-06/-07/-20), am Auslass mit einem Katharometer (KR-4-08) gemessen. Allerdings wird zur Messung der Einlasskonzentration wie schon in den Versuchen zur Kamin- und Druckvariation nur der Katharometer KR-4-20 verwendet, der in einem horizontalen Abstand von 170 mm vom Einlass positioniert ist. Hiermit wird der Einfluss von Wärmestrahlung auf die Wasserstoffkonzentrationsmessung verringert. Abbildung 7.3 zeigt schematisch die Positionierung der Messstellen am bzw. in der Nähe des Rekombinators. Die genaue Positionierung wird aufgrund der unterschiedlichen Varianten des Rekombinators im Zusammenhang mit der jeweiligen Messung besprochen. Auf die Messung der Gehäusetemperatur und der Eintrittsgeschwindigkeit mit PIV wird hingegen verzichtet. Die Untersuchungen werden ausschließlich anhand der Temperaturmessung mit Thermoelementen und der Konzentrationsmessung mit Katharometern durchgeführt.

7.1.3 Durchführung der Versuche mit Gegenströmung

Zu Beginn befindet sich der Rekombinator in der jeweiligen Konfiguration (Kaminhöhe/Hutze) im luftdicht abgeschlossenen Versuchsbehälter REKO-4. Die Temperaturen aller Thermoelemente liegen unter 25 °C und die Wasserstoffkonzentration unter 0,1 Vol.-% H₂. Die relative Luftfeuchtigkeit im Behälter ist sowohl oben (HR-4-01 RF) als auch unten (HR-4-02 RF) im Behälter unter 10 %. Die Axialventilatoren zur Erzeugung der Gegenströmung werden je nach Versuch auf die entsprechende Drehzahl eingestellt und mindestens 10 min vor der Wasserstoffeinspeisung gestartet. Hierdurch soll erreicht werden, dass sich eine stabile, stationäre Gegenströmung ausbildet, in der sich der Rekombinator befindet.

Die Drehzahl der Axialventilatoren variiert zwischen der maximalen Drehzahl von 2300 1/min und einer reduzierten Drehzahl von 1600 1/min. Zu Referenzzwecken wird

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung

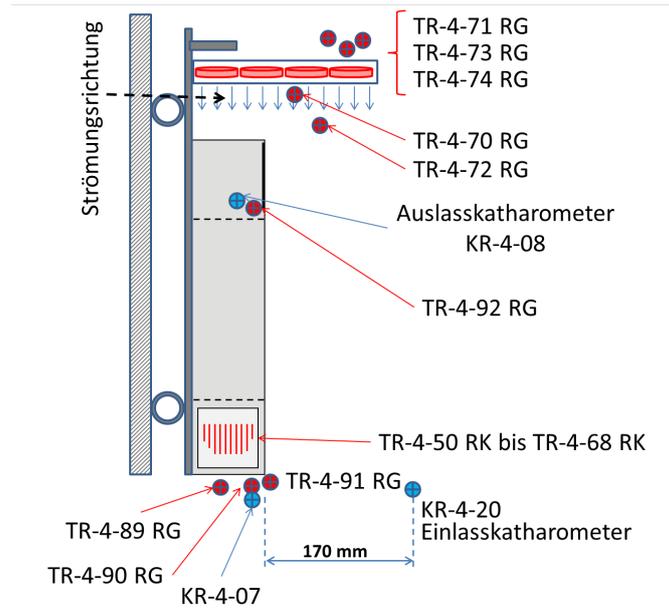


Abbildung 7.3: Übersicht zur Positionierung der Messstellen am Rekombinator für R4-P

das Betriebsverhalten jeder Rekombinatorvariante auch ohne Gegenströmung ermittelt.

Eine tabellarische Auflistung aller 22 durchgeführten Versuche mit den jeweiligen Versuchsparametern zeigt die Versuchsmatrix der Versuchsreihe R4-P in Tabelle 7.1. Sie beinhaltet zu jedem Versuch die Versuchsreihennummer, die verwendete Variation des Rekombinators und die Versuchsrandbedingungen der Gegenströmung.

Zu Beginn wird einmalig 5 Vol.-% Wasserstoff in den geschlossenen Behälter eingespeist. Die Einspeisung bzw. die Einspeisestelle erfolgt dabei in gleicher Weise wie bei den übrigen Versuchen unter Naturkonvektionsbedingungen. Das heißt, die ersten 4,75 % werden mit einem großen Volumenstrom von ca. $1,9 \text{ m}^3/\text{s}$ und die übrigen 0,25 % mit einem kleinen Volumenstrom von $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ injiziert.

Die unterschiedlichen Einstellungen der Gegenströmung (2300 1/min, 1600 1/min, ohne Gegenströmung) führen dazu, dass je nach Drehzahl der Ventilatoren der Wasserstoff schneller im Behälter verteilt wird und somit früher an die Katalysatorbleche gelangt. Aufgrund dessen ist der Zeitpunkt der Einspeisung nicht geeignet, um das Startverhalten abzuschätzen. Daher wird zur Definition des Startpunktes die Einlasskonzentration des Katharometers KR-4-20 verwendet. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass der Wasserstoff den Rekombinator erreicht hat, sobald die gemessene Konzentration um $\Delta x_{H_2, Start} = 0,1 \text{ Vol.-% H}_2$ gestiegen ist. Ebenso gilt die Rekombinationsreaktion als gestartet, sobald eine Katalysatortemperatur (TR-4-50 RK bis TR-4-68 RK) eine Temperaturdifferenz ΔT_{Start} von $1 \text{ }^\circ\text{C}$ (bzw. 1 K) erreicht. Sobald die Katalysatortemperatur und die Wasserstoffkonzentration stetig über einen längeren Zeitraum sinken, wird der

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung

Versuchsreihen- nummer	Kaminhöhe	Auslass	Drehzahl [1/s]
R4-P-05	850 mm	mit Hutze	2300
R4-P-06	850 mm	mit Hutze	2300
R4-P-07	850 mm	mit Hutze	2300
R4-P-08	850 mm	mit Hutze	0
R4-P-09	850 mm	mit Hutze	0
R4-P-10	850 mm	mit Hutze	1600
R4-P-11	300 mm	mit Hutze	2300
R4-P-12	300 mm	mit Hutze	2300
R4-P-13	300 mm	mit Hutze	2300
R4-P-14	300 mm	mit Hutze	0
R4-P-15	300 mm	mit Hutze	0
R4-P-16	300 mm	mit Hutze	0
R4-P-17	300 mm	ohne Hutze	0
R4-P-18	300 mm	ohne Hutze	2300
R4-P-19	300 mm	ohne Hutze	2300
R4-P-20	300 mm	ohne Hutze	2300
R4-P-21	300 mm	ohne Hutze	0
R4-P-22	300 mm	ohne Hutze	0
R4-P-23	300 mm	ohne Hutze	1600
R4-P-24	300 mm	ohne Hutze	1600
R4-P-25	300 mm	ohne Hutze	1600
R4-P-26	300 mm	ohne Hutze	1600

Tabelle 7.1: Variation des Rekombinatoraufbaus und der Versuchsbedingungen für R4-P

Versuch beendet.

Die Auswertung der Versuche umfasst zusätzlich noch einen Zeitraum von fünf Minuten (300 s) vor dem Start, um Vorgänge wie z.B. den Zeitpunkt der Einspeisung zu erfassen. Die Unterschiede im Betriebs- bzw. Startverhalten des Rekombinators mit und ohne Einwirkung einer Gegenströmung lassen sich dann durch Vergleich der jeweiligen Messgrößen bezogen auf den Startpunkt analysieren.

7.2 Versuchsergebnisse zum Betriebs- und Startverhalten

Die Versuchsergebnisse lassen sich in drei Abschnitte unterteilen, die sich auf die jeweilige Rekombinatorvariante (Kaminhöhe, mit/ohne Hutze) beziehen.

7.2.1 Rekombinatorvariante mit 850-mm-Kamin und Hutze

Die Qualifizierung der Gegenströmung zeigt, dass bei einer Drehzahl der Axialventilatoren von 2300 1/min in Abhängigkeit der Entfernung zum Lüftergitter Geschwindigkeiten von ca. 500 - 950 mm/s erreicht werden. Die Geschwindigkeit im Abstand von 1350 mm zum Gitter, der ungefähr der Entfernung vom Gitter zum Einlass des Rekombinators mit 850-mm-Kamin entspricht, beträgt dabei ca. 500 mm/s (siehe Abb. 7.2 [Häf12]).

Das Startverhalten ist in Abbildung 7.4 am Beispiel der Versuche R4-P-08 (durchgehende Linie) und R4-P-09 (unterbrochen-punktierte Linie) dargestellt. Auf der Pri-

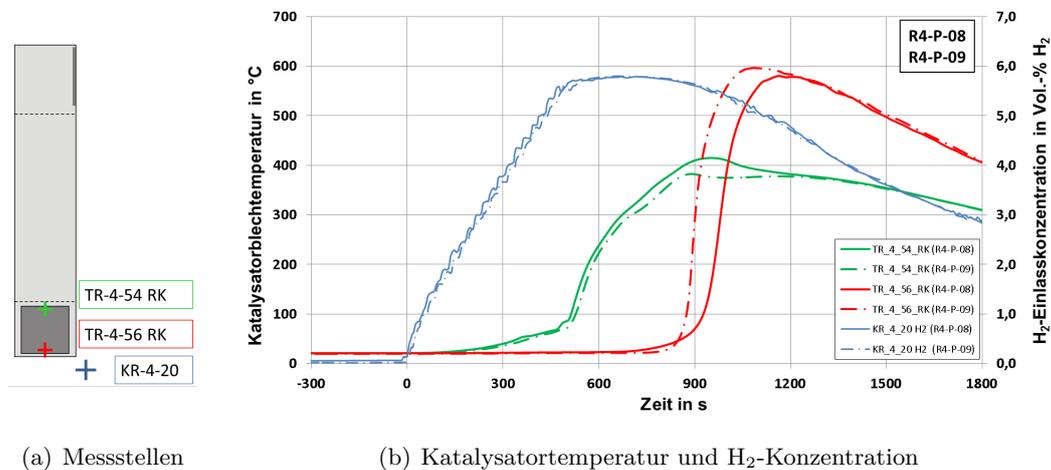


Abbildung 7.4: Startverhalten des Rekombinators mit 850-mm-Kamin und Hutze ohne Gegenströmung (R4-P-08 / R4-P-09)

märordinate sind die Katalysatorblechtemperaturen an der Unterkante (rot) und Ober-

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung

kante (grün) dargestellt. Die Sekundärordinate zeigt die Einlasskonzentration (blau) des Katharometers KR-4-20, der aufgrund der Position nicht durch Wärmestrahlung der Bleche beeinflusst wird. Auf der Abszisse ist die Zeit aufgetragen, wobei der Zeitpunkt „0“ definitionsgemäß durch $\Delta x_{H_2, Start} = 0,1 \text{ Vol.-% } H_2$ bestimmt ist. Die Wasserstoffkonzentration am Einlass steigt ab ca. 0 s linear an, bis sie zum Zeitpunkt von ca. 500 s bei ca. 5,5 - 5,8 Vol.-% H_2 liegt. Die Rekombinationsreaktion startet zuerst an der Oberkante des Katalysatorblechs, die bei ca. 900 s mit 370 - 400 °C ihr Maximum erreicht. Die Unterkante startet dementsprechend ca. 700 s später, steigt dann aber rasch innerhalb von 300 s auf 600 °C. Zu diesem Zeitpunkt hat sich das typische Blechtemperaturprofil ausgebildet, das sowohl in den vorangegangenen Versuchsreihen als auch in vorherigen Arbeiten (siehe [ASS⁺10] und [Sch11]) schon beobachtet wurde. Hier ist zu erkennen, dass R4-P-09 ungefähr 90 s früher startet und die Maximaltemperatur ungefähr 10 K über R4-P-08 liegt. Dies kann u.a. auf geringe Unterschiede der Randbedingungen zu Beginn des Versuchs zurückgeführt werden. So liegt die relative Luftfeuchtigkeit in R4-P-08 anfangs mit 9,5 % rH doppelt so hoch wie in R4-P-09 mit 4,9 % rH.

Im Vergleich dazu sind in Abbildung 7.5 die Versuche R4-P-05 bis R4-P-07 dargestellt, die bei maximaler Gegenströmung durchgeführt worden sind (durchgehende Linien). Die Konzentration am Einlass steigt sowohl bei den Versuchen mit als auch ohne

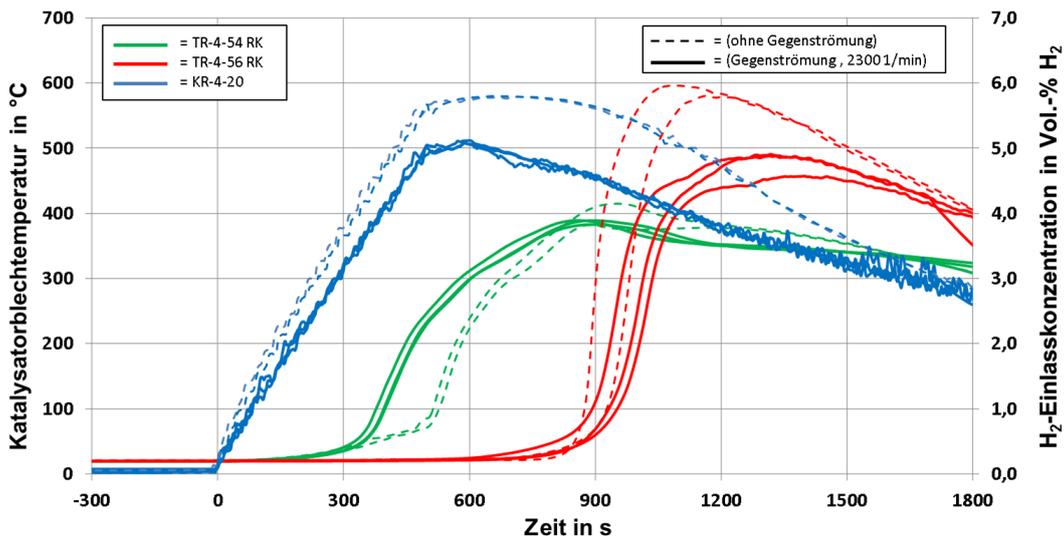


Abbildung 7.5: Vergleich der Blechtemperatur und Einlasskonzentration für Versuche mit und ohne Gegenströmung (850-mm-Kamin, R4-P-05 bis R4-P-09)

Gegenströmung linear an, wobei der Gradient mit Gegenströmung geringer ist. Die Axialventilatoren führen zu einer sehr raschen Vermischung der Wasserstoffkonzentration im Behälter, so dass keine wasserstoffreichere Zone im Deckenbereich wie zu Beginn der Versuche ohne Gegenströmung entsteht. Im Gegenströmungsversuch wird der Wasserstoff noch während der Einspeisung nahezu homogen im Behälter verteilt. Dies führt

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung

dazu, dass zum Zeitpunkt von 500 s alle Katharometer die eingespeiste Menge von ca. 5 Vol.-% H_2 anzeigen, während für den Fall ohne Gegenströmung erst die bereits beobachtete Schichtung eintritt, so dass im oberen Bereich und somit z.T. auch am Einlass des Rekombinators höhere Konzentrationen von ca. 5,8 Vol.-% H_2 gemessen werden.

Die Rekombinationsreaktion startet für beide Fälle fast zeitgleich zwischen 70 - 80 s nachdem der Wasserstoff am Einlass registriert wird. Trotz der niedrigeren Wasserstoffkonzentration unter Einfluss der Gegenströmung heizen sich die Katalysatorbleche an der Oberkante (grün) schneller auf. Ab 300 s nimmt die Temperatur rasch zu, während ohne Gegenströmung noch ca. 200 s bis zum Zeitpunkt von 500 s vergehen, bevor auch hier der Temperaturgradient stärker steigt. Mit Hinblick auf die Unterkante unterscheiden sich die Versuche in Bezug auf Startpunkt und Gradient kaum. Jedoch erreicht der Graph ohne Gegenströmung mit ca. 600 °C eine um 100 °C höhere Maximaltemperatur. Dies liegt jedoch hauptsächlich an der um 1 Vol.-% H_2 höheren Wasserstoffkonzentration am Einlass. Die höhere Maximaltemperatur ist daher nicht auf ein verändertes Betriebsverhalten des Rekombinators in einer Gegenströmung zurückzuführen.

Bei Betrachtung der Temperaturen und Wasserstoffkonzentrationen am Auslass des Rekombinators wird deutlich, dass die Durchströmungsrichtung dem Auftrieb des rekombinierten Gases folgt und somit auch unter Einwirkung einer Gegenströmung von unten nach oben gerichtet ist (Abbildung 7.6). Die Temperaturen am Auslass (rot) steigen

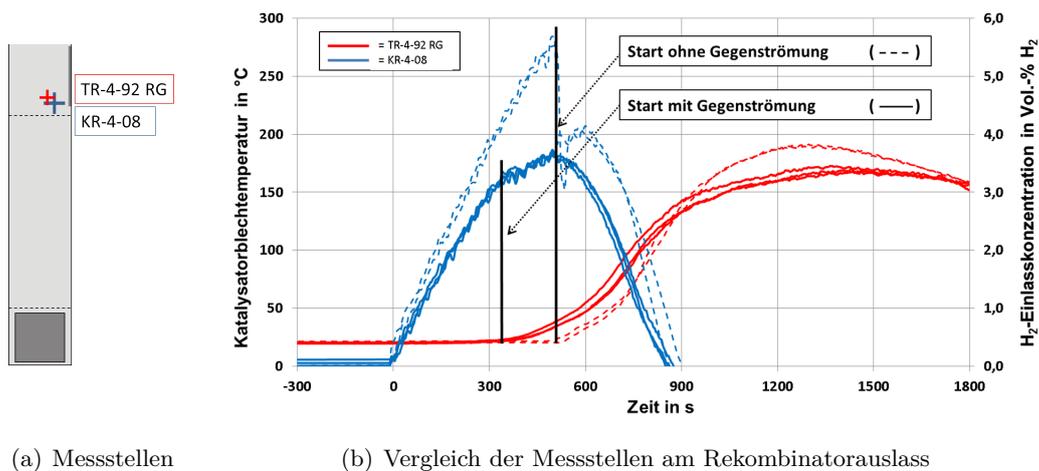


Abbildung 7.6: Vergleich der Bedingungen am Rekombinatorauslass (R4-P-05 bis R4-P-09)

sowohl mit als auch ohne Gegenströmung nahezu gleich an, wobei die Maximaltemperaturen ohne Gegenströmung (unterbrochene Linie) ca. 20 K höher sind. Diese sind aber genauso wie die Maximaltemperaturen der Bleche auf die höhere H_2 -Eintrittskonzentration zurückzuführen.

Ebenso wird deutlich, dass mit dem Anstieg der Temperatur am Auslass die dortige

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung

Wasserstoffkonzentration sinkt (blau). Dieses Verhalten wird im Fall mit Gegenströmung früher registriert als ohne Gegenströmung (vgl. Markierung „Start mit Gegenströmung“ und „Start ohne Gegenströmung“). Zudem steigt die Konzentration am Auslass ohne Einfluss der Gegenströmung ähnlich wie am Einlass bis auf 5,8 Vol.-% H_2 . Dies ist erneut auf die leichte Schichtung des Wasserstoffs im oberen Bereich des Behälters zurückzuführen, die vermutlich auch für die leichte, zeitliche Verzögerung in Bezug auf die Auslasstemperaturen verantwortlich ist. Während die Schichtung im Fall einer Gegenströmung nicht zu Stande kommt und das rekombinierte Gas ohne größeren Widerstand das Modell durch den Auslass verlassen kann, ist im Fall ohne Gegenströmung zu Beginn der Rekombination die Temperatur des Gases noch zu niedrig. Der Auftrieb des Gases reicht dementsprechend nicht aus, den Widerstand des Wasserstoffpolsters zu überwinden und durch den Kamin bzw. den Auslass des Modells zu strömen. Erst ab dem Zeitpunkt von 520 s ändert sich das schlagartig, da nun die Auftriebskräfte des rekombinierten Gases stärker sind und dieses auch gegen den Widerstand der Schichtung ausströmen kann. Auch wenn das Sensorsignal aufgrund des Temperatureinflusses (siehe Kap. 3.3) nur qualitativ interpretiert werden kann, zeigt der Verlauf eindeutig, dass rekombiniertes Gas am Sensor KR-4-08 entlangströmt und so zum Absinken des Konzentrationssingals bis unter 1 Vol.-% unter Berücksichtigung der Genauigkeit führt.

In Abbildung 7.7 sind die Temperaturen oberhalb des Auslasses aufgetragen. Das

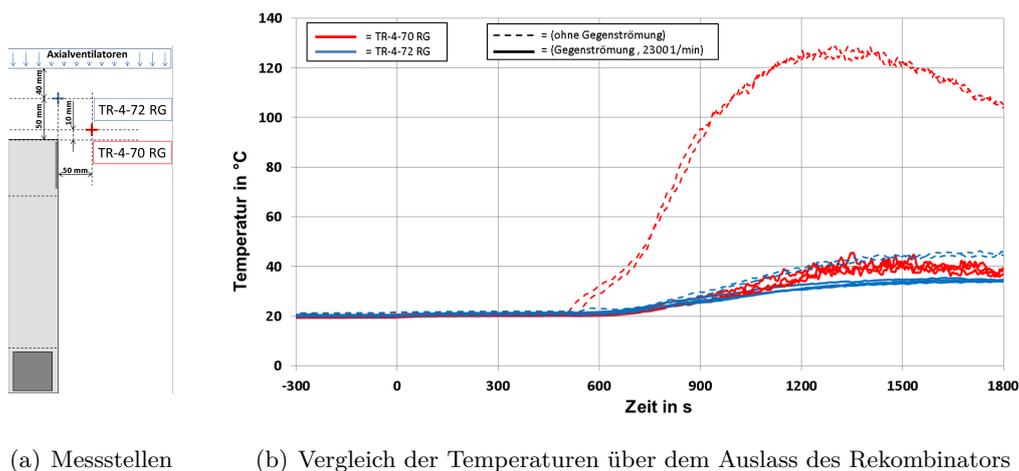


Abbildung 7.7: Vergleich der Temperaturen über dem Rekombinatoreinlass mit und ohne Gegenströmung (R4-P-05 bis R4-P-09)

Thermoelement TR-4-70 RG (rot) hängt direkt in der Auslassfahne des Rekombinators, so dass im Falle ohne Gegenströmung (unterbrochene Linie) Temperaturen von bis zu 130 °C erreicht werden. TR-4-72 RG (blau) wird von der Auslassfahne nicht direkt angeströmt und zeigt dementsprechend nur Werte im Bereich von bis knapp 50 °C an. Unter dem Einfluss der Gegenströmung wird die nach oben gerichtete Auslassfahne allerdings aufgebrochen und sofort durchmischt, so dass die Temperaturen sowohl an TR-

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung

4-70 RG als auch an -72 RG (durchgehende Linie) ebenfalls nur leicht erhöhte Werte von bis zu 45 °C anzeigen. Sie liegen trotzdem oberhalb der Temperatur von 37 °C des H₂/Luft-Gemisches, das von den Axialventilatoren vertikal nach unten geführt wird (Abbildung 7.8, blau). Diese Temperaturerhöhung über dem Rekombinator kann ebenfalls nur mit der wenn auch stark durchmischten Abluftfahne erklärt werden.

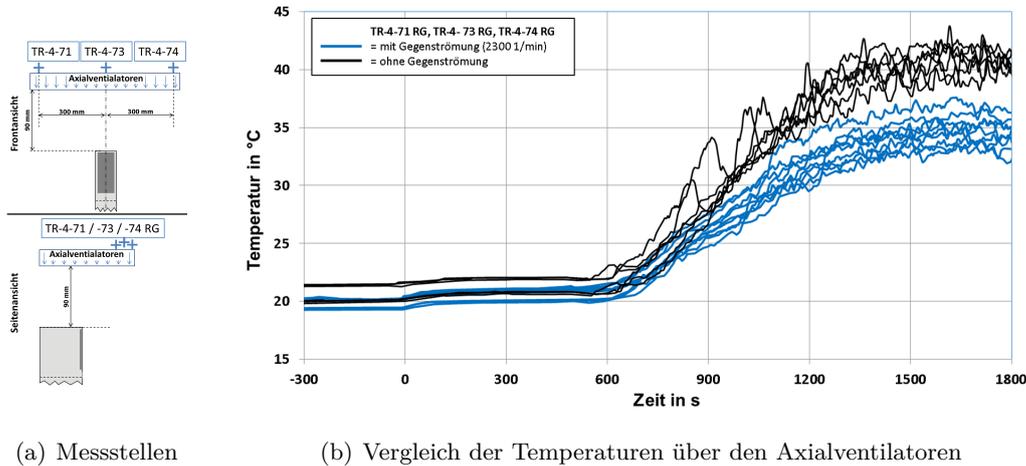


Abbildung 7.8: Vergleich der Temperaturen über den Axialventilatoren mit und ohne Gegenströmung (R4-P-05 bis R4-P-09)

Zudem kann eine mögliche (durch die Gegenströmung induzierte) Durchströmung des Rekombinators von oben nach unten ebenfalls ausgeschlossen werden, da ansonsten steigende Temperaturen am Einlass während der Startphase registriert werden müssten. Abbildung 7.9 zeigt jedoch, dass die Temperaturen zwar steigen, was jedoch auf die Wärmestrahlung der Bleche zurückzuführen ist. Dieser Effekt ist bereits in der Fehlerbetrachtung der Thermoelemente erläutert worden (Abschnitt 3.7.1). Dies ist daran zu erkennen, dass die Temperaturerhöhung ohne Gegenströmung am Sensor TR-4-89 RG am höchsten ist (unterbrochene Linie, rot), wobei jedoch gerade hierbei eine Durchströmung von oben nach unten ausgeschlossen werden kann. Während der gesamten vorigen Versuche unter Naturkonvektionsbedingungen wurde auch mit PIV keine Durchströmung beobachtet, die zu einer solchen Erwärmung durch Konvektion führen könnte. Zudem zeigt die Positionierung der Thermoelemente, dass TR-4-89 RG und TR-4-90 RG erwartungsgemäß am stärksten durch Wärmestrahlung beeinflusst werden. Des Weiteren sind die Temperaturen zu gering, als dass diese durch rekombiniertes Gas verursacht werden könnten. Daher kann eine entgegengesetzte Durchströmung des Rekombinators unter diesen Randbedingungen ausgeschlossen und die Temperaturerhöhung auf Wärmestrahlung der Katalysatorbleche zurückgeführt werden.

Der Rekombinator mit 850-mm-Kamin und Hutze zeigt unter Einwirkung einer Gegenströmung (2300 l/min) nur ein geringfügig verändertes Betriebsverhalten. Unterschiede in den maximalen Temperaturen sind zudem auf die Mischungseffekte im Behälter zu-

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung

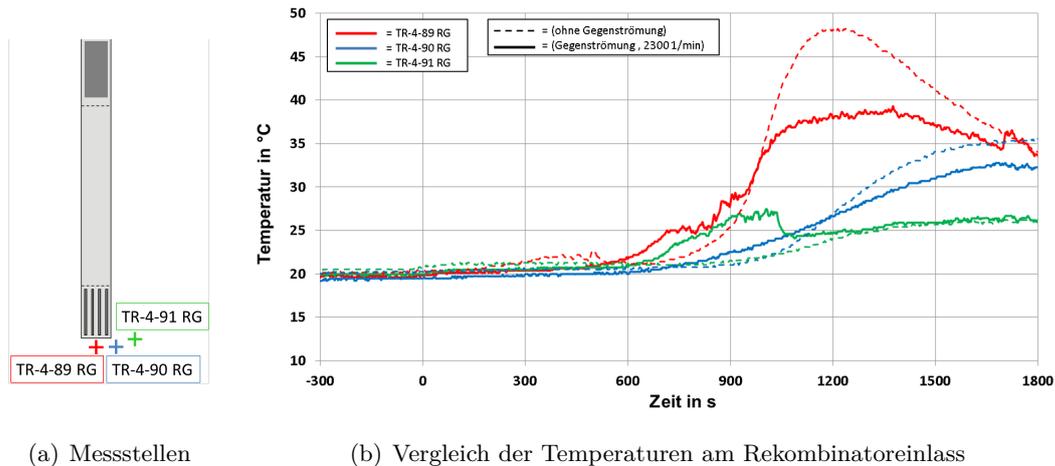


Abbildung 7.9: Vergleich der Temperaturen am Rekombinatoreinlass mit und ohne Gegenströmung (R4-P-05 / R4-P-08)

rückzuführen, die die Bedingungen am Rekombinatoreinlass leicht verändern.

Abbildung 7.10 vergleicht die Blechtemperaturen und die Einlasskonzentration der Gegenströmung mit reduzierter Drehzahl (R4-P-10 mit 1600 1/min: dicke, durchgehende Linie) mit den in Abbildung 7.5 bereits gezeigten Versuchsergebnissen ohne und mit maximaler Drehzahl. Die Einlasskonzentration verläuft nahezu identisch zur Kurve ohne Gegenströmung. Die Rekombinationsreaktion startet gemäß der Definition $\Delta T_{Start} > 1$ K ca. 110 s nachdem der Wasserstoff am Einlass angekommen ist. Jedoch ist der Gradient der Erwärmung noch langsamer als bei den übrigen Versuchen. Daher lässt die Axialventilator Drehzahl keine eindeutige Korrelation auf das Starten der Rekombinationsreaktion erkennen. Die Maximaltemperaturen der Ober- und Unterkante decken sich hingegen mit den Temperaturen der übrigen Versuche.

Der Kaminzug durch den Rekombinator stellt im Vergleich zur Gegenströmung die dominante Kraft dar. Diese Untersuchungen zeigen, dass das Betriebsverhalten des Rekombinators mit 850-mm-Kamin und Hutze durch Einwirkung einer Gegenströmung auch mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten nur geringfügig beeinflusst wird.

7.2.2 Rekombinatorvariante mit 300-mm-Kamin und Hutze

Bei Verwendung einer Kaminhöhe von 300 mm verringert sich zum einen der Kaminzug, der der Gegenströmung entgegenwirkt, zum anderen ist die Entfernung der Axiallüfter zum Rekombinatoreinlass geringer, so dass höhere Geschwindigkeiten sowohl am Einlass als auch am Auslass erreicht werden. Der Rekombinator mit 300-mm-Kamin und Hutze besitzt eine Gesamthöhe von 650 mm (siehe Tabelle 3.8 in Abschnitt 3.6). Das führt zu einem Abstand von ungefähr 800 mm zwischen dem Rekombinatoreinlass und

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung

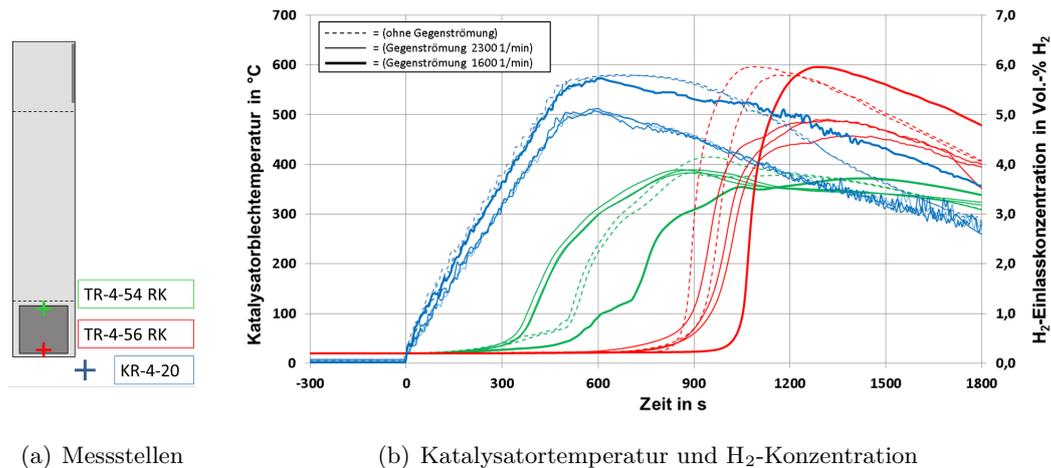


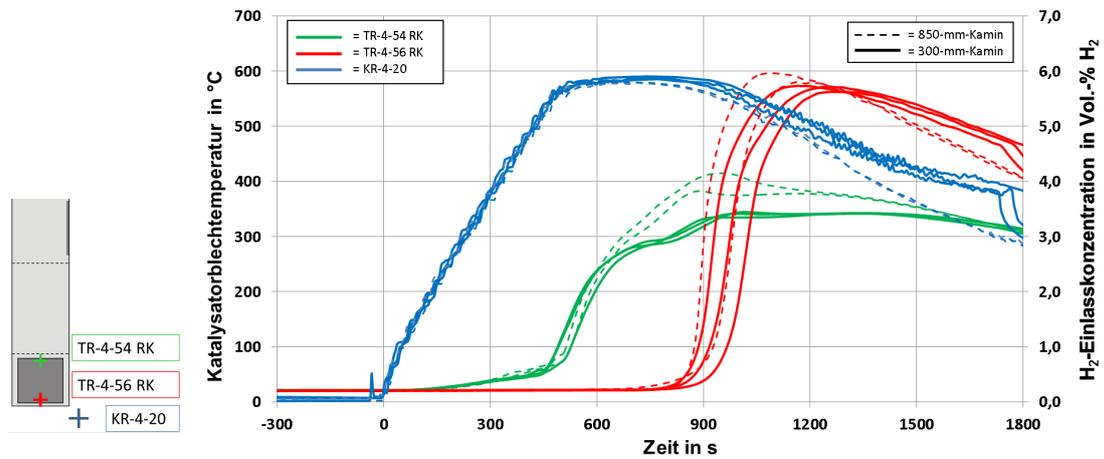
Abbildung 7.10: Startverhalten des Rekombinators mit 850-mm-Kamin und Hutze für unterschiedliche Gegenströmungen (R4-P-05 bis R4-P-10)

dem Lüftergitter. Dies führt zu einer Geschwindigkeit in der Höhe des Einlasses von 700 mm/s bei einer Drehzahl von 2300 1/min bzw. 500 mm/s für die reduzierte Drehzahl von 1600 1/min.

Abbildung 7.11 zeigt die Blechtemperatur und Einlasskonzentration ohne Gegenströmung für die beiden Kaminhöhen 300 mm und 850 mm. Der Verlauf der Wasserstoffkonzentration am Einlass ist zunächst unabhängig von der Kaminhöhe und somit für alle Versuche ohne Gegenströmung bis ca. 1000 s identisch. Die Rekombinationsreaktion startet an der Oberkante des Katalysatorbleches ebenfalls für beide Kaminhöhen zeitgleich zwischen 70 - 80 s (grüne Kurven). Ebenso sind die Temperaturgradienten in diesem Bereich gleich. Ab dem Zeitpunkt bei 600 s steigt die Temperatur an den Blechen der Modellvariante mit 300-mm-Kamin (durchgehende Linie) langsamer im Vergleich zum 850-mm-Kamin (unterbrochene Linie). Dies führt dazu, dass beide Varianten den Bereich der Maximaltemperatur zwar nach ungefähr 900 s erreichen, jedoch die Temperatur für den kürzeren Kamin ca. 70 °C niedriger ist. Auch die Unterkanten der Varianten starten nahezu zeitgleich mit dem gleichen Temperaturgradienten, wobei auch hier die Maximaltemperatur für den 300-mm-Kamin ebenfalls mit 570 °C etwas niedriger ausfällt. Dies ist ausschließlich auf den Einfluss der Kaminhöhe zurückzuführen, da der höhere Kamin zu einem höheren Naturzug und dementsprechend zu einer höheren Geschwindigkeit am Einlass führt. Dadurch steigen die absolute Menge des Wasserstoffs, die in den Katalysatoreinschub gesogen wird, und somit auch die freiwerdende Wärmeenergie aufgrund der Rekombinationsreaktion, die die höheren Temperaturen auf den Katalysatorblechen induziert. Dementsprechend sinkt die Konzentration am Einlass für den Fall mit längerem Kamin schneller, da in diesen Versuchen der Wasserstoff schneller umgewandelt wird.

Abbildung 7.12 zeigt darauf aufbauend den Einfluss der Gegenströmung (R4-P-11/-12/-13) auf die Versuche ohne Gegenströmung (R4-P-14/-15/16). Wie schon in den

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung



(a) Messstellen

(b) Katalysatorblechtemperatur und H₂-Konzentration am Einlass

Abbildung 7.11: Vergleich des Startverhaltens mit 300- und 850-mm-Kamin und Hutze ohne Gegenströmung (R4-P-08/-09/-14/-15/-16)

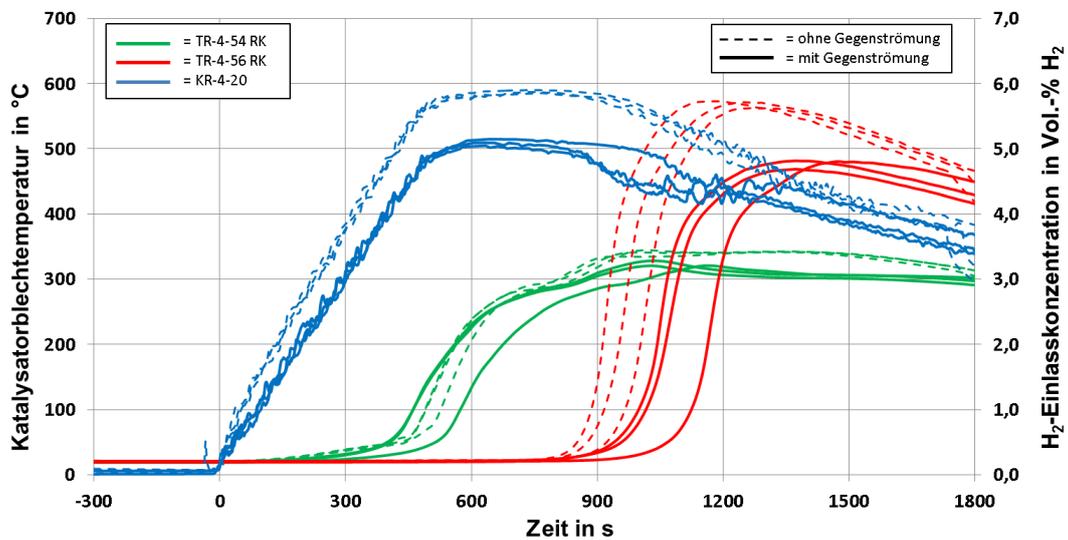


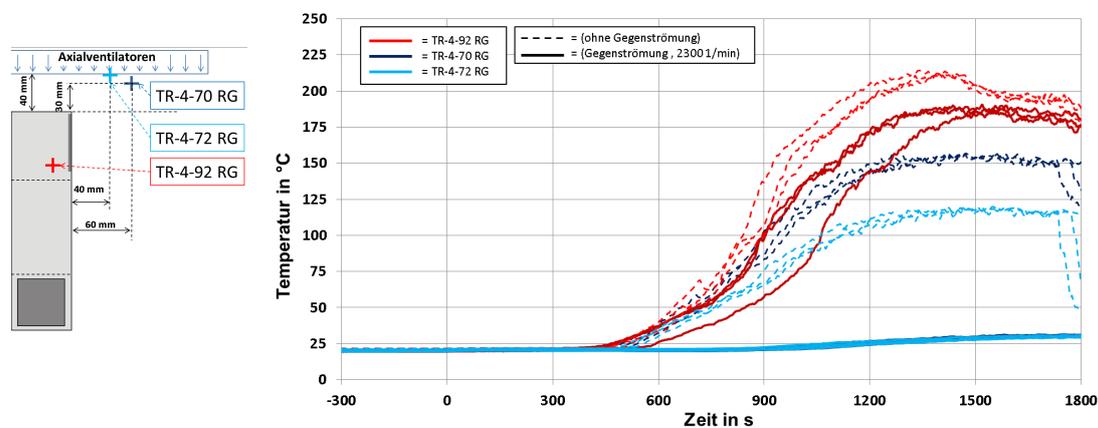
Abbildung 7.12: Vergleich der Blechtemperatur und Einlasskonzentration für Versuche ohne / maximaler Gegenströmung (300-mm-Kamin)

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung

Versuchen unter Verwendung des 850-mm-Kamins wird deutlich, dass die Wasserstoffkonzentration (blau) aufgrund der besseren Durchmischung durch die Gegenströmung (durchgehende Linie) langsamer steigt. Die maximale Konzentration liegt daher ebenfalls bei 5 Vol.-% H_2 für Versuche mit Gegenströmung, wogegen sie in den Versuchen ohne Gegenströmung auf ca. 5,8 Vol.-% H_2 steigt. Zudem startet die Rekombinationsreaktion ohne Gegenströmung an der Oberkante geringfügig früher (innerhalb einer Zeitspanne von ca. 60 - 90 s), was z.T. durch die leicht höhere Konzentration erklärt werden kann. Dies führt ebenfalls dazu, dass die maximale Temperatur unter Einfluss der Gegenströmung mit ca. 320 °C um 15 °C niedriger ist als ohne Gegenströmung.

Dahingegen startet die Unterkante des Bleches mit Gegenströmung merklich später. In diesen Versuchen vergehen 1000 - 1120 s, bevor eine Temperatur von 100 °C an der Unterkante erreicht wird. Ohne Gegenströmung werden diese Temperaturen bereits früher zwischen 880 - 960 s überschritten. In diesem Fall werden Maximaltemperaturen im Bereich von 570 °C gemessen, die somit 90 °C über den Versuchen mit Gegenströmung liegen. Auch dieser Effekt kann auf die höhere Wasserstoffkonzentration zurückgeführt werden. Während diese zum Zeitpunkt des Maximums ohne Gegenströmung bei ca. 5,2 Vol.-% H_2 liegt, ist sie zum Zeitpunkt des Maximums mit Gegenströmung um ca. 1 Vol.-% H_2 niedriger. Ob die erhöhte Wasserstoffkonzentration alleine für das frühere Starten an der Unterkante verantwortlich ist oder zusätzliche Strömungseffekte eine Rolle spielen, kann nicht mit letzter Sicherheit geklärt werden.

Die Durchströmung des Gehäuses wird erneut aus der Betrachtung der Thermoelemente oberhalb des Modells deutlich (Abb. 7.13). Das Thermoelement TR-4-92 (rot)



(a) Messstellen (b) Vergleich der Temperaturen im Auslass und oberhalb des Rekombinators

Abbildung 7.13: Temperaturerhöhung im Bereich des Auslasses aufgrund der Abluftfahne (R4-P-11 bis R4-P-16)

zeigt sowohl mit als auch ohne Gegenströmung Temperaturen an, die nur durch rekombiniertes Gas der Katalysatorbleche hervorgerufen sein können. So liegen die Maximal-

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung

temperaturen im Auslass (rot) mit Gegenströmung im Bereich von 175 - 200 °C und ohne Gegenströmung bei 200 - 225 °C. Zudem wird deutlich, dass ohne Gegenströmung die auftriebsdominierte Abluftfahne auch oberhalb des Rekombinators zu erhöhten Temperaturen von 120 °C bis über 150 °C führt. Mit Gegenströmung ist kein signifikanter Temperaturanstieg am Lüfterblech erkennbar.

Zur Absicherung werden ebenfalls die Temperaturen am Einlass verglichen (Abb. 7.14). TR-4-89 RG wird, wie bereits diskutiert, durch Wärmestrahlung der Katalysatorbleche

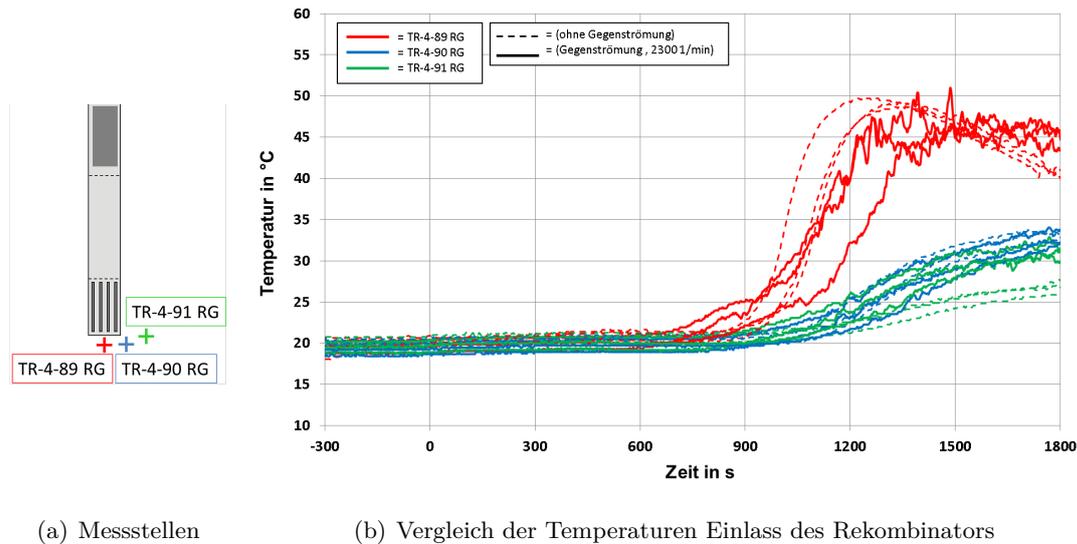


Abbildung 7.14: Temperaturerhöhung im Bereich des Einlasses (R4-P-11 bis R4-P-16)

beeinflusst, da es direkt unterhalb des Einlasses des Rekombinators positioniert ist. Dadurch wird eine Temperatur sowohl mit als auch ohne Gegenströmung in Höhe von ca. 50 °C gemessen, die jedoch nicht die reale Gastemperatur darstellt. TR-4-90 RG und TR-4-91 RG liegen seitlich neben dem Einlass und registrieren nur leicht steigende Temperaturen bis 35 °C. Die gemessenen Temperaturen sind zudem auch nahezu unabhängig von der Gegenströmung, so dass eine Durchströmung des Rekombinators von oben nach unten ausgeschlossen werden kann. Das bedeutet, dass das Betriebsverhalten dieser Rekombinatorvariante mit 300-mm-Kamin und Hutze ebenfalls nur geringfügig beeinflusst wird. Die abwärts gerichtete Gegenströmung stört das im Kamin aufsteigende, rekombinierte Gas kaum bzw. beeinträchtigt nicht das Austreten des Gases durch den horizontalen Auslass der Hutze. Unterschiede im Bereich der maximalen Temperaturen und Wasserstoffkonzentrationen können wie auch schon bei der Variante mit 850-mm-Kamin auf Mischungseffekte im Behälter zurückgeführt werden.

7.2.3 Rekombinatorvariante mit 300-mm-Kamin ohne Hutze

Da die Rekombinatorvarianten 850-mm-Kamin / 300-mm-Kamin mit Hutze keinen signifikanten Einfluss einer Gegenströmung auf das Betriebsverhalten zeigen, wird auch eine Modellvariante ohne Hutze untersucht, die strömungstechnisch als konservative Abschätzung gelten kann. Durch das Weglassen der Hutze wird erreicht, dass der Kamin bzw. der Katalysatoreinschub direkt durchströmt wird. Diese Versuche werden nur mit der niedrigen Kaminhöhe mit 300 mm durchgeführt. Dazu wird die Positionierung sowohl des Rekombinators als auch der Axialventilatoren nicht verändert. Somit bleiben der Abstand zwischen Einlass und Lüftergitter und damit in erster Näherung auch die Geschwindigkeit der Gegenströmung am Einlass konstant. Nur die Gesamthöhe des Rekombinators verringert sich aufgrund der demontierten Hutze auf 450 mm. Abbildung 7.15 zeigt den Rekombinator mit 300-mm-Kamin ohne Hutze unter den Axialventilatoren. Links ist der gesamte Aufbau des Rekombinators in der Gegenströmung dargestellt. Die

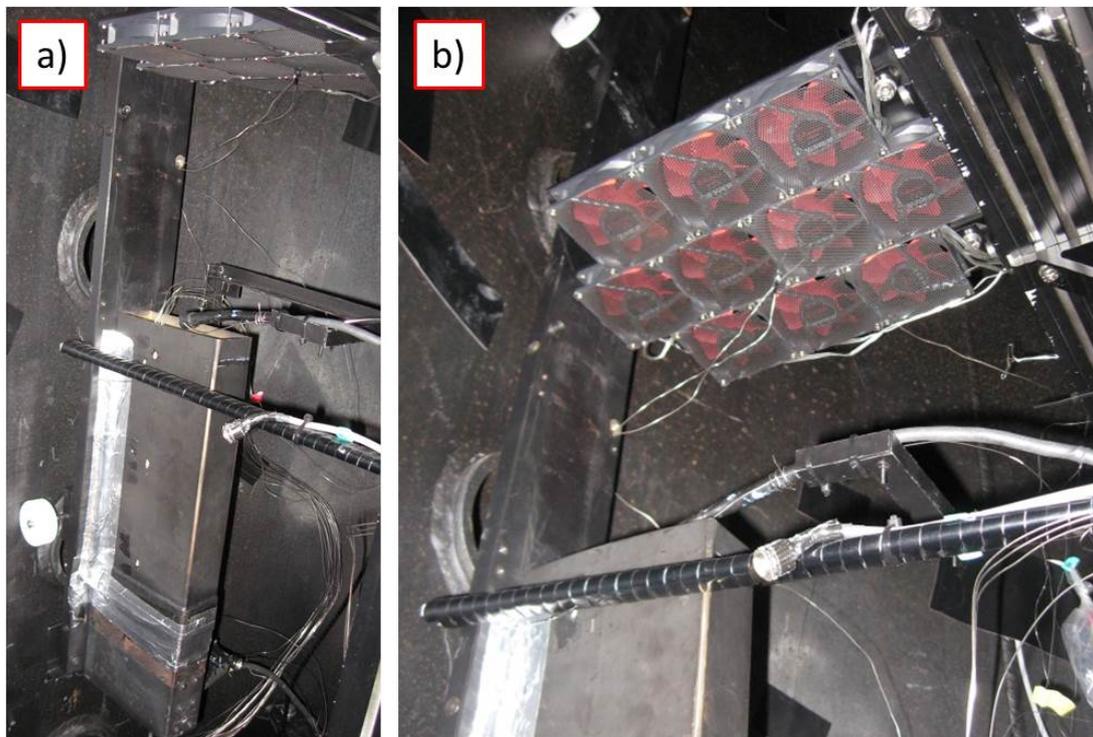


Abbildung 7.15: a),b) Installation des Rekombinators mit 300-mm-Kamin ohne Hutze

rechte Seite zeigt mit aufwärts gerichteter Perspektive die Gegenströmungsvorrichtung, die auf den Auslass des Rekombinators gerichtet ist.

Das Betriebsverhalten wird zunächst wieder ohne Gegenströmung untersucht und mit den anderen Modellvarianten verglichen. Abbildung 7.16 zeigt die Katalysatorblechtemperaturen und Einlasskonzentrationen der drei verwendeten Varianten. Die di-

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung

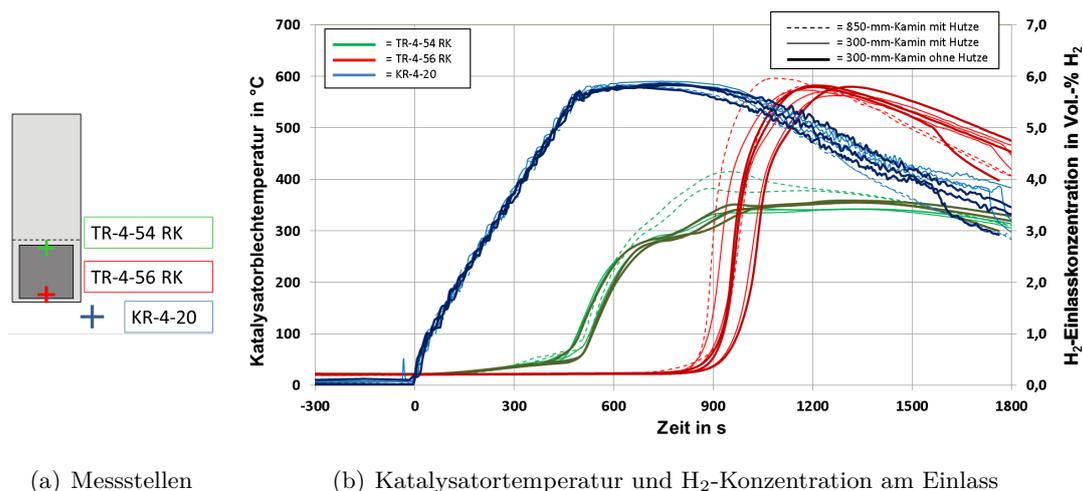


Abbildung 7.16: Vergleich des Startverhaltens aller Versuche mit 850-mm-Kamin / 300-mm-Kamin mit und ohne Hutze (ohne Gegenströmung)

cken, durchgezogenen Linien (jeweils dunklere Farbe) stellen dabei die Versuche mit 300-mm-Kamin ohne Hutze dar (R4-P-17/-21/-22). Sowohl die H_2 -Konzentrationen als auch die Temperaturen auf den Blechen sind über den gesamten Zeitraum nahezu deckungsgleich mit den Untersuchungen bei gleicher Kaminhöhe mit Hutze. Das bedeutet, dass die Hutze bzw. der Strömungswiderstand der Auslassöffnung nur einen marginalen Einfluss auf das Betriebsverhalten ohne Gegenströmung besitzt. Die Temperaturen des 850-mm-Kamins liegen aufgrund des etwas höheren Kaminzugs und der damit einhergehenden größeren, einströmenden Wasserstoffmenge leicht über den Versuchen mit 300-mm-Kamin. Dementsprechend sinken die Konzentrationen ab ca. 1200 s geringfügig schneller (blau: dünne, unterbrochene Linie).

Abbildung 7.17 vergleicht die H_2 -Einlasskonzentrationen und Katalysatortemperaturen der Versuche mit und ohne Gegenströmung. Die Wasserstoffkonzentration liegt wie in den übrigen Versuchen auch aufgrund der Durchmischung durch die Gegenströmung bis zu 1 Vol.-% H_2 niedriger. Die Rekombinationsreaktion an der Blechoberkante scheint unter Berücksichtigung der dortigen Temperaturen unabhängig von der Gegenströmung zeitgleich zu starten. Jedoch ist der jeweilige Temperaturanstieg unterschiedlich. Zur Erklärung wird hierfür der über zehn Sekunden gemittelte Gradient der Temperaturänderung $g_{T,10s}$ über

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = g_{T,10s} = \frac{T_{t+10} - T_t}{10 \text{ s}} \quad (7.1)$$

definiert. Dieser Gradient gibt die Temperaturveränderung über eine Zeitdauer von 10 Sekunden wieder. Abbildung 7.18 zeigt den Vergleich von $g_{T,10s}$ für die Versuche mit und ohne Gegenströmung (durchgehende / unterbrochene Linie). Hieraus wird deutlich, dass unter Einfluss der Gegenströmung der Temperaturgradient früher steigt und an der

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung

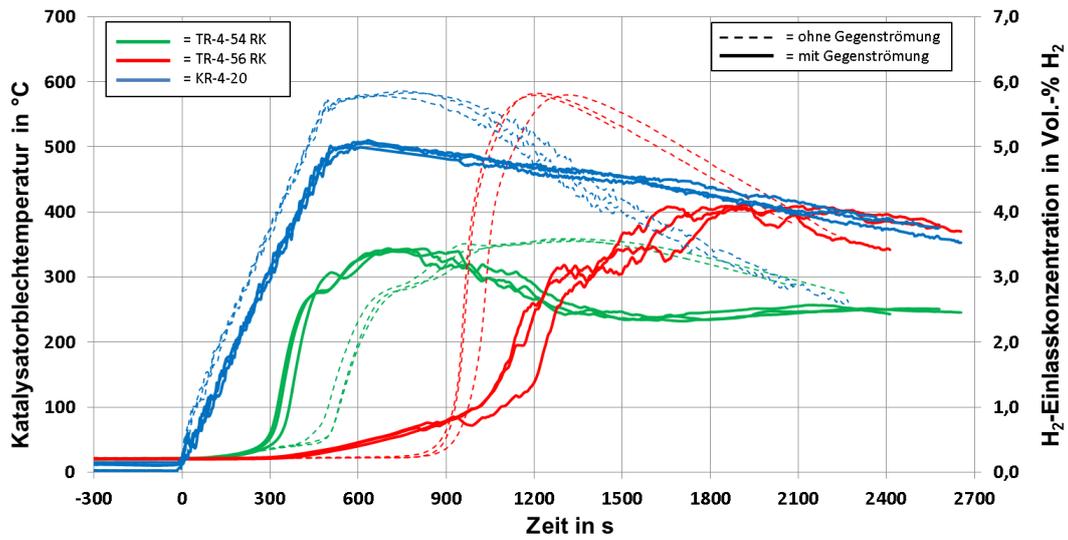


Abbildung 7.17: Vergleich der Katalysatortemperatur und Einlasskonzentration des Modells ohne Hutze mit / ohne Gegenströmung (R4-P-17 bis R4-P-22)

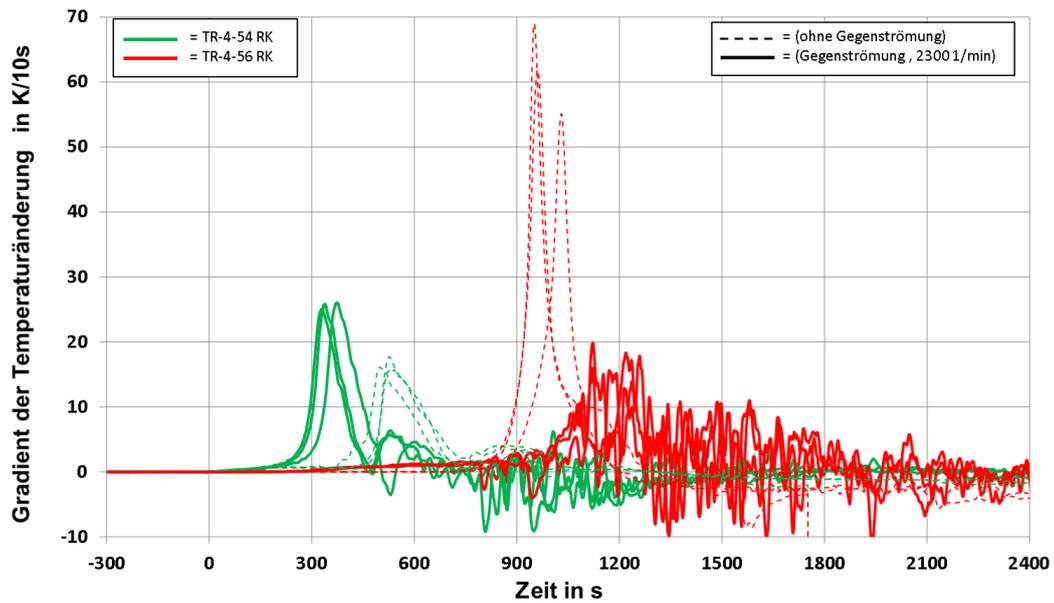


Abbildung 7.18: Verlauf des Temperaturgradienten $g_{T,10s}$ mit und ohne Gegenströmung über der Zeit (R4-P-17 bis R4-P-22)

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung

Oberkante Werte bis zu 26 K/10 s erreicht. Dadurch überschreitet die Oberkante des Blechs die Temperatur von 100 °C bereits zum Zeitpunkt von 320 - 340 s, nachdem Wasserstoff erstmalig am Einlass registriert wird. Ohne Gegenströmung startet $g_{T,10s}$ erst ca. 180 s (3 Minuten) später und erreicht nur Werte von bis zu 18 K/10 s, wodurch erst ab 500 - 530 s Temperaturen von über 100 °C registriert werden.

Hierbei ist bemerkenswert, dass die Temperaturen anfangs an der Oberkante ohne Gegenströmung höher sind, obwohl die Wasserstoffkonzentration im Zeitraum bis 500 s um ca. 0,5 Vol.-% H_2 niedriger ist (Abb. 7.17). Von 500 - 900 s liegt sogar ein noch höherer Konzentrationsunterschied von 1 Vol.-% H_2 vor. Erst ab dem Zeitpunkt von 900 s sind die Blechtemperaturen an der Oberkante identisch. Das Temperaturmaximum unterscheidet sich ebenfalls nur geringfügig und liegt bei ca. 350 °C, wobei mit Gegenströmung der Zeitpunkt bei 700 s ungefähr 500 s früher registriert wird. Ebenfalls bemerkenswert ist, dass die Temperatur nach Erreichen des Maximums wieder sinkt und bei ca. 250 °C stationär zu werden scheint.

Für die Betrachtung der Unterkante (TR-4-56 RK, Abb. 7.18) ergibt sich ein abweichendes Bild. Im Falle ohne Gegenströmung steigt der Temperaturgradient der Unterkante ca. 400 s später im Vergleich zur Oberkante. Hierbei erreicht $g_{T,10s}$ jedoch Werte von bis zu knapp 70 K/10 s, was in allen Versuchen unter Naturkonvektionsbedingungen beobachtet wurde. Mit Gegenströmung startet der Temperaturgradient zwar früher, bleibt aber bis ca. 1100 s unter 10 K/10 s. Danach steigt der Gradient zwar, erreicht jedoch nur Werte von knapp 20 K/10 s. Die Maximaltemperatur der Unterkante unter Einfluss der Gegenströmung liegt zudem mit 400 °C knapp 200 °C unterhalb des Maximums für die Versuche ohne Gegenströmung (siehe Abb. 7.17). Ebenfalls zeigt die Temperaturkurve (durchgehende, rote Linie) nach 1200 s einen unruhigen Verlauf. Dies ist vermutlich auf eine schwankende Strömungsgeschwindigkeit durch den Rekombinator zurückzuführen, die die Wasserstoffmenge und somit die exotherme Wasserstoffrekombination beeinflusst.

Dennoch wird aus Abbildung 7.19 ersichtlich, dass sich auch unter Einfluss der Gegenströmung ein Temperaturprofil auf den Katalysatorblechen einstellt, das qualitativ mit den Versuchen ohne Gegenströmung vergleichbar ist. Rechts ist die Positionierung des jeweiligen Thermoelements mit der dazugehörigen Linienfarbe ersichtlich, wobei sich die Angaben in [mm] auf die Entfernung bis zur Oberkante des Bleches beziehen (kleine, rote Markierung). Hierbei muss beachtet werden, dass aus Gründen der Darstellung im Vergleich zum Diagramm das Katalysatorblech um 180° (Uhrzeigersinn) gedreht ist und somit die Anströmrichtung von oben nach unten verläuft (siehe Darstellung rechte Seite). Ab ca. 1900 s weisen die Thermoelemente an der Unterkante des Bleches die höchsten Temperaturwerte auf, während an der Oberkante die Temperaturen niedriger sind. Dies entspricht einem typischen Temperaturverlauf unter Naturkonvektion (vgl. Abb. 4.23 und 4.24 in Kap. 4.3.2). Daher kann wieder darauf geschlossen werden, dass die Durchströmungsrichtung des Rekombinators von unten nach oben der Gegenströmung entgegen verläuft, sobald ein solches Temperaturprofil beobachtet wird.

Darauf aufbauend werden in Abbildung 7.20 die Temperaturprofile der Katalysator-

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung

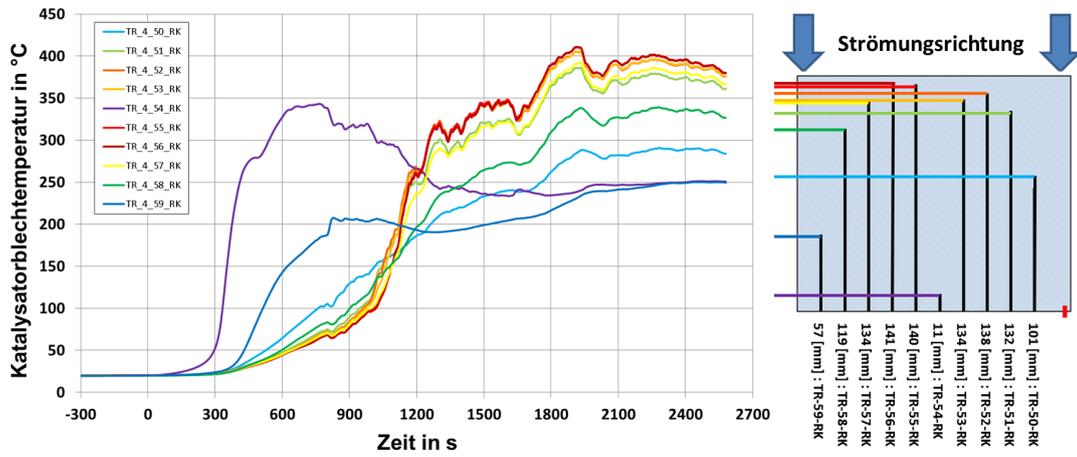


Abbildung 7.19: Ausbildung des Temperaturprofils auf Katalysatorblech 1 (R4-P-19)

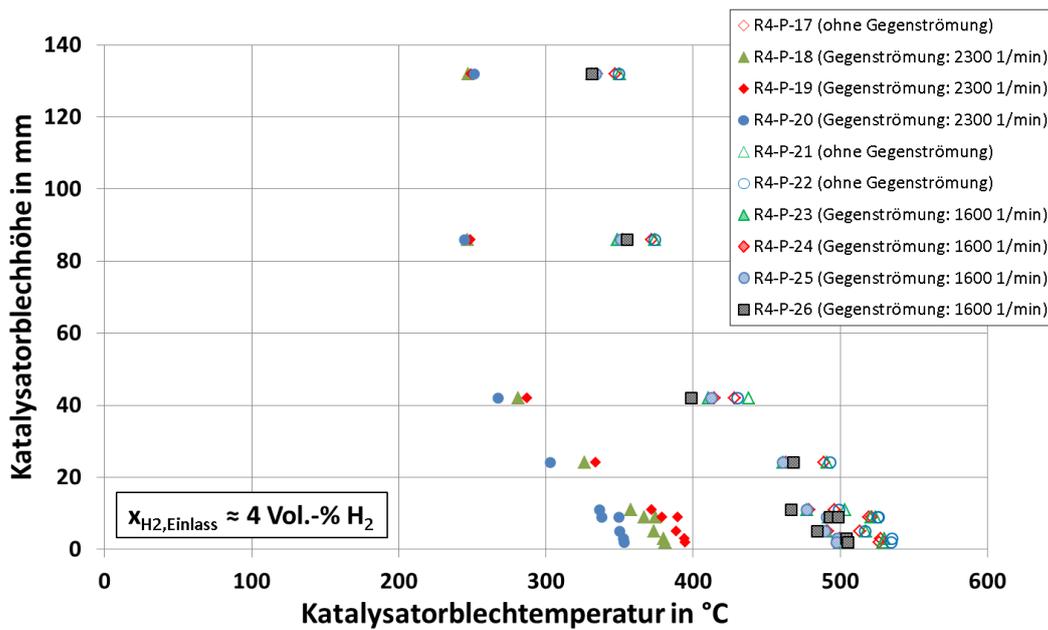


Abbildung 7.20: Vergleich der Temperaturprofile mit und ohne Gegenströmung (R4-P-17 bis R4-P-26)

bleche für die Versuche mit und ohne Gegenströmung zum Vergleich für eine Einlasskonzentration von ungefähr 4 Vol.-% H_2 dargestellt. Dabei ist die Blechhöhe auf der Ordinate über der Katalysatorblechtemperatur auf der Abszisse aufgetragen. Die Katalysatorblechhöhe bezieht sich hierbei auf die Unterkante, die dementsprechend bei 0 mm liegt. Die geschlossenen Symbole spiegeln die Versuche mit Gegenströmung wider (R4-P-18/-19/-20), während die offenen Symbole Versuche ohne Gegenströmung darstellen (R4-P-17/-21/-22). Zusätzlich sind in diesem Diagramm die Versuche R4-P-23 bis R4-P-26 eingetragen (schraffiert gefüllte Symbole), die mit einer reduzierten Drehzahl der Axiallüfter von 1600 1/min durchgeführt worden sind. Diese Profile sind streng genommen noch nicht stationär, da die Versuche nur die Startphase der Rekombination beleuchten. Dennoch ist deutlich der Temperaturunterschied zwischen den Versuchen mit und ohne bzw. mit reduzierter Gegenströmung zu erkennen. Während bei einer Eintrittskonzentration von 4 Vol.-% H_2 die Temperatur an der Unterkante in den Versuchen mit maximaler Gegenströmung zwischen 350 - 400 °C liegt, erreicht sie ohne Gegenströmung Werte von bis zu 535 °C. An der Oberkante ist der Unterschied der Temperatur mit 100 K etwas geringer, aber dennoch ausgeprägt. Die Temperaturprofile mit reduzierter Drehzahl liegen vollständig zwischen den Versuchen mit maximaler bzw. ohne Gegenströmung, wobei der Temperaturunterschied zu den Versuchen ohne Gegenströmung nur 20 - 30 K beträgt. Somit ist eine Korrelation zwischen der Drehzahl der Axiallüfter respektive Geschwindigkeit der Gegenströmung und der sich ausbildenden Temperaturen auf den Katalysatorplatten erkennbar. Die Gegenströmung führt in Abhängigkeit der Geschwindigkeit zu geringeren Temperaturen bei gleicher Eintrittskonzentration. Dieses Verhalten kann damit erklärt werden, dass die Gegenströmung den Naturzug durch den Kamin behindert und somit dessen Geschwindigkeit reduziert. Je höher die Geschwindigkeit der Gegenströmung, desto größer ist der Widerstand gegen den Auftrieb im Kamin. Dadurch sinkt der Volumenstrom und folglich die absolute Wasserstoffmenge, die durch den Rekombinator strömt. Somit verringert sich die Rekombinationsrate und folglich auch die Temperatur an den Katalysatorblechen. Dennoch ist anhand des Vergleichs zwischen Versuchen mit Gegenströmung bei reduzierter Geschwindigkeit und Versuchen ohne Gegenströmung offensichtlich, dass der Einfluss der Gegenströmung erst bei höheren Geschwindigkeiten relevant wird. Die reduzierte Drehzahl von 1600 1/min führt zu Temperaturabweichungen von 20 - 30 K, während die doppelte Drehzahl Abweichungen von über 100 -200 K verursachen kann.

Der Widerstand der Gegenströmung ist zusätzlich anhand der Wasserstoffkonzentration am Einlasskatharometer in Abbildung 7.17 zu erkennen. Während diese in den Versuchen mit Hutze und maximaler Gegenströmung stets unterhalb der Einlasskonzentration ohne Gegenströmung liegt (vgl. Abb. 7.5 und Abb.7.12), sinkt sie ohne Hutze und maximaler Gegenströmung langsamer, was auf einen geringeren Wasserstoffabbau schließen lässt. Ab dem Zeitraum 1200 s bis 1350 s liegen die Versuche mit Gegenströmung sogar über den Versuchen ohne Gegenströmung und weisen eine H_2 -Differenz von ungefähr 1 Vol.-% H_2 auf. Dies lässt ebenfalls die Vermutung zu, dass die Gegenströmung die stationäre Durchströmung des Rekombinators von unten nach oben behindert und so die Rekombinationsrate bzw. den Wasserstoffabbau verringert.

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung

Zur Untersuchung der Durchströmungsrichtung werden alternativ wieder die Thermoelemente am Einlass und Auslass des Rekombinators betrachtet. Abbildung 7.21 zeigt sowohl die Einlass- und Auslasstemperaturen als auch die Positionierung am Rekombinator. Die Thermoelemente TR-4-90 RG und TR-4-91 RG zeigen keine erhöhten Temperaturen und steigen nur geringfügig mit zunehmender Versuchsdauer. Das Thermoelement am Einlass hingegen (TR-4-89 RG) registriert schon ab 300 s steigende Temperaturen, wohingegen das Auslassthermoelement TR-4-92 RG bis ca. 750 s nahezu unbeeinflusst bleibt. Im Zeitraum von 300 s bis 750 s liegt die Temperatur am Einlass durchgängig über der Auslasstemperatur, wobei die Temperaturdifferenz zum Zeitpunkt von 750 s ungefähr 60 - 80 °C beträgt. Hierbei ist bemerkenswert, dass die Rekombinationsreaktion an der Oberkante des Katalysatorblechs früher startet und bereits kurz nach 300 s Werte von über 100 °C bzw. ab 600 s sogar Temperaturen von über 300 °C erreicht. In Anbetracht dessen wird deutlich, dass im Zeitraum bis 750 s eine Strömung von oben nach unten durch den Rekombinator herrschen muss. Die Temperaturerhöhung kann nicht auf Wärmestrahlung zurückgeführt werden, da zu dieser Zeit die Unterkante des Katalysatorblechs noch weit unter 100 °C liegt.

Dieser Effekt wird auch bei der reduzierten Gegenströmung ansatzweise beobachtet (Abbildung 7.22). Auch hier registriert das Thermoelement TR-4-89 RG am Einlass als erstes einen Temperaturanstieg, der nicht durch Wärmestrahlung erklärt werden kann. Ab ungefähr 300 s zeigt das Einlassthermoelement bis 500 s Temperaturwerte von bis zu knapp 40 °C an, während am Auslass noch keine Veränderung eintritt. Diese Temperaturverläufe lassen wiederum auf eine Durchströmung von oben nach unten aufgrund der Gegenströmung schließen, auch wenn dieser Effekt bei weitem nicht so ausgeprägt ist wie in den Versuchen mit der maximalen Gegenströmung, wo Einlasstemperaturen von bis zu knapp 80 °C gemessen werden. Ab 500 s bricht die Einlasstemperatur allerdings wieder ein und die Auslasstemperatur TR-4-92 RG steigt stetig auf Werte bis über 200 °C, die schon in den Versuchen ohne Gegenströmung beobachtet worden sind (vgl. Abb. 7.13). TR-4-89 RG bleibt bis ungefähr 750 s konstant bei etwas über 20 °C und steigt dann erst auf Werte um 50 °C, was nun allerdings durch die Wärmestrahlung an der Unterkante der Katalysatorbleche induziert wird und somit nicht die reale Gastemperatur am Einlass widerspiegelt.

Der Vollständigkeit halber ist in Abbildung 7.23 die Auslasskonzentration (KR-4-08) für die Versuche R4-P-17 bis R4-P-26 aufgetragen. Die Linienfarben beziehen sich dabei auf die Stärke der Gegenströmung bzw. die Drehzahl der Axialventilatoren mit schwarz für „ohne Gegenströmung“, blau für 1600 1/min und rot für 2300 1/min. Die Auslasskonzentration verhält sich zu anfangs nahezu versuchsunabhängig, bis sie ab ca. 400 s für Versuche ohne Gegenströmung anfängt instabil zu werden und zu sinken. Leicht zeitversetzt folgen die Versuche mit reduzierter Gegenströmung, wobei diese relativ gesehen schneller abfallen und ab ca. 730 s in den negativen Bereich absacken. Diese unphysikalischen Messwerte sind wie schon zuvor auf die instationären Verhältnisse am Auslass zurückzuführen, woraus eine entsprechend hohe Messwertungenauigkeit resultiert. Dennoch wird deutlich, dass die Auslasskonzentration im Falle der reduzierten Gegenströmung schneller fällt, da ohne Gegenströmung noch ca. 200 s vergehen, bevor auch hier

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung

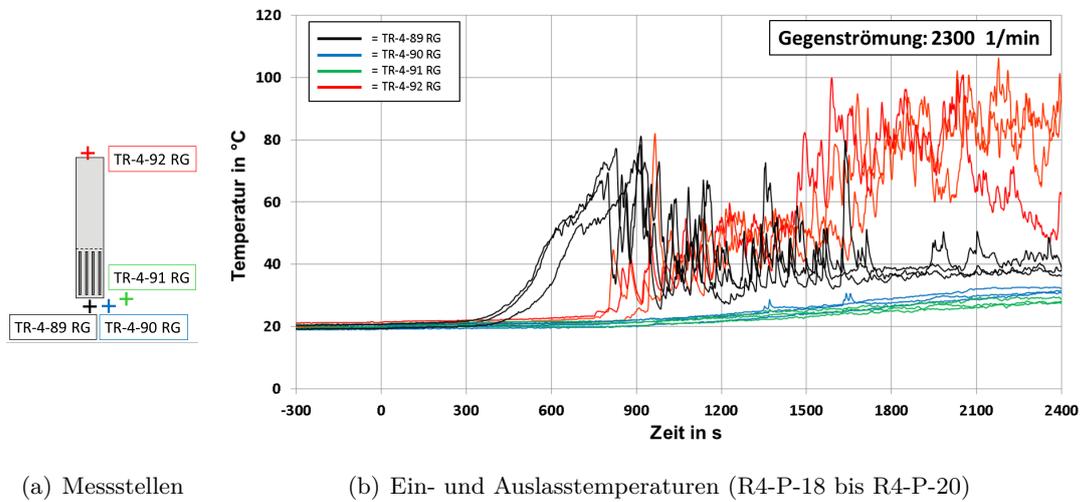


Abbildung 7.21: Vergleich der Temperaturen am Rekombinatorein- und auslass zur Untersuchung der Durchströmungsrichtung bei maximaler Gegenströmung

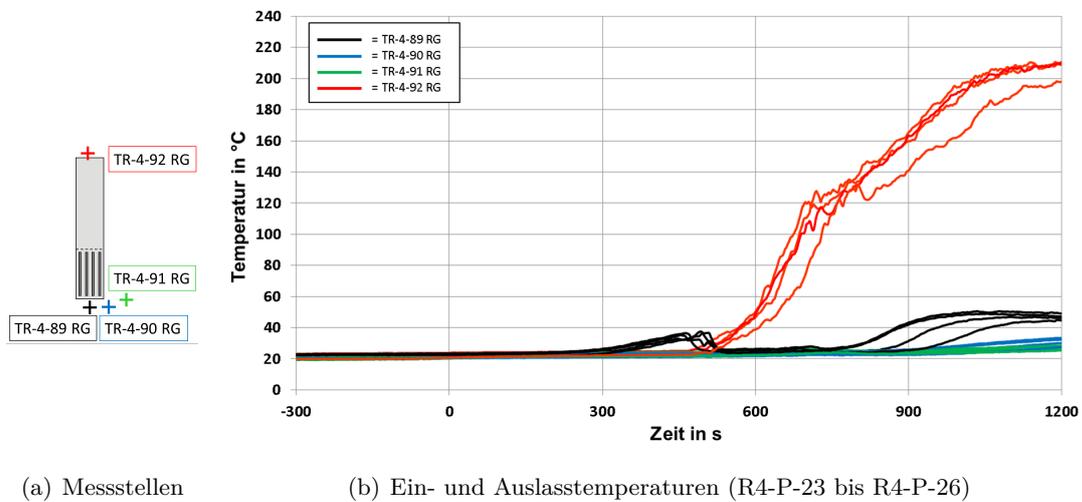
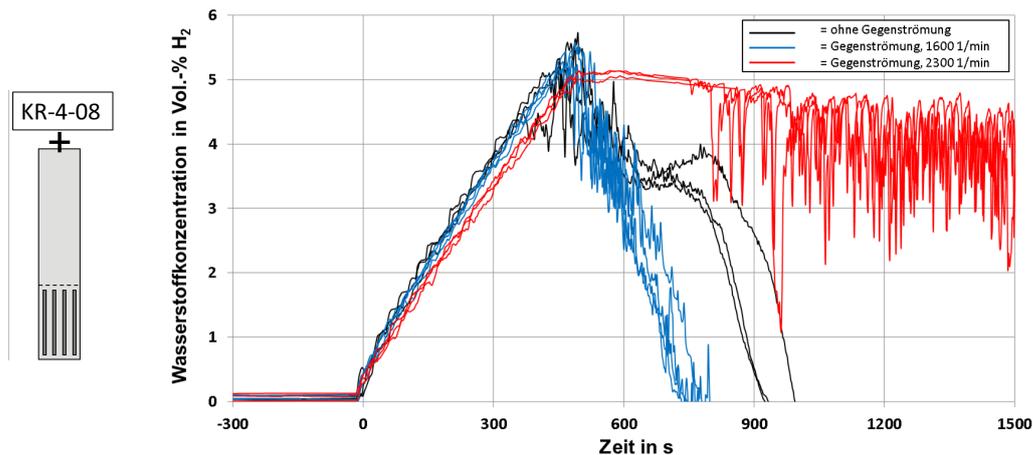


Abbildung 7.22: Vergleich der Temperaturen am Rekombinatorein- und auslass zur Untersuchung der Durchströmungsrichtung bei reduzierter Gegenströmung

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung



(a) Messstellen

(b) H₂-Konzentration des Katharometers KR-4-08

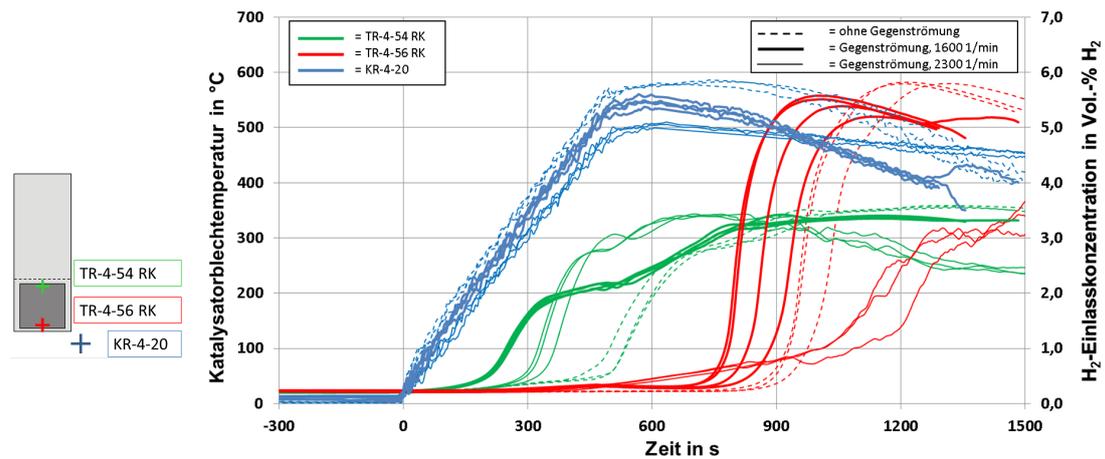
Abbildung 7.23: Auslasskonzentration während der Versuche R4-P-17 bis -26

der Messwert des Katharometers im negativen Bereich liegt.

Im Gegensatz dazu ist die Auslasskonzentration mit maximaler Gegenströmung bis ca. 750 s nahezu unbeeinflusst. Dies unterstützt mit Hinblick auf die Temperaturen sowohl an den Katalysatorblechen als auch am Rekombinatoreinlass die These, dass bis zu diesem Zeitpunkt eine entgegengesetzte Strömung durch den Kamin vorherrscht. Erst danach wird das Messsignal des Katharometers durch das nun aufsteigende Gas beeinflusst, was in Form einer Messwerteschwankung mit einer Amplitude von über 1 Vol.-% H₂ zu erkennen ist. Diese Schwankungen sind auf die Strömungsverhältnisse am Auslass zurückzuführen. Der Katharometer hängt direkt über dem Auslass und wird sowohl von einem frischen H₂/Luft-Gemisch aus Richtung der Axialventilatoren angeströmt als auch vom wasserstoffarmen Gas aus dem Kamin. Da sich die beiden Strömungen direkt am Sensor KR-4-08 treffen, kommt es an der Stelle zu starken, turbulenten Mischungseffekten, die zu stark schwankenden Wasserstoffkonzentrationen führen. Dieser Effekt ist in abgeschwächtem Maße ebenfalls für die Versuche mit reduzierter Gegenströmung zu erkennen.

Abschließend zeigt Abbildung 7.24 die Einlasskonzentration und Katalysatorblechtemperaturen für alle Variationen der Gegenströmung (R4-P-17 bis R4-P-26). Die breiten Kurven stehen hierbei für die reduzierte Drehzahl der Axialventilatoren, die dünnen Kurven für die maximale Drehzahl und die unterbrochenen Kurven für die Versuche ohne Gegenströmung. Die H₂-Eintrittskonzentration für die reduzierte Gegenströmung verhält sich ähnlich wie die Versuche mit Hutze und Gegenströmung. Sie bleibt auch stets unter der Konzentration der Versuche ohne Gegenströmung, so dass die reduzierte Gegenströmung anscheinend nur einen geringfügigen Einfluss auf die Rekombinationsrate hat. Bemerkenswert ist allerdings, dass in den Versuchen mit 1600 1/min die Katalysa-

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung



(a) Messstellen

(b) Katalysatorortemperatur und H_2 -Konzentration am Einlass

Abbildung 7.24: Vergleich der H_2 -Einlasskonzentration und Katalysatorblechtemperatur unter verschiedenen Gegenströmungsgeschwindigkeiten (R4-P-17 bis R4-P-26)

torblechtemperaturen sowohl der Oberkante als auch der Unterkante früher steigen als während der Versuche mit 2300 l/min oder ohne Gegenströmung. Anscheinend führt die reduzierte Gegenströmung zu einem schnelleren Start der Rekombinationsreaktion. Mit Hinblick auf die kurzzeitig entgegengesetzte Durchströmung des Rekombinators, wie sie in Abbildung 7.22 zwischen 300 - 500 s identifiziert wurde, scheint die Gegenströmung den Antransport des Wasserstoffs von oben durch den Kamin zu unterstützen. Vermutlich handelt es sich um einen Geschwindigkeitsbereich, in dem anfangs die Gegenströmung überwiegt, so dass der Wasserstoff direkt an die Katalysatorbleche gefördert wird. Mit Beginn der Wasserstoffrekombination und dem damit einhergehenden thermischen Auftrieb überwiegt aber der Naturzug relativ früh gegenüber der Gegenströmung, so dass nun der Rekombinator durch den eigenen Naturzug von unten nach oben durchströmt wird und sich selbst bespeisen kann. Somit scheint die reduzierte Gegenströmung das Startverhalten zu beschleunigen. Die Wasserstoffkonzentration am Auslass des Rekombinators sinkt unter diesen Bedingungen ebenfalls schneller, was diese These ebenfalls unterstützt (siehe Abb. 7.23). Kurz nach dem Starten der Bleche scheint die Gegenströmung nur noch marginalen Einfluss zu besitzen, da sich sowohl die Maximaltemperaturen an der Unter- als auch Oberkante von den Versuchen ohne Gegenströmung nur geringfügig unterscheiden. Dieser Effekt eines beschleunigten Startverhaltens bei einer reduzierten Gegenströmung kann aber nicht mit letzter Sicherheit verifiziert werden.

7.3 Zusammenfassung der Ergebnisse unter Einfluss einer Gegenströmung

Die Ergebnisse zeigen, dass die Rekombinationsreaktion unabhängig von den Randbedingungen während der Versuche ausnahmslos startet und sich ähnliche Betriebsbedingungen während der Versuche einstellen. Zudem zeigen die ersten beiden Varianten des getesteten Rekombinatormodells (300- und 850-mm-Kamin jeweils mit Hutze) nur einen marginalen Einfluss der Gegenströmung auf das Betriebsverhalten. Diese behindert die im Kamin aufsteigende Luft kaum, da die Hutze des Rekombinatormodells eine direkte Durchströmung anscheinend verhindert.

Dahingegen zeigt das Rekombinatormodell mit 300-mm-Kamin ohne Hutze unter Einfluss einer Gegenströmung ein geändertes Betriebsverhalten. Insbesondere konnte gezeigt werden, dass gerade zu Beginn der Wasserstoffrekombination eine Durchströmung des Rekombinatormodells abwärts durch den Kamin induziert wird. Dies wird daran abgeleitet, dass die Temperaturen sowohl auf den Katalysatorblechen als auch am Einlass steigen, während die Bedingungen am Auslass noch keine steigenden Temperaturen oder sinkenden H_2 -Konzentrationen zeigen. Der Einfluss der Gegenströmung auf das Betriebsverhalten ist dabei von der Drehzahl abhängig. Je höher die Geschwindigkeit desto höher sind die Abweichungen bzgl. Temperaturen und Wasserstoffkonzentrationen im Vergleich zur den Untersuchungen ohne Gegenströmung. Zwar konnte gezeigt werden, dass sich diese abwärts gerichtete Durchströmung des Modells nach der Aufheizphase der Katalysatorbleche wieder umkehrt, doch scheint die Gegenströmung den Volumenstrom und somit auch die Wasserstoffrekombinationsrate zu beeinträchtigen. So führt die Gegenströmung mit maximaler Geschwindigkeit zu einem Temperaturprofil, das im Vergleich zum Profil ohne Gegenströmung ca. 100 - 200 °C niedriger liegt. Der Effekt ist auch bei reduzierter Geschwindigkeit erkennbar, ist jedoch mit Temperaturunterschieden von bis zu 30 °C nicht so ausgeprägt. Die Beeinträchtigung der Wasserstoffrekombinationsrate kann mit dem zusätzlichen Widerstand aufgrund der Gegenströmung erklärt werden, die wegen der fehlenden Hutze direkt von oben in den Kamin gelangt. Dieser Widerstand wirkt direkt gegen den durch das Rekombinatormodell aufsteigenden Naturzug und verringert somit den Volumenstrom und folglich auch die in den Einlass einströmende Menge an Wasserstoff. Dadurch sinkt die Rekombinationsrate und dementsprechend auch die Temperatur auf den Katalysatorblechen. Zusätzlich wurde ein früheres Starten der Katalysatorblechtemperaturen bei reduzierter Gegenströmung beobachtet, was im Ansatz mit einem anfänglich besseren Antransport des Wasserstoffs zwar begründet, jedoch im Rahmen dieser Versuche noch nicht belastbar belegt werden kann. Dennoch stellt die Modellvariation mit 300-mm-Kamin ohne Hutze nur einen Extremfall für Rekombinatoren im AREVA-Design dar, in dem die Gegenströmung direkt in den Auslass gelangt. Mit Hinblick auf Rekombinatoren von anderen Herstellern, die keinen horizontalen Auslass in Form einer Hutze o.ä. besitzen und die Gegenströmung direkt von oben in den Kamin eindringen kann, muss dieser Effekt allerdings berücksichtigt bzw. genauer untersucht werden.

7 Betriebsverhalten eines Rekombinators in einer Gegenströmung

Bezüglich der Übertragbarkeit dieser Versuche auf reale Störfälle muss beachtet werden, dass die Erzeugung der Gegenströmung mittels Axialventilatoren auch unter Verwendung der Lüftergitter zu einem anderen Strömungsbild bzw. anderen Turbulenzeigenschaften führen kann. Zwar sind die Geschwindigkeiten, denen das Rekombinatormodell ausgesetzt wurde, in einer ähnlichen Größenordnung wie die, die im Rahmen einer Simulationsrechnung abgeschätzt wurden, dennoch sind sie am Einlass und Auslass direkt nicht bekannt. Eine Durchführung dieser Versuche insbesondere unter Verwendung der optischen Strömungsmesstechnik PIV könnte zusätzliche Informationen zu den Strömungsverhältnissen am Einlass und Auslass des Rekombinator ergeben und so den Einfluss der Gegenströmung genauer quantifizieren. Zusätzlich könnten Versuche zur Gegenströmung in größeren Versuchsbehältern wie der THAI-Anlage in Eschborn zeigen, ob die Ergebnisse, die im Rahmen dieser Arbeit an einem kleinskaligem Rekombinator gewonnen wurden, auf kommerzielle Rekombinatoren übertragen werden können.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Katalytische Rekombinatoren werden in Kernkraftwerken als passive Sicherheitskomponenten eingesetzt, um die Bildung zündfähiger Wasserstoff/Luft-Gemische, die während eines Störfalls mit Kernschmelze entstehen können, nach Möglichkeit zu verhindern bzw. die Auswirkungen einer Wasserstoffverbrennung zu minimieren. In diesem Zusammenhang ermöglicht das Jülicher Rechenprogramm REKO-DIREKT das Betriebsverhalten von Rekombinatoren zu simulieren und deren Einfluss auf den Störfallablauf zu untersuchen. Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Modellierung der auf Naturkonvektion basierenden Durchströmung des Rekombinatorgehäuses zu optimieren und anhand experimenteller Daten zu validieren. Ein weiteres Ziel ist die Untersuchung des Betriebsverhaltens eines Rekombinators unter Einfluss einer abwärtsgerichteten Luftströmung, die z.B während eines Störfalls innerhalb des Sicherheitsbehälters in Wandnähe auftreten kann.

Die theoretische Betrachtung des Naturzugs zeigt, dass der sich einstellende Massenstrom durch den Rekombinator zum einen maßgeblich von der Kaminhöhe abhängt, zum anderen von den Einlass- und Betriebsbedingungen des Rekombinators. Daher wurden im Versuchsbehälter REKO-4 Experimente zum Betriebsverhalten eines kleinskaligen Rekombinators durchgeführt, der mit Kaminsegmenten unterschiedlicher Höhe ausgerüstet werden kann. REKO-4 umfasst neben konventioneller Messtechnik auch innovative Messmethoden wie Katharometer zur in-situ Wasserstoffkonzentrationsmessung, die im Rahmen dieser Arbeit qualifiziert werden musste, und PIV als optische Strömungsmesstechnik.

Um Aussagen über die Genauigkeit der Messergebnisse treffen zu können, wurde eine detaillierte Fehlerbetrachtung aller im Versuchsstand verwendeten Messtechniken durchgeführt. Hierbei wurde insbesondere auf die Messung der Wasserstoffkonzentration mit Katharometern und auf die Geschwindigkeitsmessung mit PIV eingegangen. Zur Qualifizierung der Katharometermessung wurden Versuche mit H_2 /Luft-Gemischen in REKO-4 durchgeführt, die eine vollständige Massen- bzw. Mengenbilanz im Behälter ermöglichen. Diese Versuche beinhalten sowohl Experimente mit als auch ohne Rekombinator. Die Analyse der PIV-Messgenauigkeit umfasst die Auswertung der Geschwindigkeitsfelder am Einlass des Rekombinators und die damit verbundene Berechnung des Gasmassenstroms durch das Rekombinatorgehäuse. Die Bilanzierung der H_2 -Rekombination über einen Versuch zeigt, dass sowohl die in den Versuchsstand REKO-4 eingespeiste H_2 -Menge als auch der mit PIV gemessene Massenstrom durch das Rekombinatorgehäuse bis auf 2 % genau übereinstimmen und somit die Messungen ein in sich konsistentes Bild ergeben.

Die Versuche zur Kaminhöhenvariation umfassen 18 Versuchsreihen mit insgesamt ca. 960 Messpunkten, die mit vier verschiedenen Kaminhöhen zwischen 150 mm und 850 mm bei zum Teil unterschiedlichen Drücken zwischen 1,0 bar_{abs} und 3,0 bar_{abs} durchgeführt worden sind. Eine Versuchsreihe umfasst auch den Rekombinator ohne Kamin, so dass die strömungstechnischen Eigenschaften des Katalysatoreinschubs bestimmt werden können. Die Ergebnisse bzw. die Messpunkte der Experimente liefern u.a. die für die Modellierung von Rekombinatoren zentrale Korrelation zwischen der H₂-Einlasskonzentration, der Katalysatorblechtemperatur und der Einlassgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der jeweiligen Kaminhöhe des Rekombinators bei unterschiedlichen Drücken. Zudem konnte das stationäre Temperaturprofil auf den Katalysatorblechen, das in vorherigen Arbeiten u.a. in REKO-3 unter Zwangskonvektionsbedingungen ermittelt worden ist, im Rahmen der unter Naturkonvektionsbedingungen durchgeführten Versuche in REKO-4 bestätigt werden.

Das bestehende numerische Kaminmodell von REKO-DIREKT wurde optimiert, indem zum einen die Modellparameter an die Strömungen im Rekombinator angepasst und zum anderen die Reibungsbeiwerte anhand unterschiedlicher Daten aus der Literatur bestimmt wurden. Das optimierte Modell wurde zudem anhand der gewonnenen Datenbasis validiert. Der Vergleich zwischen experimentellen und berechneten Daten zeigt eine gute Übereinstimmung für Kaminhöhen über 300 mm mit einer Abweichung von weitgehend unter 10 %. Lediglich bei niedrigen Geschwindigkeiten, die kurz vor Versuchsende nach fast vollständiger Rekombination des vorhandenen Wasserstoffs gemessen werden, steigen die Abweichungen, da die Versuchsbedingungen aufgrund der hohen relativen Feuchte im Behälter nicht mehr optimal sind. Auch für Versuche mit höheren Drücken bis zu 2 bar_{abs} steigen die Abweichungen leicht an, liegen jedoch ebenfalls immer noch im Bereich von 10 %. Für Kaminhöhen unter 300 mm ergeben sich größere Abweichungen, die aber durch ein auf kleine Kaminhöhen optimiertes Kaminmodell ebenfalls auf ca. 12 % gesenkt werden können.

Mit dem optimierten Kaminmodell wurde anschließend ein repräsentativer Versuchspunkt eines großskaligen Rekombinator-Experiments in der THAI-Versuchsanlage nachgerechnet, der unter Verwendung eines kommerziellen Rekombinators gewonnen worden ist. Hierzu wurde das Rechenmodell mit aus der Literatur bekannten Strömungskennwerten angepasst, um die unterschiedlichen geometrischen Verhältnisse der in den jeweiligen Versuchen verwendeten Rekombinatoren zu berücksichtigen. Der Vergleich zeigt, dass mit dem optimierten Kaminmodell der in der THAI-Anlage gemessene Versuchspunkt sehr gut wiedergegeben werden kann. Ferner konnten Ergebnisse transienter Nachrechnungen mit dem um das optimierte Kaminmodell erweiterten Simulationscode REKO-DIREKT gezeigt werden, die im Anschluss an diese Arbeit anhand von Experimenten aus dem OECD/NEA-THAI Projekt (THAI-Anlage) durchgeführt und veröffentlicht worden sind. Diese Berechnungen bestätigen die Eignung des im Rahmen dieser Arbeit optimierten Kaminmodells für einen breiten Bereich sowohl geometrischer Parameter als auch thermophysikalischer, störfallrelevanter Randbedingungen.

Zur Untersuchung des Betriebsverhaltens eines Rekombinators in einer abwärts gerich-

teten Strömung wurden Experimente durchgeführt, in denen oberhalb des Rekombinators eine Anordnung von Axialventilatoren zur Realisierung einer Gegenströmung im Behälter REKO-4 installiert wurde. Die Versuche wurden mit unterschiedlichen Kaminhöhen und Geschwindigkeiten der Gegenströmung durchgeführt.

Die gewonnenen Versuchsdaten zeigen nur einen marginalen Einfluss der Gegenströmung auf das Start- und Betriebsverhalten, wenn der Rekombinator mit einer Auslasshutze ausgerüstet ist, die das rekombinierte Gas waagrecht aus dem Rekombinatorgehäuse führt. Diese Hutze verhindert ein Eindringen der Gegenströmung in den Rekombinatorkamin, so dass der Naturzug nicht gestört wird. Eine Rekombinatorvariante mit kurzem Kamin und ohne Hutze zeigt jedoch ein geändertes Betriebsverhalten. In diesem Fall kann zu Beginn der Wasserstoffrekombination eine durch die Axialventilatoren verursachte Durchströmung des Rekombinators von oben nach unten gezeigt werden. Mit fortlaufender Versuchsdauer kehrt sich diese Strömung aufgrund des dominierenden Naturzugs um, wobei die sich auf den Katalysatorblechen einstellende Temperaturen um bis zu 200 K niedriger als im betrachteten Referenzfall sind. Ferner wurde ein früheres Starten der Katalysatorblechtemperaturen bei reduzierter Gegenströmung beobachtet, was im Ansatz mit einem anfänglich besseren Antransport des Wasserstoffs zwar begründet, jedoch im Rahmen dieser Versuche noch nicht belastbar belegt werden kann. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass für Rekombinatorvarianten, bei denen eine entgegengesetzte Durchströmung von oben nach unten nicht durch konstruktive Maßnahmen verhindert wird, das Betriebsverhalten in einem entsprechenden Störfallszenario beeinflusst werden kann.

Die Ergebnisse dieser Arbeit haben das Verständnis sowohl für die Vorgänge im Rekombinator als auch für den Einfluss äußerer Faktoren signifikant erweitert. Mit dem in dieser Arbeit optimierten Kaminmodell liegt nun ein praxistaugliches numerisches Rekombinator-Modell vor, mit dem das Betriebsverhalten von Rekombinatoren in Störfallsimulationen berechnet werden kann. Der Einfluss einer Gegenströmung könnte aber unter Verwendung optischer Strömungsmesstechnik (z.B. PIV) noch genauer untersucht werden, wodurch eine detaillierte Analyse der resultierenden Vorgänge und somit eine Optimierung des Rekombinatorgehäuses in Bezug auf widrige Strömungsbedingungen ermöglicht werden könnte.

9 Literaturverzeichnis

- [AAKH⁺] ALLELEIN, H.-J., S. ARNDT, W. KLEIN-HESSLING, S. SCHWARZ, C. SPENGLER und G. WEBER: *COCOSYS: Status of development and validation of the German containment code system*. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln (Germany), Nuclear Engineering and Design 238, Seiten 872 bis 889.
- [ABA⁺01] ARNOULD, BACHELLERIE, AUGLAIRE, DE BOECK, BRAILLARD, ECKARDT, FERRONI, MOFFETT und VAN GOETHEM: *State of the art on hydrogen passive autocatalytic recombiner*, 2001. EUROPEAN UNION PARSOAR PROJECT, Proc. Int. Conf. Nuclear Engineering ICONE-9, Nizza, France, ICONE-546.
- [ABA⁺02] ARNOULD, BACHELLERIE, AUGLAIRE, DE BOECK, BRAILLARD, ECKARDT, FERRONI, MOFFETT und VAN GOETHEM: *State-of-the-Art on Passive Autocatalytic Recombiner, Handbook Guide for Implementing Catalytic Recombiners*, June 2002. EUROPEAN UNION PARSOAR PROJECT, Reference: Technical Note TA-185706 Ind. A.
- [ASS⁺10] ALLELEIN, H.-J., B. SIMON, U. SCHWARZ, E.-A. REINECKE, K. TROLLMANN und T. ZGAVC: *Abschlussbericht/Final Report: Untersuchungen zur weiteren Verbesserung der Methoden zur sicherheitstechnischen Bewertung der katalytischen Rekombination von Wasserstoff in Sicherheitsbehältern von Kernkraftwerken bei schweren Störfällen*, Juni 2010. LRST der RWTH Aachen University und Forschungszentrum Jülich, Reaktorsicherheitsforschung-Vorhaben-Nr.: 1501308.
- [BBB⁺01] BAND, BORGHOFF, BÜTTNER, KAULARD, KILIAN-HÜLSMEYER, MAQUA, MILDENBERGER, SCHIMPFKE, SONNENKALB, STAHL, WEISS und WETZE: *Mitigation of hydrogen hazards in water cooled power reactors*, February 2001. International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1196, ISSN 1011-4289.
- [BBB⁺13] BAND, BORGHOFF, BÜTTNER, KAULARD, KILIAN-HÜLSMEYER, MAQUA, MILDENBERGER, SCHIMPFKE, SONNENKALB, STAHL, WEISS und WETZE: *Fukushima Daiichi, 11. März 2011, Unfallablauf / Radiologische Folgen*, März 2013. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-59-5, 2.Auflage.
- [BG01] BEITZ und GROTE (Herausgeber): *Dubbel, Taschenbuch für den Maschi-*

9 Literaturverzeichnis

- nenbau. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2001. ISBN: 3-540-67777-1, 20.Auflage.
- [Böh06] BÖHM, J.: *Modellierung der Prozesse in katalytischen Rekombinatoren*, 2006. Dissertation am Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik der RWTH Aachen University.
- [BJWRC04] BINNEWIES, M., M. JÄCKEL, H. WILLNER und G. RAYNER-CANHAM: *Allgemeine und Anorganische Chemie*. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin, 2004. ISBN: 3-8274-0208-5.
- [Bli93] BLIEK, L.: *Grundlagen der elektrischen Temperatur-Meßtechnik*. 1993. Wirtschaftsverl. NW, Verlag für Neue Wiss., Bericht: E, ISBN:9783894293796, <http://books.google.de/books?id=u0hAAAACAAJ>.
- [Can11] *PARs*, 2011. Candu Energy Inc., Broschüre zu CANDU-Pars, Nr.: 1 866 96 CANDU (2 2638).
- [DIN96] *Grundlagen der Meßtechnik, Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit*, Mai 1996. Deutsche Norm: DIN 1319-3.
- [DIN99] *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*, Juni 1999. DIN V ENV 13005, Deutsche Fassung ENV 13005:19999.
- [Dri06] DRINOVAC, P.: *Experimentelle Untersuchungen zu katalytischen Wasserstoffrekombinatoren für Leichtwasserreaktoren*, 2006. Dissertation am Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik der RWTH Aachen University.
- [ES00] ECKARD, B. und LOSCH, N. (SIEMENS NUCLEAR POWER GMBH, OFFENBACH (GERMANY)): *Passive autocatalytic recombiner systems: Design, qualification and implementation*, Oktober 2000. 26 Reunión Anual, León.
- [Eyi05] EYINK, J.: *Recombiner Modelling in GASFLOW for EPR Application*, Juni 2005. SARNET WP12 Workshop, CEA, Paris.
- [GRS89] *Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Phase B, Eine zusammenfassende Darstellung*, Juni 1989. Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH.
- [Häf12] HÄFELE, B.: *Realisierung und Vermessung einer abwärts gerichteten, wandnahen Gasströmung innerhalb des Versuchsstandes REKO-4*, Februar 2012. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik der RWTH Aachen University.
- [HGAB11] HOURRI, GOMEZ, ANGERS und BENARD: *Computational study of horizontal subsonic free jets of hydrogen: Validation and classical similarity analysis*, Oktober 2011. Elsevier Ltd., international journal of hydrogen energy 36 (2011)15913 - 15918.
- [Hin99] HINDS, W. C.: *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. Wiley-Interscience, Januar 1999. ISBN-10:

9 Literaturverzeichnis

0471194107, ISBN-13: 978-0471194101, 2.Edition.

- [HKSZ95] HECK, R., G. KELBER, K. SCHMIDT und H. J. ZIMMER: *Hydrogen reduction following severe accidents using the dual recombiner-igniter concept*, 1995.
- [HS08] HOUF und SCHEFER: *Analytical and experimental investigation of small-scale unintended releases of hydrogen*, Februar 2008. Elsevier Ltd., international journal of hydrogen energy 33 (208)1435 - 1444.
- [Ide08] IDELCHICK, I.E.: *Handbook of Hydraulic resistance*. Jaico Publishing House, 2008. ISBN: 81-7992-118-2.
- [ILA12] *Intelligent Laser Applications GmbH*. Internetseite: www.ila.de, 2012. Adresse: Karl-Heinz-Beckurts-Straße 13, 52428 Jülich, Germany.
- [IP75] IOFFE, I. I. und L. M. PISSMEN: *Heterogene Katalyse, Chemie und Technik*. Akademie-Verlag, Berlin, 1975.
- [Jan10] JANSEN, C.: *Qualifizierung von Wasserstoffsensoren (Katharometer) für den Einsatz in einer Versuchsanlage zur Untersuchung der Wasserstoffrekombination*, Dezember 2010. Diplomarbeit der FH Aachen - University of Applied Sciences, angefertigt am Versuchsstand REKO-1 im Forschungszentrum Jülich.
- [Jüh07] JÜHE, S. H.: *Modellierung der Naturkonvektion in einem katalytischen Wasserstoffrekombinator*, April 2007. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik der RWTH Aachen University.
- [KAF⁺07] KANZLEITER, T., G. AHRENS, K. FISCHER, W. HÄFNER, G. KÜHNEL, A. ANDPOSS, F. FUNKE, G. LANGROCK, H.-J. ALLELEIN, G. WEBER und S. SCHWARZ: *Abschlussbericht, Versuchsanlage und Programm zur Untersuchung offener Fragen zum Spaltproduktverhalten im Sicherheitsbehälter, THAI Phase II (THAI = Thermohydraulik, Aerosole, Iod)*, März 2007. Becker Technologies GmbH, AREVA NP GmbH, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi, Reaktorsicherheitsforschung - Vorhaben Nr. 150 1272, Berichts-Nr.: 150 1272 - S1.
- [Kan93] KANZLEITER, T.F.: *Hydrogen deflagration experiments performed in a multicompartment containment*, 1993. Battelle-Institut e.V., Frankfurt-am-Main, Germany, Elsevier Science Publishers B.V.
- [Kan09] KANZLEITER, T.: *Quick Look Report: Hydrogen Recombiner Tests, HR-1 to HR-5, HR-27 and HR-28 (Tests without steam, using an Areva PAR)*, Februar 2009. Becker Technologies GmbH, Eschborn (Germany), Reactor Safety Research Project 150 1326, OECD-NEA THAI Project (contract 18 July 2007).
- [Kap07] KAPULLA, R.: *PIV-Grundlagen und Anwendungen am Paul-Scherrer-Institut*, Juni 2007. Informationsveranstaltung Strömungs- und Turbulenz-

9 Literaturverzeichnis

messtechnik, Zürich, Schweiz.

- [Kla11] KLAUCK, M. A.: *Optische Vermessung der Einlassströmung und Qualifizierung von Feuchtesensoren einer Versuchsanlage zur Untersuchung des Betriebsverhaltens katalytischer Rekombinatoren*, August 2011. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik der RWTH Aachen University.
- [Kle10] KLEMM, R.: *Thermoelemente in der industriellen Praxis*. RÖSSEL-Messtechnik GmbH, Dezember 2010.
- [Kob06] KOBOLD MESSRING GMBH: *Bedienungsanleitung für Digital-Manometer*, Juli 2006. www.kobold.com.
- [KSD⁺09] KELM, S., L. SCHOPPE, J. DORNSEIFER, D. HOFMANN, E.-A. REINECKE, F. LEISTNER und S. JÜHE: *Ensuring the long-term functionality of passive auto-catalytic recombiners under operational containment atmosphere conditions - An interdisciplinary investigation*, 2009. Nuclear Engineering and Design 239, Seiten 274 bis 280.
- [Kub13] KUBELT, C. M.: *Modellierung der Wärmeverluste eines katalytischen Rekombinatoren*, Januar 2013. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik der RWTH Aachen University.
- [KVS⁺12] KESSLER, G., A. VESER, F.-H. SCHLÜTER, W. RASKOB, C. LANDMANN und J. PÄSLER-SAUER: *Sicherheit von Leichtwasserreaktoren: Risiken der Nukleartechnologie*. Springer Vieweg, 2012. ISBN: 978-3-642-28380-2.
- [KYG⁺] KUZNETSOV, M., J. YANEZ, J. GRUNE, A. FRIEDRICH und T. JORDAN: *Hydrogen Combustion in a Flat Semi-Confined Layer with Respect to the Fukushima Daiichi Accident*. Proceedings of ICAPP 12, Chicago, USA, June 24-28, 2012, Paper 12419.
- [Luc04] LUCAS, K.: *Thermodynamik, die Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlungen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2004. 4.Auflage, ISBN: 3-540-14014-x.
- [Mar07] MARCINKOWSKA, K. (ATOMIC ENERGY OF CANADA LIMITED CHALK RIVER LABORATORIES, CANADA): *AECL Passive Autocatalytic Recombiner (PAR) for Hydrogen Mitigation in Nuclear Reactors*, Oktober 2007. Proceedings of International Symposium on Nuclear Energy, SIEN'07.
- [Mes] MESSTECHNIK SCHAFFHAUSEN GMBH: *Technische Daten Widerstandsthermometer: Grenzwertabweichung*. gemäß IEC 751 bzw. EN 60 751.
- [Mos12] MOSHÖVEL, M.: *Analytische Abschätzung des Einflusses von Wärmestrahlung auf die Gastemperaturmessung in Experimenten zur Wasserstoffrekombination*, November 2012. Studienarbeit am Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik der RWTH Aachen University in Zusammenarbeit

9 Literaturverzeichnis

mit dem IEK-6 (Forschungszentrum Jülich GmbH).

- [MSR04] MORFIN, F., J.-C. SABROUX und A. RENOUPREZ: *Catalytic combustion of hydrogen for mitigation hydrogen risk in case of a severe accident in a nuclear power plant: study of catalysts poisoning in a representative atmosphere*, 2004. (Elsevier), Applied Catalysis B, Volume 47, Seiten 47 bis 58.
- [Nat10] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. <http://physics.nist.gov/cuu/index.html>, 2010. Empfohlen vom Committee on Data for Science and Technology (CODATA).
- [NB06] NITSCHKE, W. und A. BRUNN: *Strömungsmesstechnik*. Springer Berlin Heidelberg, 2006. ISBN: 978-3-540-20990-4.
- [NIS11] *NIS-PAR - NIS Passiv Autocatalytic Recombiner (H₂-Recombiners)*, 2011. Siempelkamp, NIS Ingenieurgesellschaft mbH, Firmenbroschüre, www.siempelkamp-nis.com.
- [Nor12] NORMENAUSSCHUSS CHEMISCHER APPARATEBAU (FNCA) IM DIN: *DIN 28011: Gewölbte Böden - Klöpperform*, Juni 2012. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [Pap01] PAPULA, L.: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Band 3*. Vieweg, 2001. ISBN: 3-528-34937-9.
- [Pap06] PAPULA, L.: *Mathematische Formelsammlung, Für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Vieweg Verlag, 2006. ISBN-13: 978-3-8348-0156-2, 9. Auflage.
- [Pos] POSS, G.: *THAI-Facility and Program*. Reactor Safety, Engineering, Becker Technologies GmbH.
- [Rab10] RABINOVICH, S.: *Evaluating Measurement Accuracy - A Practical Approach*. Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2010. ISBN 978-1-4419-1455-2, e-ISBN 978-1-4419-1456-9, DOI 10.1007/978-1-4419-1456-9.
- [RBDT] REINECKE, E.-A., J. BÖHM, P. DRINOVAC und I.-M. TRAGSDORF: *Modelling of catalytic recombiners: Comparison of REKO-DIREKT calculations with REKO-3 experiments*. Proc. Int. Conf. Nuclear Energy for New Europe, Bled, Slowenien, 5.-8. September 2005, Paper No. 092.
- [RBK⁺10] REINECKE, E.-A., A. BENTAIB, S. KELM, W. JAHN, N. MEYNET und C. CAROLI: *Open issues in the applicability of recombiner experiments and modeling to reactor simulations*, 2010. Progress in Nuclear Engineering 52, Seiten 136 bis 147.
- [Rei99] REINECKE, E.-A.: *Reaktionskinetische Untersuchungen zur Auslegung von katalytischen Wasserstoffrekombinatoren*, 1999. Dissertation am Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik der RWTH Aachen University, D 82

(Diss. RWTH Aachen).

- [RKS⁺14] REINECKE, E.-A., S. KELM, B. SIMON, M. KLAUCK und H.-J. ALLELEIN: *Interpretation of the entire OECD/NEA-THAI HR test series including AREVA and AECL PARs using the code REKO-DIREKT*, November 2014. OECD/NEA THAI2, Final Seminar, Eschborn, Germany.
- [Roc92] ROCO, M. C.: *Particulate Two-Phase Flow*. Butterworth-Heinemann Ltd, 1992. ISBN-13: 978-0750692755.
- [RRB⁺00] ROYL, P., H. ROCHHOLZ, W. BREITUNG, J.R. TRAVIS und G. NECKER: *Analysis of steam and hydrogen distributions with PAR mitigation in NPP containments*, 2000. Nuclear, Engineering and Design, Volume 202, Page 231 bis 248, DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0029-5493\(00\)00332-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0029-5493(00)00332-0).
- [RSK09] RSK - *STELLUNGNAHME, Gefährdung des Sicherheitsbehälters von DWR durch Wasserstoffreaktionen infolge der Zünderwirkung von passiven autokatalytischen Rekombinatoren*, September 2009. Reaktor-Sicherheitskommission, 419. Sitzung der RSK.
- [RSSA10] REINECKE, E.-A., U. SCHWARZ, B. SIMON und H.-J. ALLELEIN: *Validation of the PAR code REKO-DIREKT: Post-calculation of integral PAR experiments in the THAI facility*, June 2010. Proc. 2nd International Meeting on the Safety and Technology of Nuclear Hydrogen Production, Control, and Management, San Diego, CA.
- [Sch04] SCHRÖDER, W.: *Fluidmechanik*. Wissenschaftsverlag Mainz in Aachen, 2004. ISBN: 3-86130-371-X, (Aachener Beiträge zur Strömungsmechanik, Band 7).
- [Sch11] SCHWARZ, U.: *Modellierung des Betriebsverhaltens katalytischer Rekombinatoren*, 2011. Dissertation am Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik der RWTH Aachen University.
- [SDP⁺99] STUDER, E., M. DURIN, M. PETIT, P. RONGIER, J. VENDEL, D. LETEINTURIER und S. (IPSN/DPEA, IPSN/DPRE, KURCHATOV INSTITUTE) DOROFEEV: *Assessment of Hydrogen Risk in PWR*, 1999. Proc. EUROSAFE Forum, Paris, Frankreich, 18.-19. November 1999.
- [Seh12] SEHGAL, B. R.: *Nuclear Safety in Light Water Reactors, Severe Accident Phenomenology*. Elsevier, 2012. ISBN: 978-0-12-388446-6.
- [SH05] SCHRÖDER, V. und K. HOLTAPPELS: *Explosion characteristics of hydrogen-air and hydrogen-oxygen mixtures at elevated pressures*, September 2005. Proc. 1st Int. Conf. Hydrogen Safety (ICHS-1), 8.-10. September 2005, Pisa, Italien.
- [SHA05] SCHWINGES, B., M. HEITSCH und H.-J. ALLELEIN: *Kompendium zur Wasserstoffproblematik und Wirksamkeit eines Systems autokatalytischer Rekombinatoren*, Januar 2005. Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH,

9 Literaturverzeichnis

- Bericht zum Vorhaben SR 2468, Auftrags-Nr.: 820401/5, GRS-V-SR 2468 - 1/2005.
- [Sim09] SIMON, B.: *Qualifizierung von Messtechnik sowie Instrumentierung einer Versuchsanlage zur Untersuchung der Wasserstoffrekombination unter Naturkonvektionsbedingungen*, Oktober 2009. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik der RWTH Aachen University, angefertigt am Versuchsstand REKO-4 im Forschungszentrum Jülich.
- [Sim12] SIMON, B.: *Fehlerabschätzung der Messung von Geschwindigkeitsfeldern mit „Particle Image Velocimetry“ für Versuche unter Naturkonvektionsbedingungen am Versuchsstand REKO-4 im Wasserstofflabor des Forschungszentrums Jülich*, Januar 2012. Interner Bericht: IEK-6 der Forschungszentrum Jülich, Gruppe Containmentphänomene und -prozesse.
- [SKC10] SHEPELIN, V., D. KOSHMANOV und E. (PRIVATE INVESTMENT AND PRODUCTION COMPANY „RUSSIAN ENERGY TECHNOLOGIES“, RUSSIA) CHEPELIN: *Catalyst for Recombination of Hydrogen and Oxygen in Confined Spaces Under High Concentrations of Hydrogen*, Juni 2010. ST-NH2, San Diego, California, June 13-17, 2010.
- [SM54] SHAPIRO, Z.M. und T.R. MOFFETTE: *Hydrogen flammability data and application to PWR loss-of-coolant accident*. U.S.ATOMIC ENERGY COMMISSION by WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION, 1954. WAPD-SC-545, CONTRACT AT-11-1-GEN-14.
- [SOK⁺08] STANISLAS, M., K. OKAMOTO, C.J. KÄHLER, WESTERWEEL J. und SCARANO F.: *Main results of the third international PIV Challenge*, 2008. Exp Fluids, Volume 45, Seiten 27 bis 71, DOI 10.1007/s00348-008-0462-z.
- [Ste11] STERNKOPF, B.: *Einfluss von Wasserdampf auf das Messsignal von Wärmeleitfähigkeitssensoren zur Wasserstoffkonzentrationsmessung*, März 2011. Studienarbeit an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der RWTH Aachen University.
- [Str88] STRUTH, S.: *Untersuchungen zur Thermohydraulik des Druckentlastungsvorgangs bei Hochtemperaturreaktoren*, 1988. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Reaktortechnik der RWTH Aachen University.
- [Tes09] TESTO AG: *Testo 6681 Feuchte-Messumformer, Testo 6610 Fühler: P2A-Software, Parametrier-, Abgleich- und Analysesoftware*, Januar 2009. Bedienungsanleitung Band 1 und 2.
- [TOP08] *Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat, DEHS*, 2008. TOPAS GmbH, Technologieorientierte Partikel-, Analysen-, und Sensortechnik: www.topas-gmbh.de.
- [Tru96] TRUCKENBRODT, E.: *Fluidmechanik Band 1, Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1996. ISBN: 3-540-58512-5, 4. überarbeitete und erwei-

9 Literaturverzeichnis

terte Auflage.

- [TYF07] TROPEA, C., A. L. YARIN und J. F. (EDS.) FOSS: *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. Springer, 2007. 1. Edition, ISBN-13: 978-3540251415.
- [Ung88] UNGER, J.: *Konvektionsströmungen*. Teubner, 1988. ISBN: 3-519-03033-0.
- [VDI06] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENS-TECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN (GVC) (Herausgeber): *VDI-Wärmeatlas*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. ISBN-13: 978-3-540-25505-8.
- [WBH08] WILKENING, H., D. BARALDI und M. HEITSCH: *CFD simulations of light gas release and mixing in the Battelle Model Containment with CFX*, 2008. Nuclear Engineering and Design (238), Seiten 618 bis 626.
- [Wil00] WILCOX, D. C.: *Basic Fluid Mechanics*. DCW Industries, Inc., 2000. ISBN: 1-928729-03-7, Second Edition.
- [WWH54] WIBERG, N., E. WIBERG und A. HOLLEMAN: *Lehrbuch der Anorganischen Chemie*. Gruyter, 1954. Auflage: 102, ISBN-13: 978-3110177701.

10 Anhang und Tabellen

10.1 Kalibrierung der Wärmeleitfähigkeitssensoren

Die Kalibrierfunktion wird mit vordefinierten H₂/Luft-Gemischen unterschiedlicher Konzentration erstellt, denen die Katharometer ausgesetzt werden. Hierzu wurden die Versuchsstände REKO-1 oder REKO-3 des Wasserstofflabors im Forschungszentrum Jülich verwendet. Sie bestehen beide aus jeweils einem zwangsdurchströmten Kanal, durch den definierte Gemische aus Luft und Wasserstoff geführt werden können (siehe Abschnitt 2.1.1). Die Zusammensetzung der durch das Rohr geführten Gemische wird dabei über Massendurchflussregler bestimmt. Zusätzlich verfügt jeder Versuchstand über eine Wasserstoffanalytik, die den Wasserstoffanteil von den Reglern unabhängig analysiert.

Zur Kalibrierung werden die Sensoren Wasserstoff/Luft-Gemischen mit unterschiedlichen Wasserstoffkonzentrationen ausgesetzt und das jeweilige mA-Signal gemessen. Jede Wasserstoffkonzentration ergibt als Stützstelle mit dem dazugehörigen Sensorsignal als Stützwert jeweils einen Stützpunkt. Dieser besteht dabei aus einem über zwei Minuten gemittelten Sensorsignal und der dazugehörigen über zwei Minuten gemittelten Wasserstoffkonzentration. Für jeden Sensor werden Stützpunkte im Bereich zwischen 0 Vol.-% und 8 Vol.-% H₂ mit einer Schrittweite von 1 Vol.-% ermittelt. Die Temperatur während der Kalibrierung liegt hierbei bei ungefähr 20 °C. Tabelle 10.1 zeigt am Beispiel des Katharometers KR-4-06 die Stützpunkte zur Berechnung der Wasserstoffkonzentration aus dem Sensorsignal.

Die Genauigkeit der Kalibrierung ist durch die Genauigkeit der Analytik auf $\pm 0,02$ Vol.-% H₂ begrenzt. Die Auflösung des Sensorsignales mit den in Tabelle 10.1 angegebenen fünf Nachkommastellen ist somit auch für Wasserstoffkonzentrationsänderungen im Bereich von wenigen Hundertstel Vol.-% H₂ theoretisch verwendbar, wird jedoch in der Praxis durch verschiedene Aspekte nicht erreicht, die im Kapitel 3.7.4 genauer betrachtet werden.

Mit den Stützpunkten aus Tabelle 10.1 wird die Kalibrierfunktion als Interpolationspolynom 2. Grades der Form

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \tag{10.1}$$

ermittelt. Die Konstanten a, b und c werden dabei unter Berücksichtigung des kleinsten Quadrates der Fehler optimiert [Pap06] (Abbildung 10.1). Hierbei ist auf der Abszisse das Sensorsignal in mA und auf der Ordinate die von der Analytik gemessene Wasserstoffkonzentration aufgetragen. Zusätzlich ist in dem Diagramm die Gleichung für die

Stützpunkt	H ₂ -Konzentration (Analytik)	Sensorsignal
	[Vol.-% H ₂]	[mA]
0	0,01	17,06557
1	0,91	16,84688
2	1,95	16,60468
3	2,96	16,37193
4	3,99	16,14204
5	5,01	15,91143
6	5,99	15,70647
7	6,94	15,50740
8	7,92	15,31299

Tabelle 10.1: Stützpunkte am Beispiel des Katharometers am KR-4-06

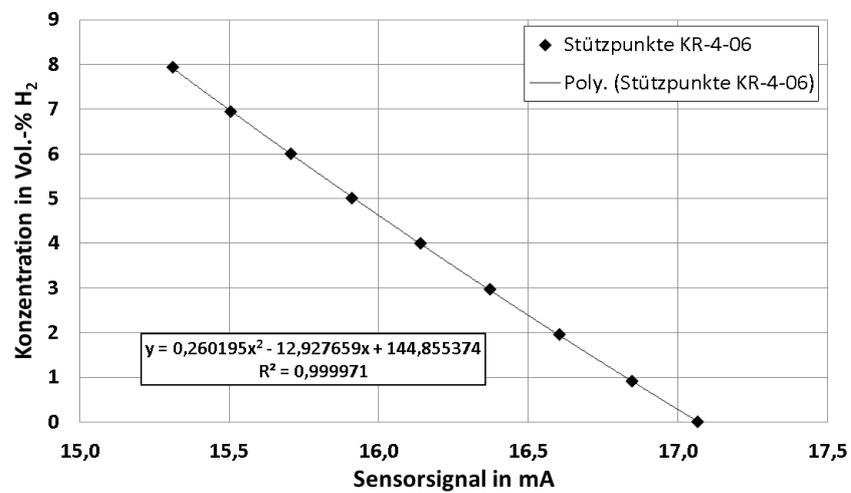


Abbildung 10.1: Stützpunkte und Kalibrierfunktion am Beispiel des Katharometers KR-4-06

Kalibrierfunktion mit den jeweiligen Werten für die Konstanten a, b und c angegeben. Die Kalibrierfunktion wird mit den berechneten Konstanten in die Anlagensteuerung implementiert, so dass aus dem verstärkten Sensorsignal $I_{H_2, mess}$ die Wasserstoffkonzentration $x_{H_2, mess}$ über

$$x_{H_2, mess} = j \cdot (I_{H_2, mess})^2 - k \cdot I_{H_2, mess} + l \quad (10.2)$$

berechnet werden kann. Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist nahezu 1 und somit hinreichend genau. Auch wenn die berechnete Funktion als Interpolationsfunktion strenggenommen nur innerhalb des Wertebereiches der Stützpunkte von 0 - 8 Vol.-% H_2 gültig ist, kann aufgrund der guten Übereinstimmung und der streng stetigen Kurvenform die Kalibrierkurve mittels Extrapolation in begrenztem Maße für Berechnungen von Wasserstoffkonzentrationen über 8 Vol.-% H_2 hinaus ausgegangen werden. Dies ist für Versuche im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht notwendig.

Die Kalibrierung der Katharometer muss vor der Installation im Versuchsbehälter REKO-4 an einem anderen, örtlich getrennten Versuchsstand (REKO-1/REKO-3) durchgeführt werden. Zwar wird diese Kalibrierung weitgehend mit derselben Sensorperipherie (Verstärkerschaltung/Kabel/Steckverbindungen) durchgeführt, doch bestehen Unterschiede in Bezug auf die Kabellänge und -übergänge. Ebenso kann das elektrische Potential variieren und somit die Signalverarbeitung beeinflusst werden. Daher wird bei der Berechnung der Wasserstoffkonzentration noch ein Korrekturfaktor benötigt, der diesen Einfluss berücksichtigt bzw. minimiert. Hierzu wird die Kalibrierfunktion aus Gleichung 10.2 um das Glied f_{REKO4} erweitert. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Faktor unabhängig von den Messbedingungen in REKO-4 ist, sondern nur von der leicht geänderten Sensorperipherie abhängt. Somit ergibt sich für die auf den Versuchsstand REKO-4 bezogenen Kalibrierfunktion zu:

$$x_{H_2, mess} = \underbrace{j \cdot (I_{H_2, mess})^2 - k \cdot I_{H_2, mess} + l}_{\text{Kalibrierung}} + \underbrace{f_{REKO4}}_{\text{Korrekturfaktor REKO-4}} \quad (10.3)$$

mit f_{REKO4} in Vol.-% H_2 . Dieses Korrekturglied addiert zur berechneten Wasserstoffkonzentration aus Gleichung 10.2 den Offset, der auf die leicht unterschiedliche Peripherie zurückzuführen ist. Weitere Korrekturen, die auf das Sensorsignal angewendet werden müssen, werden in Abschnitt 10.3 erläutert.

10.2 Kalibrierung der Pt-100-Elemente

In unmittelbarer Nähe des Wärmeleitfähigkeitssensors befindet sich ein Pt-100-Element, das als Widerstandsthermometer die Temperatur des Katharometerkopfes bestimmt. Mit deren Hilfe wird die Temperaturabhängigkeit des Sensorsignals kompensiert 10.3. Das Pt-100-Element muss zur Verwendung als Temperaturmessstelle auf dem Sensor kalibriert werden. Die Messeinheit besteht aus einem Platinwiderstand, dessen elektrischer Widerstand temperaturabhängig ist. Dieser lässt sich nach DIN IEC 751 von 0 °C bis 850

°C in guter Näherung aus der Temperatur T und Widerstand R_0 des Platinwiderstands bei 0 °C über die quadratische Gleichung

$$R_{Pt-100}(T) = R_0 \cdot (1 + a \cdot T - b \cdot T^2) \quad (10.4)$$

mit

$$\begin{aligned} a &= 3,90802 \cdot 10^{-3} \quad \left[\frac{1}{^\circ\text{C}} \right] \\ b &= -5,802 \cdot 10^{-7} \quad \left[\frac{1}{(^\circ\text{C})^2} \right] \end{aligned} \quad (10.5)$$

berechnen [Bli93]. Sind R_0 und T bekannt, kann somit der Widerstand R_{Pt-100} bei jeder Temperatur innerhalb des Intervalls berechnet werden. Andererseits kann aus der Messung des Widerstands und bekanntem R_0 die Temperatur bestimmt werden. R_0 unterliegt dabei Schwankungen, die jedoch gemäß DIN IEC 751 kleiner als

$$R_0 = 100,000 \pm 0,120 \quad \Omega \quad (10.6)$$

angenommen werden. Die Temperatur berechnet sich danach unter Vernachlässigung der nicht physikalischen Lösungen gemäß Gleichung 10.4 zu

$$T = \frac{-a \cdot R_0 + \sqrt{(a \cdot R_0)^2 - 4 \cdot b \cdot R_0 \cdot (R_0 - R_{Pt-100})}}{2 \cdot b \cdot R_0}, \quad (10.7)$$

wobei R_{Pt-100} dem Widerstand des Pt-100-Elements bei der Temperatur T entspricht. Das Sensorsignal bzw. der Pt-100-Widerstand wird allerdings nicht direkt gemessen, stattdessen über eine Verstärkerschaltung, die auch das Wärmeleitfähigkeitssignal zur Konzentrationsmessung verarbeitet, in ein 4-20 mA-Signal umgewandelt und in die Anlagensteuerung geführt. Das Sensorsignal ist daher kein direkter Widerstandsmesswert, sondern ein dazu eindeutig korreliertes mA-Signal $I_{\text{mess,Pt-100}}$, das aber erst für jede Schaltung mit Hilfe eines Kalibrierpunktes bestimmt werden muss. Darüber hinaus müssen auch weitere Quereinflüsse der Schaltungen wie „Veränderung des Versorgungsstromes unter Last“ mit berücksichtigt werden, so dass sowohl für die Korrelation $I_{\text{mess,Pt-100}}$ über R_{Pt-100} als auch für den Einfluss des Versorgungsstromes lineare Ansätze gemäß

$$y = f_i \cdot x + f_y \quad (10.8)$$

verwendet werden. R_{Pt-100} berechnet sich dann unter Annahme des jeweiligen linearen Ansatzes zu

$$R_{Pt-100}(I_{\text{mess,Pt-100}}) = f_3 \cdot (f_1 \cdot I_{\text{mess,Pt-100}} + f_2) + f_4 \quad (10.9)$$

bzw. nach kurzer Umformung

$$R_{Pt-100}(I_{\text{mess,Pt-100}}) = f_1 \cdot f_3 \cdot I_{\text{mess,Pt-100}} + \underbrace{f_2 \cdot f_3 + f_4}_{f_{ges}}, \quad (10.10)$$

wobei f_1 und f_3 Konstanten darstellen, die im Rahmen einer vorherigen Arbeit zu

$$f_1 \cdot f_3 = 15,080 \frac{mV}{mA} \cdot 1,0144 \frac{1}{mA} = 15,2972 \frac{mV}{(mA)^2} \quad (10.11)$$

bestimmt wurden [Ste11]. Die Kalibrierung der Pt-100-Elemente wird durchgeführt, indem Gleichung 10.7 mit Gleichung 10.10 und den bekannten Konstanten f_1 und f_3 (Gl.10.11) verwendet wird, wobei f_{ges} als Kalibrierkonstante in

$$T = \frac{-a \cdot R_0 + \sqrt{(a \cdot R_0)^2 - 4 \cdot b \cdot R_0 \cdot (R_0 - f_1 \cdot f_3 \cdot I_{mess,Pt-100} + f_{ges})}}{2 \cdot b \cdot R_0} \quad (10.12)$$

als einzige Unbekannte verbleibt. Die Kalibrierkonstante f_{ges} muss für jedes Pt-100-Element mit Schaltung einzeln bestimmt werden. Hierzu wird ein bekannter Betriebspunkt der Sensoren als Stützstelle verwendet. Die Stützstelle enthält das Sensorsignal $I_{mess,Pt-100}$ und die mit einem Thermoelement direkt in der Nähe der Sensoren gemessene Temperatur T . Unter Verwendung von Gleichung 10.12 lässt sich f_{ges} somit bestimmen. Da Steigung und Form des Graphen durch den Funktionsgraph nach DIN IEC 751 festgelegt ist, wird nur ein Betriebspunkt benötigt.

Die Ermittlung der jeweiligen Stützstellen erfolgt anhand einer Temperaturmessung innerhalb des Versuchsbehälters und der Korrelation mit dem jeweiligen Messsignal $I_{mess,Pt-100}$ im Rahmen der Inbetriebnahme. Hierzu wird die Temperatur entweder mit Thermoelementen oder mit Pt-1000-Elementen der Feuchtigkeitssensoren (siehe Abschnitt 3.2.3) in der Nähe jedes Katharometers bestimmt. Die Stützpunkte werden bei Umgebungstemperatur ermittelt, so dass Abweichungen durch Wärmestrahlung, die eine Differenz der Temperatur der Pt-100-Elemente und der Referenzmessung hervorrufen könnte, zu vernachlässigen sind. Abbildung 10.2 zeigt den Verlauf der Temperatur über dem Sensorsignal und die Konstanten zur Berechnung der DIN IEC 751 Kurve für das Pt-100-Element des Sensors am Beispiel des Katharometers KR-4-19.

Die Genauigkeit dieser Temperaturmessung und die möglichen Beschränkungen dieser Messung mit Hinblick auf Versuche im Versuchsstand REKO-4 werden in Zusammenhang der Fehlerabschätzung in Kapitel 3.7.4 erläutert.

10.3 Quereinflüsse von Temperatur und Feuchtigkeit

Die Messung mit Katharometern unterliegt verschiedenen Quereinflüssen, die eine Messwertabweichung verursachen. Im Folgenden werden mögliche Faktoren, die u.U. zu einer solchen Messwertabweichung führen, identifiziert und die Möglichkeit untersucht, den Einfluss durch eine Messwertkorrektur zu minimieren. Dabei wurde in vorangegangenen Arbeiten erkannt, dass z.B. variierende Temperaturen und Kondensation von Wasser auf den Wärmeleitfähigkeitssensoren bei hoher Luftfeuchtigkeit zu teils erheblichen Messwertabweichungen führen [Sim09]. Darauf aufbauende Arbeiten zeigten, dass eine

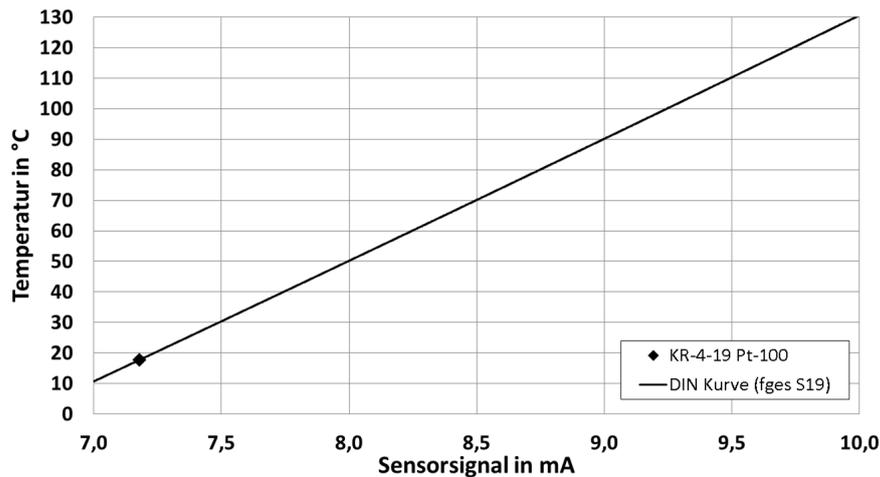


Abbildung 10.2: Kalibrierfunktion und Stützstelle eines Pt-100-Elements (KR-4-19)

Korrektur der Sensoren aufgrund des Quereinflusses der Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeitsmessung unumgänglich ist [Jan10]. Der Einfluss der Feuchtigkeit auf die Sensoren ist bei hohen Volumenkonzentrationen von Wasserdampf bei Temperaturen von über 100°C von erheblichem Interesse [Ste11]. Solche Bedingungen sind jedoch während der Versuche innerhalb des Versuchsbehälters REKO-4 nur an vereinzelt Positionen möglich und können daher für den Großteil der Katharometer vernachlässigt werden.

Nachfolgend werden die möglichen Quereinflüsse in Gruppen unterteilt:

Änderung der Gemischzusammensetzung Die Berechnung der Wasserstoffkonzentrationsänderung aus der Änderung der Wärmeleitfähigkeit ist nur unter der Annahme möglich, dass sich ausschließlich eine Komponente des Gasgemisches ändert. Während der Versuche führt die Rekombinationsreaktion von $H_2 + \frac{1}{2} \cdot O_2 \rightarrow H_2O$ jedoch zu einem geringfügig variierenden Hintergrundgas. Zum einen verringert sich die Konzentration an Sauerstoff, zum anderen steigt der Wasseranteil und damit einhergehend auch die Feuchtigkeit der Behälteratmosphäre.

Änderung der Umgebungsbedingungen Hierunter fallen die Faktoren, die zwar keine direkte Änderung der Konzentration verursachen, aber dennoch indirekt die Messung der Wärmeleitfähigkeit und somit die Bestimmung der Gemischzusammensetzung beeinflussen. So führen z.B. von der Kalibriertemperatur abweichende Gastemperaturen zu einer Messwertabweichung.

Änderung der Sensorperipherie Wird die Peripherie eines Sensors geändert (z.B. durch veränderte Kabellänge, zusätzlich benötigte Kabelkupplungen), kann dies Auswirkungen auf die Genauigkeit der Wasserstoffkonzentrationsmessung haben, da sich der elektrische Widerstand des Signalwegs ändert. So führen solche Veränderungen zu einem nun abweichenden Widerstand, der sich auf die Messung niederschlägt. Diese Abweichung ist konstant und kann dementsprechend in Anlehnung an den

Konstante	Wert	Einheit
a	$3,90802 \cdot 10^{-3}$	$\left[\frac{1}{^\circ\text{C}}\right]$
b	$-5,802 \cdot 10^{-7}$	$\left[\frac{1}{(^\circ\text{C})^2}\right]$
f ₁	15,080	$\frac{\text{mV}}{\text{mA}}$
f ₃	1,0144	$\frac{1}{\text{mA}}$
R ₀	100	Ω
f _{ges,KR-4-19}	1,8331735	Ω

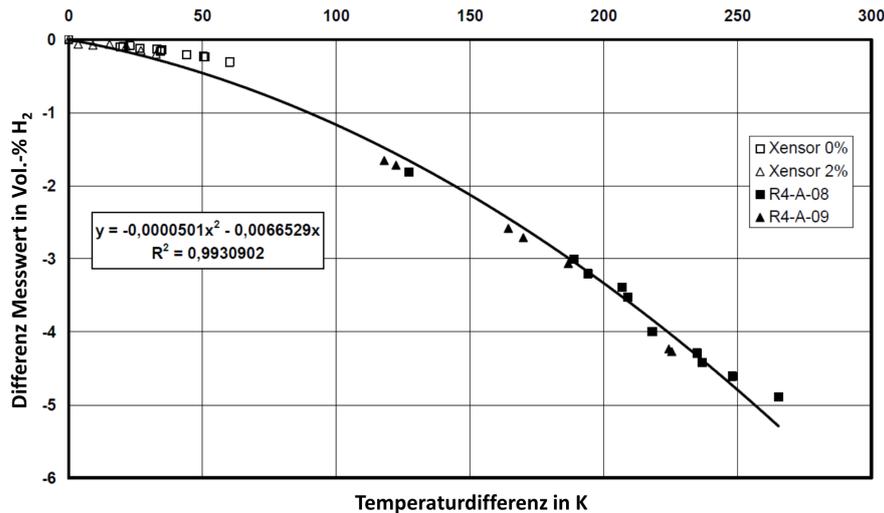
Tabelle 10.2: Berechnungswerte für Kalibrierfunktion des Pt-100-Elements am Beispiel von KR-4-19

Korrekturfaktor f_{REKO4} (siehe Abschnitt 10.1) korrigiert werden.

Zur Berechnung einer Temperaturkorrektur wurden im Rahmen dieser Arbeit drei Ansätze verfolgt. Der erste Ansatz versucht die Abweichung durch den Einfluss der Temperatur durch Versuche am Versuchsstand REKO-1 bzw. REKO-3 zu bestimmen. Hierbei wurden die Sensoren in einem Gasgemisch mit konstanter Zusammensetzung bei unterschiedlichen Gastemperaturen betrieben und die scheinbare H₂-Konzentration mit der Temperaturdifferenz korreliert [Sim09][Jan10][Ste11]. Die daraus entwickelten Temperaturkorrekturen ermöglichten zwar eine Minimierung des Temperatureinflusses, zeigten jedoch gerade bei höheren Gastemperaturen noch signifikante Schwächen und wurden daher nicht weiter verfolgt.

Der zweite Ansatz wurde im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Projektes (Förderkennzeichen 1501308) entwickelt [ASS⁺10]. Hierbei wurde ein Katharometer im Auslass des Rekombinators genauer untersucht. Dieser Katharometer war während eines Versuches hohen Temperaturen und erhöhten Wasserdampfkonzentrationen ausgesetzt. Anhand der Ergebnisse früherer Arbeiten konnte aber gezeigt werden, dass bei Einlasskonzentrationen unterhalb von 4 Vol.-% H₂ die Auslasskonzentrationen nahezu bei 0 Vol.-% H₂ liegen muss [Sch11]. Somit konnte unter Verwendung der angezeigten und der am Auslass postulierten Wasserstoffkonzentration eine Korrekturfunktion ermittelt werden, wobei die Temperatur über ein Thermoelement in der Nähe des Sensors gemessen wurde. Abbildung 10.3 zeigt die Korrekturfunktion inklusive der Stützpunkte, anhand derer sie erstellt wurde [ASS⁺10].

Dieser Ansatz wurde nun im Rahmen dieser Arbeit übernommen und in Bezug auf die Temperaturmessung erweitert. Für die Korrelation zwischen Temperatur und Wasserstoffdifferenz wird kein Thermoelement im Auslass verwendet, sondern das auf dem Sensorkopf des Katharometers positionierte Pt-100-Element. Dies ermöglicht im Gegen-

Abbildung 10.3: Kalibrierfunktion und Stützstelle gemäß [ASS⁺10]

satz zum Thermoelement am Auslass eine noch präzisere Bestimmung der Temperatur auf dem Sensorkopf und somit eine genauere Temperaturkorrektur. Abbildung 10.4 zeigt ausschnittsweise die unkorrigierte Wasserstoffkonzentration des Katharometers KR-4-08 und die am Sensorkopf gemessene Temperatur. Die blaue Kurve stellt die gemessene Wasserstoffkonzentrationsmessung auf der Primärordinate über der Zeit dar. Die Kurve liegt ab ca. 1000 s im negativen Bereich mit einem Tiefpunkt von ca. -4,5 Vol.-% H₂ bei ungefähr 2000 s. Die Temperatur des Pt-100-Elements (Sekundärordinate, rechts) steigt auf Temperaturen bis zu knapp 160 °C an. In diesem Bereich sind sowohl die am Sensor herrschenden Temperaturen als auch die Versuchsbedingungen (z.B. Nachspeisung von Wasserstoff in den Behälter) nicht quasistationär genug, um diese Werte zur Korrektur verwenden zu können. Ab ca. 4500 s hingegen kann aber aus versuchstechnischen Gründen die Abweichung des Katharometers alleine auf die Auslassbedingungen zurückgeführt werden, so dass dieser Bereich (orange) bis ca. 7800 s zur Temperaturkorrektur verwendet wird. Die Werte danach erscheinen zwar auch quasistationär, doch ist hierbei der Versuch schon soweit fortgeschritten, dass die oben genannte Annahme bzgl. der Auslasskonzentration aus strömungstechnischen Gründen nicht mehr gesichert ist und dieser Wertebereich daher nicht betrachtet wird. Für die Temperaturkorrektur wird die Differenz zwischen der Betriebstemperatur im Auslass und der Kalibriertemperatur benötigt, da sie den störenden Einfluss der Temperatur im Vergleich zur Kalibrierung kennzeichnet. Die Kalibriertemperatur T_{Kalib} des KR-4-08 beträgt dabei 21 °C, so dass sich die Übertemperatur $T_{\text{ü}}$ zu

$$T_{\text{ü}} = \Delta T = T_{\text{Pt100}} - T_{\text{Kalib}} \quad (10.13)$$

berechnet. Für die angezeigte Wasserstoffkonzentration ist eine Überkonzentration nicht notwendig, da wie oben erwähnt die Korrektur von der Annahme ausgeht, dass die Konzentration ca. 0 Vol.-% H₂ beträgt und somit die Differenz gleich der angezeigten Was-

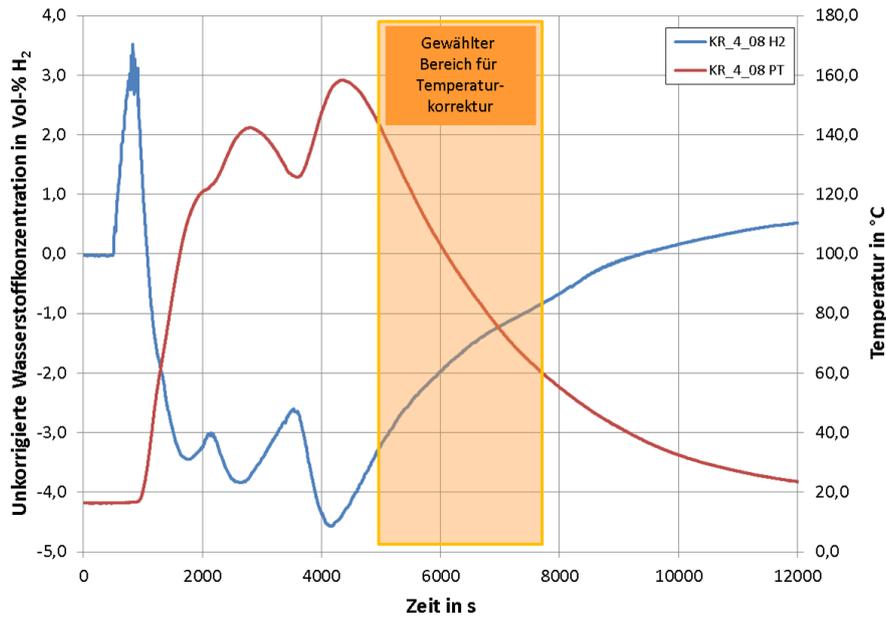


Abbildung 10.4: Gemessene (unkorrigierte) Wasserstoffkonzentration und Sensorkopf-temperatur des Katharometers KR-4-08

serstoffkonzentration ist. Abbildung 10.5 zeigt die gemessene Wasserstoffkonzentration über der mit dem Pt-100-Element gemessenen Übertemperatur des Katharometers. Die schwarze Kurve besteht dabei aus allen H₂-Messpunkten aus dem oben beschriebenen Intervall, die mit einem Polynom 2. Grades (blau-unterbrochene Linie) angenähert wird. Die Geradengleichung des Polynoms ist ebenfalls aus dem Diagramm ersichtlich und geht definitionsgemäß durch den Nullpunkt. Die Abweichungen der gemessenen Wasserstoffkonzentration liegen bei einer Übertemperatur von 40 °C bei ca. 0,8 Vol.-% H₂ und bei 130 °C zwischen 3,5 - 4,0 Vol.-% H₂. Unter Verwendung des nun ermittelten Polynoms kann nun mit dem Temperatursignal des Sensors $I_{mess,Pt}$ die gemessene Wasserstoffkonzentration um den Einfluss der Temperatur über

$$x_{H_2,tempkorr} = x_{H_2,mess} - \left[m \cdot (T_{Pt100} - T_{Kalib})^2 + n \cdot (T_{Pt100} - T_{Kalib}) \right] \quad (10.14)$$

mit

$$m = -7,588 \cdot 10^{-5}$$

$$n = -1,783988 \cdot 10^{-2}$$

$$T_{Kalib} = 21^\circ\text{C}$$

korrigiert werden. Die Korrektur nach Gleichung 10.15 wird für alle Katharometer innerhalb des Versuchsstands REKO-4 verwendet. Abbildung 10.6 zeigt die um die ermittelte Korrekturfunktion erweiterte Signalverarbeitung. Dabei ist zu beachten, dass der Ein-

10 Anhang und Tabellen

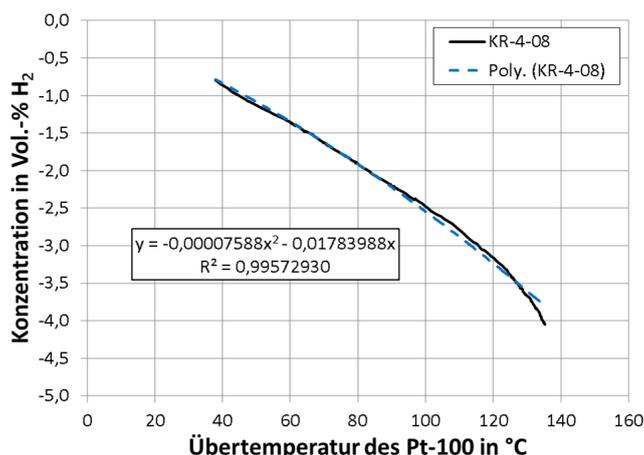


Abbildung 10.5: Gemessene Wasserstoffkonzentration und die dazugehörige Näherungsfunktion 2. Grades

fluss der Temperatur auf die Katharometer für einen Großteil sehr gering ausfällt, da diese im Verlauf eines Versuches nur mit relativ geringen Übertemperaturen von wenigen Grad beaufschlagt werden und somit die Korrektur nur im Bereich von einigen Zehntel-% liegt. Für Katharometer die in der Nähe des Rekombinators oder dessen Auslassfahne positioniert sind, werden auch größere Korrekturwerte erreicht.

Diese Temperaturkorrektur ist für den Katharometer KR-4-07 direkt am Einlass des Rekombinators nicht ausreichend bzw. führt immer noch zu negativen H₂-Konzentrationen. Im Gegensatz zu den Zuständen im Auslass wird die Temperaturerhöhung nicht durch das heiße Gas induziert, sondern durch Wärmestrahlung von den bis zu 700 °C heißen, ca. 50 mm entfernten Katalysatorblechen. Diese unterschiedlichen Randbedingungen führen dazu, dass für den Katharometer im REKO-Einlass eine alternative Temperaturkorrektur gefunden werden muss. Hierzu wurden sechs Katharometer in dieselbe Höhe des Rekombinatoreinlasses verlegt. Dabei ist während der Vorversuche im Rahmen der Inbetriebnahme und während der Hauptversuche beobachtet worden, dass sich die Konzentration nur über die Höhe ändert, innerhalb einer Ebene derselben Höhe jedoch nicht. Hieraus lässt sich wieder eine Temperaturkorrektur ermitteln, indem die gemessene Einlasskonzentration von KR-4-07 mit den unbeeinflussten Katharometern auf derselben Höhe verglichen wird. Zu diesem Zweck wird in Abbildung 10.7 wieder die Konzentrationsdifferenz zwischen dem Einlasskatharometer und der Vergleichsstelle ermittelt und mit der Übertemperatur zwischen der jeweiligen Pt-100-Temperatur korreliert. Diese Temperaturkorrektur kann in Anlehnung an Gleichung 10.15 für den

10 Anhang und Tabellen

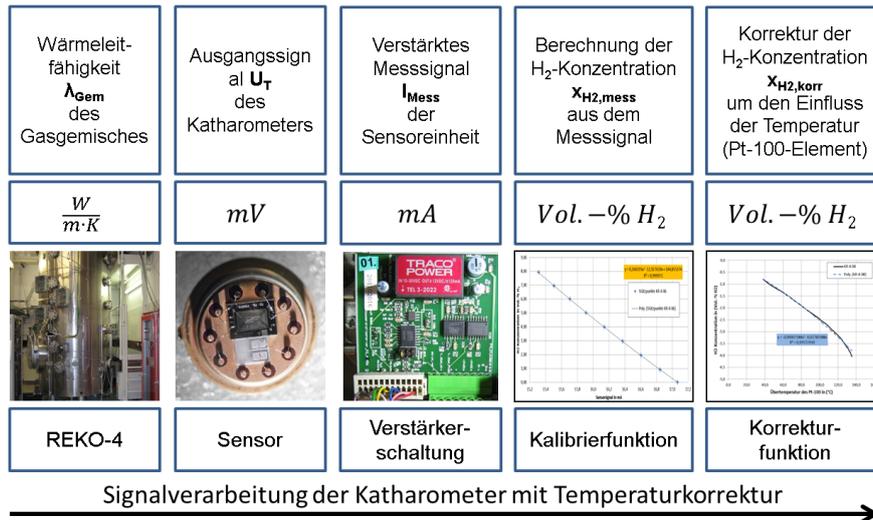


Abbildung 10.6: Verarbeitung des Sensorsignals eines Katharometers mit Temperaturkorrektur

Einlasskatharometer KR-4-07 über

$$x_{H_2, \text{tempkorr}} = x_{H_2, \text{mess}} - \left[m \cdot (I_{\text{mess}, Pt})^2 + n \cdot I_{\text{mess}, Pt} \right] \quad (10.15)$$

mit

$$m = -2,902 \cdot 10^{-4}$$

$$n = -2,45921 \cdot 10^{-2}$$

verwendet werden. Im Rahmen der Versuche wird zur Bestimmung der Einlasskonzentration nicht KR-4-07 verwendet, sondern stattdessen direkt ein in der Nähe liegender Sensor gewählt (z.B. KR-4-06 oder KR-4-20). Diese Sensoren unterliegen nicht dem Einfluss von Wärmestrahlung der Katalysatorbleche und können direkt verwendet werden, wie in Abschnitt 4.2.4 gezeigt wird.

10 Anhang und Tabellen

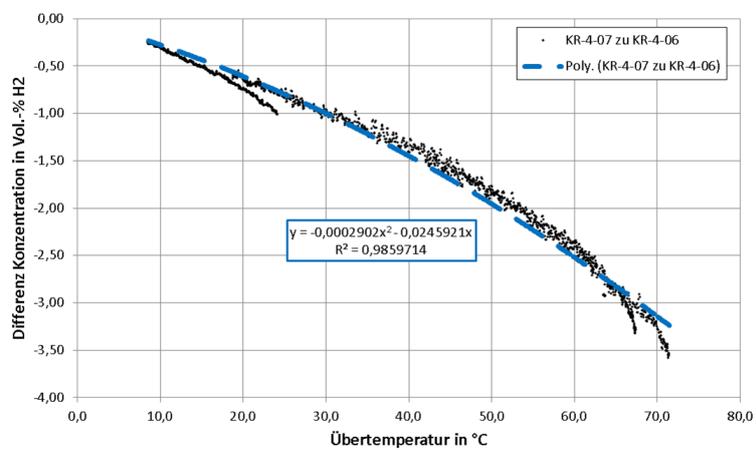


Abbildung 10.7: Abweichung der gemessenen H₂-Konzentration in Abhängigkeit von der Übertemperatur und die dazugehörige Näherungsfunktion 2. Grades

10.4 Positionierung der Thermoelemente (Behälter)

Bezeichnung	Ort	Messgröße	Höhe [mm]	Radius [mm]	Winkel [°]	TE-Ø [mm]	Messbereich [°C]
TR-01-GO	oberere Traverse	Gastemperatur	3102	0	0	1,0	[0 - 500]
TR-02-GO	oberere Traverse	Gastemperatur	3102	300	45	1,0	[0 - 500]
TR-03-GO	oberere Traverse	Gastemperatur	3102	300	135	1,0	[0 - 500]
TR-04-GO	oberere Traverse	Gastemperatur	3102	300	225	1,0	[0 - 500]
TR-05-GO	oberere Traverse	Gastemperatur	3102	300	315	1,0	[0 - 500]
TR-06-GO	oberere Traverse	Gastemperatur	3102	600	45	1,0	[0 - 500]
TR-07-GO	oberere Traverse	Gastemperatur	3102	600	135	1,0	[0 - 500]
TR-08-GO	oberere Traverse	Gastemperatur	3102	600	225	1,0	[0 - 500]
TR-09-GO	oberere Traverse	Gastemperatur	3102	600	315	1,0	[0 - 500]
TR-10-GO	oberere Traverse	Gastemperatur	3102	0	0	1,0	[0 - 500]
TR-11-GM	mittlere Traverse	Gastemperatur	1942	300	45	1,0	[0 - 500]
TR-12-GM	mittlere Traverse	Gastemperatur	1942	300	135	1,0	[0 - 500]
TR-13-GM	mittlere Traverse	Gastemperatur	1942	300	225	1,0	[0 - 500]
TR-14-GM	mittlere Traverse	Gastemperatur	1942	300	315	1,0	[0 - 500]
TR-15-GM	mittlere Traverse	Gastemperatur	1942	600	45	1,0	[0 - 500]
TR-16-GM	mittlere Traverse	Gastemperatur	1942	600	135	1,0	[0 - 500]
TR-17-GM	mittlere Traverse	Gastemperatur	1942	600	225	1,0	[0 - 500]
TR-18-GM	mittlere Traverse	Gastemperatur	1942	600	315	1,0	[0 - 500]
TR-19-GO	untere Traverse	Gastemperatur	3102	0	0	1,0	[0 - 500]
TR-20-GM	untere Traverse	Gastemperatur	346	300	45	1,0	[0 - 500]
TR-21-GM	untere Traverse	Gastemperatur	346	300	135	1,0	[0 - 500]
TR-22-GM	untere Traverse	Gastemperatur	346	300	225	1,0	[0 - 500]
TR-23-GM	untere Traverse	Gastemperatur	346	300	315	1,0	[0 - 500]
TR-24-GM	untere Traverse	Gastemperatur	346	600	45	1,0	[0 - 500]
TR-25-GM	untere Traverse	Gastemperatur	346	600	135	1,0	[0 - 500]
TR-26-GM	untere Traverse	Gastemperatur	346	600	225	1,0	[0 - 500]
TR-27-GM	untere Traverse	Gastemperatur	346	600	315	1,0	[0 - 500]

Tabelle 10.3: Thermoelementposition (TR-01-GO bis TR-27-GO)

10.5 Positionierung der Thermoelemente (Katalysatorbleche)

Bezeichnung	Katalysatorblech / -ort	Tiefe, gemessen von Oberkante [mm]	TE-Ø [mm]	Messbereich [°C]
TR-50-RK	Blech 1 (Mitte)	100	0,5	0 - 800
TR-51-RK	Blech 1 (Mitte)	132	0,5	0 - 800
TR-52-RK	Blech 1 (Mitte)	139	0,5	0 - 800
TR-53-RK	Blech 1 (Mitte)	137	0,5	0 - 800
TR-54-RK	Blech 1 (Mitte)	14	0,5	0 - 800
TR-55-RK	Blech 1 (Mitte)	141	0,5	0 - 800
TR-56-RK	Blech 1 (Mitte)	142	0,5	0 - 800
TR-57-RK	Blech 1 (Mitte)	132	0,5	0 - 800
TR-58-RK	Blech 1 (Mitte)	113	0,5	0 - 800
TR-59-RK	Blech 1 (Mitte)	56	0,5	0 - 800
TR-60-RK	Blech 2 (Rand)	73	0,5	0 - 800
TR-61-RK	Blech 2 (Rand)	111	0,5	0 - 800
TR-62-RK	Blech 2 (Rand)	115	0,5	0 - 800
TR-63-RK	Blech 2 (Rand)	139	0,5	0 - 800
TR-64-RK	Blech 2 (Rand)	5	0,5	0 - 800
TR-65-RK	Blech 2 (Rand)	124	0,5	0 - 800
TR-66-RK	Blech 2 (Rand)	115	0,5	0 - 800
TR-67-RK	Blech 2 (Rand)	104	0,5	0 - 800
TR-68-RK	Blech 2 (Rand)	110	0,5	0 - 800

Tabelle 10.4: Thermoelementposition (TR-50-RK bis TR-68-RK)

10.6 Positionierung der Thermoelemente (Rekombinator)

Bezeichnung	Ort	Messgröße	Höhe [mm]	Radius [mm]	Winkel [°]	TE-Ø [mm]	Messbereich [°C]
TR-70-RG	Kamintemperatur	Gastemperatur		Rekombinator		0,5	[0 - 800]
TR-71-RG	Kamintemperatur	Gastemperatur		Rekombinator		0,5	[0 - 800]
TR-72-RG	Kamintemperatur	Gastemperatur		Rekombinator		0,5	[0 - 800]
TR-73-RG	Kamintemperatur	Gastemperatur		Rekombinator		0,5	[0 - 800]
TR-74-RG	Kamintemperatur	Gastemperatur		Rekombinator		0,5	[0 - 800]
TR-75-WD	Behälterwand Decke	Gastemperatur	3400	150	0	0,5	[0 - 800]
TR-76-WO	obere Behälterwand	Gastemperatur	3102	700	315	0,5	[0 - 500]
TR-77-WO	obere Behälterwand	Gastemperatur	3102	700	135	0,5	[0 - 500]
TR-78-WM	mittlere Behälterwand	Gastemperatur	1942	700	315	0,5	[0 - 500]
TR-79-WM	mittlere Behälterwand	Gastemperatur	1942	700	135	0,5	[0 - 500]
TR-80-WU	untere Behälterwand	Gastemperatur	346	700	315	0,5	[0 - 500]
TR-81-WU	untere Behälterwand	Gastemperatur	346	700	135	0,5	[0 - 500]
TR-82-WB	Behälterwand Boden	Gastemperatur	0	150	0	0,5	[0 - 500]
TR-83-WML	Behälterwand Mannloch	Gastemperatur	896	800	14	0,5	[0 - 500]
TR-84-WML	Behälterwand Mannloch	Gastemperatur	896	800	0	0,5	[0 - 500]
TR-85-WMR	Behälterwand hinter Rekombinator	Wandtemperatur	1546	700	135	0,5	[0 - 500]
TR-86-WMR	mittlere Traverse hinter Rekombinator	Wandtemperatur	1446	700	135	0,5	[0 - 500]
TR-87-Ersatz	Ersatz-TE	-	-	-	-	0,5	[0 - 100]
TR-88-RG	untere Traverse	Wandtemperatur		Kat-Einschub		0,5	[0 - 800]
TR-89-RG	Reko-Gehäuse	Wandtemperatur		Reko-Kamin unten		1,0	[0 - 800]
TR-90-RG	Reko-Gehäuse	Wandtemperatur		Reko-Kamin mitte		1,0	[0 - 800]
TR-91-RG	Reko-Gehäuse	Wandtemperatur		Reko-Kamin oben		1,0	[0 - 800]
TR-92-RG	Reko-Gehäuse	Wandtemperatur		Reko-Hutze		1,0	[0 - 800]

Tabelle 10.5: Thermoelementposition (TR-70-RG bis TR-92-RG)

10.7 Positionierung und Peripherie der Katharometer

Bezeichnung	Ort	Höhe [mm]	Radius [mm]	Winkel [°]	Addierte Kabellänge [mm]	Anzahl Kupplungen [-]
KR-4-01	REKO-4 Boden	10	0	0	5300	2
KR-4-02	untere Traverse (*1)	346	0	0	5300	2
KR-4-03	untere Traverse (*1)	346	450	45	5300	2
KR-4-04	untere Traverse (*1)	346	450	135	5300	2
KR-4-05	untere Traverse (*1)	346	450	225	5300	2
KR-4-06	untere Traverse (*1)	346	450	315	5300	2
KR-4-07	Rekombinatoreinlass	1350	600	135	8300	3
KR-4-08	Rekombinatorauslass	(*1)	600	135	8300	3
KR-4-09	mittlere Traverse	1942	0	0	4300	2
KR-4-10	mittlere Traverse	1942	450	45	4300	2
KR-4-11	mittlere Traverse	1942	450	135	4300	2
KR-4-12	mittlere Traverse	1942	450	225	4300	2
KR-4-13	mittlere Traverse	1942	450	315	4300	2
KR-4-14	obere Traverse	3102	0	0	6300	3
KR-4-15	obere Traverse	3102	450	45	6300	3
KR-4-16	obere Traverse	3102	450	135	6300	3
KR-4-17	obere Traverse	3102	450	225	6300	3
KR-4-18	obere Traverse	3102	450	315	6300	3
KR-4-19	REKO-4 Decke	3450	0	0	7300	3
KR-4-20	Höhe Rekombinatoreinlass	1350	600	90	4300	2

*1: Z.T. abweichende Positionierung während der Versuche
Abweichungen siehe Versuchsbeschreibung / -instrumentierung

Tabelle 10.6: Positionierung / Kabellängen der Katharometer (Typ XEN-TCG3880 + Pt100) während der Hauptversuche

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik (LRST) an der RWTH Aachen University.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Universitätsprofessor Dr.-Ing. Hans-Josef Allelein. Die spannenden und tiefgehenden Diskussionen, nicht zuletzt auch während der Doktorandentreffen, sind ein integraler Bestandteil dieser Arbeit, für die ich sehr dankbar bin. Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Universitätsprofessor Dr.-Ing. Dirk Müller für die Übernahme des Korreferats.

Vielen Dank an Dr.-Ing. Ernst-Arndt Reinecke vom Forschungszentrum Jülich, der mich von der ersten Computersimulation als Hilfwissenschaftler bis zum Ende meiner Promotionszeit gefördert, gefordert und betreut hat. Den Dank für die Unterstützung und das entgegengebrachte Vertrauen kann ich nicht in Worte fassen. Und Entschuldigung für die grauen Haare, die ich vermutlich in Zusammenhang mit unseren Diskussionen bis zum Ende verursacht habe. Ebenso auch einen herzlichen Dank an Dr.-Ing. Ulrich Schwarz, unter dessen Leitung ich die ersten Arbeiten am LRST durchführen durfte und der sicherlich als ein Wegbereiter für REKO-4 gilt.

Zudem möchte ich mich zum einen besonders bei Michael Klauck, Daniel Heidelberg, Christian Kubelt, Alexander Belt, Johannes Baggemann und allen Mitarbeitern des Lehrstuhls bedanken, die neben der Hilfe bei technischen Fragestellungen auch stets für moralische Unterstützung gesorgt haben. Vielen Dank an Jan Welling für seine Hilfe bei der Größenvermessung der DEHS-Partikel und danke an Björn Krupa, dass er bis zum Schluss REKO-4 unverändert gelassen hat. Zum anderen möchte ich mich bei meinen Diplom-/Studien-/Bachelorarbeitern und Hilfwissenschaftlern (Christian Jansen, Benjamin Sternkopf, Benjamin Häfele, Piotr Fejcher und Patrick Poros) bedanken, ohne deren Tatkraft und Ideen die Arbeit so nicht möglich gewesen wäre. Und natürlich geht auch ein besonderer Dank an Kathrin Trollmann, Hans-Klemens Hinssen und die Mitarbeiter des IEK-6 des Forschungszentrum Jülich, die mir stets bei konstruktiven und messtechnischen Problemen mit Rat und Tat zur Seite standen.

Vielen Dank an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), an die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH und das Forschungszentrum Jülich für die Möglichkeit, die im Rahmen des Projekts (Förderkennzeichen 1501394) geplanten Arbeiten in Zusammenarbeit mit dem LRST der RWTH Aachen University durchführen zu können.

Einen ganz lieben Dank an meine Eltern Dr. Wolfgang und Annemarie Simon, die mir ein Studium in Aachen ermöglicht haben.

Und natürlich danke ich meiner Frau Martina Simon und unserer Tochter Theresa, die mir immer den notwendigen Rückhalt gegeben haben und ohne die ich diese Promotion nicht zu Ende gebracht hätte.

Euch allen vielen Dank!