

Konzipierung und Aufbau eines Windkanals zur  
Depositionsmessung und Klimasimulation sowie  
Untersuchungen zur Deposition von Schwefeldioxid  
auf Gesteinsprüfkörpern und Surrogatflächen

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades  
des Fachbereiches Chemie  
der Universität Hamburg

vorgelegt von

Werner Nowatzky  
aus Hamburg

Hamburg 1998

1. Gutachter: Prof. Dr. W. Dannecker
2. Gutachter: Prof. Dr. K. Nagorny

Tag der letzten mündlichen Prüfung: 09.03.1999

Farewell to your bricks and mortar -  
farewell to your dirty lime...

*The Wolfe Tones - Botanny Bay*

Ye see yon birkie ca'd 'a lord'  
Wha struts, an' stares, an' a' that?  
Tho' hundreds worship at his word,  
He's but cuif for a' that.

For a' that an' a' that,  
His ribband, star an' a' that,  
The man o' independent mind,  
He looks an' laughs at a' that.

*Robert Burns, 1795.*



## Danksagung

Herrn Professor Dr. W. Dannecker danke ich herzlich für die Überlassung des Themas und seine immer wohlwollende Unterstützung und Förderung der Arbeit, gerade in Zeiten angespannter Haushaltslagen.

Für ihre stete Diskussionsbereitschaft und vielfältigen Anregungen danke ich meinen Kollegen im Arbeitskreis, insbesondere Herrn Dr. M. Steiger, Herrn Dr. J. Bergmann, Herrn Dr. T. Bothmann und Herrn Dipl.-Chem. M. Carstens.

Den Beschäftigten der technischen Werkstatt unter der Leitung von Frau Zeise bzw. Herrn Rost danke ich herzlich für Verständnis, meist zügige Bearbeitung und vielfache konstruktive Hilfestellung bei technischen Problemen.

Für die Überlassung der Luftmeßdaten auf dem Prüffeld Duisburg und die Unterstützung bei der Auswertung danke ich Herrn Oliver Görtzen.

Weiterhin danke ich Herren Dipl.-Chem. Olaf Cranz für die im Rahmen seines AC-Praktikums durchgeführten Methodenoptimierungen zur Eluation und Analytik von Gesteinsproben und der stud. Hilfskraft, Herrn Carsten Saal, für die Unterstützung bei der Aufarbeitung der Vielzahl von IC-Proben, die im Verlauf dieser Arbeit angefallen sind.

Dem Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie danke ich für die finanzielle Unterstützung.

Ein ganz besonderer Dank gebührt meinen Eltern, ohne deren immerwährenden Einsatz in finanzieller und vor allem moralischer Hinsicht ein erfolgreicher Abschluß nicht mehr möglich gewesen wäre.

Danke, Martina.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Problemstellung</b>	<b>1</b>
1.1	Entwicklung der historischen Hintergründe . . . . .	1
1.2	Auswirkungen der Luftschadstoffe . . . . .	2
1.3	Problematik des Steinzerfalls . . . . .	2
1.4	Bisherige Untersuchungen . . . . .	5
1.5	Aufgabenstellung . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Deposition von Schwefeldioxid</b>	<b>8</b>
2.1	Übergang auf die Rezeptoroberfläche . . . . .	9
2.2	Transport durch die Grenzschicht . . . . .	10
2.3	Widerstandsmodell . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Konzipierung des Depositionskanals</b>	<b>12</b>
3.1	Vorgaben bei der Entwicklung des Depositionskanals . . . . .	12
3.2	Grundkonzeption des Systems . . . . .	12
3.3	Auswahl des Gebläses . . . . .	15
3.4	Auslegung der Temperiereinheit . . . . .	19
3.4.1	Grundlegende Überlegungen zum Wärmehaushalt . . . . .	19
3.4.2	Berechnung der stationären Heiz- und Kühllasten . . . . .	19
3.4.2.1	Abschätzung der ungünstigsten Betriebsbedingungen . . . . .	20
3.4.2.2	Wärmedurchgang . . . . .	21
3.4.2.3	Wärmeeintrag durch das Gebläse . . . . .	24
3.4.2.4	Temperierleistung für den Nebenstrom . . . . .	24
3.4.3	Berechnung der dynamischen Heiz- und Kühllasten . . . . .	26
3.4.3.1	Berechnung der charakteristischen Temperaturen . . . . .	27
3.4.4	Ergebnis der Berechnungen . . . . .	29
3.5	Auslegung der Regelung . . . . .	29
3.5.1	Temperaturregelung . . . . .	29
3.5.2	Regelung der Luftfeuchtigkeit . . . . .	30
3.5.3	Regelung des Schadgasgehaltes . . . . .	31
3.5.4	Aufbau der Gasmischapparatur . . . . .	31
3.5.5	Regelung der Strömungsgeschwindigkeit . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Einmessung des Depositionskanals</b>	<b>35</b>
4.1	Windgeschwindigkeit . . . . .	35
4.1.1	Die Funktionsweise des Hitzdrahtanemometers . . . . .	35
4.1.2	Kalibration der Hitzdrahtsonde . . . . .	36
4.1.3	Kalibration der Windgeschwindigkeit in der Kanalhauptachse . . . . .	37
4.1.4	Bestimmung der Windgeschwindigkeitsverteilung . . . . .	38
4.1.5	Abschätzung der Turbulenzgradverteilung . . . . .	43
4.2	Temperatur . . . . .	44
4.3	Kalibration von Dosierung und Messung von Schwefeldioxid . . . . .	46
4.4	Kalibration von Dosierung und Messung der Luftfeuchtigkeit . . . . .	47

<b>5</b>	<b>Untersuchungen mit Hilfe von Passivsammlern</b>	<b>49</b>
5.1	Durchführung der Versuche . . . . .	49
5.1.1	Herstellung der Passivsammler . . . . .	49
5.1.2	Aufarbeitung der Passivsammler nach Exponierung . . . . .	50
5.1.3	Ionenchromatographie . . . . .	50
5.1.4	Bilanzierung aus den aufgezeichneten Meßdaten . . . . .	50
5.2	Zeitlicher Verlauf der Deposition von Schwefeldioxid . . . . .	51
5.3	Einfluß der Windgeschwindigkeit . . . . .	53
5.4	Einfluß der Schadgaskonzentration . . . . .	57
5.5	Einfluß der Temperatur . . . . .	59
5.6	Einfluß der Luftfeuchtigkeit . . . . .	60
5.7	Gleichwertigkeit der Exponierungsplätze . . . . .	61
5.8	Fehlerbetrachtung . . . . .	61
5.9	Einfache Modellierung von Gebäudeumströmungen . . . . .	62
5.10	Ergebnis der Passivsammleruntersuchungen . . . . .	65
<b>6</b>	<b>Auswahl und Charakterisierung der Gesteinssorten</b>	<b>66</b>
6.1	Auswahl der untersuchten Gesteinssorten . . . . .	66
6.2	Charakterisierung der untersuchten Gesteinssorten . . . . .	67
<b>7</b>	<b>Vorbewitterung von Gesteinsproben</b>	<b>69</b>
7.1	Durchführung der Vorbewitterung . . . . .	69
7.2	Relevante Umweltdaten aus dem Meßcontainer . . . . .	73
7.3	Ergebnisse der Vorbewitterung . . . . .	74
7.3.1	Aufarbeitung der exponierten Proben und Auswertung . . . . .	74
7.3.2	Ergebnisse der Vorbewitterung für Ihrlersteiner Grünsandstein . . . . .	75
7.3.3	Ergebnisse der Vorbewitterung für Krensheimer Muschelkalk . . . . .	76
7.3.4	Ergebnisse der Vorbewitterung für Obernkirchner Grünsandstein . . . . .	77
7.3.5	Ergebnisse der Vorbewitterung für Sander Schilfsandstein . . . . .	78
7.3.6	Vergleich der Ergebnisse der Vorbewitterung . . . . .	78
<b>8</b>	<b>Untersuchung von Gesteinsprüfkörpern</b>	<b>81</b>
8.1	Grundlegende Verfahrensschritte . . . . .	81
8.1.1	Probenvorbereitung . . . . .	81
8.1.2	Depositionsmessung im Kanal . . . . .	81
8.1.3	Probenaufarbeitung . . . . .	82
8.1.4	Bilanzierung der Deposition über die Gasdosierung . . . . .	82
8.2	Vergleich zwischen bruchfrischen Gesteinen und Passivsammlern . . . . .	82
8.3	Vergleich zwischen vorbereiteten und bruchfrischen Gesteinsproben . . . . .	84
8.4	Ergebnisse der Untersuchung an Gesteinsplättchen . . . . .	84
8.4.1	Vergleich zwischen Freilandbewitterung und Kanalmessungen . . . . .	84
8.4.2	Vergleich mit den Ergebnissen anderer Autoren . . . . .	85
8.4.3	Vergleich zwischen bruchfrischen und vorbereiteten Gesteinen . . . . .	86
8.5	Zusammenfassung der Untersuchungen an Gesteinsprüfkörpern . . . . .	87

<b>9 Zusammenfassung der Ergebnisse</b>	<b>90</b>
9.1 Zusammenfassung . . . . .	90
9.2 Summary . . . . .	91
<b>10 Ausblick und weiterführende Untersuchungen</b>	<b>93</b>
<b>11 Literaturverzeichnis</b>	<b>94</b>
<b>12 Anhang</b>	<b>98</b>
12.1 Erläuterungen zur verwendeten Software . . . . .	98
12.2 Dokumentation der Blockstrukturseiten . . . . .	99
12.2.1 Regelung der Windgeschwindigkeit . . . . .	99
12.2.2 Regelung von Heizleistung und Lufttemperatur . . . . .	101
12.2.3 Regelung der Kühlanlage . . . . .	103
12.2.4 Regelung des Schadstoffgehaltes . . . . .	105
12.2.5 Regelung der Wasserverdampfungseinheit . . . . .	106
12.2.6 Regelung der Luftfeuchtigkeit . . . . .	108
12.2.7 Ansteuerung des magnetischen Mehrwegeventils . . . . .	110
12.2.8 Zeitprogramm zur automatischen Ventilumschaltung . . . . .	112
12.2.9 Zeitsteuerung für Temperaturgänge . . . . .	113
12.3 Übersicht über die Meß-, Steuer- und Regelungssignale . . . . .	115
12.4 Sicherheitsrelevante Daten der verwendeten Chemikalien . . . . .	117
12.5 Lebenslauf . . . . .	118

## Abbildungsverzeichnis

1 Entstehung von Grenzschichten und Unterschicht . . . . .	10
2 Schematischer Aufbau des Depositionskanals . . . . .	14
3 Wärmedurchgang durch eine ebene, isolierte Wand . . . . .	21
4 Charakteristische Temperaturen . . . . .	28
5 Gasmischanlage . . . . .	32
6 Mischkammer . . . . .	33
7 Prinzip des Hitzdrahtanemometers . . . . .	36
8 Ausgangssignal des Hitzdrahtanemometers . . . . .	37
9 Kalibration der Hitzdrahtsonde . . . . .	38
10 Kalibration der Windgeschwindigkeit . . . . .	39
11 Windprofile für 1 und 3 m/s . . . . .	40
12 Windprofil 6 m/s . . . . .	41
13 Turbulenzgradverteilung für 1 und 3 m/s . . . . .	42
14 Turbulenzgradverteilung für 6 m/s . . . . .	43
15 Temperaturgang . . . . .	45
16 Kalibrationsgeradenschar für die SO <sub>2</sub> -Dosierung . . . . .	46
17 Bilanzierung über Dosierungsmessungen . . . . .	51
18 Zeitreihe . . . . .	52
19 Windabhängigkeit der Depositionsgeschwindigkeit, Teil 1 . . . . .	55
20 Windabhängigkeit der Depositionsgeschwindigkeit, Teil 2 . . . . .	56
21 Abhängigkeit der Depositionsgeschwindigkeit von der Konzentration . . . . .	58

22	Abhängigkeit der Depositionsgeschwindigkeit von der Temperatur . . . . .	59
23	Abhängigkeit der Depositionsgeschwindigkeit von der Luftfeuchte . . . . .	60
24	Vergleich der Exponierungsplätze . . . . .	62
25	Fehlerabschätzung in den Passivsammlerexperimenten . . . . .	63
26	Einfache Modellierung der Gebäudeumströmung . . . . .	64
27	Tische mit Gesteinsproben im Freiland . . . . .	69
28	Anordnung der Probenträger im Freilandversuch . . . . .	70
29	Monatsmittelwerte der SO <sub>2</sub> -Konzentration . . . . .	73
30	SO <sub>2</sub> -Konzentrationsmittelwerte über die Exponierungszeit . . . . .	74
31	Deposition auf Ihrlersteiner Grünsandstein . . . . .	75
32	Deposition auf Krensheimer Muschelkalk . . . . .	76
33	Deposition auf Obernkirchner Sandstein . . . . .	77
34	Deposition auf Sander Schilfsandstein . . . . .	78
35	Depositionsgeschwindigkeiten für westliche Exponierung . . . . .	79
36	Depositionsgeschwindigkeiten für östliche Exponierung . . . . .	80
37	Depositionsmessung auf bruchfrischen Steinen . . . . .	83
38	Vergleich bruchfrischer mit vorbewitterten Gesteinen 1 . . . . .	87
39	Vergleich bruchfrischer mit vorbewitterten Gesteinen 2 . . . . .	88
40	Vergleich bruchfrischer mit vorbewitterten Gesteinen 3 . . . . .	89
41	Windsteuerung . . . . .	99
42	Heizungsregelung . . . . .	101
43	Wirkungsweise des PID-Reglers . . . . .	102
44	Kühlanlagenregelung . . . . .	103
45	Schadgasregelung . . . . .	105
46	Regelung des Blockverdampfers . . . . .	106
47	Regelung der Luftfeuchte . . . . .	108
48	Ventilsteuerung 1 . . . . .	110
49	Ventilsteuerung 2 . . . . .	111
50	Automatische Ventilumschaltung . . . . .	112
51	Temperaturgang . . . . .	113

## Tabellenverzeichnis

1	Übersicht über standardisierte Untersuchungsverfahren . . . . .	5
2	Übersicht über bisherige Arbeiten zur Deposition von SO <sub>2</sub> . . . . .	6
3	Übersicht über Untersuchungen zur Gebäudeumströmung . . . . .	7
4	Dimensionierungsdaten des Depositionskanals, Teil 1 . . . . .	17
5	Dimensionierungsdaten des Depositionskanals, Teil 2 . . . . .	18
6	Ungünstigste Betriebsbedingungen im Depositionskanal . . . . .	20
7	Wärmehaushalt des Depositionskanals . . . . .	25
8	Heiz- und Kühllasten zur Temperierung des Volumen Nebenstroms . . . . .	26
9	Zusammenstellung aller stationären Wärmelasten . . . . .	26
10	Charakteristische Temperaturen . . . . .	28
11	Temperierlasten der Komponenten . . . . .	29
12	Ergebnis der Wärmeleistungsberechnungen . . . . .	29
13	Grenzwerte der Luftfeuchtigkeit im Depositionskanal . . . . .	31

14	Zusammensetzung der Absorptionslösung für Passivsammler . . . . .	49
15	Versuchsbedingungen Zeitreihe . . . . .	52
16	Versuchsbedingungen Windgeschwindigkeitsreihe . . . . .	54
17	Versuchsbedingungen Konzentrationsreihe . . . . .	58
18	Versuchsbedingungen Temperaturreihe . . . . .	60
19	Versuchsbedingungen Luftfeuchtigkeitsreihe . . . . .	61
20	Versuchsbedingungen für die Gebäudeumströmung . . . . .	63
21	Ergebnisse der Versuche der Gebäudeumströmung . . . . .	64
22	Vergleich mit Depositionsgeschwindigkeiten aus anderen Arbeiten, Teil 1	65
23	Charakterisierung der eingesetzten Gesteinssorten . . . . .	67
24	Exponierungszeiten . . . . .	71
25	Analysengang . . . . .	72
26	Versuchsbedingungen für die Untersuchungen an Gesteinsproben, Teil 1	83
27	Versuchsbedingungen für die Untersuchungen an Gesteinsproben, Teil 2	84
28	Vergleich Freilandbewitterung/Kanalmessung . . . . .	85
29	Vergleich mit Depositionsgeschwindigkeiten aus anderen Arbeiten, Teil 2	86
30	Macros der Windsteuerung . . . . .	100
31	Konstante Signale zur Windsteuerung . . . . .	100
32	Reglerparameter der Temperaturregelung . . . . .	103
33	Konstante Signale zur Heizungsregelung . . . . .	103
34	Macros der Kühlanlagensteuerung . . . . .	104
35	Konstante Signale zur Kühlanlagensteuerung . . . . .	104
36	Reglerparameter der Schadgasdosierung . . . . .	106
37	Konstante Signale zur Schadgasdosierung . . . . .	106
38	Reglerparameter der Blockverdampfersteuerung . . . . .	107
39	Konstante Signale zur Blockverdampfersteuerung . . . . .	107
40	Reglerparameter der Feuchterege lung . . . . .	109
41	Konstante Signale zur Feuchterege lung . . . . .	109
42	Macros der Feuchterege lung . . . . .	109
43	Einstellung der Timer für die Ventilsteuerung . . . . .	112
44	Timer-Einstellungen für die automatische Ventilumschaltung . . . . .	113
45	Konstante Signale der Zeitsteuerung für Temperaturgänge . . . . .	114
46	Reglerparameter der Zeitsteuerung für Temperaturgänge . . . . .	114
47	Timer- Einstellungen für die Zeitsteuerung der Temperaturgänge. . . . .	114
48	Übersicht über die verwendeten binären Signale . . . . .	115
49	Übersicht über die verwendeten analogen Signale . . . . .	116
50	Sicherheitsrelevante Daten der verwendeten Chemikalien . . . . .	117



# 1 Einleitung und Problemstellung

## 1.1 Entwicklung der historischen Hintergründe

Die Problematik der Umweltbelastung durch anthropogene Luftverunreinigungen begleitet die Menschheit praktisch seit dem Beginn der Nutzung des Feuers. Die dabei entstehenden Verbrennungsprodukte wie Rauch, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, organische Gase und andere haben schon in den frühen Hochkulturen mit ihren dichtbewohnten Städten zur Beeinträchtigung der Außenluft geführt. Schriftliche Zeugnisse dieser Auswirkungen sind bis heute erhalten (vgl. BAUMBACH).

Als bedeutendste anthropogene Quellen in vorindustrieller Zeit stellen sich das Hüttenwesen, die Töpfereien als Gewerbe mit hohem Energieverbrauch und die Räuhereien dar. Die Auswirkungen waren unter den damaligen Bedingungen auf die unmittelbare Nachbarschaft begrenzt. So wurden von den bei der Erzröstung freigesetzten sauren Gasen und schwermetallreichen Stäuben Schäden an Äckern, Wiesen und Früchten der Umgebung beobachtet.

Die daraus resultierenden Nachbarschaftskonflikte zwischen Gutsbesitzern und Hüttenleuten führten zum Beginn der Umwelttechnik in Deutschland und zur Entwicklung wirksamer Rauchfänge zur Grobstaubabscheidung durch Sedimentation.

Mit dem Aufkommen der Dampfmaschinen vervielfachte sich der Energieverbrauch innerhalb weniger Jahrzehnte. In der folgenden Zeit stürmischer Entwicklung der Technik und dem Anstieg der Produktivität in allen Gewerbezweigen stieg auch der Ausstoß von Luftschadstoffen drastisch. Zudem wurde die Palette emittierter Stoffe vor allem durch die sich entwickelnde chemische Industrie schnell erweitert.

In der Mitte des letzten Jahrhunderts wurde in der Umgebung der industriellen Zentren Mitteleuropas ein weitverbreitetes Waldsterben beobachtet. Dieses Phänomen führte zur Erforschung und Aufdeckung der Wirkungspfade der sogenannten klassischen Rauchschäden. Entsprechend dem Bedarf wurden daher Methoden zur Immissionsmessung für Schwefeldioxid und seine Folgeprodukte in Luft bzw. Regenwasser entwickelt.

Durch forstwirtschaftliche Maßnahmen, wie den Ersatz geschädigter Bäume durch resistenterer Laubhölzer, und die Entwicklung von Methoden zur Emissionsminderung begann die Industriegesellschaft der Umweltbelastung entgegenzuwirken.

Beginnende Gesundheitsfürsorge für die Arbeitnehmer, die Entwicklung der verfahrenstechnischen Grundlagen für emissionsärmere Anlagen sowie für wirksame Abgasreinigungsverfahren und der Wechsel auf andere Energieträger (zentral erzeugten, elektrischen Strom statt einzelner Dampfmaschinen) brachten Veränderungen in der Emissionssituation. Steigender Individualkraftverkehr führte zuerst in den USA zu einer neuartigen Belastung, dem Photo-Smog.

Eine Reihe von gesetzgeberischen Maßnahmen über Brennstoffqualitäten und maximale Auswurfmengen war wegen des exponentiell steigenden Primärenergieverbrauchs Mitte bis Ende der Fünfziger Jahre notwendig geworden. In den folgenden Jahren gestaltete sich durch den Einsatz schwefelarmer Brennstoffe die Erhöhung des Wirkungsgrades der Brenner in Heizanlagen und Kraftwerken und Ausbau der Gasreinigung im Zuge der 13. BImSchV (Verordnung über Großfeuerungsanlagen) in Deutschland die Schwefeldioxidbelastung rückläufig [vgl. LAHMANN (1997), UBA (1994) und (1997)]. Zunehmender Kraftverkehr hat trotz Maßnahmen zur Emissionsminderung bei Auto-

mobilen bis heute eine Reduzierung stickstoffhaltiger Luftschadstoffe und organischer Schadstoffe verhindert.

Wenngleich eine Verlagerung weg von den „klassischen Luftschadstoffen“, wie  $\text{SO}_2$  und Stäuben zu den Stickoxiden und gebildeten Sekundärschadstoffen, wie Ozon, stattgefunden hat, so ist Schwefeldioxid nach wie vor ein wichtiger Belastungsfaktor und für bestimmte schädigende Auswirkungen bestimmender Bestandteil der Gesamtbelastung.

## 1.2 Auswirkungen der Luftschadstoffe

Das mögliche Spektrum nachteiliger Wirkungen von Luftverunreinigungen ist von der kaum wahrnehmbaren Grundbelastung über Belästigung, Schädigung, Krankheit bis zur Todesfolge weit gefächert. Betroffen werden können Menschen, Tiere, Pflanzen, Klima und Sachgüter.

Das Hauptargument für die Begrenzung der Schadstoff-Emissionen sind die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Die Auswirkungen können von der Belästigung (z.B. durch Gerüche), der Störung des psychischen und physischen Wohlbefindens über akute und chronische Schädigungen (z.B. der Atemwege) bis zu erhöhter Sterblichkeit reichen. Die Auswirkungen auf die Tierwelt sind prinzipiell gleichartig.

Schaden an der Pflanzenwelt kann sich in direkten ökonomischen Verlusten, wie z.B. der Ertragsminderung, in dem Verlust der ökologischen Funktion (Schutz vor Bodenerosion, Erhalt eines ausgeglichenen Wasserhaushaltes u.ä.), im Verlust ideller Werte und in einer Einschränkung des Gen-Pools manifestieren.

Zunehmen wichtig ist auch die Problematik klimatischer Veränderungen, die durch Luftverunreinigungen hervorgerufen werden können. In diesem Zusammenhang wäre zunächst die mögliche Verstärkung des sogenannten Treibhauseffektes zu nennen, die zu einer Verschiebung der Klimazonen mit unvorhersehbaren Konsequenzen führen könnte. Weiterhin wird eine Abnahme der stratosphärischen Ozonschicht auf die Emission von Stickoxiden und FCKW zurückgeführt. Die Folge wäre eine Zunahme harter UV-Strahlung auf der Erdoberfläche mit schädigender Wirkung auf Menschen, Tiere und Pflanzen.

Schließlich können auch reine Sachgüter von Schadensbildern betroffen sein, die durch die Einwirkung von Luftschadstoffen verursacht werden. Saure Schadgase und Stäube schädigen in großem Umfang alle der Atmosphäre ausgesetzten Baustoffe wie Stahl, Beton, Ziegel und Naturstein. Insbesondere Sedimentgestein ist anfällig gegenüber aggressiven Schadstoffen. Aber auch Kunststoffe, Lacke und Pigmente werden von sogenannten Photooxidantien geschädigt.

Mit den im wesentlichen oberflächlichen Korrosionen an diesen Stoffen sind erhebliche volkswirtschaftliche Einbußen verknüpft. Bei der fortschreitenden Zerstörung kulturhistorisch wichtiger Natursteinbauten tritt neben den wirtschaftlichen auch ein ideller Verlust.

## 1.3 Problematik des Steinzerfalls

Seit dem Ende des 19. Jahrhunderts zeigen sich industriell bedingte Zerfalls- und Zerstörungserscheinungen an Bauwerken aus Natursteinen. Der entstehende Schaden ist sowohl materieller als auch kulturhistorischer Art [LUCKAT (1973) und (1981)].

Die Faktoren, die zum Zerfall von Gesteinen führen, lassen sich unter verschiedenen Gesichtspunkten einteilen. Grundsätzlich zu unterscheiden sind:

### 1. Klimatische Einflüsse

Darunter fallen Vorgänge wie Winderosion, zerstörende Wirkung von Frost-/Tauwechseln und unterschiedliche Ausdehnung durch Sonneneinstrahlung, Bodenhebungen bzw. -senkungen und besonders in unseren Breiten die Auflösung calciumcarbonathaltiger Bestandteile bei Regenereignissen.

Durch das natürlicherweise in der Atmosphäre vorkommende Kohlendioxid hat auch „reiner“ Regen einen niedrigen pH-Wert von etwa 5,6. Kohlensäurehaltiges Wasser kann Calciumcarbonat durch die Bildung von erheblich besser löslichem Hydrogencarbonat mobilisieren.

### 2. Einflüsse durch Schadstoffbelastungen (anthropogen, natürlich oder mikrobiologisch verursacht)

Saure Schadstoffe können den pH-Wert des Regens weiter senken. Dabei müssen diese Stoffe nicht unbedingt dem menschlichen Wirken entstammen, sondern können auch natürlichen Ursprunges sein.

Nach einer Darstellung aus FINNLAYSON-PITTS / PITTS betrug der Anteil anthropogener Schwefelverbindungen für die nördliche Hemisphäre 1976 etwa 56 %. Natürliche Prozesse sind Vulkanausbrüche, Sea Spray und biogene Produktion von schwefelhaltigen Verbindungen mit gegebenenfalls nachfolgender atmosphärischer Oxidation.

Durch den Angriff saurer Schadstoffe auf die Carbonate in der Gesteinsmatrix entstehen durchweg besser lösliche Salze (Sulfate, Nitrate usw.) und es folgt verstärkter Materialverlust am Bauwerk.

Indirekte Wirkungen können von hygroscopischen Partikeln verursacht werden, die für eine erhöhte Oberflächenfeuchte am Gestein mit nachfolgend verstärkter Aufnahme von wasserlöslichen Schadstoffen verantwortlich sein können. Auch Oxidationsmittel können durch die Oxidation der primär abgeschiedenen Stoffe die weitere Aufnahme erhöhen. Ein Beispiel ist in der Umwandlung von Sulfit (aus der Lösung von  $\text{SO}_2$  im wässrigen Oberflächenfilm entstanden) zu Sulfat zu sehen.

Weiterhin können deponierte Stoffe auch katalytisch wirksam sein oder als Nahrungssubstrat für Mikroorganismen wirken, die wiederum zerstörerische Stoffwechselprodukte abgeben können.

Die bei der Steinzerstörung wirksamen Mechanismen können, bei etwas formalistischer Betrachtungsweise, in physikalische, chemische oder biologische Vorgänge unterteilt werden [vgl. ZEHNDER (1982)]. Da aber die real ablaufenden Prozesse sehr komplex sein können, kann diese Einteilung nicht streng gültig sein. Biologische Besiedlung kann z.B. sehr wohl auch physikalische Schadensursachen nach sich ziehen (Sprengdruck durch Wurzelwachstum in Porenräumen) oder durch aggressive Stoffwechselprodukte zu einem chemischen Abbau von Gesteinsmaterial führen. Trotzdem ist diese Einteilung für die nachfolgenden Betrachtungen sinnvoll.

### 1. Physikalische Prozesse

- (a) Salzsprengung (Kristallwasseraufnahme, Umkristallisation, etc),
- (b) Frostsprengung durch die Volumenausdehnung beim Gefrieren von Wasser in den Porenräumen,
- (c) Sprengwirkung durch unterschiedliche, thermische Ausdehnung,
- (d) Deflation (Winderosion),
- (e) von außen einwirkende mechanische Spannungen durch Bodenhebungen oder -senkungen.

### 2. Chemische Prozesse

- (a) Auflösung von Carbonaten durch Säuren,
- (b) Auflösung durch Komplexbildung mit org. Stoffen.

### 3. Biologische Prozesse

- (a) Angriff durch aggressive Stoffwechselprodukte,
- (b) Veränderung des Wasserhaushaltes durch Bioschleimproduktion,
- (c) Drucksprengung durch Wurzelwachstum.

Eine besondere Rolle spielt dabei das Zusammenwirken von klimatischen und chemischen Einflüssen auf das Bauwerk. So findet man an den Wetterseiten von Gebäuden geringere Verschmutzungen, andere Temperatur- und Feuchtigkeitstagesgänge, sowie andersartige Schadensbilder [GRIMM et al. (1983) sowie ZEHNDER (1982)].

#### 1. Wetterseiten (bevorzugt Westen):

- (a) geringere, sichtbare Verschmutzung,
- (b) ausgeprägte Tagesgänge der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit (schnelle Wechsel, große Änderungen),
- (c) Oberflächenzerstörung.

#### 2. abgewandte Seiten:

- (a) starke, sichtbare Verschmutzung,
- (b) keine Tagesgänge von Temperatur und Luftfeuchtigkeit (langsame Wechsel, geringe Änderungen),
- (c) Tiefenzerstörung.

Es besteht unter den verschiedenen Forschern Einvernehmen über die Wichtigkeit des Einflusses der lokalen Strömungsverhältnisse auf die Schädigung von Natursteinen [vgl. den Übersichtsartikel von LIPFERT (1989)]. Es ist daher notwendig, diese Verhältnisse auch in die Laborsimulation korrosiver Atmosphären einzubeziehen. Bisherige Untersuchungen können dabei kaum als erschöpfend angesehen werden.

Tabelle 1: Übersicht über die standardisierten Untersuchungsverfahren zur Gesteinsverwitterung.

Untersuchungsmethode	Vorschrift
Frost-/Tauwechselversuche	DIN 52.107
Kristallisation mit Natriumsulfat	DIN 52.111
Bewitterung mit Schwefeldioxid	VDI 3797
Bewitterung mit wechselnder Luftfeuchtigkeit	DIN 50.008

## 1.4 Bisherige Untersuchungen

Zur Aufklärung dieser Vorgänge gibt es zwei grundsätzlich unterschiedliche Wege: Naturbeobachtungen und Laboruntersuchungen. Die Laborverfahren sind zum Teil schon standardisiert (siehe Tabelle 1).

Weiterhin sind in verschiedenen Arbeitsgruppen bereits Simulationskammern im Einsatz, in denen Begasungsversuche gemacht, und die Einflüsse von Temperatur und Feuchtigkeit untersucht werden. Außer den Schädigungsmechanismen bedürfen auch die Transportprozesse zum Ort der Schadenswirkung der genauen experimentellen Aufklärung. Eine Reihe von Untersuchungen befaßt sich daher mit der Deposition von gasförmigen und partikulären Schadstoffen auf verschiedenartigen Oberflächen. Die in Tabelle 2 angeführten Arbeiten sind mit der hier dargestellten Aufgabe thematisch verwandt.

Neben diesen Untersuchungen gibt es eine Reihe von weiteren Arbeiten, die sich im wesentlichen mit der Umströmung von Gebäuden oder bebautem Gelände beschäftigen. Ziel der Untersuchungen sind meist Voraussagen über Konzentrationsverteilungen im Einflußbereich lokaler Quellen. Sofern diese Arbeiten für die vorliegenden Untersuchungen von Belang waren, sind sie in der Tabelle 3 aufgeführt.

Weiterhin gibt es natürlich eine Vielzahl von Arbeiten, die sich mit den Schadensmechanismen auseinandersetzen. An dieser Stelle kann dabei kein auch nur halbwegs erschöpfender Überblick gegeben werden. Da zudem derartige Untersuchungen nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit waren, wird auf eine Auflistung verzichtet und stattdessen auf WITTENBURG (1994) und BOTHMANN (1997) verwiesen, die entsprechende Quellen bewerten.

Es fehlen bisher Untersuchungen zur Deposition von Schadstoffen auf den relevanten Werksteinen in Abhängigkeit von äußeren Bedingungen und Zustand der Oberflächen nach längerer Einwirkung von schädigenden Stoffen.

## 1.5 Aufgabenstellung

Damit eine Schadenswirkung durch einen in der Atmosphäre transportierten Stoff an einem Werkstein auftreten kann, muß dieser Stoff auf dem Gestein deponiert werden. Neben der Untersuchung der Schädigungsmechanismen ist daher auch die Kenntnis der Art und Weise des Transportes an den Ort der Schadenswirkung wichtig.

Es sollte im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Windkanal konzipiert und aufgebaut werden, der die Untersuchung der Deposition von Schwefeldioxid unter regelbarer

Tabelle 2: Übersicht über die bisherigen Arbeiten zur Untersuchung der Deposition von Luftinhaltsstoffen.

Autoren	Art der Untersuchungen	Zitat
1. Windkanaluntersuchungen:		
Sickles/Michie	Bestimmung von $v_d$ , $R_S$ und $R_A$ für SO <sub>2</sub> auf einem idealen Absorber (PbO <sub>2</sub> -Kerze)	HICKS et al. (1985)
Adema	Depositionsgeschwindigkeiten und Übergangswiderstände für die Deposition von SO <sub>2</sub> auf Wasserflächen	HICKS et al. (1985)
Spiker	Untersuchungen zur Deposition von SO <sub>2</sub> auf Werksteinoberflächen und anderen Baumaterialien	SPIKER et al. (1992)
2. Kammerexperimente:		
Gilardi	Deposition von SO <sub>2</sub> auf feuchten und trockenen Probekörpern verschiedener Gesteinsorten	HICKS et al. (1985)
Spedding	SO <sub>2</sub> -Deposition auf Kalkstein	HICKS et al. (1985)
Braun/Wilson	SO <sub>2</sub> -Deposition auf Kalkstein, reinem Natriumcarbonat und Gips	HICKS et al. (1985)
Mangels	Untersuchungen zur Deposition von SO <sub>2</sub> auf Werksteinoberflächen bei gleichzeitiger Klimasimulation	MANGELS (1992)
Wittenburg	Untersuchung der Deposition von SO <sub>2</sub> auf einer Vielzahl von Werksteinoberflächen im Freiland und in verschiedenen Depositionskammern	WITTENBURG (1994)
Behlen	Untersuchungen zur Deposition von SO <sub>2</sub> und stickstoffhaltigen Spezies auf Werksteinflächen	BEHLEN (1996)
Bothmann	Untersuchung zur Deposition von SO <sub>2</sub> auf Pulvern und Gesteinsprüfkörpern in der Simulationskammer und im Freiland (parallel mit der hier vorgestellten Arbeit)	BOTHMANN (1997)

Temperatur und Luftfeuchtigkeit erlaubt.

Dazu waren zunächst die im Kanal zu realisierenden Bedingungen anhand von einschlägigen Umweltdaten so auszuwählen, daß die Vergleichbarkeit mit natürlichen Bedingungen möglichst weit gewahrt bleibt. Die Einhaltung der Vorgaben war mit entsprechenden Voruntersuchungen zu überprüfen.

Weiterhin war zum unmittelbaren Vergleich zwischen dem Verhalten in natürlicher Umgebung und den Versuchen im Depositionskanal eine Freilandexponierung von

Tabelle 3: Übersicht über Untersuchungen zur Gebäudeumströmung.

Autoren	Art der Untersuchungen	Zitat
Vincent	Verhalten von Rauchfahnen bei der Umströmung von Quadern im Windkanal	VINCENT (1977)
McCormick	Konzentrationsverhalten der Abgasfahnen lokaler Quellen im Windkanal und im Freiland	McCORMICK (1971)
Hunt	Detaillierte, theoretische Behandlung der Umströmung einfacher Gebäude (Quader und Zylinder)	HUNT (1971)
Schatzmann	Modellierung der Strömungsbedingungen für bebaute Flächen im Windkanal	SCHATZMANN et al. (1986)

Gesteinen gleicher Sorte und Herkunft durchzuführen. Da notwendigerweise die Simulation von Umweltbedingungen auf wenige Parameter beschränkt bleibt, besteht die Gefahr, daß wichtige Synergismen im Experiment wegfallen und so eine falsche Einschätzung des Anteils der kontrollierten Parameter durch den Experimentator erfolgt oder gar vollständig andere Schadensmechanismen auftreten. Versuche am Windkanal sollen daher stets kritisch mit Feldbeobachtungen verglichen werden.

In ersten Versuchsreihen mit Passivsammlersystemen wurde unter Variation jeweils eines Parameters bei Konstanthaltung aller anderen Größen der Einfluß dieser speziellen Größe auf die Deposition in der konstruierten Anlage bestimmt. Im Vergleich mit Daten aus anderen Simulationen kann so eine Einschätzung der Leistungsfähigkeit erzielt werden.

Schließlich wurde die Deposition von  $\text{SO}_2$  auf bruchfrischen und vorbewitterten Gesteinen untersucht und ein Vergleich der Aufnahme verschiedener Oberflächen erhalten.

Vorversuche zur einfachen Modellierung von Gebäudeumströmungen wurden durchgeführt, um die Eignung des Windkanals für aufwendigere Untersuchungen zu überprüfen und gegebenenfalls die Notwendigkeit von konstruktiven Veränderungen erkennen zu können.

## 2 Deposition von Schwefeldioxid

Ein Stoff wird als Luftschadstoff angesehen, wenn er als Luftverunreinigung eine schädigende Wirkung zeigt. Grundsätzlich kann eine schädigende Wirkung nur dann auftreten, wenn der Stoff in reaktiver Form auf die Substratoberfläche abgeschieden wird. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von der Deposition des Stoffes.

Diese Deposition kann auf verschiedenen Wegen erfolgen. Nach WINKLER (1985) unterscheidet man zwischen

- der **nassen Deposition**, bei der der Schadstoffeintrag durch belastete Niederschläge (Schnee, Regen etc.) erfolgt,
- der **trockenen Deposition**, bei der Gase oder Partikel direkt aus der Luft auf die Rezeptoroberfläche transportiert werden
- sowie der **feuchten Deposition**, bei der hochbelastete Nebeltropfen, Tau oder Reif die Schadstoffe auf die Oberfläche transportieren.

Regentropfen können atmosphärische Verunreinigungen z.T. schon bei der Bildung (Kondensationskerne) insbesondere aber im freien Fall sehr effektiv aufnehmen. Für den Übergang dieser Stoffe aus dem Regenwasser auf die Rezeptoroberfläche ist die Benetzungsdauer (und damit die Orientierung der Fläche) entscheidend, zum anderen die Konzentration im Regenwasser und die Aufnahmefähigkeit des Rezeptors. Umfangreiche Messungen zum Eintrag von Schadstoffen über Regenereignisse findet man z.B. bei WOLF (1991).

Nebeltropfen sind im Vergleich zu Regentropfen, bedingt durch ihre kleinere Masse und damit längere Aufenthaltsdauer in der Luft, besonders wirksame Sammler von Schadstoffen. Der Schadstoffeintrag über Nebel ist vor allem für Waldschäden in Hochlagen ein wichtiger Eingangspfad. Untersuchungen zur feuchten Deposition findet man u.a. bei TRAUTNER et al. (1988), LOVETT et al. (1982) und NOWATZKY (1989).

In der vorliegenden Arbeit werden weder Nebel- noch Regenereignisse simuliert oder im Freiland untersucht. Die durchgeführten Experimente beschränken sich auf die trockene Deposition von Schwefeldioxid. Wie unter 1.4 bereits gezeigt wurde, ist die Deposition von  $\text{SO}_2$  für viele Materialoberflächen bereits untersucht worden, aber bisher kaum als abschließend behandelt zu betrachten.

Im physikalischen Sinn versteht man unter der Deposition  $F_M$  die pro Zeit- und Flächeneinheit auf der Substratoberfläche abgeschiedene Masse des deponierten Stoffes:

$$F_M = \frac{m}{t \cdot A} \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (1)$$

$F_M$	:	Deposition
$m$	:	Masse des abgeschiedenen Stoffes
$t$	:	Zeit
$A$	:	Fläche

Um die unterschiedlichen Bedingungen bezüglich der Stoffkonzentration in der Gasphase vergleichbar zu machen, wird diese Größe üblicherweise auf die Konzentration

normiert. Dabei erhält man die sogenannte Depositionsgeschwindigkeit  $v_d$ :

$$v_d = \frac{F_M}{c} \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (2)$$

$v_d$	:	Depositionsgeschwindigkeit
$F_M$	:	Deposition
$c$	:	Konzentration in der Gasphase

Grundsätzlich lassen sich wenigstens zwei Phasen für die trockene Deposition unterscheiden, die unter entsprechenden Bedingungen jeweils geschwindigkeitsbestimmend für den Gesamtvorgang sein können. Im ersten Schritt muß der Transport des Stoffes durch die Atmosphäre zur Oberfläche des Substrates erfolgen, dann schließt sich ein Phasenübergang durch Lösung, Adsorption etc. auf die Oberfläche an.

## 2.1 Übergang auf die Rezeptoroberfläche

Beim Übergang eines Schadstoffes aus einer direkt die Materialoberfläche berührenden Fluidschicht ist der sogenannte Oberflächenwiderstand  $R_S$  zu überwinden.

Für die Untersuchung von Materialeigenschaften sind besonders die Faktoren interessant, die diesen Oberflächenwiderstand verändern. So wird die trockene Deposition von  $\text{SO}_2$  stark durch die Oberflächenfeuchtigkeit beeinflusst. Auf trockenen Oberflächen deponiert nur eine etwa monomolekulare Schicht, Oberflächenfeuchtigkeit erhöht die Aufnahme von  $\text{SO}_2$  durch Lösung zu  $\text{H}_2\text{SO}_3$ . Findet daran anschließend Oxidation zu  $\text{H}_2\text{SO}_4$  statt, die mit basischen Komponenten weiterreagiert, so kann die  $\text{SO}_2$ -Aufnahme weiter erhöht werden.

Unter den Bedingungen in der natürlichen Atmosphäre sind Oberflächen immer von einem Feuchtfilm überzogen, der je nach herrschender Luftfeuchte und Temperatur unterschiedlich stark ist. Der Übergang eines Gases aus der oberflächennahen Luftschicht in diesen Feuchtfilm kann mit Hilfe des Henryschen Gesetzes beschrieben werden, wenn angenommen werden kann, daß der Feuchtfilm sich wie ein normales Lösungsmittel verhält (BARROW):

$$a_{s,i} = K \cdot P_i \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (3)$$

$a_{s,i}$	:	Sättigungsaktivität des Gases i in Lösung
$c_{s,i}$	:	Sättigungskonzentration des Gases i in Lösung
$P_i$	:	Partialdruck des Gases i über der Lösung
$K$	:	Henry-Konstante des Gases

Auch die Schadenswirkung wird verstärkt, da erstens mehr  $\text{SO}_2$  aufgenommen wird, und andererseits der Angriff einer gelösten Spezies auf das Material wirksamer ist, als eine Gas/Festphasenreaktion. Schließlich kann noch der Ort der Schädigung bei Durchfeuchtung des Materials von der Oberfläche in das Materialinnere verlagert werden. Die Oberflächenfeuchtigkeit wird außer durch die relative Feuchte der umgebenden Luft-

schicht und die Temperatur auch noch durch die Oberflächenbeschaffenheit bestimmt.

Weiterhin hängt die Deposition von  $\text{SO}_2$  auf feuchten Oberflächen auch vom pH-Wert der Flüssigkeitsschicht ab. Dieser wird sowohl vom Oberflächenmaterial als auch von Korrosionsprodukten und codeponierten Stoffen beeinflusst [LIPFERT(1989)]. Unterhalb von  $\text{pH}=4$  ist  $\text{H}_2\text{SO}_3$  nur wenig dissoziiert, die  $\text{SO}_2$ -Aufnahme der Flüssigkeitsschicht wird dann durch das Henrysche Gesetz bestimmt und  $v_d$  sinkt mit abnehmendem pH-Wert schnell. Ungepufferte Oberflächenfilme sind daher schlechte bis sehr schlechte Akzeptoren für  $\text{SO}_2$ .

## 2.2 Transport durch die Grenzschicht

Ein gasförmiges Teilchen muß demnach zunächst gegen einen atmosphärischen Widerstand  $R_A$  aus der Atmosphäre in die Luftschicht in unmittelbarer Nähe zur Oberfläche transportiert werden. Dieser Widerstand  $R_A$  ist abhängig von den Strömungsverhältnissen um die betrachtete Oberfläche. Für den einfachsten Fall, der Überströmung einer längsangeströmten, plattenförmigen Rezeptorfläche ergeben sich die in Abbildung 1 überzeichnet dargestellten Verhältnisse.

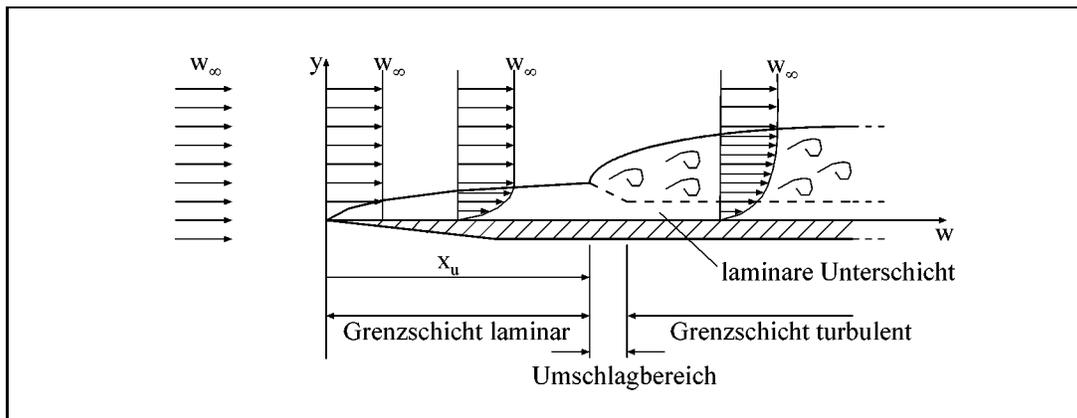


Abbildung 1: Darstellung der Entstehung von laminarer und turbulenter Grenzschicht, sowie laminarer Unterschicht. Die Abbildung wurde nach einer Darstellung bei BÖSWIRTH angefertigt, die Größenverhältnisse sind stark überzeichnet.

Infolge des Anhaftens von Fluidteilchen an der Oberfläche bildet sich ein Geschwindigkeitsprofil aus. Die Geschwindigkeit des strömenden Mediums ist Null an der Rezeptoroberfläche und erreicht in entsprechend großem Abstand von der Oberfläche den Wert der freien Strömung. Die dünne Schicht, in der sich die Geschwindigkeitsänderung vollzieht, heißt Grenzschicht. Zunächst ist diese Grenzschicht laminar, nach einer kritischen Überströmlänge  $x_u$ , die wesentlich von der Form der Anströmkante abhängt, schlägt sie in eine turbulente Grenzschicht mit außerordentlich dünner, laminarer Unterschicht um. Die kritische Überströmlänge  $x_u$  ist umso kleiner, je stumpfer die Anströmkante, je größer die Geschwindigkeit außerhalb der Grenzschicht und je geringer die Viskosität des Fluids ist.

Infolge der Strömungsverhältnisse in dieser Grenzschicht, ist der Stofftransport ge-

genüber der freien Strömung erschwert. Zur Durchdringung der laminaren Unterschicht steht nur noch die molekulare Diffusion als Transportmechanismus zur Verfügung.

### 2.3 Widerstandsmodell

Für stationäre Verhältnisse bei der Deposition kann ein einfaches Widerstandsmodell zur Beschreibung des Vorganges herangezogen werden. Die Depositionsgeschwindigkeit läßt sich damit als Kehrwert der Summe aller zu überwindenden Widerstände auf dem Transportweg zur Oberfläche ausdrücken:

$$v_d = \frac{1}{R_A + R_S} \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (4)$$

- $v_d$  : Depositionsgeschwindigkeit
- $R_A$  : atmosphärischer Widerstand
- $R_S$  : Oberflächenwiderstand

In hochturbulenten Strömungen wird  $R_A$  vernachlässigbar klein gegenüber  $R_S$  und es ergibt sich somit die Möglichkeit, den Oberflächenwiderstand aus der meßtechnisch leicht zugänglichen Depositionsgeschwindigkeit zu bestimmen.

Für ideale Senken geht  $R_S$  gegen Null, und es kann damit der atmosphärische Widerstand des verwendeten Versuchsaufbaus bzw. der untersuchten Bauteile bestimmt werden.

Es läßt sich dieses Modell aber auch dahingehend verfeinern, daß die betrachteten Widerstände weiter aufgegliedert werden. So kann man den Oberflächenwiderstand  $R_S$  aufteilen in einen Anteil für den reversiblen Phasenübergang (z.B. Lösung in einem Oberflächenfilm) und einen Anteil für chemische Folgereaktionen zu irreversibel gebundenen Spezies (Oxidation etc.). Auch für den atmosphärischen Widerstand  $R_A$  können die Verhältnisse in der freien Strömung und die in der Grenzschicht unmittelbar über der Substratfläche getrennt betrachtet werden.

## 3 Konzipierung des Depositionskanals

### 3.1 Vorgaben bei der Entwicklung des Depositionskanals

Zunächst müssen die klimatischen Bedingungen festgelegt werden, unter denen die geplanten Untersuchungen durchgeführt werden sollen. Die Parameter Wind, Temperatur, Schadgaskonzentration und relative Luftfeuchtigkeit sollen dabei in Bereichen eingestellt werden können, wie sie typischerweise auch in der Umwelt gefunden werden. Dies gilt sowohl für die Mittelwerte als auch für die relevanten Übergänge (z.B. Frost-/Tauwechsel). Extremfälle wie Stürme oder besonders hohe Schadgaskonzentrationen durch lokale Einflüsse sollen wegen der schwierigen technischen Realisation nicht nachgebildet werden. Als Orientierung für die geforderten Leistungsdaten der zu entwerfenden Anlage dienen die in der folgenden Aufzählung angegebenen Werte (nach RUMPEL und SONDERHAUSEN):

1. **Temperatur:** Laut VDI-Binnenlandklima Typ 0 gibt es einen Jahresgang der monatlichen Temperaturmittelwerte von -3 bis +32 °C. In der geplanten Anlage sollen Temperaturen von -5 bis +40 °C erreichbar sein. Mit dieser Vorgabe können Temperaturgänge unter den Gefrierpunkt gefahren werden.
2. **Luftfeuchtigkeit:** Der monatliche Mittelwert der relativen Luftfeuchtigkeit zeigt einen Jahresgang von 55 bis 95 %. Die Anlage soll nur für relative Luftfeuchtigkeiten bis zu 80 % ausgelegt werden. Da Taupunktunterschreitungen in der Anlage unbedingt vermieden werden müssen, darf die Temperaturdifferenz zwischen dem Wärmetauscher der Kühlanlage und der Kanalinnenluft nicht zu groß werden. Hohe Luftfeuchtigkeiten erzwingen niedrige Temperaturdifferenzen und damit größere Oberflächen der Wärmetauscher. In der Folge wird nicht nur die Kühlanlage teurer, durch den ebenfalls ansteigenden Strömungswiderstand wird auch ein stärkeres Gebläse benötigt.
3. **Wind:** Die mittlere, monatliche Windgeschwindigkeit zeigt in Hamburg einen Jahresgang zwischen 4,8 und 6,2 m/s. Der Jahresmittelwert liegt bei 5,5 m/s. In der geplanten Anlage sollen Windgeschwindigkeiten von 1 bis 10 m/s realisiert werden, um die Volumenströme nicht zu groß werden zu lassen. Spitzenwindgeschwindigkeiten können damit nicht erreicht werden.
4. **Schadgase:** Die Anlage wird zunächst nur für den Betrieb mit SO<sub>2</sub> konzipiert, spätere Erweiterungen auf weitere Schadgase sollen möglich sein. Es sollen dabei Konzentrationen bis zu 1 ppmV SO<sub>2</sub> erreicht werden können. Damit können neben den typischen mittleren Luftkonzentrationen an SO<sub>2</sub> in Deutschland auch um mehr als Faktor 10 überhöhte, von anderen Experimentatoren [MANGELS(1992), WITTENBURG(1994), BOTHMANN(1997) u.a.] benutzte Konzentrationen nachgebildet werden.

### 3.2 Grundkonzeption des Systems

Die anlagentechnische Ausstattung des zu entwerfenden Systems ergibt sich aus den in 3.1 aufgelisteten, zu realisierenden Vorgaben. Der geplante Windkanal muß folgende Komponenten besitzen:

- Gebläse mit ausreichender Leistung zur Förderung des erforderlichen Volumenstromes gegen die Druckverluste im Kanal,
- Vorrichtung zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit,
- Anlagen zur Heizung und Kühlung mit Temperaturregelung,
- Dosierungsvorrichtungen für SO<sub>2</sub> und relative Luftfeuchtigkeit,
- Teilstromentnahme für die Analytik,
- Meßgeräte für SO<sub>2</sub>, relative Luftfeuchtigkeit und andere Betriebsparameter (Temperaturen, Gasflüsse etc.),
- computergestützte Meßwerterfassung und Regelung, sowie
- Filterbank zur Luftreinigung.

Windkanäle können grundsätzlich offen oder als geschlossene Systeme gebaut werden. Obwohl offene Kanäle strömungstechnische Vorteile bieten und vor allem auch leichter zu realisieren sind, muß beim Einsatz von schädlichen Stoffen aus Rücksicht auf Umwelt und Experimentatoren ein geschlossenes System gewählt werden. Daneben wird der erhöhte Aufwand an Material und Fertigungsgenauigkeit durch den geringeren Verbrauch an eingesetztem Schadgas und einen effizienteren Energieeinsatz wenigstens teilweise kompensiert.

Wegen der guten Verträglichkeit gegenüber SO<sub>2</sub>, der günstigen mechanischen und chemischen Eigenschaften im Einsatzbereich und der leichten Bearbeitungsmöglichkeiten wurde PVC als Werkstoff für die Kanalwandungen ausgewählt. Wichtig für die Auswahl war vor allem die Tatsache, daß leicht nachträglich eventuell notwendige Veränderungen vorgenommen werden konnten. PVC kann gut gebohrt, geschweißt und gasdicht verklebt werden. Insbesondere das Aufbringen einer thermischen Isolierungsschicht fiel so leichter. Gegen die Verwendung von PVC sprach allein die problematische Entsorgung.

Der Kanal soll einen quadratischen Querschnitt aufweisen. Damit fällt zum einen die Grundkonstruktion leichter, zum anderen erleichtert dies den Einbau von Fenstern, Gaszu- und Ableitungen, die Aufhängung der gesamten Apparatur und den gasdichten Einbau der Meßfühler. Für die Meßstelle wird ein Durchmesser von 250 mm als geeignet festgelegt. Damit ergibt sich bei einer geforderten Windgeschwindigkeit von 10 m/s ein Volumenstrom von 0,625 m<sup>3</sup>/s bzw. 2250 m<sup>3</sup>/h. Größere Durchmesser an der Meßstelle führen zu steigenden Volumenströmen, und damit werden dann stärkere Gebläse benötigt, kleinere Durchmesser schränken die Größe der untersuchbaren Proben zu stark ein. An anderen Stellen im Umlauf muß dieser Querschnitt verändert werden, um Platz für notwendige Einbauten zu lassen.

Damit die Zusammensetzung der Kanalinnenluft verändert werden kann, muß ein Nebenstrom, der mit einer Gasmischapparatur erzeugt wird, eingespeist und ein entsprechendes Luftvolumen kontinuierlich abgezogen werden. Aus der abgezogenen Luft entnehmen die Meßgeräte jeweils die nötigen Teilströme. Dieser Nebenstrom muß klein gegenüber der Strömung im Kanal sein, aber ausreichend schnelle Veränderungen der Schadgaskonzentration und Luftfeuchtigkeit erlauben. Dieser Nebenstrom soll in einer Stunde ein Luftvolumen in den Kanal leiten, das dem Kanalinnenvolumen entspricht.

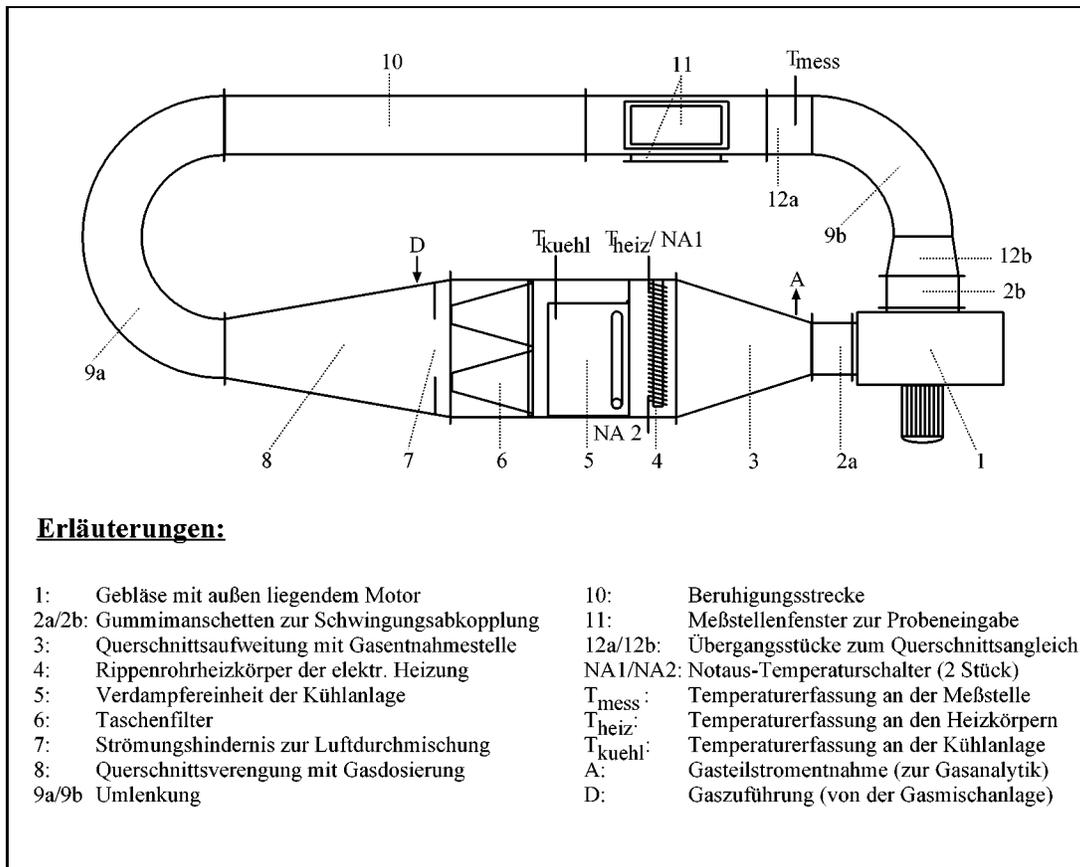


Abbildung 2: Schematischer Aufbau des Depositionskanals mit Meßstelle und Gaszuführungs- und Gasentnahmestellen.

Abbildung 2 zeigt das Aufbauschema des Depositionskanals, ohne das Gerüst aus Stahlprofilen, das die Konstruktion trägt. Meßgeräte, Gasmischapparat sowie Regelung und Meßwerterfassung sind ebenfalls nicht gezeigt.

Ausgehend vom Gebläse sei der Aufbau der Anlage im folgenden noch etwas eingehender erläutert. Das Gebläse ist über zwei Gummimanschetten mit dem Kanalkörper verbunden, um Vibrationen von der Anlage abzukoppeln. Direkt hinter dem Gebläse folgt zunächst eine Querschnittsaufweitung. An dieser Stelle, im Überdruckbereich des Gebläses, erfolgt auch die Absaugung des Nebenstromes.

Im erweiterten Querschnitt liegen dann die Rippenheizrohre der elektrischen Heizung, gefolgt von dem Verdampfer der Kältemaschine. Mit dieser Temperiereinheit wird eine konstante Lufttemperatur im Kanal eingeregelt. Es folgt die Filterbank mit einem geeigneten Faltenfilter zur Aerosolabscheidung. Partikel, die von den Probekörpern oder den Heizungsrohren abgegeben werden können, werden hier zurückgehalten. Dies ist insbesondere für den Einsatz einer Hitzdrahtsonde zur Geschwindigkeitsmessung wichtig.

An die Filterbank schließt sich eine Querschnittsverengung auf die Maße der Meßstelle an. Hier wird Gas aus der Mischanlage eindosiert, um die Konzentration im Kanal

einzustellen. Die Eindosierung erfolgt an einer Stelle, an der nur noch geringer Druckunterschied gegenüber der Umgebung vorliegt. Der weitaus größte Teil des Druckabfalles über den Kanal wird von den davor liegenden Einbauten hervorgerufen. Die in der Umlenkung erzeugten Turbulenzen werden dabei zur Durchmischung genutzt und verhindern die Ausbildung von Konzentrationsfahnen. Über eine Umlenkungen wird die Luft dann in die Beruhigungsstrecke geleitet. Hier wird das erwünschte Strömungsprofil ausgeprägt. Im Anschluß daran liegt die Meßstelle mit den Probekörpern. Über zwei Übergangsstücke zur Anpassung des Querschnittes an den Gebläseeingang und eine weitere Umlenkung tritt die Kanalluft wieder in den Ansaugflansch des Gebläses ein.

Nachträglich wurde noch ein Hindernis zur besseren Durchmischung der Luft hinter der Filterbank eingebaut, da der Wärmetauscher der Kühlanlage eine stabile, kalte Unterschicht erzeugte. Die Auswirkungen dieses Bauteils sind ursprünglich nicht berücksichtigt worden. Sie wurden für die vorliegende Arbeit in die Dimensionierungsrechnungen in Kapitel 3.3 nachgetragen, um die verbleibende Leistungsreserve des Gebläses für weitere bauliche Änderungen abschätzen zu können.

### 3.3 Auswahl des Gebläses

Für das benötigte Gebläse kam aus mehreren Gründen nur ein Radialventilator in betracht. Axialventilatoren liefern nicht die nötige Druckerhöhung und haben konstruktive Nachteile durch den in der Kanalatmosphäre liegenden Motor. Dieser ist damit korrosionsanfälliger und heizt den Luftstrom zusätzlich auf. Radialventilatoren realisieren höhere Druckdifferenzen und ihre Motoren geben Verlustwärme nicht in den Kanal ab. Dafür sind allerdings die Wellen zum Lüfterrad nie vollständig dicht, es muß also ein Leckstrom an schadgashaltiger Kanalluft in die Umgebung der Anlage berücksichtigt werden.

Für die weitere Auswahl des Gebläses muß zunächst der Widerstand der Anlage im Arbeitspunkt mit der höchsten Windgeschwindigkeit bestimmt werden. Die folgenden Berechnungen entstammen BÖSWIRTH, FISCHER, SIEMENS sowie SIEMES.

Der totale Druckabfall über die gesamte Kanallänge ergibt sich nach folgender Formel:

$$p_t = \sum p_R + \sum p_U + \sum p_G + p_{d,A} \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (5)$$

$p_t$	:	Totaldruckerhöhung des Gebläses
$p_R$	:	Rohrreibungsverluste
$p_U$	:	Umlenkverluste
$p_G$	:	Gerätoreibungsverluste der Einbauten
$p_{d,A}$	:	dynamischer Druck am Ausblasquerquerschnitt A

Da der Querschnitt und damit die Strömungsgeschwindigkeit in der Anlage nicht konstant sind, erfolgt die Berechnung für jeweils gleichförmige Abschnitte, die einzelnen Druckverluste werden dabei aufsummiert. In der Tabelle 4 sind die geometrischen

Abmessungen des Kanals aufgeführt, Tabelle 5 zeigt die resultierenden Strömungswiderstände gemäß den obigen Ausführungen.

Die einzelnen Reibungsverlustanteile am totalen Druckverlust berechnen sich nach:

$$\sum p_R = \sum(p_r \cdot l) \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (6)$$

- $p_r$  : Rohrreibungsverluste eines Kanalabschnittes
- $l$  : Länge des Kanalabschnittes

Für die Druckverluste durch Umlenkungen und Querschnittsveränderungen der einzelnen Komponenten (ohne den Diffusor) gilt folgende Beziehung:

$$\sum p_U = \sum(\xi \cdot p_d) \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (7)$$

- $\xi$  : Reibungsbeiwert für eine Umlenkung
- $p_d$  : dynamischer Druck in der Umlenkung

Eine spezielle Gleichung wird für den Diffusor benutzt (**FISCHER**):

$$p_U = \frac{\rho_L}{2} \cdot (u_1^2 - u_0^2) \cdot (1 - \mu) \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (8)$$

- $\rho_L$  : Dichte der Luft
- $u_0$  : Windgeschwindigkeit am Eingang
- $u_1$  : Windgeschwindigkeit am Ausgang
- $\mu$  : Wirkungsgrad des Diffusors (etwa 0,75).

Für die Einbauten werden die Herstellerangaben addiert:

$$\sum p_G = p_H + p_K + p_F \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (9)$$

- $p_H$  : Druckverlust über den Heizungseinbauten
- $p_K$  : Druckverlust über den Kühlanlageneinbauten
- $p_F$  : Druckverlust über der Filterbank

Schließlich muß noch die nötige Energie für die geforderte Endgeschwindigkeit nach Durchqueren der Kanalstrecke bis zum Gebläse aufgebracht werden. Dieser Anteil am Druckverlust wird in diesem Fall nicht vollständig aufgebraucht, da der Kanal geschlos-

Tabelle 4: Die für die Dimensionierung notwendigen geometrischen Abmessungen wurden für jeweils gleichförmige Abschnitte des Depositionskanals berechnet und dann aufsummiert. Verwendet wurden entsprechende stereometrische Formeln aus BARTSCH. Die Nummerierung der Bauelemente entspricht der in der Abbildung 2 benutzten.

Nr.:	Bauteil:	$l_{\text{innen}}$ : [m]	$V_{\text{innen}}$ : [m <sup>3</sup> ]	$V_{\text{Wand}}$ : [m <sup>3</sup> ]	$V_{\text{Iso.}}$ : [m <sup>3</sup> ]	$A_{\text{außen}}$ : [m <sup>2</sup> ]
1	Gebälse	0,333	0,137	-	0,061	2,131
2a	Manschette	0,160	0,018	-	0,008	0,260
3	Diffusor	0,600	0,318	0,005	0,040	1,382
4	Heizung	} 1,000	0,372	0,016	0,083	2,746
5	Kühlung					
6	Filterbank					
7	Mischer	-	-	-	-	-
8	Einströmdüse	1,000	0,196	0,008	0,061	2,048
9a	Umlenkung	1,600	0,100	0,008	0,062	2,492
10	Beruhigung	} 2,400	0,150	0,012	0,090	3,110
11	Meßstelle					
12a	Übergang	0,240	0,015	0,001	0,009	0,311
9b	Umlenkung	0,800	0,050	0,004	0,029	1,246
12b	Übergang	0,200	0,019	0,001	0,008	0,336
2b	Manschette	0,160	0,021	-	0,007	0,241
Summe		8,253	1,216	0,055	0,458	16,303

sen ist. Der Beitrag dient als Sicherheitsreserve:

$$p_{d,A} = \frac{\rho_L}{2} \cdot u^2 \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (10)$$

- $p_{d,A}$  : dynamischer Druckver am Ende der Kanalstrecke
- $\rho_L$  : Dichte der Kanalluft
- $u$  : Windgeschwindigkeit am Ende der Kanalstrecke.

Der Reibungsverlust  $p_r$  wird dabei unter Verwendung eines Nomogrammes (aus SIEMENS) bestimmt. Zwar ist diese Größe prinzipiell auch genau zu berechnen, dies setzt aber die genaue Kenntnis der Oberflächenrauigkeit des verwendeten Materials voraus. Zudem sind die durch Wandreibung verursachten Verluste geringer als die durch die Einbauten hervorgerufenen, für die nur Anhaltswerte der Hersteller zur Verfügung standen. Der Reibungsbeiwert  $\xi$  ist für verschiedene Strömungsgeometrien tabelliert [BÖSWIRTH, FISCHER sowie SIEMENS].

Tabelle 5: Die Strömungswiderstände wurden für die einzelnen Bauelemente berechnet, bzw. für die Einbauten aus den Herstellerangaben abgeschätzt und für den gesamten Kanal aufsummiert. Die verwendeten Widerstandsbeiwerte sind Tabellen in SIEMENS entnommen, für den Diffusor fand eine Gleichung aus FISCHER Anwendung. Die Nummerierung der Bauelemente ist mit der Abbildung 2 identisch.

Nr.:	Bauteil:	$p_r$ : [ $\frac{\text{Pa}}{\text{m}}$ ]	$\Delta p_R$ : [Pa]	$p_d$ : [Pa]	$\xi$ : [-]	$\Delta p_U$ : [Pa]	$\Delta p_G$ : [Pa]
1	Gebläse	-	-	-	-	-	-
2a	Manschette	1,100	0,176	-	-	-	-
3	Diffusor	0,150	0,009	-	-	4,247 <sup>†</sup>	-
4	Heizung	} 0,060	0,060	-	-	-	150
5	Kühlung						150
6	Filterbank						300
7	Mischer	-	-	43,759	0,400	17,504	-
8	Einströmdüse	0,180	0,180	-	-	$\approx 0$	-
9a	Umlenkung	4,500	7,200	60,000	0,150 (x 2)	18,000	-
10	Beruhigung	} 4,500	10,800	-	-	-	-
11	Meßstelle						
12a	Übergang	4,500	1,080	-	-	-	-
9b	Umlenkung	4,500	3,600	60,000	0,150	9,000	-
12b	Übergang	4,500	0,900	-	-	-	-
2b	Manschette	0,750	0,120	-	-	-	-
$\Delta p_t$		672,890 Pa					

†: Berechnet mit Diffusorgleichung (aus FISCHER)

Es ergibt sich eine totale Druckdifferenz von etwa 680 Pa, gegen die das Gebläse arbeiten muß. Mit diesem Arbeitspunkt (2250 m<sup>3</sup>/h bei 680 Pa) konnte aus den Gebläsekennlinien ein geeignetes Exemplar ausgesucht werden. Eingesetzt wurde ein Gebläse des Typs 2CF611 der Firma SIEMENS, das mit 75 dB(A) im Arbeitspunkt wesentlich weniger Schall abgibt als Lüfter mit vergleichbarer Leistung und außerdem noch genügend Leistungsreserve für nachträgliche Erweiterungen aufweist. Auch der zusätzliche Widerstand des nachträglich eingebauten Mischungshindernisses bringt den Ventilator nicht an die Grenzen der Leistungsfähigkeit. Der Lärmpegel wird nach Anbringung der thermischen Isolation und durch die schwingungsdämpfende Aufhängung des Lüfters noch weiter gesenkt.

Zur Regelung des Luftstromes wird ein SIMOVERT P Frequenzsteller, Baureihe 6SE20, mit 2,5 kVA Leistung der gleichen Firma eingesetzt. Dieser wandelt den eingespeisten Netzstrom in Drehstrom um und steuert die Gebläseleistung über die Regelung der Drehstromfrequenz.

### 3.4 Auslegung der Temperiereinheit

#### 3.4.1 Grundlegende Überlegungen zum Wärmehaushalt

Um die in 3.1 erläuterten Temperaturbereiche realisieren zu können, muß der Anlage dauernd Wärme zugeführt bzw. entzogen werden. Dabei sind folgende Fälle zu unterscheiden:

1. Im stationären Betrieb wird dauernd Wärme zwischen der Anlage und der Umgebung ausgetauscht. Zur Aufrechterhaltung einer konstanten Arbeitstemperatur müssen die auftretenden Wärmeströme kompensiert werden.
2. Im dynamischen Betrieb muß die gesamte Anlage auf eine andere Temperatur gebracht werden (Temperaturgang). Dabei treten zusätzlich zu den stationären Wärmeströmen noch Ströme zur Umtemperierung der Probekörper und der Anlagenkomponenten auf, die von entsprechend ausgelegten Heizungen und Kühlanlagen innerhalb der vorgegebenen Zeit bewältigt werden müssen.

Die nötige Leistung der Heizung und der Kühlanlage errechnet sich also aus den maximalen Wärmeströmen, die im Gleichgewichtszustand zwischen Anlage und Umgebung ausgetauscht werden und der nötigen thermischen Energie, die für die Umtemperierung der Anlagenkomponenten zwischen der minimalen und der maximalen zu realisierenden Temperatur in der Anlage aufzuwenden sind, geteilt durch die Zeit, die für eine Umtemperierung vorgesehen ist:

$$\dot{Q}_{ges} = \dot{Q}_{stat} + \frac{Q_{dyn}}{t} \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (11)$$

- |                  |   |   |
|------------------|---|---|
| $\dot{Q}_{ges}$  | : | gesamte Leistung                            |
| $\dot{Q}_{stat}$ | : | stationäre Wärmeleistung                    |
| $Q_{dyn}$        | : | zur Umtemperierung aufzuwendende Wärmemenge |
| $t$              | : | zur Umtemperierung zulässige Zeit           |

#### 3.4.2 Berechnung der stationären Heiz- und Kühllasten

Zur Berechnung der stationären Heiz- und Kühllasten wird nach einem Ansatz nach VDI verfahren. Dazu werden zunächst die ungünstigsten Arbeitsbedingungen abgeschätzt, unter denen das System noch arbeiten können muß, und dann werden die Wärmeströme berechnet.

Der Gesamtwärmestrom, der zwischen Anlage und Umgebung fließt, gliedert sich in vier Teilströme: den Wärmedurchgang durch die Kanalwand, die Strahlung an der äußeren Oberfläche des Kanals, die aufzuwendende Energie zur Temperierung des Vo-

Tabelle 6: Aufstellung der ungünstigsten Betriebsbedingungen im Depositionskanal zur Dimensionierung von Heizung und Kühlanlage (Umgebungstemperaturen sind geschätzt).

Größe:	Abschätzung für	
	Heizleistung:	Kühlleistung:
$\dot{V}_H$ :Volumenhauptstrom	0,625 m <sup>3</sup> /s	0,625 m <sup>3</sup> /s
$\dot{V}_N$ :Volumennebenstrom	1000 l/h	1000 l/h
$\vartheta_M$ :Mediumtemperatur	40 °C	-5 °C
$\vartheta_U$ :Umgebungstemperatur	15 °C	30 °C
A :Kanalaußenfläche	16,303 m <sup>2</sup>	16,303 m <sup>2</sup>
$\dot{Q}_G$ :Gebläseeintrag	kein Beitrag	volle Wellenleistung

lumennebenstroms und den Wärmeeintrag des Gebläses.

$$\dot{Q}_{stat.} = \dot{Q}_{Umgeb.} + \dot{Q}_{Neben.} + \dot{Q}_{Gebl.} \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (12)$$

- $\dot{Q}_{stat.}$  : stationärer Wärmestrom
- $\dot{Q}_{Umgeb.}$  : Zwischen Kanaloberfläche und Umgebung ausgetauschte Wärme (Leitung und Strahlung)
- $\dot{Q}_{Neben.}$  : Wärmestrom für die Nebenstromtemperierung
- $\dot{Q}_{Gebl.}$  : Wärmeeintrag des Gebläses

### 3.4.2.1 Abschätzung der ungünstigsten Betriebsbedingungen

In der Tabelle 6 sind die ungünstigsten Betriebsbedingungen, unter denen die Heizung bzw. die Kühlanlage des Systems noch arbeiten können muß, angegeben. Da die maximale und minimale Raumtemperatur nicht bekannt sind, werden Werte abgeschätzt, die sicher nicht über- bzw. unterschritten werden.

Die Wahl der oben angegebenen Werte sei nochmal kurz begründet. Bei dem höchsten, zu realisierenden Volumenhauptstrom ist die Turbulenz im strömenden Medium maximal. Damit wird der Wärmeübergang zwischen Medium und innerer Wandoberfläche ebenfalls maximal groß. Der Volumennebenstrom wird aus den bereits in 3.2 erwähnten Gründen festgelegt.

Für die Heizungsauslegung sind die ungünstigsten Bedingungen sicherlich maximale Innentemperatur und minimale Raumtemperatur, für die Kühlung gelten entsprechend die umgekehrten Voraussetzungen für den ungünstigsten Betriebszustand. Die Größe der Oberfläche der Kanalaußenwand ergibt sich aus der Konstruktion (siehe Tabelle 4). Der Wärmeeintrag des Gebläses wird für die Auslegung der Kühlanlage aus der Kennlinie des eingesetzten Gebläses abgeschätzt. Dieser Wärmeeintrag muß

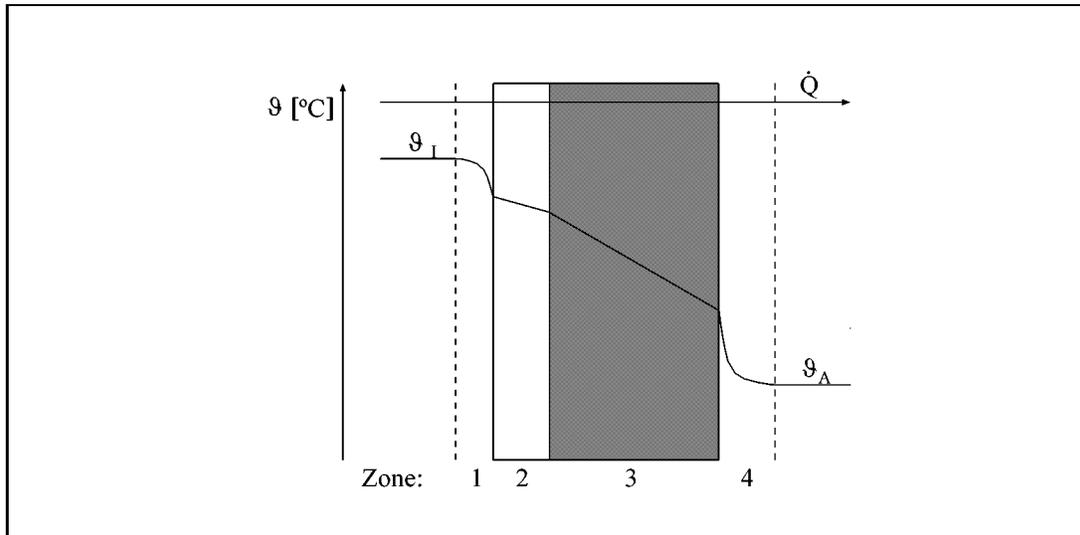


Abbildung 3: Wärmedurchgang durch eine ebene, isolierte Wand. 1) Zone erzwungener Konvektion, 2) Wärmeleitung im Wandmaterial, 3) Wärmeleitung in der Isolationsschicht, 4) näherungsweise freie Konvektion, sowie Strahlungsbeitrag.

von der Kühlanlage sicher bewältigt werden können. Bei der Auslegung der Heizung wird der Beitrag des Gebläses nicht berücksichtigt. Er dient als zusätzliche Reserve der Wärmeleistung.

### 3.4.2.2 Wärmedurchgang

In der Abbildung 3 ist der Mechanismus des Wärmedurchgangs durch eine isolierte Wand skizziert. Der dargestellte Fall bezieht sich auf eine höhere Temperatur im Inneren der Anlage, im Fall der Kühlung sind die Temperaturverläufe gerade entgegengesetzt. Dabei sind vier Zonen zu unterscheiden. In der innersten Zone erfolgt der Wärmetransport durch erzwungene Konvektion in turbulenter Strömung. In den beiden folgenden Zonen erfolgt der Wärmetransport durch Wärmeleitung einmal durch das Wandmaterial, danach durch die Isolationsschicht. Für den äußeren Wärmeübergang in der vierten Zone, wird näherungsweise freie Konvektion angesetzt. Zusätzlich ist für diese Zone noch die Wärmeabgabe bzw. der Wärmeeintrag über Strahlung zu berücksichtigen.

Im stationären Gleichgewicht sind die Wärmeströme durch jede der vier Zonen

gleichgroß. Der Wärmestrom ergibt sich dann nach folgender Formel:

$$\dot{Q}_{ges} = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_m \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (13)$$

$\dot{Q}_{ges}$	:	Wärmestrom
k	:	Wärmedurchgangszahl
A	:	Oberfläche
$\Delta\vartheta_m$	:	mittlere Temperaturdifferenz zwischen Medium im Kanal und Umgebungsluft

Näherungsweise wird die Änderung des Temperaturgradienten längs der Kanal-längsachse vernachlässigt, da sonst Berechnungen wesentlich komplizierter ausfallen. Statt der mittleren Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta_m$  wird die maximale Temperaturdifferenz zwischen Innenluft und Umgebung eingesetzt, dies ist eine konservative Abschätzung.

$$\dot{Q} \approx k \cdot A \cdot (\vartheta_M - \vartheta_U) \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (14)$$

$\alpha$	:	Wärmeübergangs- koeffizient
$\delta$	:	Schichtdicke
$\vartheta$	:	Temperatur
Indices 1 - 4		stehen für die Zonen gem. Abbildung 3
Index M		Kanalinnenluft
Index U		Umgebungsluft

Die Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten sind tabelliert (FISCHER, VDI, LIDE sowie STÖCKER), die Wandstärken aus der Konstruktion bzw. von den Herstellern vorgegeben, nur die Wärmeübergangskoeffizienten müssen berechnet werden. Dabei gilt für die erzwungene Konvektion in turbulenter Rohrströmung die folgende empirische Beziehung (nach VDI bzw. VORTMEYER):

$$Nu_1 = \frac{\xi \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 + 2 \sqrt{\frac{\xi}{3} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)}} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{d_i}{l} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (15)$$

mit:

$$\xi = (1,82 \cdot \log Re - 1,64)^{-2}$$

Nu	:	Nusseltsche Kennzahl
$\xi$	:	Druckverlustbeiwert
Re	:	Reynoldszahl
Pr	:	Prandtlzahl
d	:	innerer Äquivalentdurchmesser
l	:	Länge (Kanalmittellinie)

Für freie Konvektion gibt der VDI-Wärmeatlas folgende empirische Formel an, in der die Stoffwerte und Kennzahlen jeweils für die mittlere Temperatur der beiden

beteiligten Medien (äußere Wand und Umgebungsluft) anzusetzen sind:

$$Nu_4 = \left[ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}}\right]^2 \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (16)$$

mit:

$$Ra = Pr \cdot Gr$$

und

$$Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta\vartheta$$

- Nu : Nusseltsche Kennzahl
- Ra : Rayleighsche Kennzahl
- Gr : Grashoffsche Kennzahl
- g : Gravitationskonstante
- l : kritische Länge, für umströmte  
Rohre der halbe Umfang
- d : äußerer Äquivalentdurchmesser
- $\beta$  : thermischer Ausdehnungs-  
koeffizient des strömenden  
Mediums
- $\vartheta_i$  : Innentemperatur
- $\vartheta_\infty$  : Raumtemperatur außerhalb  
der konvektiven Grenzschicht
- $\eta$  : kinematische Viskosität der  
Raumluft

Aus den berechneten Nusseltschen Kennzahlen erhält man die entsprechenden Wärmeübergangskoeffizienten schließlich nach folgender Beziehung:

$$\alpha_i = Nu_i \cdot \frac{\lambda}{l_c} \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (17)$$

- $Nu_i$  : Nusseltsche Kennzahl
- $\lambda$  : Wärmeleitfähigkeitskoeffizient
- $l_c$  : krit. Länge (Innendurchmesser  
Zone 1, Überströmlänge Zone 4)

Schließlich ist abzuschätzen, ob Strahlung im Bereich der Arbeitsbedingungen eine Rolle spielt. Wärmeübergänge durch Strahlung sind nur für die äußere Kanaloberfläche zu berücksichtigen. Der Wärmetransport durch Strahlung kann nach der folgenden Beziehung abgeschätzt werden (FISCHER):

$$\alpha_{4,Str.} = \sigma \cdot \epsilon \cdot \frac{T_o^4 - T_u^4}{T_o - T_u} \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (18)$$

- $\alpha_{4,Str.}$  : Strahlungsübergangswert
- $\sigma$  : Strahlungskonstante
- $\epsilon$  : Emissionsgrad
- $T_o$  : Temperatur der Kanal-  
oberfläche
- $T_u$  : Temperatur der Umgebungs-  
flächen (Wände)

Dabei liegen die Emissionsgrade für verschiedene Kunststoffe nahe an 0,9. Es er-

scheint damit gerechtfertigt, näherungsweise mit einem Emissionsgrad von 1 (schwarzer Strahler) zu rechnen, damit wird der Strahlungsanteil leicht überbewertet.

In der äußeren Zone laufen Wärmeübertragung durch Konvektion und durch Strahlung gleichzeitig ab, die Kehrwerte der einzelnen Wärmeübergangswiderstände (also die Wärmeübergangskoeffizienten) können dann addiert werden.

Der Kanal wird aus 5 mm starkem Polyvinylchlorid gefertigt. Die Isolation erfolgt durch Bekleben mit einer 32 mm starken Schicht aus geschlossenzelligem, wasserdampfdiffusionsdichten Schaumstoff (Flexen FX). Unter den in Kapitel 3.4.2.1 diskutierten Bedingungen erhält man nach Anwendung der obigen Formeln die in Tabelle 7 zusammengestellten Ergebnisse und stationären Wärmeströme. Die einzelnen Beiträge zur stationären Wärmelast werden in Tabelle 9 zusammengefaßt.

Zur Berechnung der Wärmestrahlung bzw. Konvektion in der äußersten Zone wird die Oberflächentemperatur des Depositionskanals gebraucht. Diese ist zu Beginn der Rechnungen nicht bekannt und muß daher iterativ bestimmt werden. Als Startwert wird die jeweilige Kanalinnentemperatur eingesetzt (dies entspricht dem Grenzfall ideal guten Wärmetransportes zwischen Kanal und Umgebung). Mit dem so erhaltenen Wärmestrom wird gemäß Abschnitt 3.4.3.1 eine neue Oberflächentemperatur berechnet und damit wiederum der Wärmetransport bestimmt. Bereits der dritte Durchgang führt nur noch zu Änderungen unter einem Prozent in der Oberflächentemperatur, daher wird die Berechnung an dieser Stelle abgebrochen.

### 3.4.2.3 Wärmeeintrag durch das Gebläse

Um die Strömung im Kanal aufrecht zu erhalten, muß dauernd Arbeit gegen die Reibungswiderstände der Kanalkomponenten (Umlenkungen, Filter, Verdampfer der Kühlmaschine usw.) geleistet werden. Der maximale Reibungsverlust tritt bei der maximalen Windgeschwindigkeit auf, an dieser Stelle wird die vom Gebläsemotor aufgenommene Wellenleistung aus der Kennlinie abgelesen. Diese Arbeit wird letztlich vollständig in Wärme umgewandelt.

Im jeweils ungünstigsten Fall muß einerseits die Kühlanlage ausreichend dimensioniert sein, um den maximalen Wärmeeintrag durch das Gebläse (bei maximaler Windgeschwindigkeit) zu kompensieren, andererseits muß die Heizung auch im Bereich minimaler Windgeschwindigkeiten genug Leistung haben, um ohne den Beitrag des Gebläses die geforderte Innentemperatur aufrecht erhalten zu können. Für die Auslegung der Heizleistung wird der Gebläsebeitrag daher nicht berücksichtigt, für die Kühlanlagendimensionierung wird mit maximalem Gebläseeintrag gerechnet. Diese Werte sind in Tabelle 9 angegeben.

### 3.4.2.4 Temperierleistung für den Nebenstrom

Um die Konzentration an Schadgas und Wasserdampf im System regeln zu können, wird stets ein kleiner Teilstrom über die Analysengeräte entnommen. Dieser Teilstrom wird durch einen gleichgroßen Luftstrom durch die Dosiervorrichtung kompensiert.

Tabelle 7: Übersicht über die zur Berechnung der stationären Wärestrome nötigen Stoffdaten und die damit erhaltenen Ergebnisse.

Größe:		min. Innentemperatur:	max. Innentemperatur:
$l_{\text{innen}}$	[m]	8,253	8,253
$d_{\text{hydr.}}$	[m]	0,250	0,250
$\Delta\vartheta$	[K]	35	25
$Pr_{\text{Luft}}$	[-]	0,70	0,69
$\lambda_{\text{Luft}}$	$[\frac{W}{Km}]$	$24,16 \cdot 10^{-3}$	$27,49 \cdot 10^{-3}$
$\nu_{\text{Luft}}$	$[\frac{m^2}{s}]$	$12,99 \cdot 10^{-6}$	$16,92 \cdot 10^{-6}$
$u$	$[\frac{m}{s}]$	10	10
$Re$	[-]	$1,92 \cdot 10^5$	$1,48 \cdot 10^5$
$\frac{\xi}{8}$	[-]	$1,97 \cdot 10^{-3}$	$2,07 \cdot 10^{-3}$
$\alpha_1$	$[\frac{W}{Km^2}]$	31,6	29,0
$\delta_2$	[m]	0,005	0,005
$\lambda_2$	$[\frac{W}{Km}]$	0,190	0,190
$\delta_3$	[m]	0,032	0,032
$\lambda_3$	$[\frac{W}{Km}]$	0,035	0,039
$Gr$	[-]	$4,42 \cdot 10^8$	$1,86 \cdot 10^8$
$l_{\text{umstr.}}$	[m]	0,39	0,39
$g$	$[\frac{m}{s^2}]$	9,81	9,81
$\beta$	$[K^{-1}]$	$\frac{1}{273}$	$\frac{1}{273}$
$\vartheta_{\text{Wand,außen,Start}}$	[K]	268	313
$\vartheta_{\text{Wand,außen,Ende}}$	[K]	297,3	292,9
$Ra$	[-]	$3,10 \cdot 10^8$	$1,28 \cdot 10^8$
$\alpha_{4,\text{Leit}}$	$[\frac{W}{Km^2}]$	5,3	4,6
$\sigma$	$[\frac{m^2}{WK^3}]$	$5,67 \cdot 10^{-8}$	$5,67 \cdot 10^{-8}$
$\epsilon$	[-]	$\approx 1$	$\approx 1$
$\alpha_{4,\text{Str.}}$	$[\frac{W}{Km^2}]$	6,13	5,54
$\alpha_4$	$[\frac{W}{Km^2}]$	11,4	10,1
$Q_{\text{Umgeb.}}$	[W]	545,2	420,8

Tabelle 8: Heiz- und Kühllasten zur Temperierung des Volumen Nebenstromes.

	$\rho$ [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	V [ $\frac{m^3}{s}$ ]	$c_p$ [ $\frac{J}{msK}$ ]	$\Delta\vartheta$ [K]	$\dot{Q}_N$ [W]
Heizung:	1,103	$2,2 \cdot 10^{-4}$	1,008	25	7
Kühlung:	1,317	$2,2 \cdot 10^{-4}$	1,006	35	10

Tabelle 9: Zusammenstellung aller stationären Wärmelasten.

Teilstrom:	min. Innentemperatur:	max. Innentemperatur:
Wärmedurchgang:	545 W	421 W
Gebälsebeitrag:	1200 W	–
Nebenstrom:	10 W	7 W
Summe:	1755 W	428 W

Er muß natürlich auf eine geeignete Temperatur gebracht werden. Der benötigte Wärmestrom ergibt sich nach:

$$\dot{Q}_N = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (19)$$

$$= \rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta$$

$\dot{Q}_N$  : Wärmestrom zur Umtemperierung des Nebenstroms  
 $\dot{m}$  : Massenstrom (Nebenstrom)  
 $c_p$  : spez. Wärmekapazität (Nebenstromluft)  
 $\Delta\vartheta$  : erforderliche Temperaturänderung  
 $\rho$  : Dichte (Nebenstrom)  
 $\dot{V}$  : Volumenstrom (Nebenstrom)

In der Tabelle 8 sind die Berechnungen für die Aufheizung bzw. Abkühlung dieses Nebenstroms dargestellt, die resultierenden Wärmeströme sind in Tabelle 9 angegeben.

### 3.4.3 Berechnung der dynamischen Heiz- und Kühllasten

Außer den stationären Wärmeströmen zwischen Anlage und Umgebung treten bei Temperaturgängen noch zusätzliche Wärmeströme zur Umtemperierung der Anlagenkomponenten und des Prüfgutes auf. Die insgesamt aufzuwendende Leistung teilt sich in die einzelnen Temperierleistungen für die Anlagenkomponenten und die Probekörper

auf:

$$\dot{Q}_{dyn.} = \frac{Q_{Luft} + Q_{Wand} + Q_{Isol} + Q_{Gebl} + Q_{Probe}}{t} \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (20)$$

und

$$Q_i = m_i \cdot c_{p,i} \cdot \Delta\vartheta_i$$

$\dot{Q}_{dyn}$	:	dynamische Wärmelast
$Q_i$	:	zur Umtemperierung nötige Energiemenge der Komponente i
$m_i$	:	Masse der Anlagenkomponente i
$c_{p,i}$	:	spez. Wärmekapazität der Anlagenkomponente i
$\Delta\vartheta_i$	:	Temperaturänderung bei Aufheizung bzw. Abkühlung der Komponente i
i	:	Luft, Wand, Isolation, Probkörper bzw. Gebläsemasse

wobei die Masse aus Dichte und Volumen erhalten werden kann, wenn andere Daten nicht zur Verfügung stehen. Die dynamischen Lasten bei den Temperaturgängen sind für Aufheizung und Abkühlung betragsmäßig gleich. Die zur Temperierung der Probkörper aufzuwendende Leistung ist gegen die großen Wärmelasten, die durch die Anlagekomponenten selbst gegeben sind, vernachlässigbar.

In Tabelle 11 sind die nach obigen Gleichungen mit den charakteristischen Temperaturen aus Abschnitt 3.4.3.1 erhaltenen Wärmemengen dargestellt. Für den Zeitbedarf eines Aufheiz- bzw. Abkühlschrittes wurde 1 h angesetzt, bei schnelleren Temperaturwechseln wäre die Kühlanlage nicht als einstufiges Aggregat realisierbar gewesen. Um den Aufwand zur Anlagensteuerung und die entstehenden Kosten nicht zu stark ansteigen zu lassen, wurde mit dieser Zeitvorgabe kalkuliert. Damit bleiben die nötigen Leistungen von Heizung und Kühlung im akzeptablen Bereich.

### 3.4.3.1 Berechnung der charakteristischen Temperaturen

Sind die Wärmeströme im stationären Fall bekannt, so können die mittleren Temperaturen für die verschiedenen Anlagenkomponenten in den Grenzfällen maximale bzw. minimale Innentemperatur bestimmt werden. Diese Temperaturen sind für die Berechnung der dynamischen Wärmelasten wichtig. So muß die Kanalinnenluft von der höchsten zur niedrigsten Arbeitstemperatur abgekühlt werden können, für das Wandmaterial ist die Temperaturdifferenz schon geringer und für die Isolation wiederum kleiner (siehe Abbildung 3).

Die Berechnung erfolgt nach VDI über ein Widerstandsmodell, bei dem die Wärmeübergangswiderstände aus Tabelle 7 in der Reihenfolge der Schichten nach Abbildung 3 auf der Abszisse aufgetragen werden und die Temperaturen auf der Ordinate. Beim Widerstand 0 wird die Kanalinnentemperatur eingetragen, über dem gesamten Widerstand wird die Außentemperatur notiert (siehe Abbildung 4). Stellt man jeweils für die minimale und maximale Innentemperatur ein solches Diagramm auf, kann die mittlere Temperatur von Wand und Isolation leicht abgelesen werden. Genauere Ergebnisse bekommt man durch Regressionsrechnung; diese Methode wurde für die in Tabelle 10 angegebenen Werte benutzt.

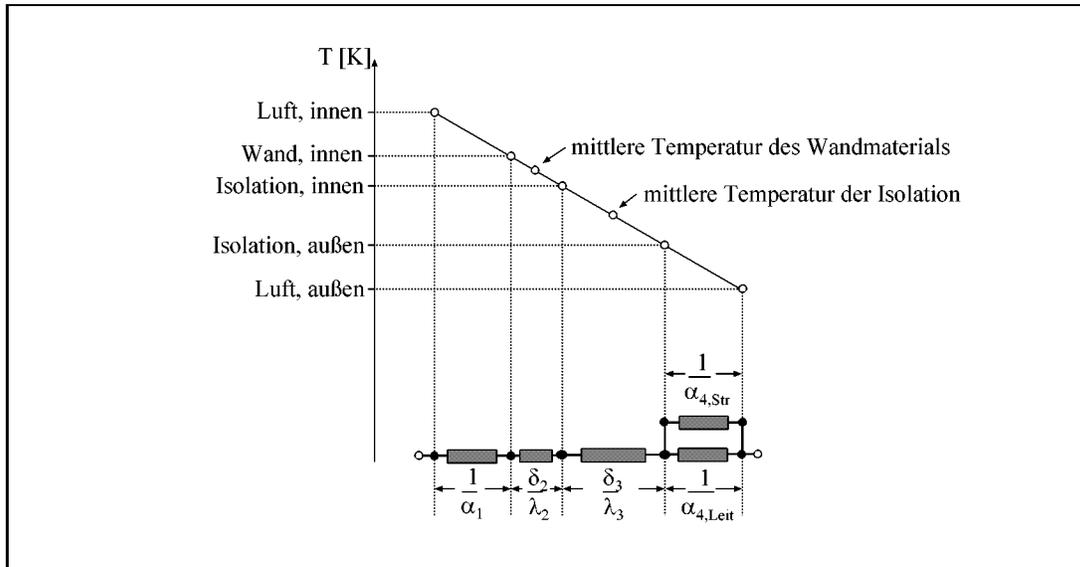


Abbildung 4: Berechnung der charakteristischen Temperaturen mit Hilfe des Widerstandsmodells nach VDI. Die einzelnen Wärmeleitwiderstände werden auf der Abzisse aufgereiht, die bekannten Temperaturen im Kanalinneren und in der Umgebung an den Enden der Widerstandsreihe aufgetragen und mit einer Geraden verbunden. Der hier dargestellte Fall bezieht sich auf eine höhere Temperatur im Kanal. Besonders wichtig sind die mit Pfeilen markierten Werte, die zur Berechnung der Umtemperierungsenergie für Wandmaterial und Isolation benötigt werden, sowie die Außentemperatur an der Kanaloberfläche.

Tabelle 10: Die errechneten charakteristischen Temperaturen für die Komponenten der Kanalwandung sind hier zusammengefaßt. Bei einem Temperaturgang werden nur diese Grenzwerte erreicht. Die Temperaturdifferenz zwischen der äußeren Oberfläche und den Raumwänden wird zur Bestimmung des Strahlungsanteils benötigt.

	min. Innentemperatur:	max. Innentemperatur:
Kanalwand innen	269,2 K	312,1 K
mittlere Temperatur PVC	269,7 K	311,8 K
Grenzschicht PVC/Flexen	270,1 K	311,4 K
mittlere Temperatur Flexen	287,1 K	301,0 K
Kanalwand außen	304,0 K	290,5 K

Auf diese Weise wurde auch die Oberflächentemperatur berechnet, die für die Bestimmung der Wärmeübertragung zwischen der Kanaloberfläche und der Umgebung benötigt wurde.

Tabelle 11: Berechnung der Temperierlasten für die einzelnen Komponenten des Depositionskanals.

	$m$ [kg]	$\rho$ [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$c_p$ [ $\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ ]	$\vartheta_o$ [°C]	$\vartheta_1$ [°C]	$Q$ [kJ]
Luft:	-	1,32	1,1	1,008	-5	+40	65,86
Wand:	-	910	0,04	1,7	-4	+39	2660,84
Isol.:	-	34	0,45	1,4	+11	+29	372,71
GebL.:	32	-	-	0,5	-5	+40	720
Summe:							3819,41
$\frac{Q}{3600}$ [J/s]							1060,90

Tabelle 12: Ergebnis der Berechnung der stationären und dynamischen Lasten für Heizung und Kühlung.

	Heizung:	Kühlung:
statische Last:	428 W	1755 W
dynamische Last:	1061 W	1061 W
Gesamtlast:	1489 W	2816 W

### 3.4.4 Ergebnis der Berechnungen

In der Tabelle 12 werden die statischen und dynamischen Lasten sowie deren Summen für die Kühlanlage und die Heizung nochmals angegeben. Es wird also eine Kühlanlage für eine Kältelast von 2,8 kW benötigt und eine Heizung, die 1,5 kW leisten kann.

## 3.5 Auslegung der Regelung

Zu regelnde Größen sind die Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, SO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft und die Strömungsgeschwindigkeit. Jede dieser Größen muß erfaßt, protokolliert und über eine geeignete Regelstruktur im Rahmen der experimentellen Vorgaben gehalten werden. Im folgenden soll der grundsätzliche Ansatz zur Regelung der einzelnen Größen dargestellt werden; die genaue, regeltechnische Realisierung wird in den Kapiteln 12.1 und 12.2 beschrieben.

### 3.5.1 Temperaturregelung

Alle Temperaturen werden elektronisch erfaßt, in computerlesbare Daten gewandelt und während der Messung kontinuierlich aufgezeichnet. Dazu werden PT100-Meßfühler und die zugehörigen Aufnehmer verwendet, die einen der Temperatur entsprechenden Spannungswert an den Steuerrechner weiterliefern. Besonders wichtig ist die aktuelle

Temperatur an der Meßstelle, die auch den Istwert für die Regelung darstellt. Daneben sind noch drei weitere Kontrollpunkte notwendig, um das korrekte Verhalten der Anlage sicherzustellen. Am kältesten Punkt der Anlage, am obersten Einspritzbogen des Blockverdampfers der Kühlanlage muß die Temperatur erfaßt werden, um gegebenenfalls Kondensation zu verhindern. Am heißesten Punkt (oberer Heizbogen der Rippenrohrheizkörper) muß sichergestellt werden, daß keine Temperaturen auftreten, die zum Verlust der Formstabilität des Wandmaterials führen. Schließlich wird auch die Temperatur des Blockverdampfers zur Wasserdosierung ständig kontrolliert.

Neben diesen Meßfühlern gibt es noch unabhängige Sensoren, die bei Überschreitung der zulässigen Höchsttemperatur die Stromzufuhr unterbrechen. Zwei davon sind oberhalb und unterhalb der elektrischen Heizstäbe auf der Kanalwand aufgebracht, der dritte sitzt im Blockverdampfer der Wasserdampfdosierung.

Die Temperaturregelung soll konstante Temperaturwerte und Temperaturgänge erlauben. Im stationären Betrieb der Anlage erfolgt die Temperaturregelung weitgehend über die Steuerung der Heizleistung. Dazu sind die Heizstäbe in Strömungsrichtung gesehen vor der Kühlung angebracht. Die Heizleistung wird über eine Phasenanschnittsteuerung zwischen ca. 7 und 100% entsprechend dem Ergebnis des Vergleiches der Solltemperatur mit der Isttemperatur an der Meßstelle eingestellt. Die Kühlmachine läuft immer mit der Minimalleistung, die sich aus der geringstmöglichen Dampfüberhitzung ergibt. Die maximale Leistung wird begrenzt durch die maximal erlaubte Temperaturdifferenz am Verdampfer, die für 80% relative Luftfeuchtigkeit nicht über 3 K liegt. Ursprünglich sollte die Kühlanlage einen eigenen, unabhängigen Regelkreis aufweisen, der die Temperatur am Einspritzblock nicht mehr als diese 3 K unter die aktuelle Lufttemperatur fallen lassen sollte. Trotz intensiver Versuche konnte mit dieser Konstruktion ein Schwingverhalten der Regelung nicht verhindert werden. Daher erfolgt auch diese Regelung jetzt über das Rechnersystem ERSIS. Bei Überschreiten dieser Temperaturdifferenz wird über die computergestützte Regelung das Ventil hinter dem Verdampferblock zugefahren und damit die Verdunstung von Kältemittel reduziert.

Im stationären Betrieb läuft die Kühlanlage also mit einer bestimmten Grundlast durch eine träge eingestellte Regelung relativ gleichförmig, die eigentliche Temperaturreglung erfolgt über die Heizung, die eine erheblich geringere thermische Trägheit aufweist.

Soll ein positiver Temperaturgang gefahren werden, so wird die Kühlung auf die Minimalleistung zurückgenommen und die Heizung je nach gewünschter Steilheit des Temperaturanstiegs gestellt. Beim Abkühlen wird die Heizung vollständig abgeschaltet, während die Kühlung entsprechend der gewünschten Steilheit des Temperaturabfalls gesteuert wird.

### 3.5.2 Regelung der Luftfeuchtigkeit

Nach Vorversuchen mit einer Reihe von Feuchtemeßgeräten wurde für die Anlage ein NDIR-Gerät (BINOS von der Firma ROSEMOUNT) angeschafft. Damit kann der Wassergehalt der Kanalluft ständig erfaßt und bei Bedarf geregelt werden.

Die Regelung der Feuchte im Kanal erfolgt über eine Veränderung der Konzentration an Wasserdampf im Nebenstrom. Dazu wird ein Teil dieses Luftstromes durch einen Blockverdampfer geleitet, in den mit einer regelbaren Peristaltikpumpe von der

Firma ISMATEC nach Bedarf Wasser dosiert wird. Die Temperatur des Blockverdampfers wird ebenfalls über ERSIS auf 400 K eingeregelt. Das Prinzip ist bereits mit gutem Erfolg in einer ganzen Reihe von Anlagen eingesetzt worden [DANNECKER und DÜWEL (1984), SCHMIDT(1995), SCHMIDT(1994) sowie GRODTEN(1995)].

Bei der Auslegung der Kühlanlage wurde eine maximale, angestrebte Luftfeuchtigkeit von 80 % rH bei der tiefsten Betriebstemperatur vorgegeben. Aus Tabelle 13 kann damit eine maximal mögliche Temperaturdifferenz zwischen Lufttemperatur und Oberflächentemperatur des Verdampfers der Kühlanlage von 3 K abgelesen werden. Wird diese Differenz beibehalten, so ergeben sich bei höheren Lufttemperaturen auch entsprechend höhere Luftfeuchten.

Tabelle 13: Grenzwerte der Luftfeuchtigkeit im Depositionskanal für eine Temperaturdifferenz von 3 K zwischen Verdampferblock und Innenluft. Die Werte stammen aus LIDE, eingeklammerte Zahlen sind abgeschätzte Zwischenwerte.

T <sub>innen</sub> [C]	ΔT [K]	max. rel. Luftfeuchtigkeit [%]
- 10	3	79
- 5	3	(80)
0	3	81
+ 10	3	82
+ 20	3	83
+ 30	3	84
+ 35	3	(85)

Muß der absolute Wasserdampfgehalt der Luft erhöht werden, so wird die Förderleistung der Schlauchpumpe erhöht und mehr Wasser auf den Blockverdampfer gebracht. Eine Senkung der Wasserdampfkonzentration erfolgt durch die Absaugung des feuchten Volumenstroms bei Abschaltung der Wasserzufuhr.

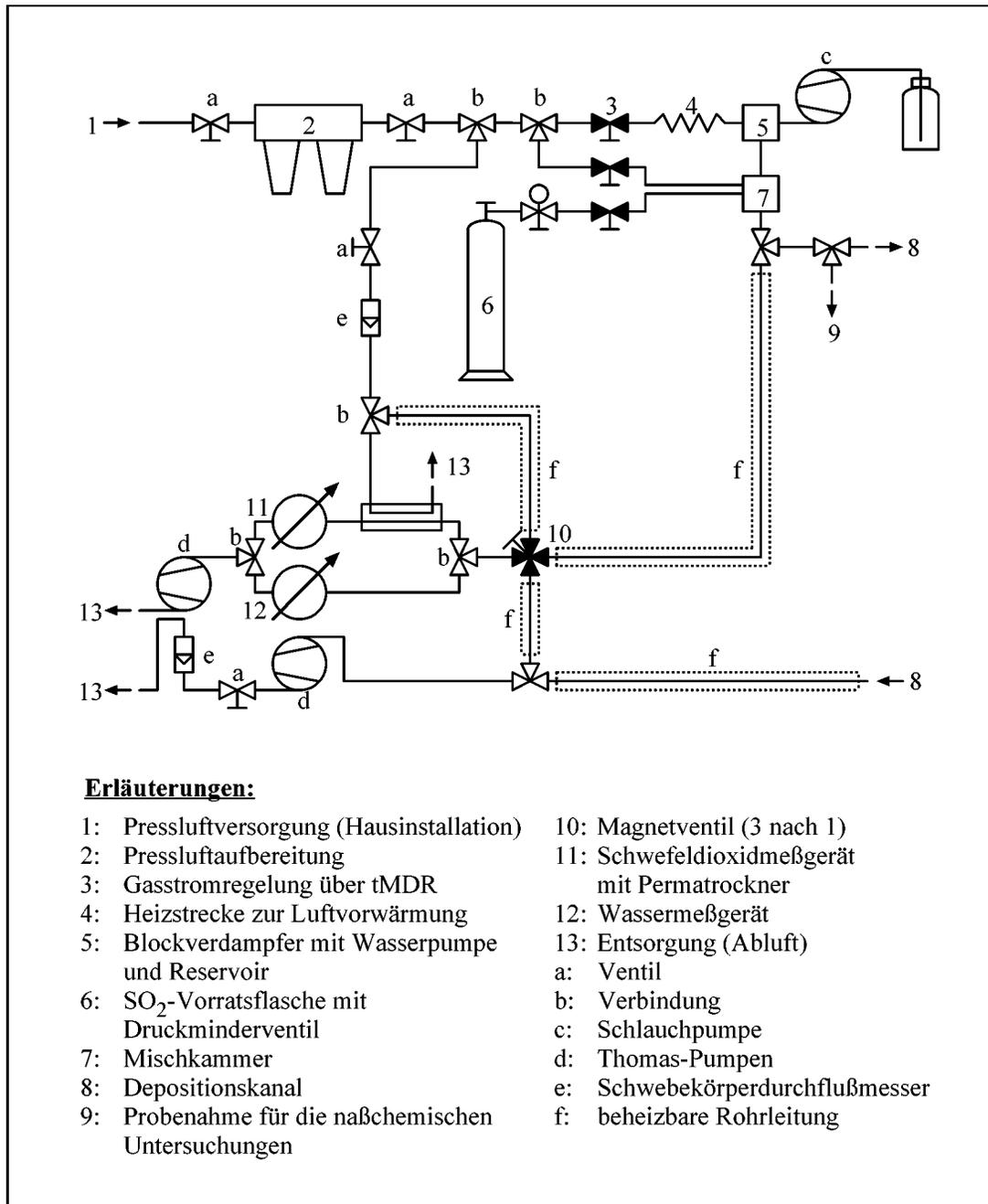
### 3.5.3 Regelung des Schadgasgehaltes

Die Einstellung einer bestimmten Schadgaskonzentration im Depositionskanal erfolgt durch eine entsprechend eingeregelt Konzentration im Nebenstrom. Dazu wird Prüfgas (1,5 Vol% SO<sub>2</sub> in Stickstoff) aus einer Gasdruckflasche über eine korrosionsfeste Armatur auf den benötigten Vordruck geregelt und auf einen thermischen Massenflußregler (tMDR) gegeben. Dieser wird über ERSIS gesteuert und stellt den Fluß entsprechend der Differenz zwischen Sollwert und Istwert im Kanal ein. Als Meßglied dient ein SO<sub>2</sub>-Meßgerät ML 8840 der Firma MONITOR LABS.

### 3.5.4 Aufbau der Gasmischapparatur

Der vollständige Aufbau der verwendeten Gasmischapparatur ist in Abbildung 5 gezeigt.

Preßluft wird der Hausleitung entnommen und über eine Aufbereitungsanlage der Firma Pressluft-Frantz von Partikeln, Öl und Wasser befreit. Ein Teil der trockenen

Abbildung 5: Schema der Dosierung von Luftfeuchte und SO<sub>2</sub>-Schadgas

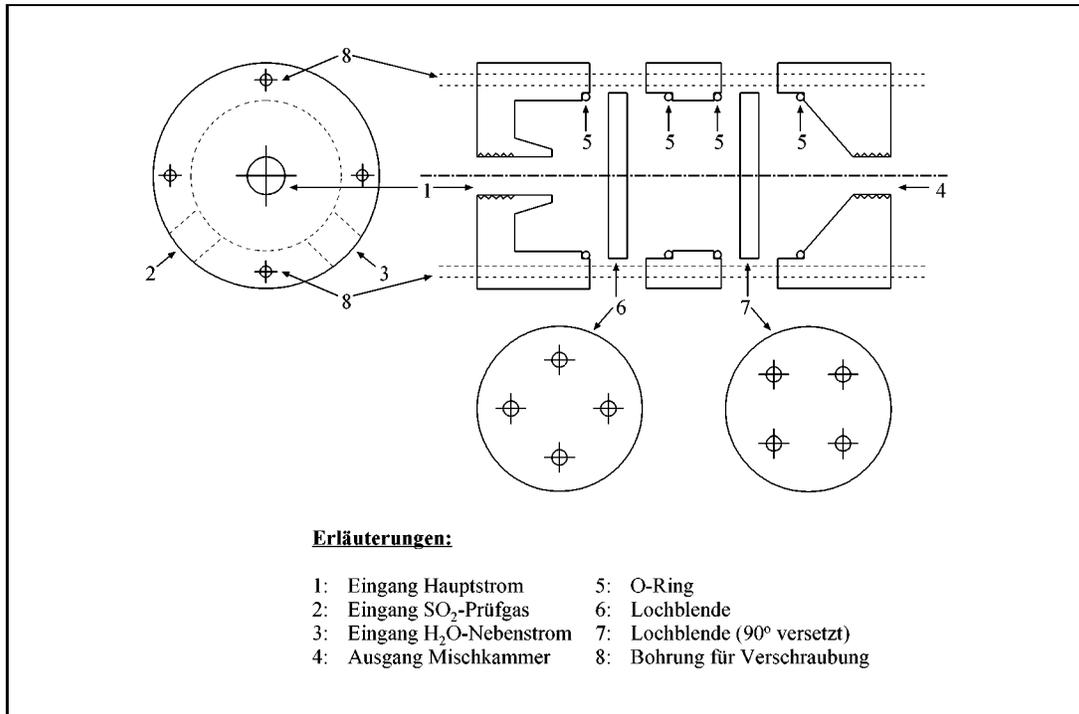


Abbildung 6: Schematischer Aufbau der verwendeten PTFE-Mischkammer. Die Teilgasströme treffen im rechten Winkel zusammen.

Preßluft wird über Nadelventil und Schwebekörperdurchflußmesser in den Permatrockner geleitet, der das Meßgas für das SO<sub>2</sub>-Gerät trocknet. Er wird gegebenenfalls auch als Nullwert für die Kalibration der Meßgeräte eingesetzt.

Ein zweiter Teilstrom wird über ein tMDR auf eine Heizstrecke gegeben, aufgeheizt und durch den Blockverdampfer geleitet. Er nimmt das verdampfte Wasser zur Einstellung der Feuchte im Kanal auf. Vom Blockverdampfer wird dieser Teilstrom in die Mischkammer geleitet, eine zylindrische PTFE-Kammer mit Strömungshindernissen zur Durchmischung, in der die eingehenden Teilströme im Winkel von jeweils 90° zusammengeführt werden. Die Mischkammer ist in der Abbildung 6 dargestellt. Vom Ausgang der Mischkammer werden die vereinigten Teilströme entweder in den Kanal (Meßbetrieb), direkt auf die Meßgeräte (Justierung) oder über ein Ventil der naßchemischen Untersuchung (Kalibrierung) zugeleitet.

Der dritte Teilstrom geht direkt von der Luftaufbereitung in die Mischkammer. Dieser Zweig ist vom vorigen nur deshalb getrennt worden, damit die Belastung des Blockverdampfers verringert wird. Er wird ebenfalls über ein tMDR eingeregelt.

Schließlich wird noch SO<sub>2</sub> über ein weiteres tMDR in die Mischkammer dosiert. Während die Einstellungen für alle anderen Ströme fest am Steuergerät der tMDR eingestellt werden und im Experiment unverändert bleiben, wird dieser Strom über das ERSIS geregelt, um eine konstante Konzentration im Kanal zu gewährleisten.

Ein elektronisch schaltbares Drei-nach-Eins-Magnetventil erlaubt das Umschalten zwischen Luft aus dem Kanal, Luft aus der Mischkammer bzw. trockener Pressluft auf

die Eingänge der Meßgeräte. Damit kann in regelmäßigen Abständen Nullwert und Standardkonzentration an den Geräten abgeglichen werden. Die Meßgeräte brauchen etwa 120 l/h, also viel weniger als der Nebenstrom beträgt, daher wird der Hauptteil des aus dem Kanal abgesaugten Luftvolumens direkt in den Abzug gegeben und nur ein entsprechender Anteil für die Meßgeräte abgezweigt. Da die eingesetzten Konzentrationen sehr gering sind, erfolgt keine Reinigung der Abgase aus der Anlage. Unter den Bedingungen der vorliegenden Arbeit wäre keine wirtschaftliche Gasreinigung durchführbar, da im wesentlichen nur eine Medienverlagerung (Luft → Wasser) erfolgen würde.

### 3.5.5 Regelung der Strömungsgeschwindigkeit

Die Strömungsgeschwindigkeit muß ebenfalls kontinuierlich aufgezeichnet und genau regelbar sein. Dabei stellt sich allerdings das Problem der Korrosionsfestigkeit für die einzusetzenden Meßgeräte. Zur genauen Windgeschwindigkeitsmessung gibt es eine Reihe von Möglichkeiten. Damit die finanziellen Aufwendungen im Verhältnis zum Gewinn an Meßsicherheit nicht zu stark anwachsen, wurde ein gangbarer Kompromiß gesucht. Der Frequenzsteller des Gebläses liefert einen Istwert zurück. Durch die Kalibration dieses Wertes mittels einer Hitzdrahtsonde kann die Windgeschwindigkeit, nach Umrechnung im ERSIS, kontinuierlich erfaßt werden. Die Sonde selber verträgt keine Partikel oder Tropfen im Meßfluid, und es zeigte sich sogar, daß die Oberfläche der Sonde sich nach einiger Zeit (wenige Wochen) im Kanal verändert. Vermutlich spielen dabei Umsetzungen von Weichmachern aus den Dichtungen oder austretende Monomere eine Rolle. Die geringen Abmessungen der Sonde eignen sich gut für Netzmessungen über den Kanalquerschnitt und ein Aufnehmer war im Arbeitskreis bereits vorhanden. Es mußte also nur noch eine geeignete Sonde angeschafft werden.

Die Kalibration der Sonde erfolgte gegen ein Referenzgerät (siehe Kapitel 4.1.2), und mit der kalibrierten Sonde wurde dann seinerseits die Ermittlung der Kalibrationsfunktion des Frequenzstellers durchgeführt. Mit diesen Daten kann die Windgeschwindigkeit während der Versuche kontinuierlich errechnet werden.

Staudruckmeßrohre lassen sich gut korrosionsfest konstruieren, die dazugehörigen Signalwandler (Druckdose o.ä.) und Meßwerterfassung (integrierendes Spannungsmeßgerät) sind allerdings vergleichsweise teuer.

Windräder liefern keine räumliche Auflösung, es lassen sich also keine Profile und insbesondere keine Verteilung über die Expositionsplätze bestimmen. Dafür gibt es relativ preiswerte Ausführungen dieser Systeme.

Optische Meßgeräte, die den Doppler-Effekt bei der Streuung von Licht an Partikeln im Meßfluid ausnutzen, sind sehr kostspielig und erfordern weiterhin eine minimale Partikelkonzentration im Medium, die z.B. mit Titantetrachlorid eingestellt werden muß.

Bei dem ausgewählten Verfahren erhält man also sehr gute räumliche und zeitliche Auflösung bei Messungen ohne korrosive Bestandteile und Partikel. Weiterhin kann die Genauigkeit der Windmessung in den Schadgasexperimenten durch regelmäßige Überprüfung der Kalibrationsfunktion gewährleistet werden.

## 4 Einmessung des Depositionskanals

Wichtige Parameter für die Untersuchungen im Depositionskanal müssen vor der Durchführung der eigentlichen Experimente bestimmt werden, um zum einen die Realisierung der Vorgaben nachweisen zu können und zum anderen die späteren Untersuchungen mit Literaturangaben vergleichbar und für andere Experimentatoren nachvollziehbar zu machen.

Als wichtigste Einflußgröße in der in dieser Arbeit realisierten Anlage ist die Windgeschwindigkeit und die damit verbundene Turbulenz anzusehen. Schließlich werden noch die Vorgaben für Temperatur, Schadgasgehalt und einstellbare Luftfeuchte überprüft. Dazu wurden die kalibrierten Meßgeräte des Kanals eingesetzt.

### 4.1 Windgeschwindigkeit

Prinzipiell könnte die Windgeschwindigkeit während der Untersuchungen mit Probekörpern natürlich dauernd miterfaßt werden. Dabei müßten aber entsprechende Meßgeräte während eines Experimentes im Schadgasstrom betrieben werden und entsprechend widerstandsfähig konstruiert werden. Aus den in Kapitel 3.5.5 erwähnten Gründen wird auf diese Vorgehensweise verzichtet. Stattdessen erfolgt eine indirekte Bestimmung der Windgeschwindigkeit während der Experimente aus der Rückmeldung des Frequenzstellers des Gebläses.

Dieses Rückmeldesignal wird durch Messung der Windgeschwindigkeit im Betrieb ohne Schadgas mit einem geeigneten Meßgerät bei verschiedenen Einstellungen am Frequenzsteller kalibriert. Aus der so erhaltenen Kalibrationsfunktion kann dann die Windgeschwindigkeit in den eigentlichen Experimenten bestimmt werden.

Durch Überprüfung dieser Kalibrationsfunktion in regelmäßigen Abständen kann sichergestellt werden, daß Veränderungen des Verhaltens rechtzeitig erkannt werden können. Dabei ist bei diesen Überprüfungen zunächst die Sonde erneut zu kalibrieren. Wie in Abschnitt 4.1.2 erläutert, verändert sich die Charakteristik der verwendeten Sonde nach längerem Betrieb im Kanal deutlich.

Außer der Windgeschwindigkeit an einem festen Punkt muß auch die Verteilung der Windgeschwindigkeit über den Querschnitt der Meßstrecke bestimmt werden. Dazu wird ein zweidimensionales Raster über den Kanalquerschnitt gelegt und Punkt für Punkt gemessen (Netzmessung).

#### 4.1.1 Die Funktionsweise des Hitzdrahtanemometers

Das eingesetzte Meßgerät zur Bestimmung von Windgeschwindigkeiten und Turbulenzintensität ist ein sogenanntes Hitzdrahtanemometer. Es besteht aus drei Komponenten: der eigentlichen Sonde, die sich in der Strömung befindet, einer Regel- und Auswerteelektronik mit Spannungsversorgung und der Aufzeichnungseinheit. Für die hier wiedergegebenen Versuche wurde das Regelungssystem ERSIS zur Auswertung der Sondersignale herangezogen. Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 7 dargestellt.

Der Meßfühler an der Sondenspitze ist ein wenige  $\mu\text{m}$  dicker, stromdurchflossener Platindraht, der seinerseits Bestandteil einer Wheatstoneschen Meßbrücke ist. Je nach momentaner Strömungsgeschwindigkeit wird dieser Draht verschieden stark gekühlt und ändert dadurch seine Temperatur und seinen Widerstand. Durch geeignete Kalibrierung kann man die momentane Geschwindigkeit zur Anzeige bringen. Wegen der

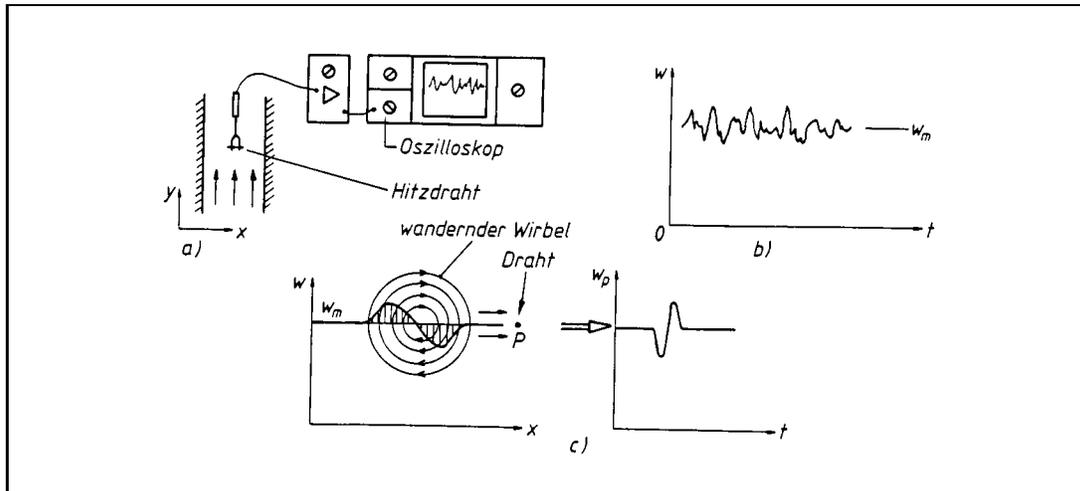


Abbildung 7: Darstellung des Prinzips des Hitzdrahtanemometers (oben links, aus BÖSWIRTH). Weiterhin ist die Entstehung der Signalschwankungen durch den Einfluß von Wirbeln gezeigt.

geringen Masse des Drahtes erfolgt die Anzeige praktisch trägheitslos. Durch die geringen geometrischen Abmessungen der Sondenspitze können auch relativ leicht Rastermessungen durchgeführt werden.

Die Aufzeichnung der Signale dieser Meßanordnung gibt typischerweise ein starkes Rauschen um einen Mittelpunkt wieder (siehe Abbildung 8). Dabei entspricht der Mittelwert der mittleren Windgeschwindigkeit am Sondenort, die Schwankungen sind ein Maß für die Turbulenzintensität (Geschwindigkeitskomponenten senkrecht zur Hauptwindrichtung).

Die „unregelmäßigen Schwankungen“ muß man sich so entstanden denken, daß kleine Wirbel quer über den Draht (bzw. über einen feststehenden Raumpunkt) hinwegwandern, wobei die Geschwindigkeit kurzzeitig einen Wert über und gleich danach unter der mittleren Geschwindigkeit annimmt. Die Schwankungen erscheinen nur unregelmäßig; tatsächlich spiegeln sie Bildung und Zerfall kleiner Wirbel (BÖSWIRTH). Die Entstehung des SONDENSIGNALS ist in Abbildung 7 ebenfalls dargestellt.

Die im Rahmen dieser Untersuchungen eingesetzte Sonde war ein sogenanntes Einzeldrahtmodell, für Erfassung der Komponenten der Windgeschwindigkeiten in den drei Raumrichtungen müssen entsprechende Dreidrahtsonden eingesetzt werden.

#### 4.1.2 Kalibration der Hitzdrahtsonde

Die verwendete Hitzdrahtsonde wurde im Umlaufkanal im Institut für Meteorologie der Universität Hamburg kalibriert. Dieser Windkanal zeichnet sich durch eine sehr gleichförmige Strömung über den Meßquerschnitt aus, so daß kleine Abweichungen im Meßort praktisch keine veränderte Geschwindigkeit zur Folge haben. Als Bezugsmeßgerät diente ein Laserdoppleranemometer, welches als hochgenaue Referenz anzusehen ist.

Die so gewonnenen Daten wurde mit Hilfe der King's Law genannten Beziehung

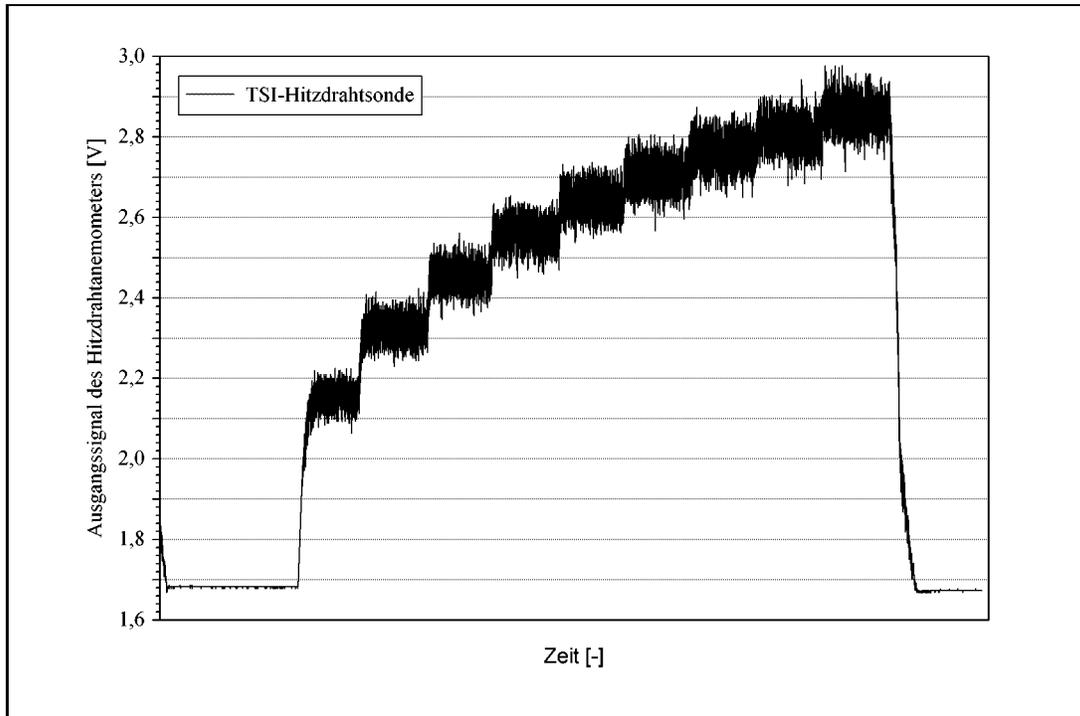


Abbildung 8: Darstellung einer mit der Hitzdrahtsonde und ERSIS aufgenommenen Geschwindigkeitsreihe. Der Mittelwert der Sondenreihe bei einer bestimmten Geschwindigkeit korreliert mit der Windgeschwindigkeit, die Schwankungen mit der Turbulenzintensität.

gefittet und somit die Kalibrationsfunktion bestimmt:

$$U = A + B \cdot u^z \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (21)$$

- U : Spannungssignal der Sonde in Volt
- A,B,z : Konstanten
- u : Windgeschwindigkeit in m/s

Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt. Die Kalibration der Hitzdrahtsonde ist in Abständen zu wiederholen, da sich die Sondencharakteristik bei längerem Einsatz im Kanal verändert. Der Grund für dieses Verhalten ist vermutlich in der Umsetzung von flüchtigen Verbindungen an der Oberfläche des beheizten Drahtes zu sehen, die aus dem Wandmaterial, den Dichtungen oder aus Klebenähten stammen könnten.

#### 4.1.3 Kalibration der Windgeschwindigkeit in der Kanalhauptachse

Zur Kalibration des Leistungsstellers des Gebläses wird die Hitzdrahtsonde in der Mitte der Meßstelle, jeweils 125 mm von den Kanalwänden entfernt, fest eingebaut. Über das ERSIS-Regelungsprogramm wird das Sondenignal abgefragt und aufgezeichnet.

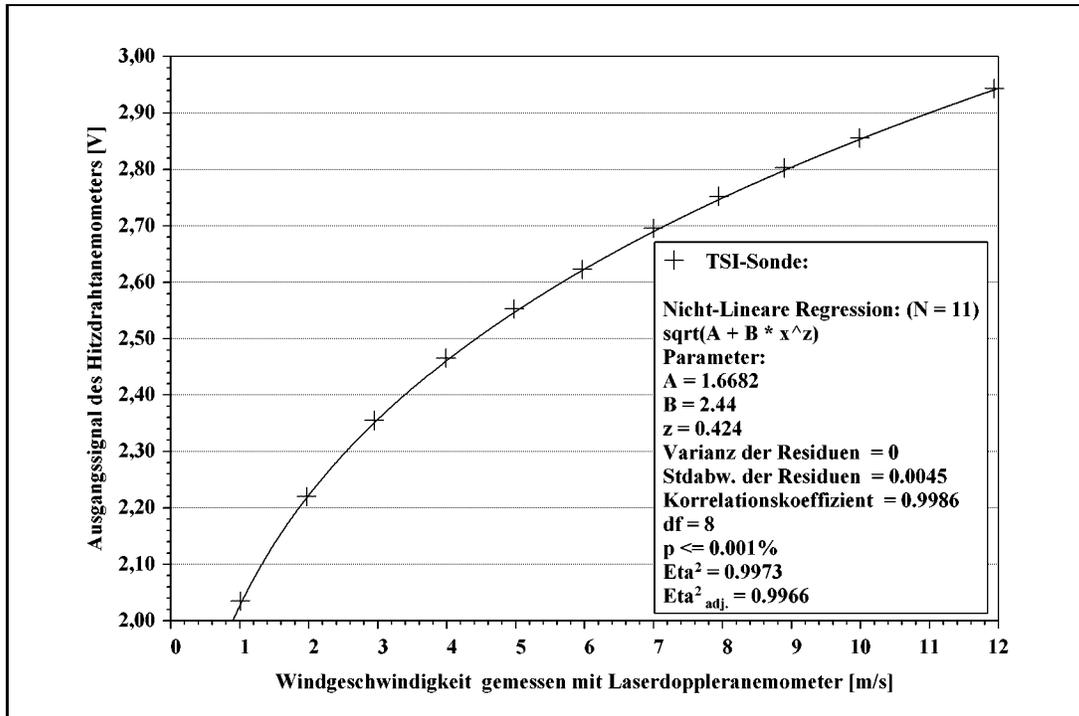


Abbildung 9: Kalibrationsfunktion der verwendeten TSI-Hitzdrahtsonde. Angegeben sind die Parameter des Kings Law, mit denen aus dem Spannungsausgangssignal die Windgeschwindigkeit berechnet werden kann.

Mit der verwendeten Zykluszeit von 200 ms werden 5 Werte pro Sekunde erfaßt. Um zu einer hinreichend sicheren Mittelwertbildung zu kommen, werden daher für jeden eingestellten Wert am Leistungssteller 2 Minuten Meßzeit festgelegt, dies entspricht 600 Einzelmeßwerten. Hinzukommen noch Einstellzeiten für das Gebläse, so daß mit 5 Minuten pro Meßpunkt gearbeitet wird.

Die Ergebnisse dieser Messungen sind in der Abbildung 10 dargestellt. Unterhalb von 1 m/s in der Kanalmitte können keine Geschwindigkeiten mehr reproduzierbar eingestellt werden. Daher wird in der Blockstrukturseite zur Regelung der Windgeschwindigkeit (siehe Kapitel 12.2.1) der eingegebene Sollwert auf Realisierbarkeit geprüft. Liegt der Sollwert unter 1 m/s, so wird das Gebläse nicht angesteuert.

#### 4.1.4 Bestimmung der Windgeschwindigkeitsverteilung für verschiedene, mittlere Geschwindigkeiten im Meßstellenmittelpunkt

Die Netzmessungen zur Bestimmung der Verteilung der Windgeschwindigkeit erfolgten analog zur Bestimmung der Geschwindigkeit im Meßstellenmittelpunkt. Es wurden drei mittlere Windgeschwindigkeiten für die Verteilungsmessung ausgewählt, um den zeitlichen Aufwand im Rahmen zu halten. Da erwartet werden kann, daß eine unregelmäßige Verteilung bei geringeren mittleren Windgeschwindigkeiten eher signifikant ist, wurden die Netzmessungen für 1, 3 und 6 m/s durchgeführt.

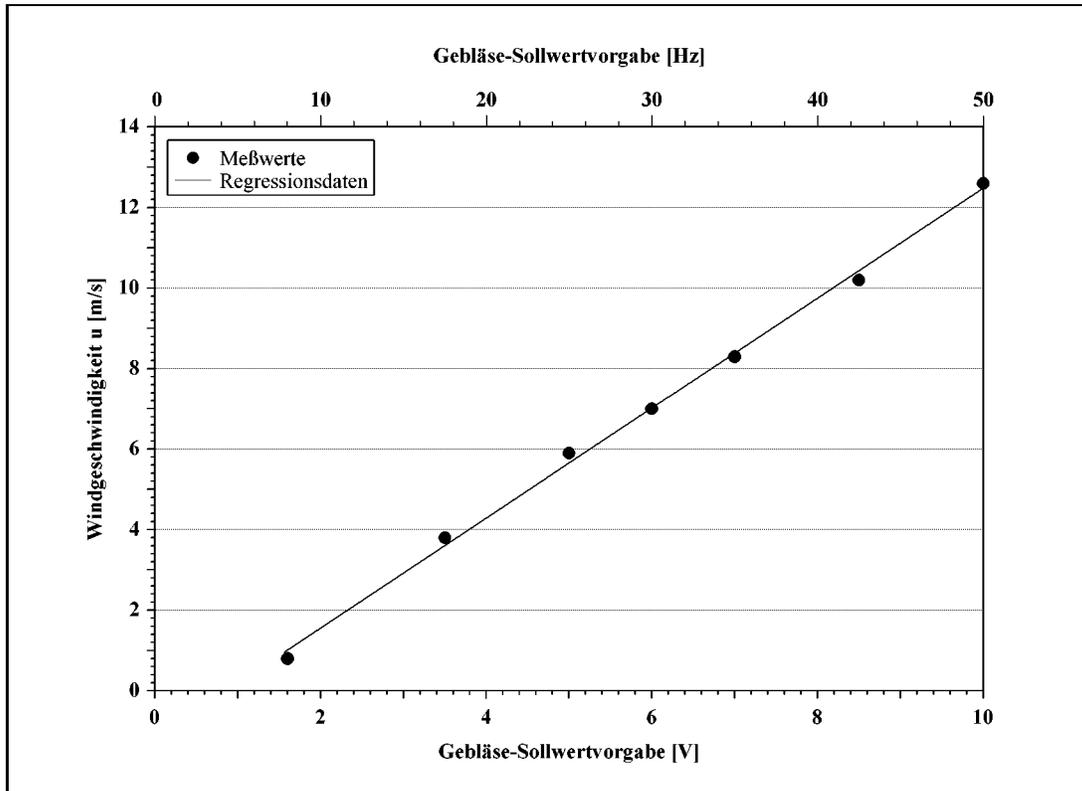


Abbildung 10: Ergebnis der Messungen der Windgeschwindigkeit in der Kanalhauptachse mit der TSI-Hitzdrahtsonde. Mit den erhaltenen Meßdaten wurde der Leistungssteller des Gebläses kalibriert.

Die gesamte Querschnittsfläche an der Meßstelle wurde mit einem Raster überlagert und die einzelnen Punkte mit der Hitzdrahtsonde nacheinander abgefahren und vermessen. Das verwendete Raster wies zu den Wänden hin Meßpunkte im Zentimeterabstand auf, zur Mitte hin wurden die Abstände auf 3 cm vergrößert, da in diesem Bereich geringere Unterschiede zu erwarten sind.

Die Ergebnisse dieser Messungen sind in den Abbildungen 11 und 12 dargestellt. Die Abbildungen zeigen zum einen die Zahlen an den realen Meßpunkten als Prozent von der Geschwindigkeit in der Meßstellenmitte, zum anderen ist eine gerechnete Windgeschwindigkeitsverteilung mit grauen Flächen gleicher Geschwindigkeitsbereiche überlagert.

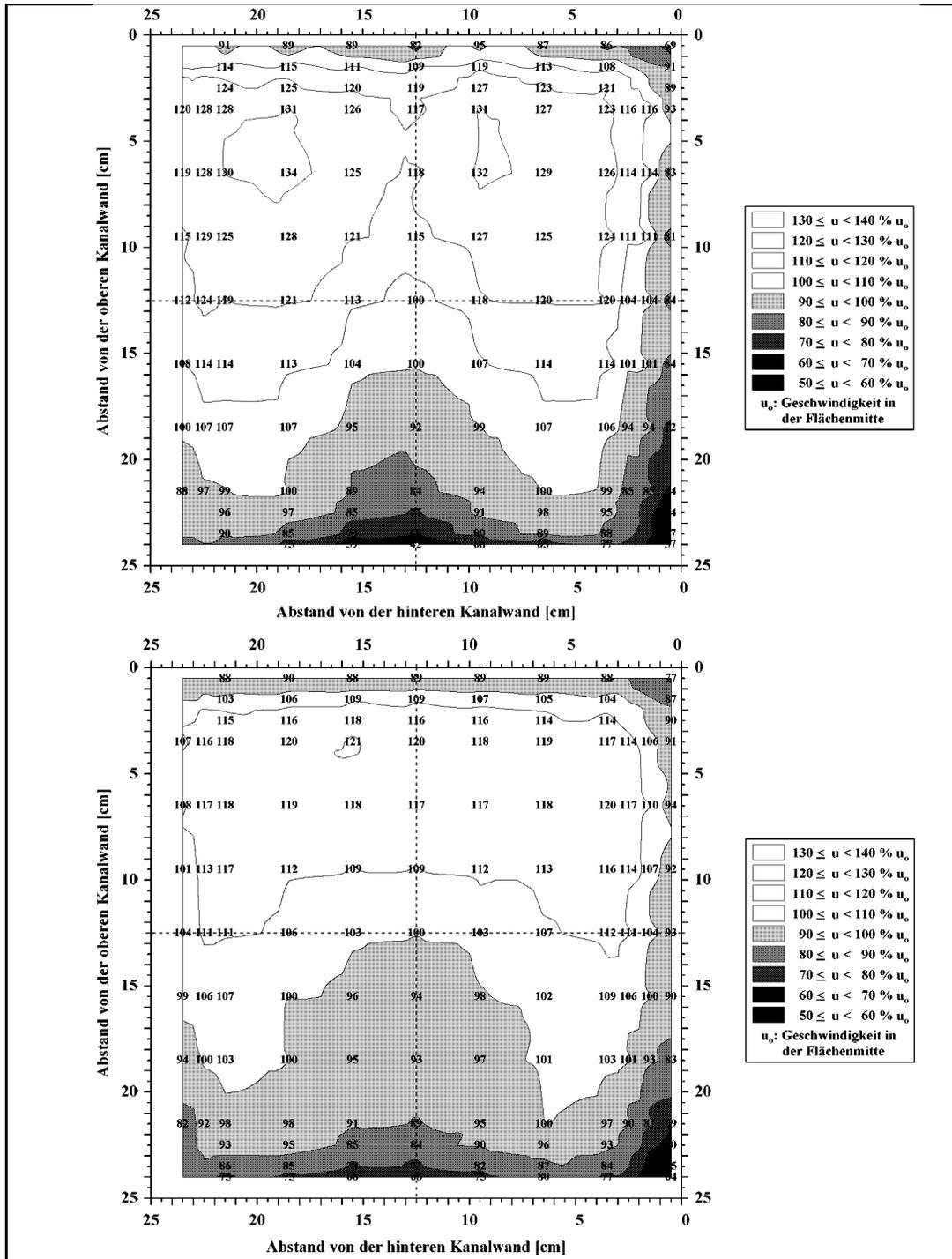


Abbildung 11: Windprofile für eine Windgeschwindigkeit von 1 m/s (oben) bzw. 3 m/s (unten) im Mittelpunkt der Querschnittsfläche.

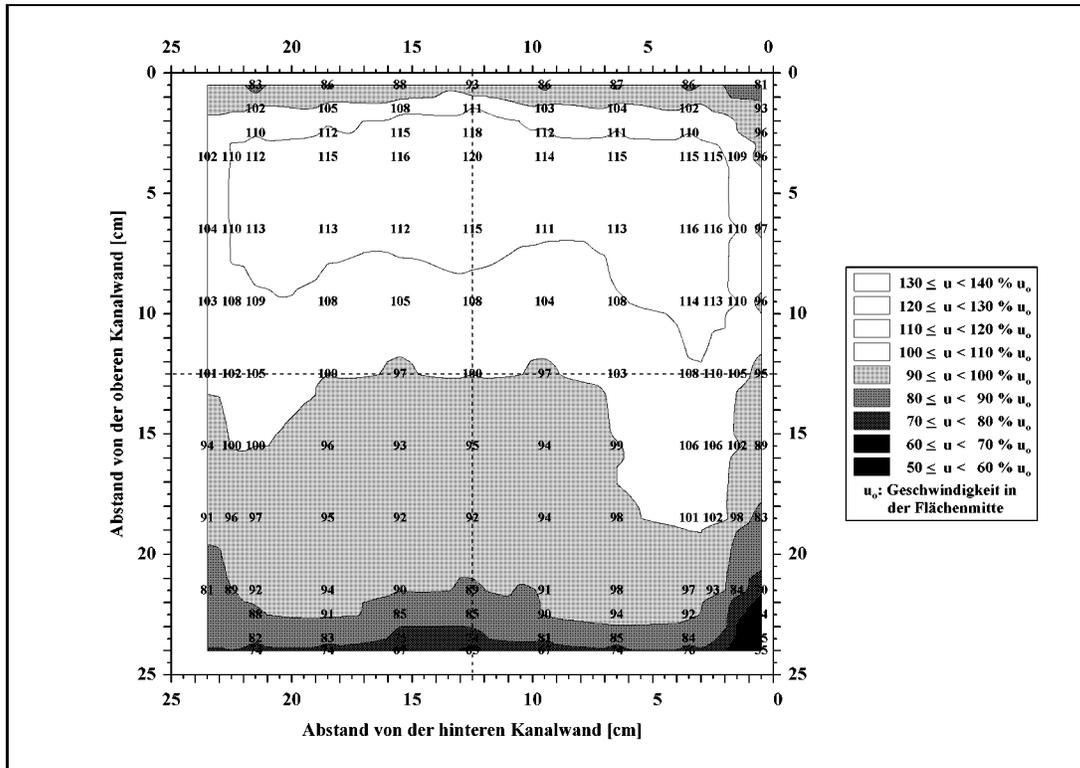


Abbildung 12: Ergebnis der Geschwindigkeitsnetzmessung über den Kanalquerschnitt an der Meßstelle für eine Windgeschwindigkeit von 6 m/s im Mittelpunkt der Querschnittsfläche.

Die Geschwindigkeitsnetzmessungen zeigen deutlich die zum Rand hin abnehmende Geschwindigkeit der strömenden Luft. Die Maximalwerte für die Windgeschwindigkeit liegen dabei nicht etwa in der Kanalmitte, sondern im oberen Drittel der Querschnittsfläche an der Meßstelle. Diese Asymmetrie der Windgeschwindigkeitsverteilung wird durch die Umlenkung bewirkt.

Die Mehrzahl der durchgeführten Versuche wurden bei einer Windgeschwindigkeit von 6 m/s gefahren. Die Verteilung für diese Windgeschwindigkeit wurde als ausreichend gleichmäßig im Bereich der eingebrachten Proben angesehen, so daß keine weiteren Anstrengungen zur Vergleichmäßigung der Strömung unternommen wurden.

Der Probenträger bringt die Proben in einem Gebiet 3,5 cm vom rechten Rand und 7 cm vom oberen und unteren Boden ein. In diesem Bereich variiert die Windgeschwindigkeit nur um  $\pm 8\%$ . Eine weitergehende Vergleichmäßigung kann prinzipiell mit geeigneten Sieben hinter der Umlenkung am Beginn der Einlaufstrecke erreicht werden. Für die hier vorgestellten Versuche wurde dies nicht als nötig befunden. Alle Versuche mit Passivsammlern (siehe Kapitel 5.7) bestätigen die Gleichwertigkeit der Exponierungsplätze auf dem Probenträger.

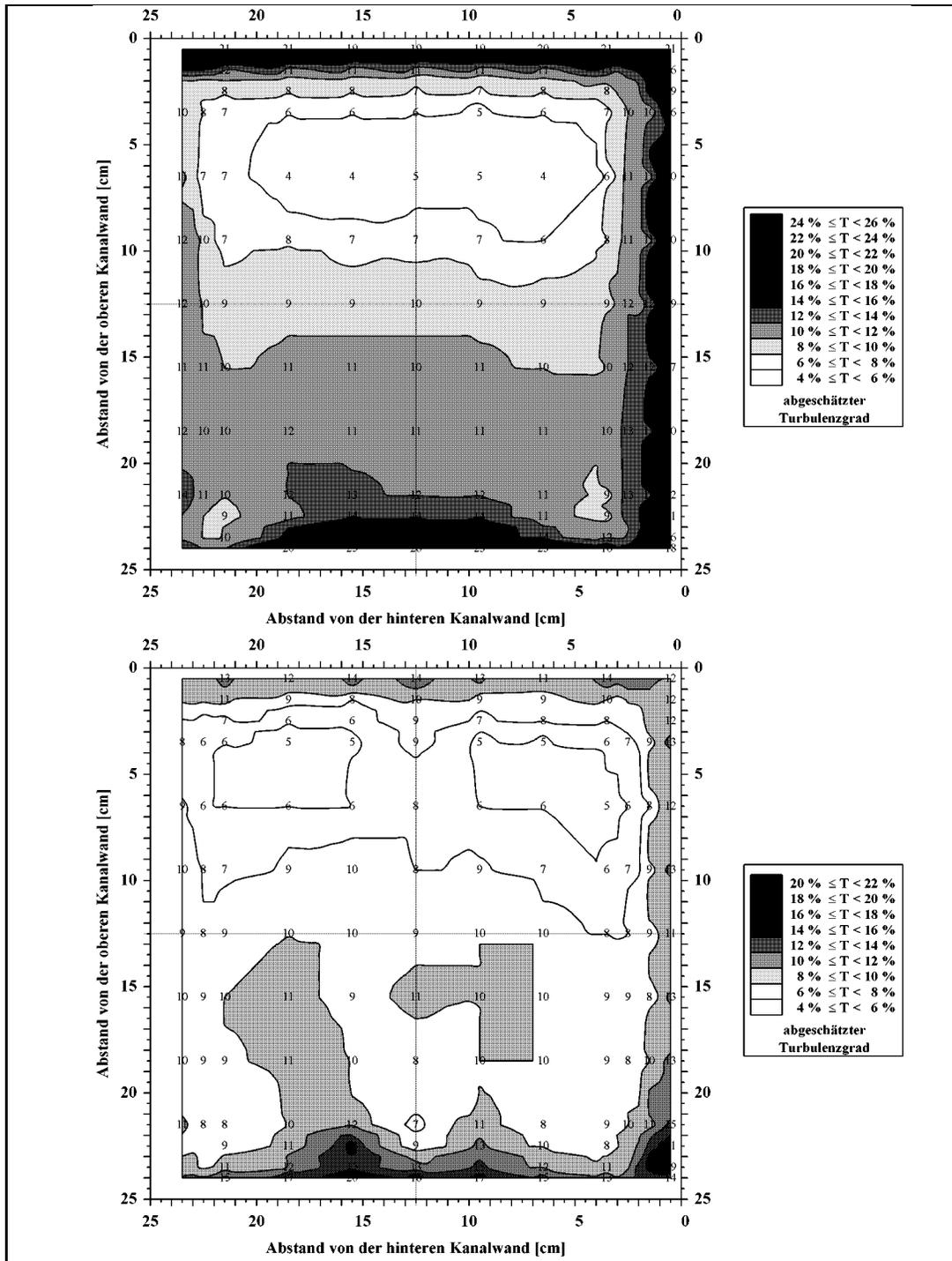


Abbildung 13: Abgeschätzte Turbulenzgradverteilungen für 1 m/s (oben) bzw. 3 m/s Windgeschwindigkeit (unten) im Mittelpunkt des Meßstellenquerschnitts.

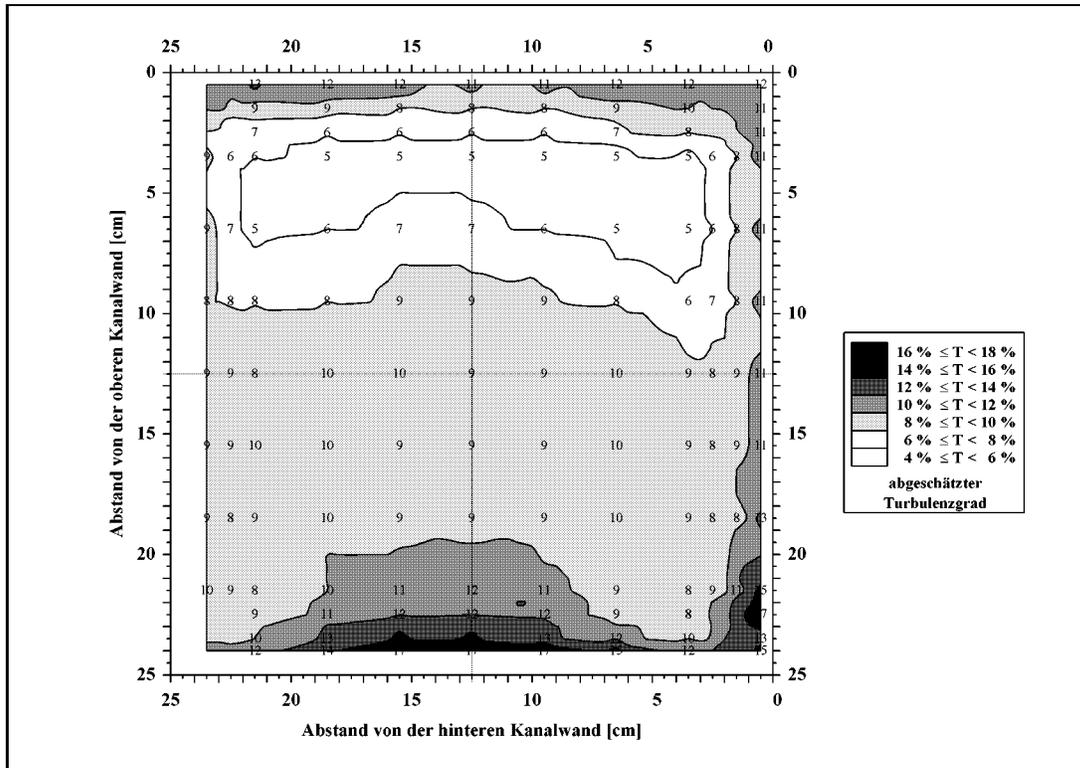


Abbildung 14: Aus den Daten der Geschwindigkeitsnetzmessung über den Kanalquerschnitt an der Meßstelle abgeschätzte Turbulenzgradverteilungen für 6 m/s Windgeschwindigkeit. Da keine Dreidrahtsonde zur Verfügung stand, stellen die Meßwerte nur Näherungen dar.

#### 4.1.5 Abschätzung der Turbulenzgradverteilung für verschiedene, mittlere Geschwindigkeiten im Meßstellenmittelpunkt

Aus den erhaltenen Daten der Netzmessungen mit dem Hitzdrahtanemometer können weiterhin die Turbulenzintensitäten abgeschätzt werden. Diese ergeben sich nach FALBE zu:

$$T = \frac{1}{u} \cdot \frac{1}{3} \cdot (\sqrt{u_x'^2} + \sqrt{u_y'^2 + u_z'^2}) \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (22)$$

$T$  : Turbulenzintensität

$u$  : mittlere Windgeschwindigkeit

$u_i'$  : Komponente der Windgeschwindigkeit in Raumrichtung  $i$

Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß der gewählte Aufbau mit einer ein-dimensionalen Hitzdrahtsonde nicht geeignet ist, die Windgeschwindigkeitskomponenten in allen drei Raumrichtungen zu erfassen. Für derartige Messungen werden Drei-

drahtsonden verwendet, die ein System aus zueinander um jeweils  $60^\circ$  geneigten Hitzdrähten zur Messung verwenden.

Da der verwendete Sondenhalter die Ausrichtung der Sonde in einer beliebigen Orientierung nicht zuließ (alle Messungen wurden mit dem Hitzdraht parallel zur unteren und oberen Wand durchgeführt), können diese auch nicht etwa nacheinander bestimmt werden. Die in den Abbildungen 13 und 14 dargestellten Ergebnisse sind also nur als Abschätzungen zu betrachten.

## 4.2 Temperatur

Die Überprüfung der Vorgaben bezüglich Temperaturbereich, Verhalten beim Verändern von Temperaturen und der maximal erlaubten Temperaturdifferenz zwischen kältestem Anlagenpunkt und Lufttemperatur erfolgten mit fest installierten Temperatursensoren.

Drei Temperaturen werden von ERSIS ständig erfaßt:

- die Temperatur an der Meßstelle, die auf einen bestimmten Sollwert eingeregelt wird,
- die Temperatur an der heißesten Stelle der Rippenrohrheizkörper, die einen bestimmten Grenzwert nicht überschreiten darf, um die Kanalwände zu schonen und
- die Temperatur am kältesten Punkt des Blockverdampfers der Kühlanlage (oberstes Einspritzrohr), die nicht zu weit unterhalb der Lufttemperatur liegen darf, um Kondensationsprobleme zu vermeiden.

Mit Hilfe einer speziell aufgebauten Blockstrukturseite wurde der Sollwert der Temperatur zwischen den beiden Grenzwerten der Anlage zyklisch auf- und abgefahren. An jedem Extremwert wurde der Sollwert einige Zeit gehalten. Als Anstiegs-, Abfall- und Haltezeit wurde einheitlich 4 Stunden eingesetzt. Schnellere Temperaturwechsel sollten auch allen weiteren Versuchen nicht realisiert werden.

Die oben angegebenen Temperaturen wurden dabei ständig aufgezeichnet. Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse eines frühen Experimentes.

Im ersten Aufheizzyklus wurde die geforderte Höchsttemperatur nicht erreicht, da die Kühlanlage zuviel Wärmeleistung aus dem System entzog (Punkt A). Durch eine Justierung der Einspritzdüse wurde die Leistung der Kühlanlage geringfügig gedrosselt und die geforderte Spitztemperatur konnte in den folgenden Aufheizzyklen problemlos erreicht werden (Punkt A').

Es erwies sich weiterhin als nötig, das Stellglied der Kühlanlage zu modifizieren, da sonst beim Abkühlen Aussetzer auftraten (Punkt B). Nachdem der eingebaute Regelblock des MPS20-Stellgliedes überbrückt worden war und die Steuerung der Kälteleistung komplett von ERSIS übernommen wurde, konnten die Aussetzer eliminiert werden (Punkt B'), allerdings verläuft die Abkühlung jetzt geringfügig langsamer als ursprünglich gefordert.

Zwei weitere wichtige Punktpaare der dargestellten Kurve bedürfen noch der Erläuterung. Die Punkte C und C' bzw. D und D' geben jeweils die höchsten auftretenden Temperaturdifferenzen zwischen kältestem Anlagenpunkt und Lufttemperatur an. Diese Temperaturdifferenz limitiert die maximal mögliche Luftfeuchte im Kanal. Mit

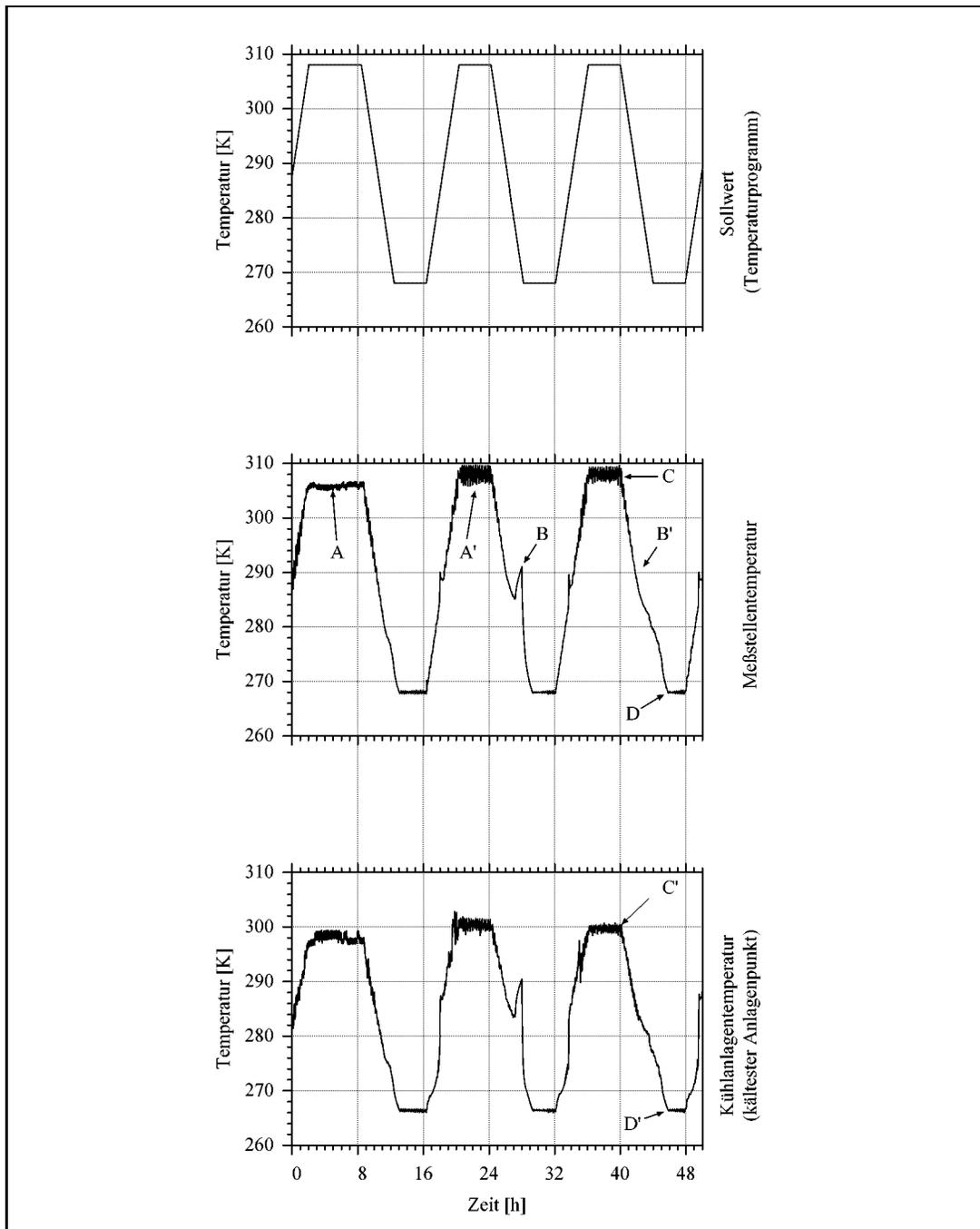


Abbildung 15: Darstellung des realisierten Temperaturganges zur Justierung der Kühlanlage.

Temperaturdifferenzen von weniger als 3 K im Bereich um  $-5^{\circ}\text{C}$  bzw. weniger als 8 K bei  $35^{\circ}\text{C}$  werden die maximal angestrebten Luftfeuchtigkeiten aus Tabelle 13 erreicht.

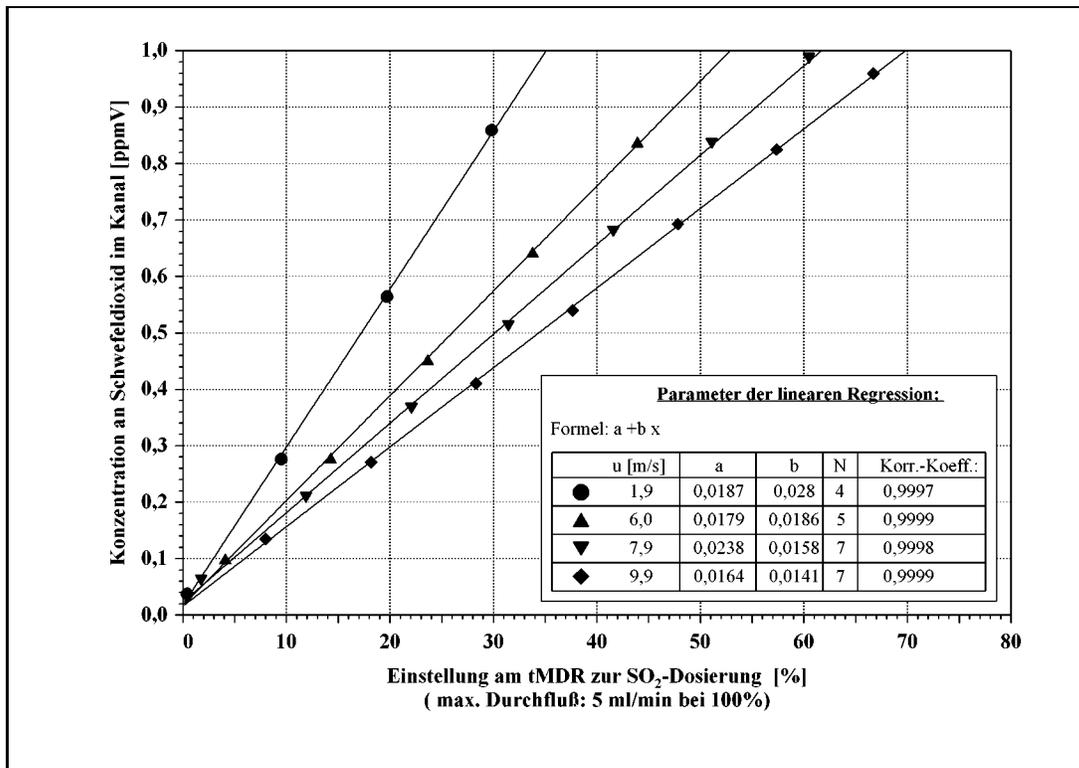


Abbildung 16: Darstellung der Kalibrationsgeradenschar für die SO<sub>2</sub>-Dosierung. Deutlich zu erkennen ist, daß bei höheren Windgeschwindigkeiten mehr SO<sub>2</sub> in die Kanalluft dosiert werden muß, um die gleiche Innenluftkonzentration zu erreichen.

### 4.3 Kalibration von Dosierung und Messung von Schwefeldioxid

Zur Kalibration der Gasmischanlage und zum erstmaligen Abgleich des SO<sub>2</sub>-Meßgerätes werden naßchemische Vergleichsmessungen herangezogen. Das verwendete Verfahren ist von BOTHMANN(1991) in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2462 entwickelt worden. Dabei wird das Schwefeldioxid in Absorptionsflaschen mit alkalischer Wasserstoffperoxidlösung quantitativ in Lösung gebracht und zum Sulfat oxidiert. Die Sulfatkonzentration wird schließlich mittels Ionenchromatographie bestimmt. Aus dem gleichzeitig gemessenen Volumen des beprobten Gases, dem Druck und der Temperatur wird auf die Konzentration im Gas zurückgerechnet.

Die Gasentnahme erfolgte direkt hinter der Mischkammer über den zusätzlichen Anschluß zur naßchemischen Probenahme (siehe auch Abbildung 5 in Kapitel 3.5.3). In einer Serie von Vorversuchen wurde zunächst die Reproduzierbarkeit der Konzentrationseinstellungen mittels tMDR sowie der zertifizierte Gehalt an SO<sub>2</sub> in der Prüfgasflasche überprüft. Im Rahmen der Meßgenauigkeit des Verfahrens wurden keine Abweichungen festgestellt. Sowohl für den Gehalt des unverdünnten Prüfgases als auch für die wiederholte Einstellung einer bestimmten Verdünnung lagen die gemessenen Abweichungen mit weniger als 1 % deutlich unter der Fehlergrenze der angewendeten

Überprüfungsmethode.

Während der späteren Versuche erfolgte die Justierung der Meßgeräte nur noch über definierte Konzentrationseinstellungen an der Gasmischanlage und entsprechenden Abgleich am Gerät. Dazu wurde vor Beginn jeder Versuchsserie mit dem Umschalten auf Nullgas der Nullpunkt der Meßgeräte überprüft und gegebenenfalls nachjustiert sowie mit einer definierten Prüfgasverdünnung kalibriert.

In Leerversuchen wurde schließlich noch überprüft, ob die angestrebten  $\text{SO}_2$ -Konzentrationen von bis zu 1 ppmV  $\text{SO}_2$  im Kanal beim Betrieb auch erreicht werden können. Dies wurde bestätigt (siehe Abbildung 16). Allerdings zeigt der Kanal konstruktionsbedingt Leckraten. Allein der Übergang zwischen dem Kanal-Element, in dem Heizung und Kühlung untergebracht sind, und der nachfolgenden Verengung mußte auf einer Länge von fast 2,50 m gedichtet werden. Der modulare Aufbau des Kanals bedingt somit eine gewisse, unvermeidliche  $\text{SO}_2$ -Verlustrate.

Raumluftmessungen zeigten allerdings kein  $\text{SO}_2$  auf. Die gute Durchlüftung des Labors und der eher geringe Verlust verhindern den Aufbau einer gefährlichen Konzentration. Neben dem Verlust von Schwefeldioxid durch Abgabe an die Raumluft läßt sich eine weitere Senke im Kanal ausmachen: Verluste durch Adsorption an Wänden und Einbauten.

In Aufheizzyklen wird wenigstens eine teilweise Wiederabgabe adsorbierten Schwefeldioxids beobachtet. Dies ist nicht hinderlich, da die Konzentration über das ERSIS-Computerprogramm ohnehin auf einen vorgegebenen Wert eingeregelt wird.

#### 4.4 Kalibration von Dosierung und Messung der Luftfeuchtigkeit

Die Überprüfung der Feuchtigkeitsmessung erfolgte ganz analog. Dazu wurde am Blockverdampfer mit einer bestimmten Förderrate Wasser dosiert und über die tMDR ein bestimmter Gasstrom eingestellt.

Anstelle der Absorptionsflaschen wurden hier mit Trockenmittel befüllte Röhrchen eingesetzt und einmal vor und einmal nach der Beladung mit feuchter Luft ausgewogen. Dem Meßröhrchen wurde dabei ein Back-up-Röhrchen nachgeschaltet, um sicherzustellen, daß der Wasserdampf vollständig abgeschieden wurde. Aus dieser Gewichts-differenz und den Daten der Gasbeprobung (Volumen, Druck und Temperatur) wurde die ursprüngliche Konzentration von Wasser im Meßgas berechnet. Durch den Vergleich mit tabellierten Feuchtwerten konnten dann die relative Luftfeuchtigkeit und der prozentuale Gehalt an Wasserdampf bestimmt werden. Letztere Größe wird vom BINOS-Meßgerät direkt ausgegeben.

Die Beprobung fand einmal direkt am Ausgang der Mischkammer statt (wie auch bei der Überprüfung der Schwefeldioxid-dosierung) und einmal direkt hinter dem BINOS-Meßgerät. Dies erschien notwendig, um die Gasleitungen auf Kondensationseffekte zu überprüfen. Für das BINOS-Meßgerät muß nur der Nullpunkt in regelmäßigen Abständen überprüft werden.

Die maximal mögliche Einstellung des Wassergehaltes der Luft im Depositionskanal ergibt sich aus der Temperaturdifferenz zwischen dem kältesten Anlagenpunkt und der Kanalluft. Bei der Auslegung der Kühlanlage wurde deshalb berücksichtigt, daß der Verdampfer nur maximal 3 K kälter sein darf als die Innenluft, wenn 80 % relative Luftfeuchte bei 268 K erreicht werden sollen. Im Bereich hoher Temperaturen kann diese Differenz größer werden, ohne zu Kondensationseffekten im Kanal zu führen. Im

oberen Bereich der realisierbaren Temperaturen werden die vorgegebenen Werte daher leicht erreicht. Um allerdings die Abluftanlagen zu schonen, wurde eine Kondensationsfalle vor den Gaseintritt in den Abzug geschaltet. Hier wird ein erheblicher Anteil des Wasserdampfes abgeschieden. Am unteren Ende des realisierbaren Temperaturbereiches ist die Einregelung dieser maximal erlaubten Temperaturdifferenz schwieriger, es werden aber 80 % rH erreicht.

Wurde die Anlage im Bereich der Temperatur der Umgebung gefahren, so konnten die Spitzenwerte der Regelschwankungen nicht klein genug gehalten werden, so daß sich bei 293 K die relative Luftfeuchtigkeit nicht über 70 % rH einstellen ließ.

## 5 Untersuchungen mit Hilfe von Passivsammlern

Zur Überprüfung der Depositionsbedingungen an den einzelnen Expositionsplätzen und zur Untersuchung von einzelnen Einflußparametern im Depositionskanal wurden zunächst Versuche mit Passivsammlern durchgeführt. Diese Systeme haben gegenüber den Gesteinsprüfkörpern den Vorteil, im Analytikgang einfacher handhabbar zu sein. Sie zeigen kaum Matrixeffekte und stellen näherungsweise ideale Senken für Schadgase dar. Damit werden alle beobachteten Effekte bei Variation der Einflußgrößen unabhängig von Oberflächeneigenschaften. Allerdings wird ein Teil des aufgenommenen  $\text{SO}_2$  in Form von Sulfit stabilisiert, so daß stets mit frischen Sulfitstandards zu messen ist.

### 5.1 Durchführung der Versuche

Für die folgenden Versuche wurden jeweils 10 Passivsammler aus einer Herstellungsreihe verwendet. Zwei Stück wurden für die Bestimmung der Blindwerte eingesetzt, die restlichen acht in zwei Reihen auf dem Probenträger für die Gesteinsplättchen angebracht und mit dem Träger dann in die Meßstrecke des Depositionskanals eingesetzt. Der Probenträger wurde dabei so eingebaut, daß er parallel zur hinteren Wand in 3 cm Entfernung befestigt war. Alle Passivsammler - und die Gesteinsplättchen der späteren Versuche - wurden somit mit senkrechten Oberflächen exponiert.

Unter Variation eines Einflußparameters bei Konstanthaltung aller anderen Größen wurden so Versuchsserien durchgeführt und ausgewertet. Die Meßbedingungen sind in den folgenden Abschnitten bei den jeweils untersuchten Einflußgrößen angegeben.

#### 5.1.1 Herstellung der Passivsammler

Die verwendeten Passivsammler sind vom selben Typ wie sie von MANGELS(1992) in der Simulationskammer und von BOTHMANN(1997) verwendet wurden. Damit ist eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse möglich.

Benutzt wurden getränkte Filterpapiere mit einem Durchmesser von 50 mm. Auf diese Filter wurden zweimal je 300  $\mu\text{L}$  der Absorptionslösung aufgebracht. Zwischen den Beladungen und am Ende erfolgt jeweils Trocknung im Vakuumtrockenschrank. Die Zusammensetzung der Absorptionslösung ist in der Tabelle 14 aufgeführt. Nach erfolgter Beladung und Trocknung wurden die Passivsammler auf einer Seite mit Alufolie (20 x 20 mm) beklebt. Auf diese Folie wurde doppelseitiges Klebeband aufgebracht

Tabelle 14: Zusammensetzung der Absorptionslösung für die verwendeten Passivsammler, bezogen auf 250 ml Endvolumen.

Chemikalie:	c [mol/L]:	m [g]:
Kaliumcarbonat	0,1	3,45
Triethanolamin (Tris-(2-Hydroxyethyl)-amin)	0,13	4,85
Ethylenglycol	0,87	13,50

und die Passivsammler damit auf dem Probenträger befestigt.

Bei hohen Windgeschwindigkeiten und hohen Luftfeuchten erwies es sich als nötig, die Verklebung zu verstärken, bei allen anderen Versuchen wurde die Verklebung nicht beeinträchtigt.

Nach der Exponierung wurden Blindproben und belastete Proben der gleichen Aufarbeitung unterworfen. In keinem Fall wurden bei den Blindproben Werte über 1 % der Belastung nach Exponierung im Kanal gefunden. Im Vergleich zum Gesamtfehler, bedingt durch Verdünnung, Elution und der Unsicherheit bei der Vermessung mittels Ionenchromatographie, ist dieser Fehler vernachlässigbar klein (siehe auch Kapitel 5.8).

### 5.1.2 Aufarbeitung der Passivsammler nach Exponierung

Zur Aufarbeitung wurden die Passivsammler jeweils zwei Stunden mit 20 mL bidestilliertem Wasser geschüttelt und über Minisart Filter filtriert. Die so gewonnenen Eluate wurden mittels Ionenchromatographie vermessen und aus den erhaltenen Sulfat- und Sulfitkonzentrationen die Gesamtmenge an deponiertem Schwefel (berechnet als  $\text{SO}_2$ ) bestimmt.

### 5.1.3 Ionenchromatographie

Die Sulfatgehalte der Proben wurden aus Messungen mittels Anionenaustauschchromatographie erhalten. Das verwendete System bestand aus:

Trennsäulen	Dionex AG 9 und AS 9
Supressor	Dionex AMMS-1
Eluent	2 mmol/L $\text{Na}_2\text{CO}_3$ und 0,75 mmol/L $\text{NaHCO}_3$
Detektoren	Dionex CMB-1 zur Leitfähigkeitsmessung Shimadzu SPD 6 AV zur UV/Vis-Detektion

Es wurden im Rahmen dieser Arbeit die in der Arbeitsgruppe erprobten Verfahrensweisen angewandt, insbesondere wurde nicht der Versuch unternommen, das bestehende System weiter zu optimieren. Eine ausführlichere Darstellung der Grundlagen dieses Meßverfahrens findet man bei WEISS, eine weitergehende Beschreibung des hier eingesetzten Systems bei BOTHMANN(1997) und, insbesondere zu Methoden der Sulfitbestimmung, bei CARSTENS(1993). Eine Fehlerbetrachtung über das gesamte Verfahren werden in Abschnitt 5.8 diskutiert.

### 5.1.4 Bilanzierung aus den aufgezeichneten Meßdaten

Neben Elution und nachfolgender ionenchromatographischer Bestimmung der gefundenen Sulfatmenge sollte auch der Versuch gemacht werden, die Aufnahme an  $\text{SO}_2$  durch die Bilanzierung der Gasdosierung zu bestimmen. Dazu wurde das Rückmeldesignal des tMDR benutzt, mit dem ERSIS den  $\text{SO}_2$ -Gehalt in der Kanalluft einregelt.

Das Verfahren ist in Abbildung 17 schematisch dargestellt. Zunächst wird unter gleichen Meßbedingungen, aber ohne Proben, der Grundbedarf an  $\text{SO}_2$  bestimmt, der durch den kontinuierlichen Abzug des Nebenstroms und durch Leckraten am Gebläse und den großen Dichtflächen bedingt ist.

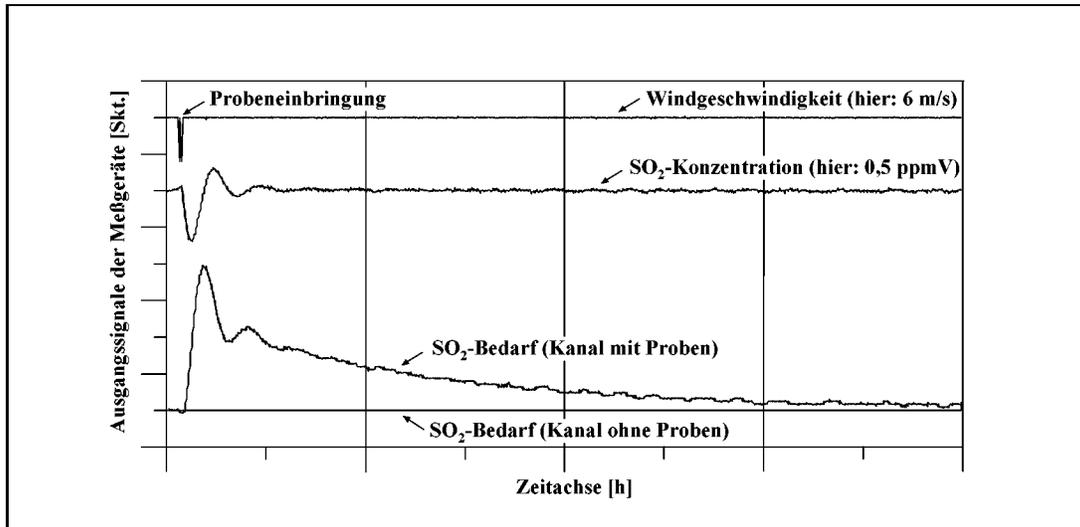


Abbildung 17: Zur Bilanzierung des zudosierten  $\text{SO}_2$  wurde der Grundbedarf des leeren Kanals von der Kurvenfläche des Bedarfs für Kanal mit Proben subtrahiert. Aus der resultierenden Fläche kann mit dem maximalen Durchfluß des tMDR die insgesamt zusätzlich aufzuwendende  $\text{SO}_2$ -Menge berechnet werden.

Dann werden Proben eingebracht und die Rückmeldung des  $\text{SO}_2$ -tMDR über die Versuchsdauer aufgezeichnet. Durch Berechnung der Kurvenfläche und nach Abzug des Grundbedarfs kann dann leicht die Menge an  $\text{SO}_2$  errechnet werden, die durch die zusätzlich eingebrachten Proben aufgenommen wurde. Es muß betont werden, daß dieses Verfahren mit erheblichen Unsicherheiten belastet ist, da die Signalaufösung am tMDR mit 5V für 100 % des Maximalflusses recht grob ist. Trotzdem werden auf diese Weise die ionenchromatographischen Untersuchungen im Rahmen der Fehlerbreiten der Methoden gut bestätigt. Eine eingehendere Fehlerbetrachtung wird in Abschnitt 5.8 gegeben.

## 5.2 Zeitlicher Verlauf der Deposition von Schwefeldioxid

Zunächst wurde eine Zeitreihe mit dem Depositionsverhalten von  $\text{SO}_2$  auf Passivsammlern aufgenommen. BEHLEN(1996) und WITTENBURG(1994) haben in Untersuchungen gefunden, daß die Depositionsgeschwindigkeit zeitlich variiert und einem Gleichgewichtszustand zustrebt. Dazu wurden Passivsammler unter den in Tabelle 15 angegebenen Versuchsbedingungen unterschiedlich lange exponiert.

Jeder Einzelversuch wurde dabei wieder mit frischen Passivsammlern zum Zeitpunkt  $t=0$  begonnen. Damit sind zu jedem Zeitpunkt gleichviele Passivsammler im Kanal, die auch jeweils gleichlang exponiert waren. So soll verhindert werden, daß Versuchsergebnisse durch unterschiedliche Anzahl von noch verbleibenden Passivsammlern oder durch unterschiedliche Vorbelastung beeinflusst werden.

Die Aufarbeitung der Passivsammler erfolgt wie unter Abschnitt 5.1.2 dargestellt.

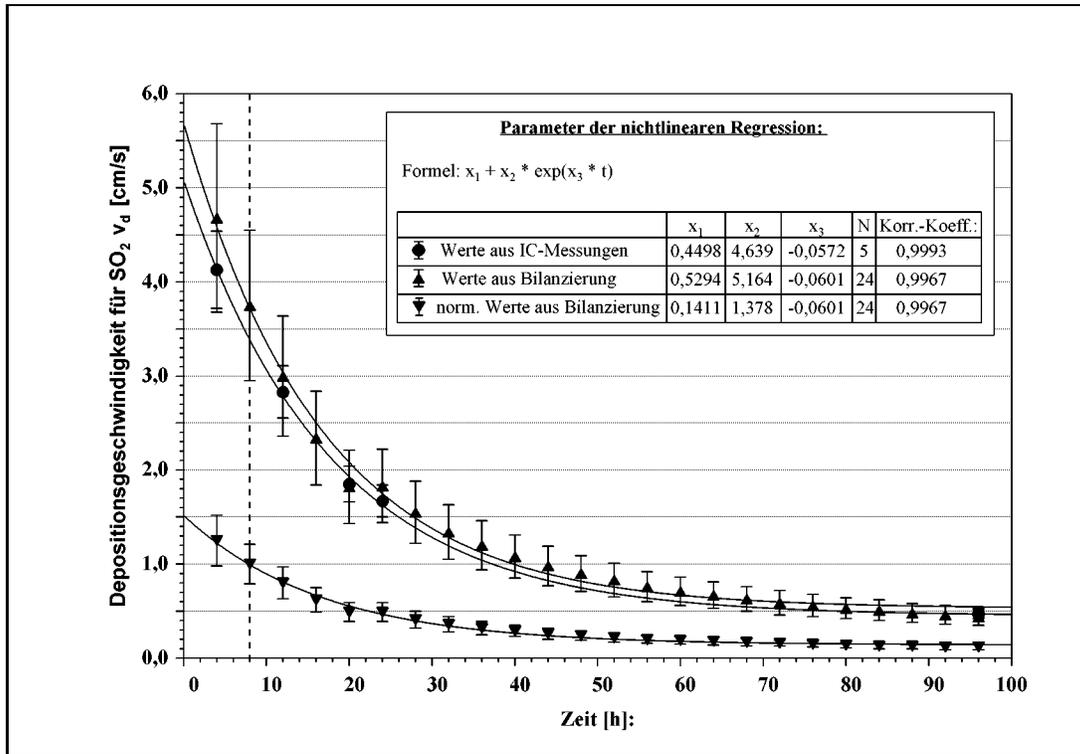


Abbildung 18: Zeitliche Veränderung der Depositionsgeschwindigkeit von  $\text{SO}_2$  auf Passivsammlern bei 0,5 ppmV  $\text{SO}_2$ , 6 m/s, 300 K und 0% relativer Feuchte. Dargestellt ist der Vergleich von Werten aus Gasbilanzrechnungen mit den Werten aus Elution und nachfolgender, ionenchromatografischer Sulfatbestimmung. Alle Messungen, zu denen es IC-Werte gibt, sind jeweils mit einem kompletten Satz frischer Passivsammler voneinander unabhängig begonnen worden.

Zusätzlich zur naßchemischen Bestimmung von Fluß und Depositionsgeschwindigkeit wurden Zwischenwerte aus der Gasbilanz im Langzeitversuch über 100 Stunden be-

Tabelle 15: Versuchsbedingungen für die Bestimmung des zeitlichen Verlaufes der Deposition von  $\text{SO}_2$  auf Passivsammlern.

Parameter:	eingestellter Wert:
Windgeschwindigkeit:	6 m/s
Temperatur:	304 K
Luftfeuchtigkeit:	0 % rH
Konzentration $\text{SO}_2$ :	0,5 ppmV
Exponierungszeit:	variabel

rechnet.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 18 dargestellt. Die erhaltenen Werte wurden mit einer einfachen Exponentialfunktion gefittet, die schon von WITTENBURG(1994) benutzt wurde.

$$v_d = x_1 \cdot e^{x_2 \cdot t} + x_3 \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (23)$$

$v_d$  : Depositionsgeschwindigkeit  
 $t$  : Zeit  
 $x_i$  : Konstanten

Die Fehlerbalken wurden für die ionenchromatographisch erhaltenen Werte aus der Standardabweichung zwischen verschiedenen Passivsammlern eines Versuches erhalten, für die berechneten Werte aus der Bilanzierung wurde der Fehler zu 20 % abgeschätzt.

Um den zeitlichen Aufwand für die weiteren Messungen nicht zu groß werden zu lassen, wurden alle weiteren Passivsammlerversuche mit einer Exponierungszeit von acht Stunden durchgeführt. Zu diesen reinen Versuchszeiten kommen jeweils noch Einlaufzeiten für den Windkanal, um konstante Betriebsbedingungen zu erreichen, sowie Nachlaufzeiten, in denen Leermessungen für die Gasbilanz durchzuführen sind.

In dieser Zeit wird noch nicht die bereits erwähnte Gleichgewichtseinstellung erreicht, der erhaltene absolute Wert für die SO<sub>2</sub>-Deposition ist daher nur eingeschränkt brauchbar und muß entsprechend vorsichtig interpretiert werden. Da aber alle weiteren Versuche gleichlang sind, kann die Veränderung der Depositionsgeschwindigkeit mit dem im entsprechenden Experiment variierten Parameter trotzdem sicher bestimmt werden. Für alle weiteren Versuche wurde daher jeweils der in diesem Experiment bestimmte Acht-Stunden-Wert ebenfalls bestimmt und die erhaltenen Depositionsgeschwindigkeiten auf diesen Wert normiert. Die einzige Ausnahme war die Versuchsserie zur Gebäudeumströmung. Hier wurde die Exponierungsdauer auf 20 h festgelegt.

In der Abbildung 18 ist dieser Wert gesondert gekennzeichnet. Zudem wurde die erhaltene Zeitkurve zusätzlich normiert in die Abbildung eingefügt.

### 5.3 Einfluß der Windgeschwindigkeit

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Einfluß der Windgeschwindigkeit in der Kanalhauptachse auf die Deposition von SO<sub>2</sub> untersucht. Aufarbeitung der Passivsammler und Bilanzierung erfolgten auch bei dieser Versuchsreihe wie unter Abschnitt 5.1.2 bzw. 5.1.4 beschrieben. Die Versuchsparameter sind in der Tabelle 16 zusammengefaßt.

In den Abbildungen 19 und 20 sind die Ergebnisse dieser Versuchsreihe dargestellt. Neben der Bestimmung der Depositionsgeschwindigkeit über ionenchromatographische Messung der exponierten Passivsammler und Bilanzierung der SO<sub>2</sub>-Dosierung wurde der Versuch unternommen, die erhaltenen Meßwerte mit theoretischen Ansätzen nach SCHLICHTING zu fitten. Diese Ansätze wurden auch von anderen Autoren benutzt [LIPFERT(1980), SPIKER(1992)].

Dazu wird aus den geometrischen Abmessungen der überströmten Fläche, der Windgeschwindigkeit in unendlicher Entfernung über dieser Fläche und der Viskosität des strömenden Mediums zunächst die Reynoldszahl  $Re_l$  bestimmt. Für diese dimensionslose Kennzahl gibt es analog zur Reynoldszahl für die freie Strömung ei-

ne Grenze oberhalb derer die Strömung in der Grenzschicht umschlägt. Für  $Re_l$  liegt dieser Umschlagsbereich zwischen  $3,2 \cdot 10^5$  und  $3 \cdot 10^6$ . Oberhalb dieses Bereiches ist die Grenzschicht sicher turbulent (mit laminarer Unterschicht), darunter laminar. Im Normalfall ist mit dem Wert von  $3,2 \cdot 10^5$  zu rechnen, nur bei besonders störungsfreier Anströmung kann der obere Wert erreicht werden (BÖSWIRTH).

$$Re_l = \frac{u_\infty \cdot l \cdot \rho_L}{\eta} \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (24)$$

- $Re_l$  : Reynoldszahl
- $u_\infty$  : Windgeschwindigkeit in unendlicher Entfernung über der überströmten Fläche
- $l$  : überströmte Länge
- $\eta_L$  : Viskosität der Luft
- $\rho_L$  : Dichte der Luft

Mit empirisch gefundenen Gleichungen kann dann aus dieser Größe  $Re_l$  die Depositionsgeschwindigkeit berechnet werden. Je nach Vorliegen von turbulenter oder laminarer Grenzschicht ergeben sich dabei folgende Beziehungen:

#### 1. laminare Grenzschicht:

$$\frac{v_d}{u_\infty} = 0,478 \cdot Re_l^{-0,5} \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (25)$$

- $v_d$  : Depositionsgeschwindigkeit
- $u_\infty$  : Windgeschwindigkeit in unendlicher Entfernung über der überströmten Fläche
- $Re_l$  : Reynoldszahl

Tabelle 16: Versuchsbedingungen für die Bestimmung der Abhängigkeit der Deposition von  $SO_2$  auf Passivsammlern von der Windgeschwindigkeit.

Parameter:	eingestellter Wert:
Windgeschwindigkeit:	variabel
Temperatur:	300 K
Luftfeuchtigkeit:	0 % rH
Konzentration $SO_2$ :	0,5 ppmV
Exponierungszeit:	8 h

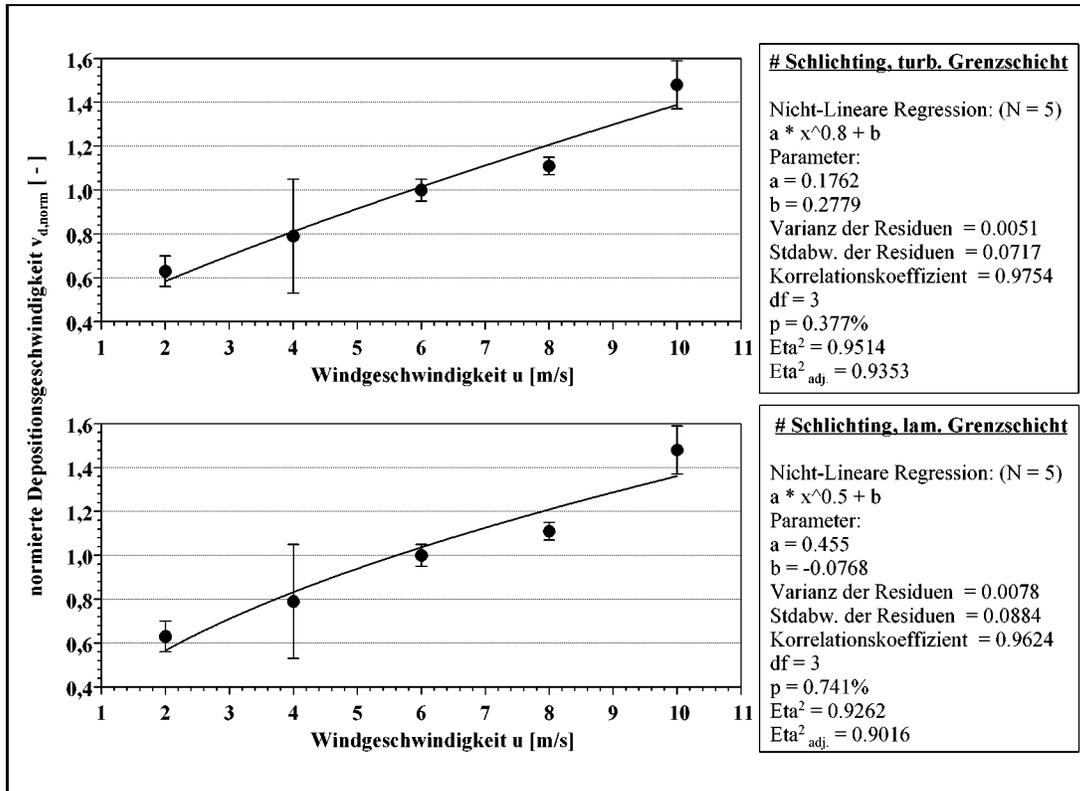


Abbildung 19: Veränderung der Depositionsgeschwindigkeit von  $\text{SO}_2$  auf Passivsammlern bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten,  $0,5 \text{ ppmV SO}_2$ ,  $300 \text{ K}$  und  $0\%$  relativer Feuchte. Dargestellt sind die Ergebnisse der IC-Messungen (Meßreihe 96) mit verschiedenen Fits nach SCHLICHTING. Im unteren Teil der Abbildung ist die Ausgleichsfunktion unter Annahme einer laminaren Grenzschicht berechnet, im oberen Teil für eine turbulente Grenzschicht mit laminarer Unterschicht.

## 2. turbulente Grenzschicht:

$$\frac{v_d}{u_\infty} = 0,02664 \cdot Re_l^{-0,2} \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (26)$$

- $v_d$  : Depositionsgeschwindigkeit
- $u_\infty$  : Windgeschwindigkeit in unendlicher Entfernung über der überströmten Fläche
- $Re_l$  : Reynoldszahl

Nach Einsetzen von  $Re_l$ , Umformung und Zusammenfassung aller konstant gehaltenen Werte ergeben sich folgende Abhängigkeiten der Depositionsgeschwindigkeit von

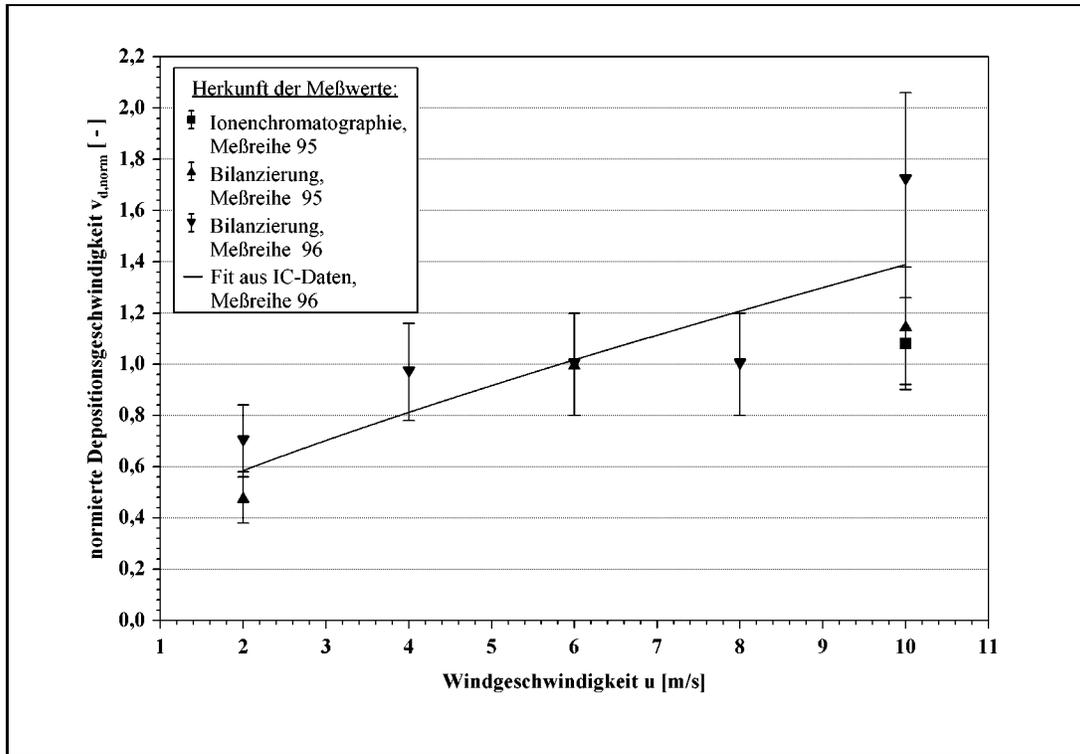


Abbildung 20: Veränderung der Depositionsgeschwindigkeit von  $\text{SO}_2$  auf Passivsammlern bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten,  $0,5 \text{ ppmV SO}_2$ ,  $300 \text{ K}$  und  $0\%$  relativer Feuchte. Neben dem Fit für die turbulente Grenzschicht nach Schlichtung nach Abbildung 19 sind die Ergebnisse aus Gasbilanzmessungen (Meßreihen 95 und 96), sowie aus IC-Messungen (Meßreihe 95) dargestellt.

der Windgeschwindigkeit:

### 1. laminare Grenzschicht:

$$v_d = a_1 \cdot u_\infty^{0,5} \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (27)$$

- $v_d$  : Depositionsgeschwindigkeit
- $a_1$  : Konstante
- $u_\infty$  : Windgeschwindigkeit in unendlicher Entfernung über der überströmten Fläche

## 2. turbulente Grenzschicht:

$$v_d = a_2 \cdot u_\infty^{0,8} \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (28)$$

- $v_d$  : Depositionsgeschwindigkeit
- $a_2$  : Konstante
- $u_\infty$  : Windgeschwindigkeit in  
unendlicher Entfernung über  
der überströmten Fläche

Mit beiden Beziehungen wurde versucht, die erhaltenen Daten zu fitten. Da die Depositionsgeschwindigkeit auch ohne Vorliegen von Wind einen Wert größer Null annimmt, wird eine zusätzliche Konstante  $b$  in die Fitfunktionen eingeführt.

Wie der Abbildung 19 entnommen werden kann, passen die erhaltenen Meßdaten wie erwartet sehr gut zu der für die turbulente Grenzschicht erhaltenen Beziehung und weniger gut zu der für die laminare Grenzschicht aufgestellten Gleichung. Die vollständige Vorausberechnung der zu erwartenden Depositionsgeschwindigkeit ist nicht möglich, ohne ein zeitabhängiges Glied einzuführen. Da die Anströmbedingungen des Probenhalters bedingt durch die stumpfe Kante nicht ideal sind, wäre der mathematische Aufwand kaum gerechtfertigt.

Aus den erhaltenen Depositionsgeschwindigkeiten kann durch einfache Kehrwertbildung der aerodynamische Widerstand des Systems bei der entsprechenden Windgeschwindigkeit erhalten werden. Für diese Funktion wurde ein Fit durch Umformung der oben angegebenen Beziehungen bestimmt. Da die erhaltenen Meßwerte besser zur turbulenten Grenzschicht passen, sei an dieser Stelle nur noch für diesen Fall die Fit-Funktion dargestellt:

$$R_A = \frac{1}{a_2 \cdot u_\infty^{0,8} + b} \quad ; \text{ darin bedeuten:} \quad (29)$$

- $R_A$  : normierter, Aerodynamischer  
Widerstand
- $a_2$  : Konstante, zu 0,154 bestimmt
- $b$  : Konstante, zu 0,352 bestimmt
- $u_\infty$  : Windgeschwindigkeit in  
unendlicher Entfernung über  
der überströmten Fläche

## 5.4 Einfluß der Schadgaskonzentration

Die Bedingungen für diese Meßreihe sind in der Tabelle 17 angegeben.

Wie aus der Abbildung 21 zu entnehmen ist, wird für die Untersuchungen im Depositionskanal eine ausgeprägte Abhängigkeit der Depositionsgeschwindigkeit von der Konzentration an  $\text{SO}_2$  in der Kanalluft gefunden. In dem hier untersuchten Konzentrationsbereich ist die Abhängigkeit fast linear.

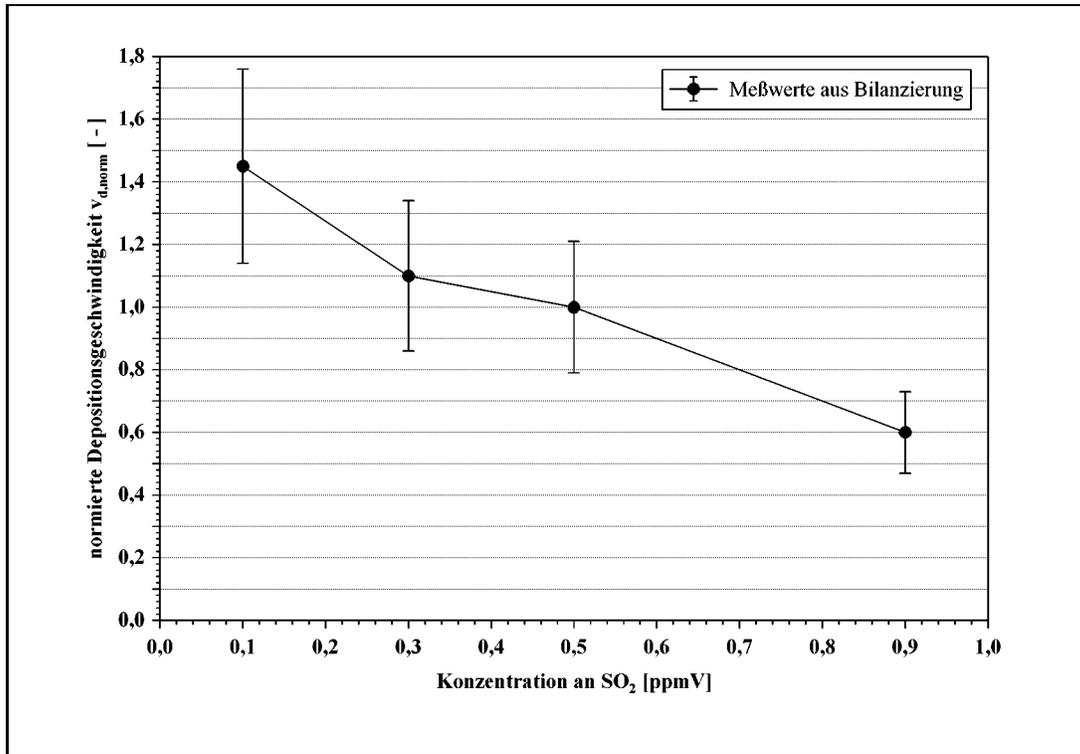


Abbildung 21: Veränderung der Depositionsgeschwindigkeit von SO<sub>2</sub> auf Passivsammlern bei unterschiedlichen SO<sub>2</sub>-Konzentrationen, 6 m/s, 300 K und 0% relativer Feuchte.

Im Vergleich dazu finden andere Autoren in ihren Arbeiten eine exponentielle Abnahme der Depositionsgeschwindigkeit mit zunehmender Konzentration an SO<sub>2</sub>, untersuchen aber auch deutlich geringere Konzentrationsbereiche.

So wird von WITTENBURG(1994) im Bereich unterhalb von 100 ppbV eine exponentielle Abnahme der Depositionsgeschwindigkeit mit zunehmender Konzentration gefunden.

Tabelle 17: Versuchsbedingungen für die Bestimmung der Abhängigkeit der Deposition von SO<sub>2</sub> auf Passivsammlern von der SO<sub>2</sub>-Konzentration im Windkanal.

Parameter:	eingestellter Wert:
Windgeschwindigkeit:	6 m/s
Temperatur:	299 K
Luftfeuchtigkeit:	0 % rH
Konzentration SO <sub>2</sub> :	variabel
Exponierungszeit:	8 h

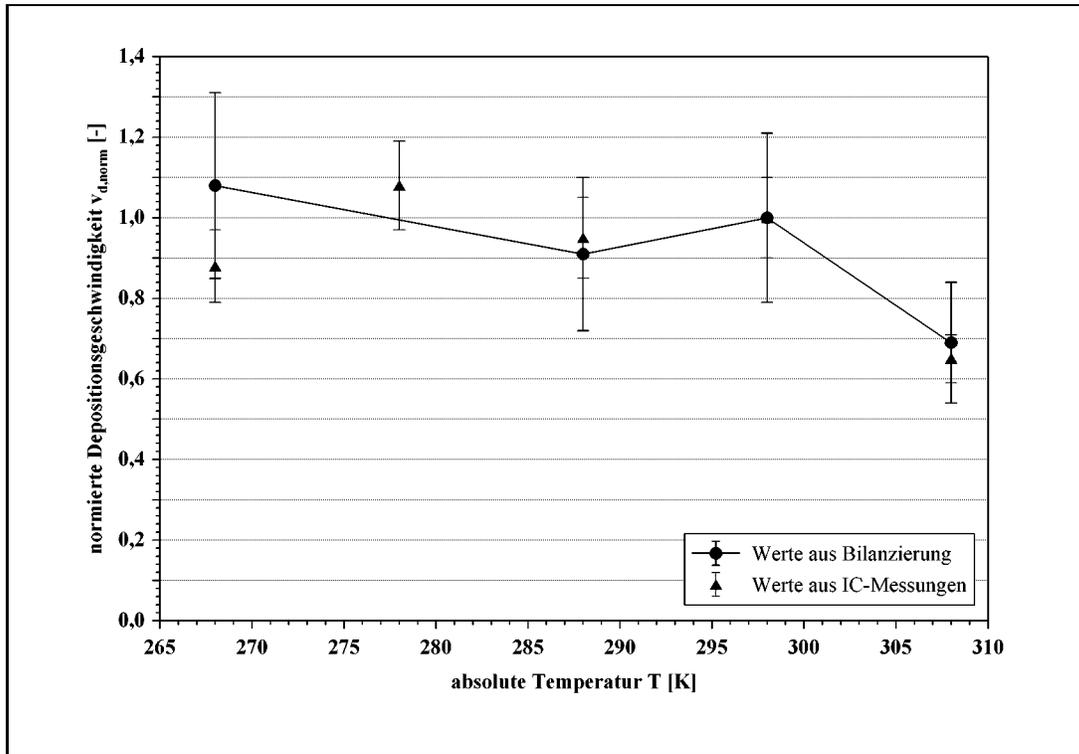


Abbildung 22: Veränderung der Depositionsgeschwindigkeit von  $\text{SO}_2$  auf Passivsammlern bei unterschiedlichen Temperaturen, 6 m/s, 0,5 ppmV  $\text{SO}_2$ , 300 K und 0% relativer Feuchte.

Zu entsprechenden Aussagen kommt auch BEHLEN(1996), der im Bereich von etwa 20 bis 600 ppbV die Abhängigkeit zwischen Depositionsgeschwindigkeit und  $\text{SO}_2$ -Konzentration untersucht hat. Bis etwa 150 ppbV wird in dieser Arbeit eine fast lineare Abnahme angegeben, darunter liegt ein exponentieller Zusammenhang zwischen Depositionsgeschwindigkeit und Konzentration vor.

BOTHMANN(1997) stellt bei Depositionsmessungen auf Pulvern im Bereich von 100 bis 1000 ppbV eine weitgehend lineare Abnahme der Depositionsgeschwindigkeit mit zunehmender Konzentration fest. Unterhalb von etwa 100 ppbV nimmt die Depositionsgeschwindigkeit stärker zu, eine exponentielle Abhängigkeit scheint sich anzudeuten, es wurden in diesem Bereich allerdings nur wenige Meßwerte aufgenommen.

## 5.5 Einfluß der Temperatur

Tabelle 18 enthält die Versuchsbedingungen für die Versuchsreihe mit variabler Temperatur.

Die grafische Darstellung der Ergebnisse (vgl. Abbildung 22) zeigt eine leichte Abnahme der Depositionsgeschwindigkeit mit zunehmender Temperatur in dem in der Anlage realisierbaren Temperaturbereich. Im Bereich von 265 bis 300 K variiert die Depositionsgeschwindigkeit allerdings nur um etwa 10 %. Kleine Schwankungen in der Temperaturregelung sollten demnach nicht zu merklichen Fehlern in der Bestimmung

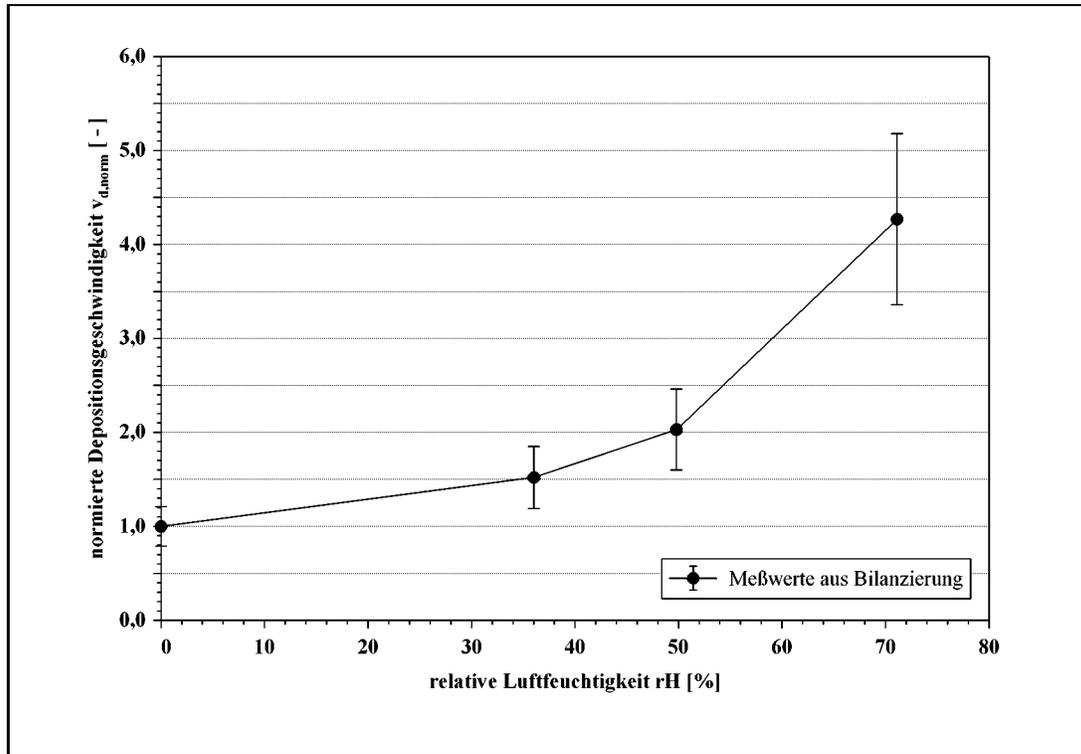


Abbildung 23: Veränderung der Depositionsgeschwindigkeit von  $\text{SO}_2$  auf Passivsammlern bei unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten, 6 m/s, 300 K und 0,5 ppmV  $\text{SO}_2$ .

der Depositionsgeschwindigkeit führen.

## 5.6 Einfluß der Luftfeuchtigkeit

Die Versuchsbedingungen für die Versuchsreihe mit wechselnder Luftfeuchtigkeit sind in der Tabelle 19 angegeben.

Wie die Ergebnisse aus Abbildung 23 zeigen, nimmt die Depositionsgeschwindig-

Tabelle 18: Versuchsbedingungen für die Bestimmung der Temperaturabhängigkeit der Deposition von  $\text{SO}_2$  auf Passivsammlern.

Parameter:	eingestellter Wert:
Windgeschwindigkeit:	6 m/s
Temperatur:	variabel
Luftfeuchtigkeit:	0 % rH
Konzentration $\text{SO}_2$ :	0,5 ppmV
Exponierungszeit:	8 h

keit mit zunehmender Feuchte exponentiell zu. Zu der gleichen Aussage kommt auch BEHLEN(1996), der ähnliche Experimente in einer kleinen Depositionskammer durchgeführt hat.

Im Depositionskanal sind relative Luftfeuchtigkeiten bis maximal 80 % realisierbar, oberhalb von 70 % können Passivsammler allerdings nicht mehr senkrecht auf den Probenhalter aufgeklebt werden. In allen Versuchen lösten sich die Klebeverbindungen einiger Passivsammler und die Filterpapiere wurden abgeweht. Deshalb stehen nicht für den ganzen realisierbaren Bereich der Luftfeuchte auch Meßwerte zur Verfügung.

### 5.7 Gleichwertigkeit der Exponierungsplätze

Alle Versuchsreihen mit Passivsammlern wurden zusätzlich auf Unterschiede zwischen den einzelnen Exponierungsplätzen untersucht. Dazu wurde für jedes Experiment der Mittelwert der abgeschiedenen  $\text{SO}_2$ -Menge bestimmt und dann für jeden einzelnen Passivsammler eine prozentuale Abweichung von diesem Mittelwert berechnet.

Diese Abweichungen wurden für Passivsammler aus unterschiedlichen Versuchen, aber gleichen Exponierungsplätzen wiederum gemittelt. Das Ergebnis ist in Abbildung 24 dargestellt. Es zeigt sich, daß Abweichungen zwischen einzelnen Exponierungsplätzen in keinem Fall größer als 3% sind. Die Standardabweichung für Meßwerte an einem Exponierungsplatz liegt mit mindestens 7,5% in jedem Fall höher. Es ist also im Rahmen der experimentell erreichten Genauigkeit keine Ungleichmäßigkeit an den Exponierungsstellen erkennbar.

### 5.8 Fehlerbetrachtung

Für alle ionenchromatographisch erhaltenen Werte wurde für den Fehler in den Abbildungen die relative Standardabweichung aus den acht erhaltenen Passivsammlerelutaten pro Versuch eingesetzt.

In der Abbildung 25 sind die Ergebnisse aller Elutionen aus den oben beschriebenen Versuchen in einer Übersichtsgrafik zusammengefaßt. Damit die Werte vergleichbar sind, wurde für jedes Experiment der Mittelwert zu 100 % gesetzt und dann die relative Standardabweichung als Fehlerbreite eingetragen.

Die Mehrzahl der Elutionen liefert damit über das gesamte Verfahren (Zubereitung der Passivsammler, Exponierung, Elution und Vermessung mittels Ionenchroma-

Tabelle 19: Versuchsbedingungen für die Bestimmung der Abhängigkeit der Deposition von  $\text{SO}_2$  auf Passivsammlern von der relativen Luftfeuchtigkeit.

Parameter:	eingestellter Wert:
Windgeschwindigkeit:	6 m/s
Temperatur:	302 K
Luftfeuchtigkeit:	variabel
Konzentration $\text{SO}_2$ :	0,5 ppmV
Exponierungszeit:	8 h

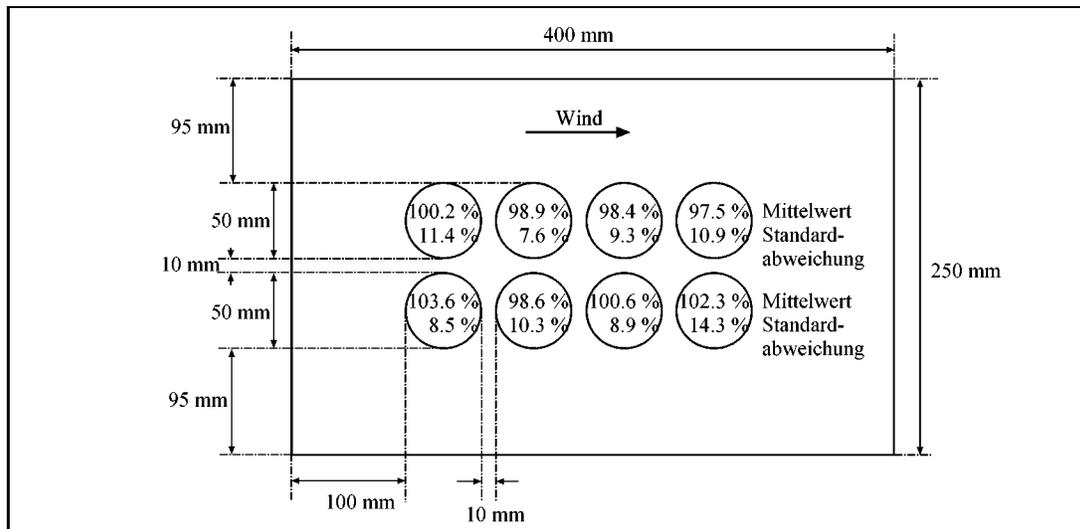


Abbildung 24: Zur Überprüfung der Gleichwertigkeit der einzelnen Exponierungsplätze wurde die Abweichung einzelner Passivsammler vom Mittelwert aller acht in einem Experiment eingesetzten Sammler berechnet und für alle Versuche statistisch ausgewertet. Die Exponierungsplätze sind im Rahmen der experimentellen Genauigkeit gleichwertig.

tographie) eine Standardabweichung von weniger als 10 %, wobei einige Extremwerte deutlich höhere Abweichungen vom Mittelwert liefern. Bei einigen Versuchen liegt der Gesamtfehler höher. Dies ist immer dann der Fall, wenn ungünstig große Verdünnungen vorzunehmen waren, um im Meßbereich der IC zu bleiben. Eine Ausnahme stellt der Vier-Stunden-Wert der Zeitreihe dar, hier liegt der Fehler besonders hoch. Dies ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf einen Verdünnungsfehler zurückzuführen. Da aber ein glaubwürdiger Wert aus der Bilanzierung vorlag, wurde der Versuch nicht wiederholt.

Für die Ergebnisse, die aus der Gasbilanzierung berechnet wurden, wird der mittlere Fehler zu 20 % abgeschätzt. Dieser Wert ist für die Fehlerbalken in den obigen Grafiken eingesetzt worden.

## 5.9 Einfache Modellierung von Gebäudeumströmungen

In einer weiteren Versuchsreihe wurde überprüft, ob der Depositionskanal geeignet ist, Gebäudeumströmungen modellhaft zu untersuchen. Die lokale Depositionsgeschwindigkeit ist über einer Akzeptorfläche im baulichen Verbund stark abhängig von den örtlichen Strömungsverhältnissen. Untersuchungen an Gebäuden im Freiland bzw. modellhaften Nachbildungen im Windkanal haben bisher nicht zu ausreichendem Datenmaterial geführt, so daß nach LIPFERT(1989) großes Interesse an weiteren Untersuchungen besteht.

Während das Strömungsprofil über den Kanalquerschnitt als ausreichend homogen für die Versuche mit Passivsammlern und Gesteinsprüfkörpern angesehen wurde, kann für die Modellierung von Gebäudeumströmungen eine weitere Vergleichmäßigung der

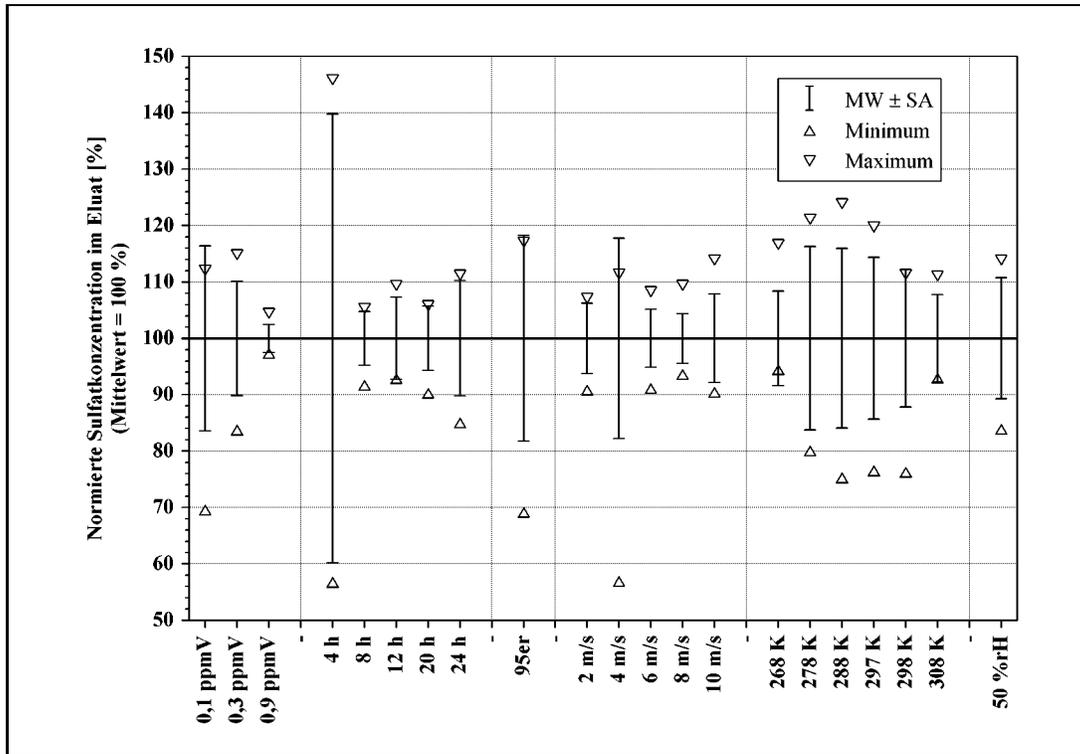


Abbildung 25: Zur Abschätzung des mittleren Fehlers in einem Experiment mit Passivsammlern und zum Vergleich der verschiedenen Versuchsserien untereinander sind in dieser Darstellung jeweils Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen Versuche dargestellt. Dabei wurde der Mittelwert auf 100 % gesetzt.

Tabelle 20: Versuchsbedingungen für die einfache Modellierung von Gebäudeumströmungen.

Parameter:	eingestellter Wert:
Windgeschwindigkeit:	6 m/s
Temperatur:	288 K
Luftfeuchtigkeit:	0 % rH
Konzentration SO <sub>2</sub> :	0,5 ppmV
Exponierungszeit:	20 h

Strömungsverhältnisse nötig sein. In der hier beschriebenen Versuchsreihe sollte zunächst geklärt werden, ob unter den Bedingungen im Kanal überhaupt Effekte, die auf Veränderungen des Strömungsfeldes durch Gebäudegeometrien beruhen, erfaßt werden können.

Dazu wurde als einfaches Modell eines Gebäudes ein Würfel aus den in Kapi-

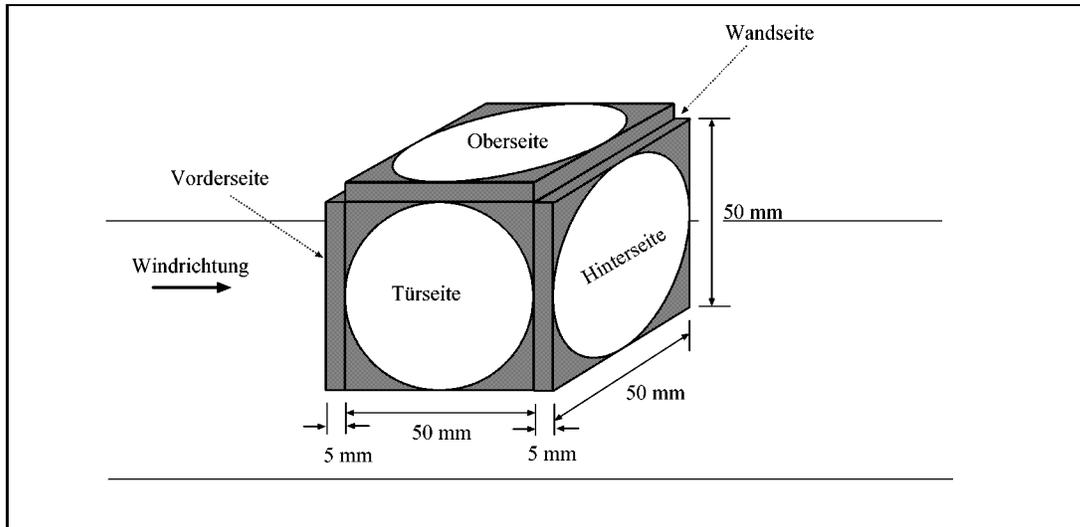


Abbildung 26: Versuchsaufbau zur einfachen Modellierung der Umströmung von Gebäuden. Aus überschüssigen Gesteinsplättchen wurden würfelförmige Modelle geklebt und mit Passivsammlern bestückt. Nach der Exponierung wurden die Passivsammler abgezogen und aufgearbeitet.

Tabelle 21: Ergebnisse der Versuche zur einfachen Modellierung der Gebäudeumströmung. Angegeben sind jeweils Mittelwert und Standardabweichung aus drei Versuchen. Die Nomenklatur der Passivsammler entspricht der Abbildung 26.

Fläche:	rel. deponierte Menge SO <sub>2</sub> [%]:
Vorderseite	100,0 ± 6,1
Türseite	86,9 ± 8,0
Oberseite	77,4 ± 13,5
Wandseite	94,3 ± k.A.†
Rückseite	94,1 ± 2,3

†: nur ein Meßwert erhalten

tel 7.1 beschriebenen Gesteinsplättchen angefertigt. Auf die Flächen dieses Würfels wurden Passivsammler aufgeklebt und das Ganze im Kanal exponiert. Nach Beendigung des Experimentes wurden die Passivsammler entfernt und wie in Abschnitt 5.1.2 beschrieben aufgearbeitet. Eine Auswertung über bilanzierende Gasmessungen ist bei Versuchen mit ungleichwertigen Exponierungsplätzen natürlich nicht möglich.

Die Versuchsbedingungen sind in Tabelle 20, der Aufbau in Abbildung 26 und die Ergebnisse in Tabelle 21 dargestellt. Es fällt auf, daß zwar das Verhältnis der verschiedenen Würfelflächen zueinander in allen Versuchen gleich ist (so findet man immer maximale Abscheidung an der Stirnfläche), die Absolutbeträge aber von Versuch zu

Tabelle 22: Vergleich zwischen den Depositionsgeschwindigkeiten von  $\text{SO}_2$  auf Passivsammlern aus verschiedenen Arbeiten.

Rezeptor:	$v_d$ [cm/s]			
	MANGELS:	SPIKER:	BOTHMANN:	NOWATZKY:
Passivsammler (100 h)	0,5	-	-	$0,5 \pm 10 \%$
Passivsammler (24 h)	1,25	1,3	$0,83 \pm 0,1$	$1,5 \pm 6 \%$
$c(\text{SO}_2)$ [ppmV]	1	0,05	0,5	0,5
rH [%]	?	75	?	0
u [m/s]	?	6	-	6
Bemerkungen	Reaktor 1 Fehler: $\pm 15 \%$	berechnet aus Daten-Fit des Autors	Reaktor 2	-

Versuch stark schwanken. Weiterhin sagt die Theorie maximale Depositionsgeschwindigkeiten an den hinteren Seitenflächen voraus, da hier Ablösewirbel auftreten sollen. Mit dem hier gewählten Aufbau wird aber nur ein Mittelwert über die gesamte Fläche erhalten, so daß diese Vorhersage nicht überprüft werden kann.

Insgesamt zeigt sich, daß im Depositionskanal sehr wohl Untersuchungen dieser Art durchgeführt werden können. Es sind Unterschiede in der Depositionsgeschwindigkeit, die auf unterschiedliche Strömungsbedingungen zurückzuführen sind, erkennbar. Für weitergehende Untersuchungen muß allerdings ein Aufbau gewählt werden, der eine verbesserte räumliche Auflösung der Depositionsmessung erlaubt. Dazu wären eventuell kleinere Passivsammler einzusetzen oder auf die von MANGELS(1992) eingesetzte Schubspannungssonde auszuweichen.

## 5.10 Ergebnis der Passivsammleruntersuchungen

Zusammenfassend läßt sich über die Versuchsreihen mit Passivsammlern feststellen, daß der Einfluß der einzelnen Versuchsparameter im Depositionskanal mit dieser Methode gut untersucht werden kann.

Mit der gleichfalls eingesetzten Bestimmung der Depositionsgeschwindigkeit aus der Bilanzierung des  $\text{SO}_2$ -Stromes stimmen die aus der naßchemischen Analyse erhaltenen Werte gut überein. Dabei sind die Werte aus der Gasbilanzierung schneller und kostengünstiger zu erhalten. Es sind bei Anwendung dieses Verfahrens allerdings längere Versuchsdauern hinzunehmen. Sowohl vor dem Beginn des eigentlichen Experimentes als auch danach sind Nullwerte für den leeren Kanal aufzunehmen.

In der Tabelle 22 sind die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Depositionsgeschwindigkeiten für Schwefeldioxid auf Passivsammleroberflächen den Ergebnissen anderer Autoren gegenübergestellt. Soweit möglich wurden dabei die Meßbedingungen mit angegeben, da ohne Kenntnis der genauen Versuchsbedingungen Vergleiche wenig aussagekräftig sind.

Im Kapitel 8.4.2 sind entsprechende Daten für die Untersuchungen von Natursteinoberflächen zusammengestellt (siehe Tabelle 29).

## 6 Auswahl und Charakterisierung der untersuchten Gesteinsarten

### 6.1 Auswahl der untersuchten Gesteinsarten

Aus der Vielzahl der in Bauwerken eingesetzten Naturwerksteine konnte im zeitlichen Rahmen der Untersuchungen für diese Arbeit naturgemäß nur ein Ausschnitt von Gesteinsarten eingesetzt werden. Für die Auswahl der eingesetzten Gesteine war sowohl eine gute Vergleichbarkeit innerhalb der Untersuchungsserien im Rahmen dieser Arbeit, als auch eine möglichst gute Vergleichbarkeit zu den Arbeiten anderer Experimentatoren wichtig.

Um der ersten Forderung Genüge zu tun, wurden die eingesetzten Steinplättchen einer Sorte jeweils aus einem bruchfrischen Block gesägt. Damit waren Variationen innerhalb einer Sorte minimiert. Damit die leichte Vergleichbarkeit mit anderen Arbeiten in der Arbeitsgruppe DANNECKER gewährleistet blieb, wurden nur Gesteinsarten eingesetzt, die zeitgleich in der Simulationskammer von BOTHMANN (1997) zum Einsatz kamen. Sowohl die in der Kammer eingesetzten Blockprüfkörper als auch die im Rahmen dieser Untersuchungen benutzten Gesteinsplättchen wurden zeitgleich bei der Firma PRESSBAU aus lagengleichen Gesteinsquadern gesägt.

Untersucht wurde ein Querschnitt über die möglichen Widerstandsfähigkeiten gegen Verwitterung bei Sedimentgesteinen. Die folgende Beschreibung der einzelnen Gesteine ist dem **Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine** von GRIMM entnommen worden:

- Ihrlersteiner Grünsandstein, als Beispiel für einen mäßig bis gering verwitterungsbeständigen Kalksandstein.

Dieses Gestein ist von grüner bis grünbrauner Färbung mit weißen Fossilresten von Zweischalern. Die Fossilreste sind im Gestein unregelmäßig verteilt und unterschiedlich stark aufgearbeitet. Das Gestein enthält teilweise Partien mit lückigem Gefüge (GRIMM).

- Krensheimer Muschelkalk, als Beispiel für ein gut verwitterungsbeständiges Gestein.

Der Krensheimer Muschelkalk ist von hellbrauner bis rotbrauner Farbe. Er ist ein feinporiger Schalenrümmerkalkstein aus sehr dicht gepackten, im Mittel 5 bis 7 mm großen Muschel- und Brachiopodenschalen. Die Poren sind teils offen, teils mit Residualmaterial aufgefüllt.

- Obernkirchner Sandstein, als Beispiel für ein sehr gut verwitterungsbeständiges Gestein.

Beim Obernkirchner Sandstein handelt es sich um einen homogenen, kieseligen grobsiltig bis feinsandigen Sandstein von grau- bis gelblichweißer Färbung, z. T. mit blasser Eisenbänderung. Oft findet man weiße, kaolinitreiche Flecken, die Fossilshalen ähneln.

- sowie Sander Sandstein, als Beispiel für ein tonmineralig gebundenes Gestein mit hoher Feuchteanfälligkeit.

Der Sander Sandstein ist ein braun- bis olivgrüner, fein- bis mittelporiger Schilfsandstein mit feinverteilten, schwarzen Pünktchen und Hellglimmer.

## 6.2 Charakterisierung der untersuchten Gesteinssorten

Die Charakterisierung der Gesteinssorten erfolgte durch Heranziehung der Literaturdaten (GRIMM) und aus Untersuchungen von BOTHMANN(1997).

Bedingt durch die mögliche starke Variabilität innerhalb einer Gesteinssorte kann die Betrachtung von Literaturdaten zur chemischen Charakterisierung nicht ausreichen. Es wurden daher die Bestandteile von jeweils einer Probe von jeder Gesteinssorte untersucht. Dazu wurden von BOTHMANN(1997) pulverisierte Gesteinsproben in Form von Wachspellets mit einem Röntgenfluoreszenzspektrometer der Firma SPECTRO X-RAY INSTRUMENTS, Kleve, untersucht. Die verwendete Röntgenröhre war mit einer Rhodiumanode ausgestattet.

In der folgenden Tabelle sind die chemischen und physikalischen Eigenschaften der verwendeten Gesteinssorten zusammengefaßt.

Für weitergehende Informationen über die eingesetzten Sedimentgesteine sei an dieser Stelle auf das Werk von GRIMM (petrografische Daten) und die Untersuchungen im Arbeitskreis von BEHLEN(1996), BOTHMANN(1997), MANGELS(1992) sowie WITTENBURG(1994) verwiesen.

Tabelle 23: Die chemischen und physikalischen Daten zur Charakterisierung der eingesetzten Gesteinsorten nach GRIMM und BOTHMANN(1997)

Quelle:	Parameter:	Ihrlersteiner Grünsandstein	Krensheimer Muschelkalk	Obernkirchner Sandstein	Sander Sandstein
Grimm	Komponenten:	42 %	75 %	77%	78 %
		Quarz: 63 % Glauconit: 15 % Bruchstücke: 11 %	Schalenreste: 75 % Extraktlasten: 22 % Akzessorien: 3 %	Quarz: 81 % Bruchstücke: 17 % Schwerminerale: 1 %	Quarz: 54 % Bruchstücke: 32 % Plasioklas: 7 %
	Bindemittel:	47 % calcitisch, dolomitisch	5 % sparitischer Zement	7 % kieselig, direkte Quarzanwachstäume	9 % tonig-chloritisch
	sichtbarer Porenraum:	11 %	20 %	16 %	14 %
	Porosität:	12,7 Vol.-%	13,9 Vol.-%	20,6 Vol.-%	20 Vol.-%
	Struktur:	Korngröße: 0,1 - 0,7 mm	Schalengröße: 5 - 7 mm	Korngröße: 0,04 - 0,15 mm	Korngröße: 0,1 - 0,4 mm
Bothmann	SiO <sub>2</sub>	24,8 %	0,89 %	95,2 %	75,4 %
	CaCO <sub>3</sub>	70,1 %	97,9 %	0,07 %	1,14 %
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,07 %	< NWG	3,51 %	11,7 %
	MgO	0,48 %	0,31 %	< NWG	2,41 %
	Na <sub>2</sub> O	< NWG	< NWG	< NWG	2,0 %
	K <sub>2</sub> O	0,72 %	0,07 %	0,16 %	3,61 %
	TiO <sub>2</sub>	0,11 %	0,01 %	0,39 %	0,46 %
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,05 %	0,27 %	0,19 %	3,02 %
	SrO	0,01 %	0,13 %	0,01 %	< NWG
	BaO	0,01 %	0,01 %	0,01 %	< NWG

## 7 Vorbewitterung von Gesteinsproben

### 7.1 Durchführung der Vorbewitterung

Bei der Nachbildung von Verwitterungsvorgängen in kontrollierbaren Laborumgebungen treten zwei Hauptprobleme auf:

- Es muß die Vergleichbarkeit der im Labor gewonnenen Erkenntnisse mit den unter natürlichen Bedingungen ablaufenden Vorgängen gewährleistet werden.
- Da die zu untersuchenden Vorgänge unter natürlichen Bedingungen langsam verlaufen, müssen entweder unpraktikabel lange Simulationszeiten in Kauf genommen oder Zeitraffungen durchgeführt werden. Bei allen Verfahren zur Beschleunigung der untersuchten Prozesse (z.B. durch Überhöhung der Schadstoffkonzentration) besteht die Gefahr, systematische Abweichungen in die Untersuchungen einzubringen.

Um die oben genannten Probleme zu minimieren, wurde ein Teil der zu untersuchenden Proben im Freiland vorberewittert. Dazu wurden Gesteinsplättchen auf dem Werksgelände der Firma THYSSEN in Duisburg exponiert. Die Standortwahl erfolgte aufgrund der Tatsache, daß dort ein Prüffeld für Gesteinsprüfkörper mit Meßcontainer zur Erfassung der relevanten Luftinhaltsstoffe zur Verfügung stand und die Luftbelastung relativ hoch liegt. Damit sollte schon bei vergleichsweise kurzer Exponierungszeit ein Effekt feststellbar sein.



Abbildung 27: Tische mit Gesteinsproben zur Vorbewitterung im Freiland

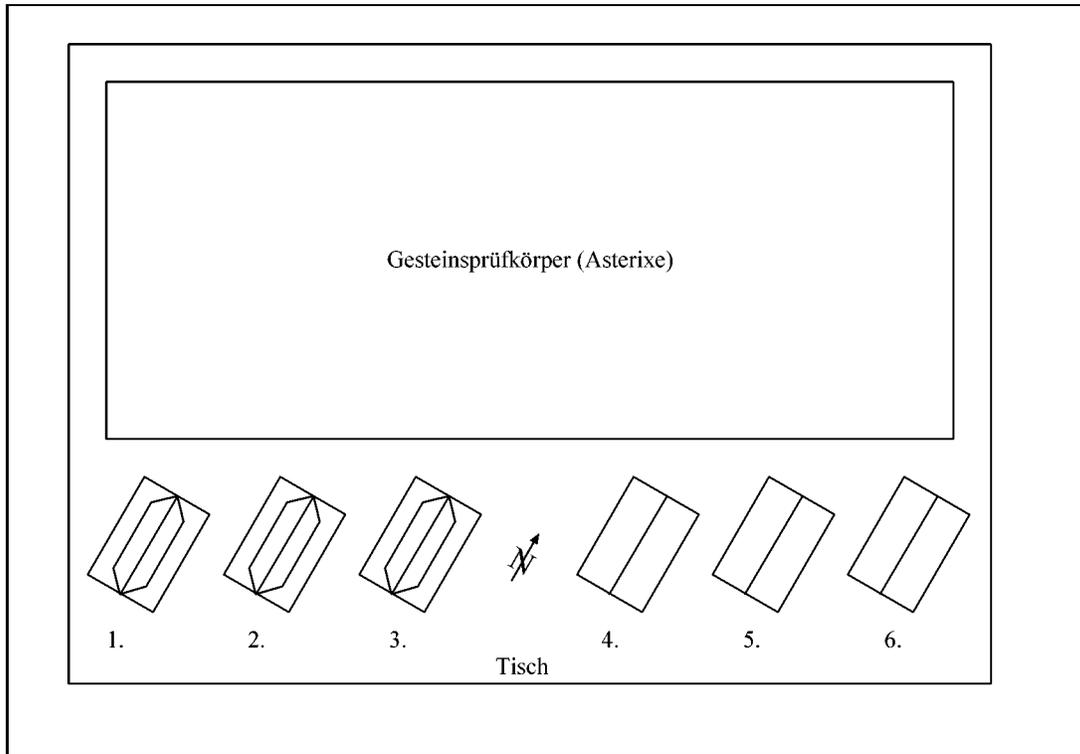


Abbildung 28: Anordnung der Tische zur Probenvorbewitterung auf dem Prüffeld in Duisburg

Zusammen mit den Gesteinsplättchen für die Versuche am Depositionskanal wurden auch Blockprüfkörper zur Untersuchung in der Simulationskammer exponiert [siehe BOTHMANN (1997)]. Dazu wurden Tische aus Stahlprofil und PVC-Platten aufgebaut, auf denen die Proben gelagert wurden. Abbildung 27 zeigt den Aufbau dieser Tische. Die Steinplättchen wurden in Kopfhöhe unter Regenschutzdächern gelagert. Dieser Aufbau entspricht den von WITTENBURG (1994) beschriebenen Trägern für Gesteinsprüfkörper, die hier eingesetzten Träger sind lediglich etwas länger. Gut erkennbar sind die beiden Reihen mit jeweils identischer Beladung an Probekörpern. Die einzelnen Plättchen haben die Maße 50 x 50 x 5 mm. Im unteren Teil der Tische sind flankenversiegelte Blockprüfkörper unter einer PVC-Platte gelagert, die nur die Stirnfläche der Steine der Witterung preisgibt.

Der gesamte Aufbau ist in Abbildung 28 skizziert. Alle Tische trugen Blockprüfkörper, die Gesteinsplättchen für die Untersuchungen im Depositionskanal waren nur an den Plätzen mit den Nummern 1,2 und 3 angebracht. Die Anordnung der Tische erfolgte so, daß jeweils die Hälfte der Probekörper in westliche und die andere Hälfte in östliche Richtung exponiert waren. Damit sollten unterschiedliche Bewitterungsbedingungen durch windab- bzw. zugewandte Orientierung erzeugt werden. In den beiden Reihen eines Probenträgers standen jeweils gleiche Steinsorten übereinander. Innerhalb einer Reihe folgten die untersuchten Gesteinssorten periodisch aufeinander.

Tabelle 24: Übersicht über die Vorexponierung von Gesteinsplättchen auf dem Prüffeld Duisburg. Die am 16.02.94 gewechselten Proben der Positionen 1 bis 4 wurden abweichend von der sonstigen Praxis in C (obere Reihe) und D (untere Reihe) statt A und B umbenannt, damit sie von den Proben der ersten Probenahme unterscheidbar sind.

Proben:	Austausch am:	Exponierungsdauer:
1W1 - 4 je A und B 1E1 - 4 2W1 - 4 2E1 - 4 3W1 - 4 3W1 - 4	16.12.1993	1 Monat
1W1 - 4, je C und D 1E1 - 4 2W1 - 4 2E1 - 4 3W1 - 4 3W1 - 4 1W5 - 8, je A und B 1E5 - 8 2W5 - 8 2E5 - 8 3W5 - 8 3W5 - 8	16.02.1994	2 Monate      3 Monate
1W17 - 20, je A und B 1E17 - 20 2W17 - 20 2E17 - 20 3W17 - 20 3W17 - 20	18.05.1994	6 Monate
1W13 - 16, je A und B 1E13 - 16 2W13 - 16 2E13 - 16 3W13 - 16 3W13 - 16	15.11.1994	1 Jahr

In regelmäßigen Abständen wurden die Probekörper gegen jeweils frische ausgetauscht und zur Untersuchung in das Hamburger Labor verbracht. Eine Hälfte der exponierten Proben wurde direkt zur Elution und ionenchromatographischen Untersuchung eingesetzt, die andere Hälfte im Depositionskanal untersucht (siehe Kapitel

Tabelle 25: Übersicht über die weitere Behandlung der vorexponierten Gesteinsplättchen. Jeweils die Hälfte der Plättchen einer Sorte wurde sofort eluiert, der Rest wurde im Depositionskanal weiter untersucht. Um ggf. systematische Unterschiede zwischen den beiden Reihen eines Probenträgers erkennen zu können, wurden sowohl Proben der oberen als auch der unteren Reihe sofort eluiert.

Tisch:	Orientierung:	Reihe:	Eluation:	Depositionskanal:
1	W	A	x	
1	W	B		x
1	E	A		x
1	E	B	x	
2	W	A		x
2	W	B	x	
2	E	A	x	
2	E	B		x
3	W	A	x	
3	W	B		x
3	E	A		x
3	E	B	x	

8). Insgesamt wurden 288 Probekörper exponiert, je 72 Plättchen der Gesteinsarten Obernkirchner Sandstein, Krensheimer Muschelkalk, Ihrlersteiner Grünsandstein und Sander Sandstein. Das Freilandexperiment begann am 16.11.1993 mit dem Aufbau der Tische und der Ausbringung der Proben; die letzte Probenahme für die vorliegende Arbeit erfolgte am 15.11.1994.

In der Tabelle 24 sind die Exponierungszeiten für die untersuchten Gesteinsprüfkörper aufgeführt. Jede Probe wird durch eine codierte Probenbezeichnung identifiziert. Als erstes ist die Tischnummer angegeben, gefolgt von einem Buchstaben für die Himmelsrichtung, der die Oberfläche zugewandt war. Eine weitere Zahl gibt den Platz der Probe im Probenhalter an, beginnend mit 1 für die Probenposition links außen (bei Ansicht von vorn). Ein weiterer Buchstabe gibt schließlich noch die Reihe an, in der die betreffende Probe im Halter befestigt war. A steht für die obere und B für die untere Reihe (siehe Abbildung 27).

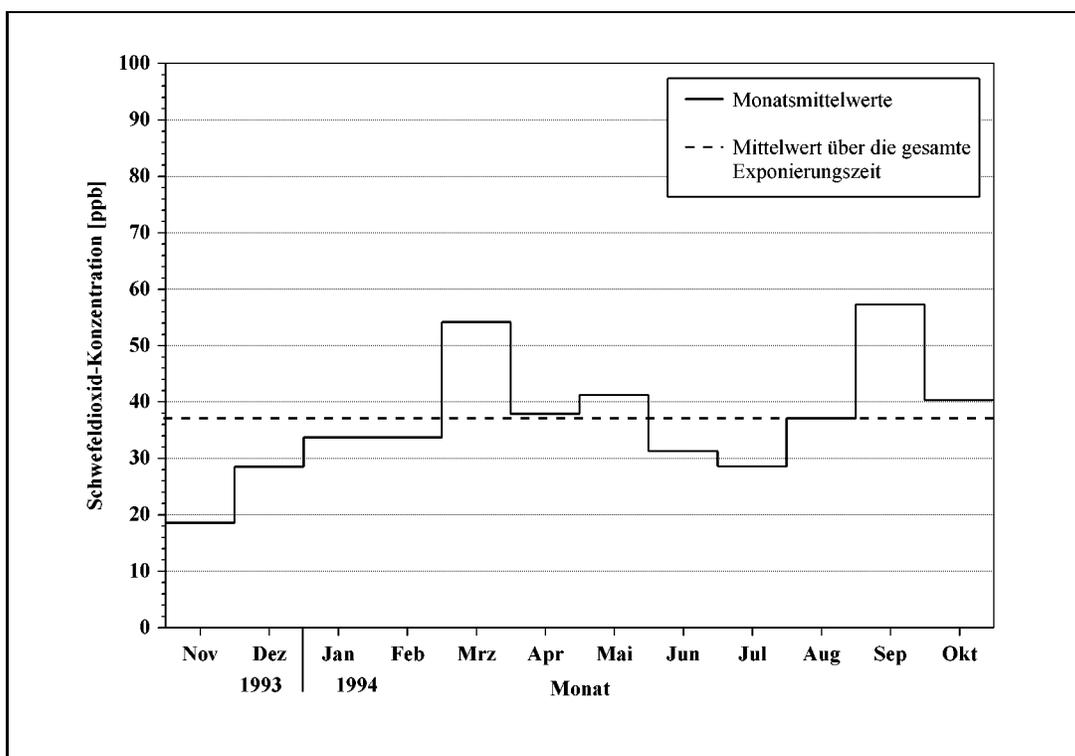


Abbildung 29: Darstellung der Monatsmittelwerte der Schwefeldioxidkonzentration auf dem Prüffeld in Duisburg während der Freilandbewitterung. Die Daten wurden während des Exponierungszeitraumes kontinuierlich durch einen am selben Ort aufgestellten Meßcontainer aufgezeichnet.

## 7.2 Relevante Umweltdaten aus dem Meßcontainer im Exponierungszeitraum

Auf dem Prüffeld stand zur kontinuierlichen Luftüberwachung ein mit Meßgeräten zur Schadgasmessung bestückter Container zur Verfügung. Aus den im Exponierungszeitraum gemessenen Daten wurden Mittelwerte gebildet, mit denen die Berechnung der Depositionsgeschwindigkeit vorgenommen wurde.

Bedingt durch Ausfallzeiten des  $\text{SO}_2$ -Meßgerätes waren nicht für jeden Tag Daten verfügbar. Insbesondere am Ende der hier betrachteten Versuchsreihe sind die Meßdaten lückenhaft.

In der Abbildung 29 sind die Meßdaten zu Monatsmittelwerten zusammengefaßt. Damit erhält man eine gut lesbare Übersicht über die Immissionssituation auf dem Prüffeld in Duisburg. Bei BOTHMANN(1997) sind weitergehende Aufgliederungen der Daten zu mittleren Tagesgängen und Jahresgängen zu finden.

Für die Beurteilung der Vorbewitterung besonders wichtig sind natürlich Mittelwerte über die Exponierungszeiten. In der Abbildung 30 werden die Daten über die jeweiligen Exponierungszeiträume gemittelt dargestellt. Dabei gibt die Länge des waagerechten Balkens die Exponierungszeit wieder, die Höhe zeigt die mittlere  $\text{SO}_2$ -

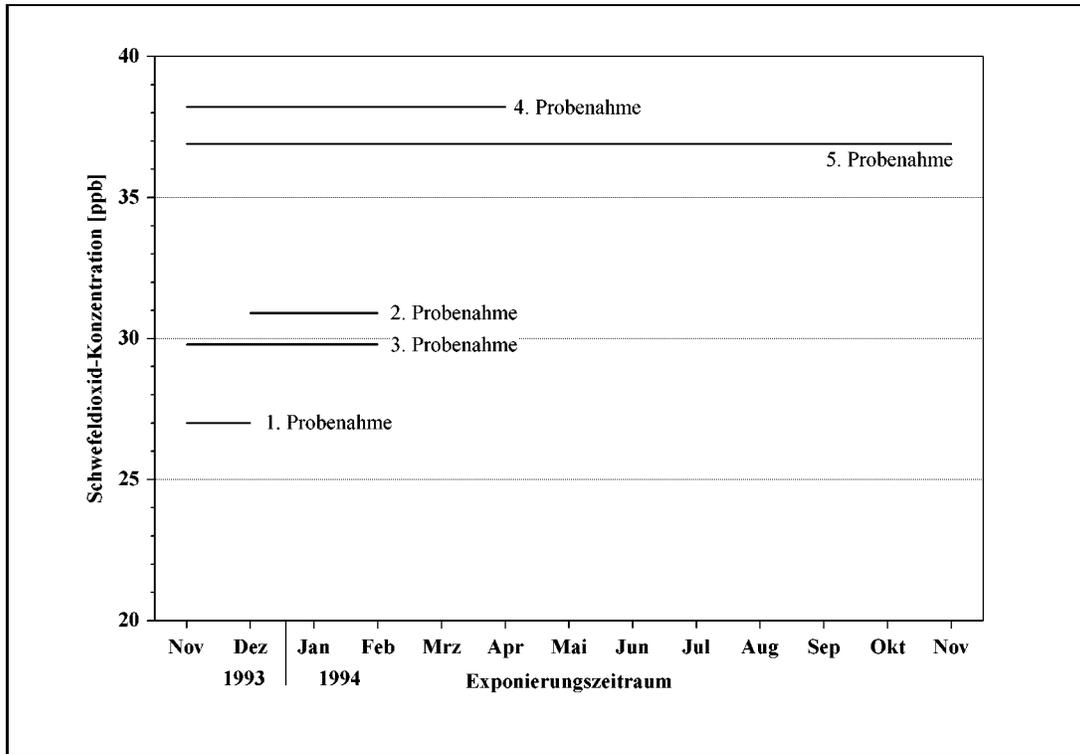


Abbildung 30: Darstellung der Mittelwerte der Schwefeldioxidkonzentration auf dem Prüffeld in Duisburg während der Freilandbewitterung. Die Länge der waagerechten Balken gibt die Exponierungszeit bis zur angegebenen Probenahme wieder, die Höhe die mittlere SO<sub>2</sub>-Konzentration in diesem Zeitraum.

Konzentration über diesen Zeitraum an.

Auffällig ist, daß im Gegensatz zum allgemeinen Trend der Luftqualität in der Bundesrepublik Deutschland am Exponierungsort Duisburg die Konzentration von SO<sub>2</sub> im betrachteten Zeitraum ansteigt.

## 7.3 Ergebnisse der Vorbewitterung

### 7.3.1 Aufarbeitung der exponierten Proben und Auswertung

Die eine Hälfte der Proben wurde nach jeder Entnahme von Plättchen sofort eluiert und die erhaltenen Eluate mittels Ionenchromatographie vermessen, die andere Hälfte im Depositionskanal untersucht.

Die Elution erfolgte durch Schütteln mit 25 mL bidestilliertem Wasser in inerten Kunststoffbechern über Nacht. Jedes Gesteinsplättchen wurde dreimal eluiert. Die Eluate wurden ionenchromatographisch vermessen. Das verwendete Meßsystem wurde bereits im Kapitel 5.1.3 beschrieben. Aus den erhaltenen Konzentrationen der drei Eluate wurde dann die Gesamtmenge an deponiertem Sulfat bestimmt, wobei Blindwerte subtrahiert wurden. Die ursprünglich abgeschiedene Menge an SO<sub>2</sub> wurde aus

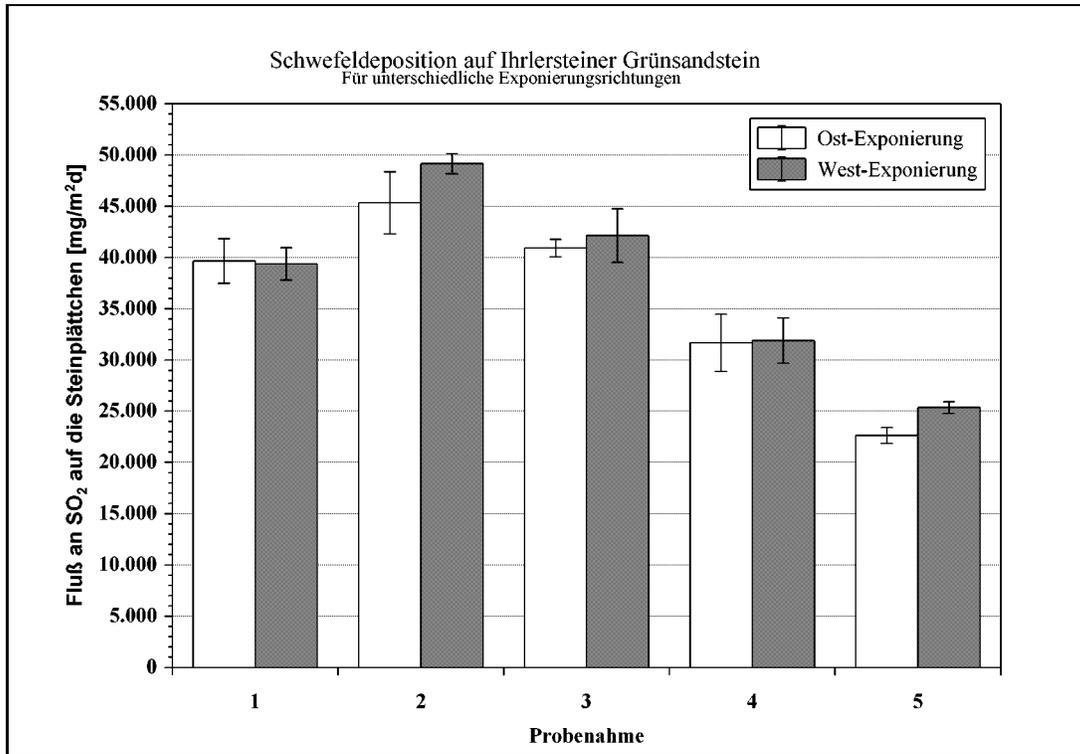


Abbildung 31: Die Deposition auf Ihrlerssteiner Grünsandstein in den Exponierungszeiträumen für die beiden Exponierungsrichtungen West bzw. Ost dargestellt.

den so erhaltenen Sulfatwerten berechnet und zur Auswertung verwendet.

Die Ergebnisse dieser Referenzproben sind in den Abbildungen 31 bis 36 zusammengefaßt.

Mit den Konzentrationsmeßdaten aus dem Meßcontainer wurden aus den so bestimmten Depositionen die mittleren Depositionsgeschwindigkeiten über den Exponierungszeitraum berechnet.

### 7.3.2 Ergebnisse der Vorbewitterung für Ihrlerssteiner Grünsandstein

Erwartungsgemäß wird auf diesen Proben die größte Menge an gebildetem Sulfat gefunden. Ein signifikanter Unterschied zwischen den west- und den ost-exponierten Proben ist nicht für alle Probenahmen erkennbar.

Beide Exponierungsrichtungen führen zu annähernd gleichgroßen abgeschiedenen Mengen an  $\text{SO}_2$ . Lediglich bei der zweiten und der letzten Probenahme findet sich mehr Sulfat auf den west-exponierten Proben. Dies macht allerdings nie mehr als 8 % aus und wird auf keiner der anderen Proben wieder gefunden.

Die anderen Probenahmen zeigen keine Unterschiede für unterschiedlich exponierte Plättchen. Wie die Grafik 31 zeigt, liegen alle Abweichungen innerhalb der Fehlerbalken, also innerhalb der Standardabweichungen des gesamten Untersuchungsverfahrens.

Für die nachfolgend beschriebenen Proben aus Krensheimer Muschelkalk werden

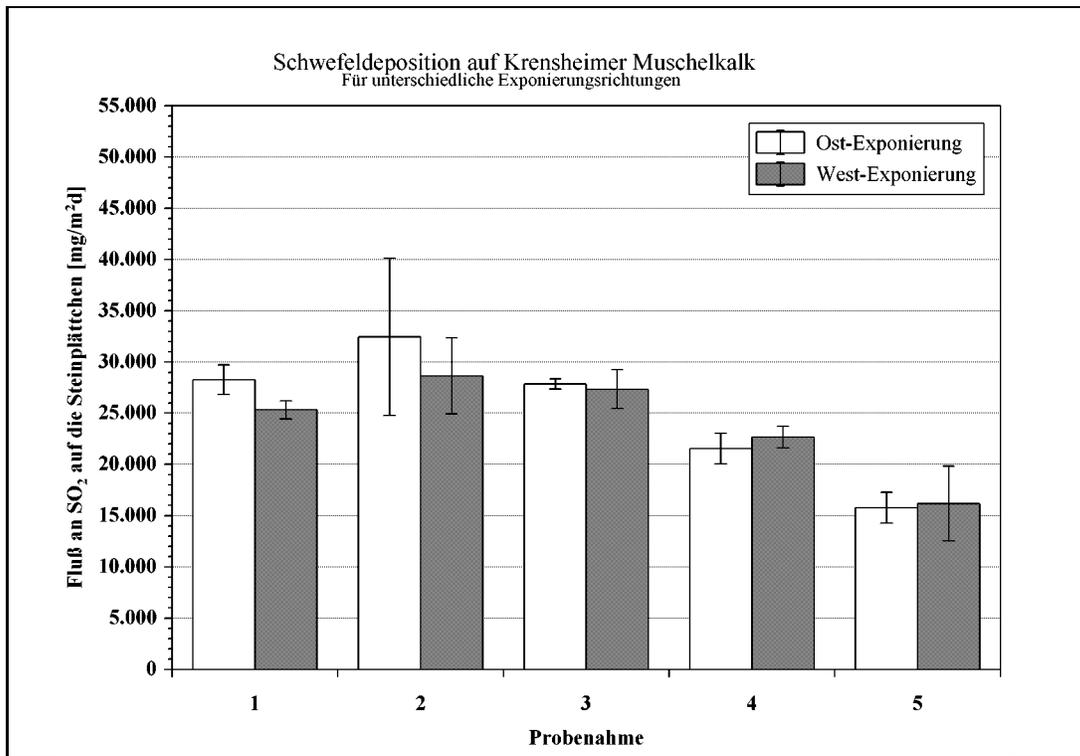


Abbildung 32: Die Deposition auf Krensheimer Muschelkalk in den Exponierungszeiträumen für die beiden Exponierungsrichtungen West bzw. Ost dargestellt.

bei der zweiten Probenahme gerade höhere Sulfatwerte auf den ost-exponierten Proben gefunden. Damit ergibt sich die Folgerung, daß die beobachteten Abweichungen nicht auf Effekte aus unterschiedlicher Exponierungsrichtung resultieren, sondern in den natürlichen Fehlergrenzen des Experimentes zu suchen sind.

### 7.3.3 Ergebnisse der Vorbewitterung für Krensheimer Muschelkalk

Der Krensheimer Muschelkalk weist nach dem Ihrlersteiner Grünsandstein die größte Menge an gefundenem Sulfat in den Eluatn auf. Dies war nach den Ergebnissen anderer Autoren auch zu erwarten.

Für den Krensheimer Muschelkalk finden sich bei der ersten und zweiten Probenahme auf den ost-exponierten Proben größere Mengen an Sulfat als auf den west-exponierten Proben. Für die zweite Probenahme liegen die Verhältnisse damit genau entgegengesetzt wie beim Ihrlersteiner Grünsandstein. Bei den Probenahmen drei bis fünf ist ein Unterschied nicht erkennbar.

Der Unterschied zwischen den Proben unterschiedlicher Exponierungsrichtung fällt allerdings mit maximal 14 % gering aus. Außerdem werden bei der Probenahme 2 auch die größten Fehler in der Auswertung gefunden. Wie aus der Abbildung 32 erkennbar ist, liegen die aus den Standardabweichungen der ionenchromatographischen Untersuchungen erhaltenen Fehlerbalken deutlich größer als die gefundene Abweichung

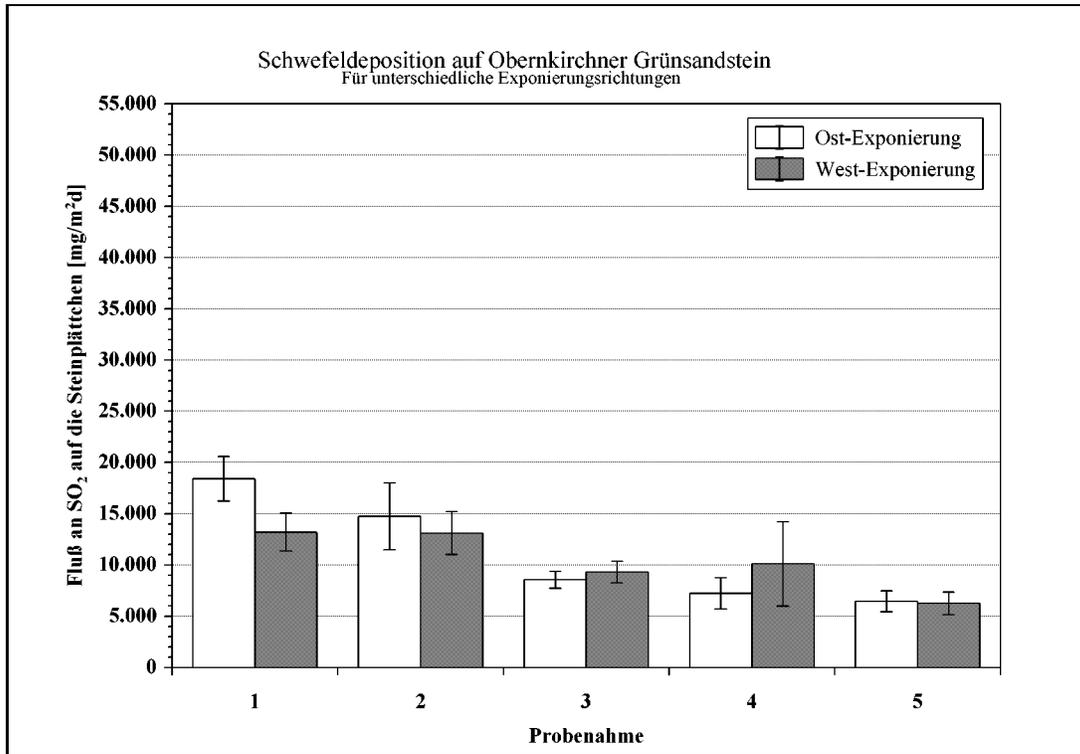


Abbildung 33: Die Deposition auf Obernkirchner Sandstein in den Exponierungszeiträumen für die beiden Exponierungsrichtungen West bzw. Ost dargestellt.

zwischen west- und ost-exponierten Proben der Probenahme 2. Somit kann dieser Unterschied nicht als signifikant betrachtet werden.

#### 7.3.4 Ergebnisse der Vorbewitterung für Obernkirchner Grünsandstein

Auf den Proben aus Obernkirchner Grünsandstein findet sich weniger gebildetes Sulfat als auf den Proben aus Ihrlinger Grünsandstein oder Krensheimer Muschelkalk. Die frischen Probekörper nehmen genausoviel SO<sub>2</sub> während der ersten Exponierungsphase auf wie die Sander-Proben. Im Gegensatz zum Sander fällt beim Obernkirchner die Aufnahme von Schwefeldioxid in den folgenden Exponierungsintervallen allerdings rasch ab (vergleiche Abschnitt 7.3.5).

Ein signifikanter Einfluß der Exponierungsrichtung ist nur für die erste Probenahme erkennbar. Diese zeigt für die ost-exponierten Gesteinsplättchen deutlich höhere Sulfatwerte (etwa 38 % mehr SO<sub>2</sub>-Aufnahme) als für die west-exponierten Proben.

Bei der vierten Probenahme sind die Verhältnisse genau umgekehrt, allerdings liegen die Unterschiede hier innerhalb der Meßunsicherheit der verwendeten Bestimmungsmethode und können somit nicht als signifikant angesehen werden.

In allen anderen Fällen sind keine Unterschiede erkennbar.

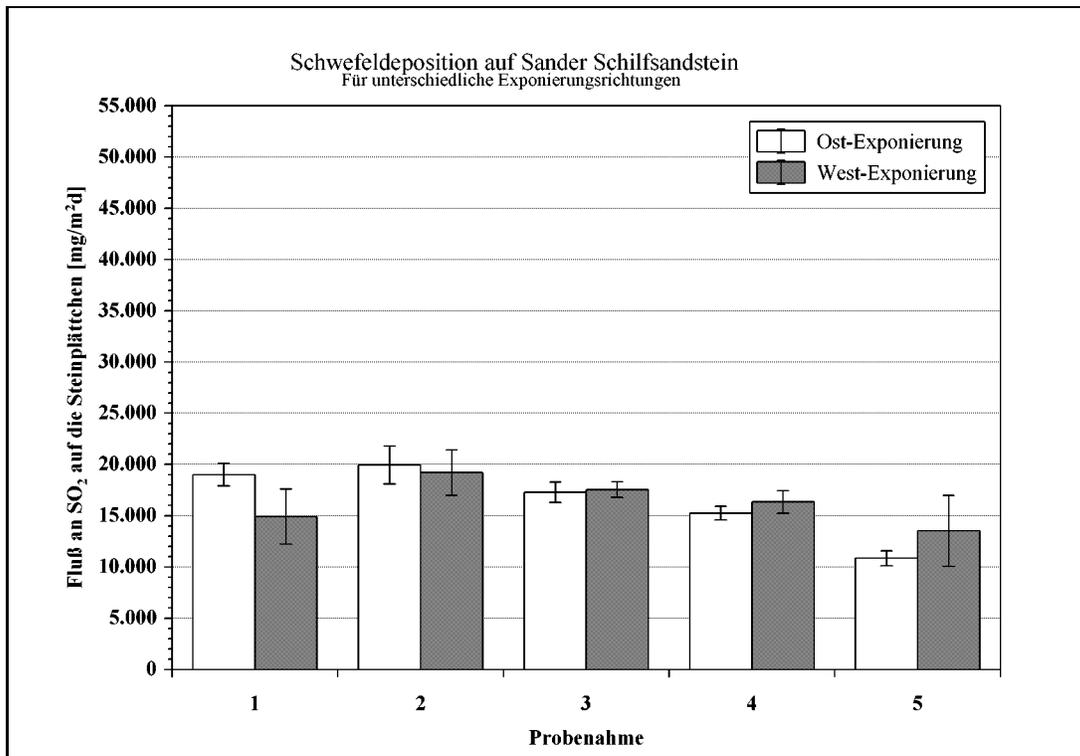


Abbildung 34: Die Deposition auf Sander Schilfsandstein in den Exponierungszeiträumen für die beiden Exponierungsrichtungen West bzw. Ost dargestellt.

### 7.3.5 Ergebnisse der Vorbewitterung für Sander Schilfsandstein

Dieser Stein zeigt zunächst eine gleichgroße Aufnahme von Schwefeldioxid wie der Obernkirchner Grünsandstein, behält diese Aufnahmerate aber länger bei. Während der ersten vier Probenahmen ändert sich die abgeschiedene Menge an  $\text{SO}_2$  kaum, erst bei den letzten beiden Probenahmen geht die Aufnahmerate deutlich zurück.

Signifikante Unterschiede bei der Exponierung in unterschiedlicher Himmelsrichtung sind nur für die erste und letzte Probenahme erkennbar. Die erste Probenahme zeigt dabei für die östlich exponierten Proben eine um etwa 26 % höhere Aufnahme, bei der letzten Probenahme sind dagegen die westlich exponierten Proben stärker belastet.

In beiden Fällen liegen die Unterschiede allerdings innerhalb des Bereiches, der durch die Meßunsicherheit des gesamten Analysenverfahrens gegeben ist und in der Abbildung durch die Fehlerbalken dargestellt wird. Ein signifikanter Unterschied ist somit nicht erkennbar.

### 7.3.6 Vergleich der Ergebnisse der Vorbewitterung

Mit den Daten aus dem Meßcontainer auf dem Prüffeld und den Ergebnissen der Elutionen der Referenzproben wurden auch die Depositionsgeschwindigkeiten von  $\text{SO}_2$  auf die Prüfkörper bestimmt.

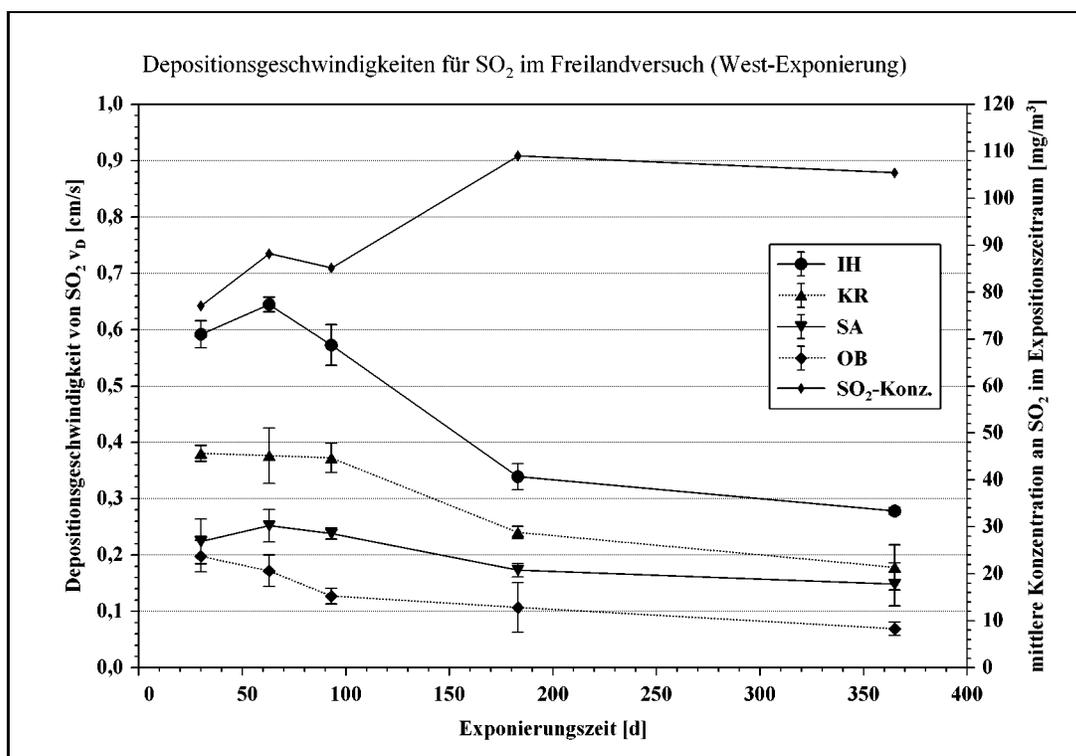


Abbildung 35: Depositionsgeschwindigkeiten für die untersuchten Steine in der Freiland-Bewitterung mit westlicher Exponierung.

Das Verhältnis dieser Depositionsgeschwindigkeiten für die einzelnen Steinsorten stimmt mit den Erwartungen überein. Ihrlersteiner Grünsandstein zeigt die größten SO<sub>2</sub>-Depositionsgeschwindigkeiten, Obernkirchner die kleinsten.

Unterschiede in der Ausrichtung der Proben nach Westen bzw. Osten sind nicht für alle Probenahmen erkennbar. Lediglich bei der ersten Probenahme zeigen alle Steine bis auf den Krensheimer Muschelkalk eine höhere Belastung für die östlich exponierten Proben.

Für zukünftige Versuche im Freiland wäre damit dringend geboten, die erfaßten Parameter auf Windgeschwindigkeit und -richtung auszuweiten.

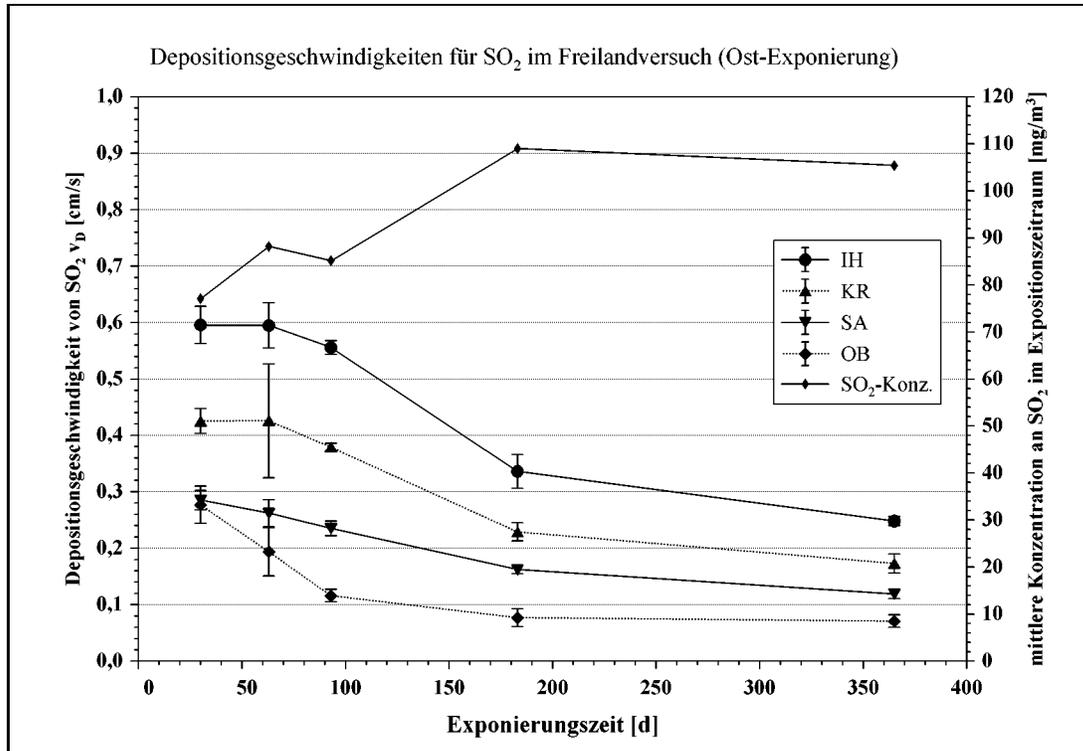


Abbildung 36: Depositionsgeschwindigkeiten für die untersuchten Steine in der Freiland-Bewitterung mit östlicher Exponierung.

## 8 Untersuchung von Gesteinsprüfkörpern

Die Untersuchungen von Gesteinsprüfkörpern gliedern sich in drei Bereiche:

- Exponierung von Prüfkörpern im Freiland
- Exponierung von vorbewitterten Prüfkörpern im Depositionskanal
- Exponierung von bruchfrischen, voreluieren Prüfkörpern im Depositionskanal

Bevor die Versuche im einzelnen dargestellt werden, sollen kurz die jeweils gemeinsamen Verfahrensschritte erläutert werden.

### 8.1 Grundlegende Verfahrensschritte

#### 8.1.1 Probenvorbereitung

Für die Vorbewitterung im Freilandversuch wurden jeweils Gesteinsplättchen gleicher Sorte aus einem bruchfrischen Quader trocken auf die Maße 50 x 50 x 5 mm gesägt und direkt eingesetzt. Nach einer entsprechenden Exponierung auf dem Prüffeld in Duisburg wurden die Proben entnommen, in Kunststoffolie eingeschweißt und nach Hamburg verbracht. Eine Hälfte der Prüfkörper wurde hier eluiert, um das Ausmaß der Vorbelastung zu ermitteln, die andere Hälfte im Kanal untersucht. Die Ergebnisse der Vorbewitterung sind in Kapitel 7.3 wiedergegeben.

Die bruchfrisch eingesetzten Proben wurden ebenfalls trocken aus einem Quader gesägt, dann aber zur Senkung des Blindwertes mit bidestilliertem Wasser bis zum Erhalt von sulfatfreiem Eluat gewaschen und nach der Trocknung eingesetzt.

#### 8.1.2 Depositionsmessung im Kanal

Der Depositionskanal wurde auf die gewünschte Temperatur, Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte eingefahren. Nach dem Erreichen einer stabilen Regelung wurden die Proben konditioniert. Dazu wurden die Gesteinsplättchen mit einer Halterung, die dem Aufbau im Freilandversuch entsprach, aber kein Regendach aufwies, in den Kanal eingebracht. Für 12 Stunden (über Nacht) wurden die Proben dann bei der eingestellten relativen Luftfeuchte und Temperatur temperiert. Die jeweils ersten beiden Probenplätze in beiden Reihen des Probenhalters wurden mit Blindplättchen besetzt, die nicht ausgewertet wurden. Auf diese Weise wurde sichergestellt, daß nicht fälschlicherweise Effekte durch die besondere Position am Anfang des Probenhalters Unterschiede in den Gesteinssorten überdecken.

Wie die Untersuchungen von BEHLEN(1996) gezeigt haben, reicht bei diesen Abmessungen der Plättchen die gewählte Temperierungszeit aus. Für Prüfkörper mit größeren Abmessungen kann die Konditionierungsphase sogar einige Tage beanspruchen [siehe BOTHMANN(1997)].

Nach dieser Zeit zur Einstellung des Feuchtehaushaltes der Oberflächen wurden die Steine mit der Halterung entnommen und in einer speziell angefertigten, kleinvolumigen Tasche aus doppelwandiger Kunststoffolie luft- und wasserdampfdicht eingeschlossen.

Im Depositionskanal wurde die gewünschte Konzentration an  $\text{SO}_2$  eingestellt. Nach dem Erreichen eines stabilen Regelverhaltens wurden die Steine wieder in den Kanal eingebracht und die Messung gestartet.

### 8.1.3 Probenaufarbeitung

Zur Aufarbeitung wurden die Steinplättchen in verschließbaren Kunststoffbechern mit jeweils 25 ml bidestilliertem Wasser jeweils dreimal eluiert. Diese Elution erfolgte über Nacht auf einer Schüttelmaschine. Dabei wurden die Proben so eingespannt, daß die exponierten Oberflächen der Gesteinsplättchen waagrecht lagen und gut vom Elutionsmittel überspült werden konnten. Nach der Elution wurde das erhaltene Eluat filtriert und die Konzentration an Sulfat mittels isokratischer Ionenchromatographie bestimmt. Das Meßsystem der Ionenchromatographie ist bereits in Kapitel 5.1.3 beschrieben worden.

Aus der so erhaltenen Sulfatkonzentration und dem Volumen des Elutionsmittels wurde die abgeschiedene Schwefelmenge berechnet. Zusammen mit den während der Messung vom ERSIS-Programm aufgezeichneten Daten konnten schließlich der Fluß und die Depositionsgeschwindigkeit für Schwefeldioxid berechnet werden.

### 8.1.4 Bilanzierung der Deposition über die Gasdosierung

Neben der direkten Bestimmung des abgeschiedenen  $\text{SO}_2$  wurde, genau wie bei den Passivsammlerversuchen, durch Bestimmung der zudosierten Menge an  $\text{SO}_2$  der durch die Proben hervorgerufene zusätzliche Verbrauch ermittelt. Das Verfahren ist in Abbildung 17 dargestellt und in Kapitel 5.1.4 näher erläutert worden.

Dieses Verfahren wurde nur für die Vergleichsmessungen zwischen Steinen und Passivsammlern eingesetzt (siehe Kapitel 8.2). Bei diesen Versuchen wurde auf eine ionenchromatographische Bestimmung verzichtet.

Da die vorbewitterten Steine aus dem Freilandversuch nicht nach Sorten getrennt, sondern gemeinsam untersucht wurden, ist für die entsprechenden Versuche eine Auswertung über Gasbilanzmessung wenig aussagekräftig. Es wird dabei nur ein Mittelwert für die Veränderung der Depositionsgeschwindigkeit über alle eingesetzten Gesteinsorten erhalten. Alle Ergebnisse für vorbewitterte Steine aus Kapitel 8.3 sind daher über IC-Messungen erhalten worden.

## 8.2 Vergleich zwischen bruchfrischen Gesteinen und Passivsammlern

Für diese Untersuchungen wurden nur Proben der Gesteinssorten Ihrlersteiner Grünsandstein, Krensheimer Muschelkalk und Obernkirchner Sandstein eingesetzt. Die Messungen an den Ihrlersteiner Proben konnten wegen eines Ausfalls der Regelung während des Experimentes nicht ausgewertet werden und zur Wiederholung war nicht mehr genügend Probenmaterial vorhanden.

Die beiden auswertbaren Meßreihen sind in Abbildung 37 im Vergleich zu einer Passivsammlermessung dargestellt. In der Tabelle 26 sind die Bedingungen zusammengefaßt, unter denen die Versuche durchgeführt wurden. Gewählt wurde eine mittlere Windgeschwindigkeit und eine Meßtemperatur, die leicht unter der Raumtemperatur

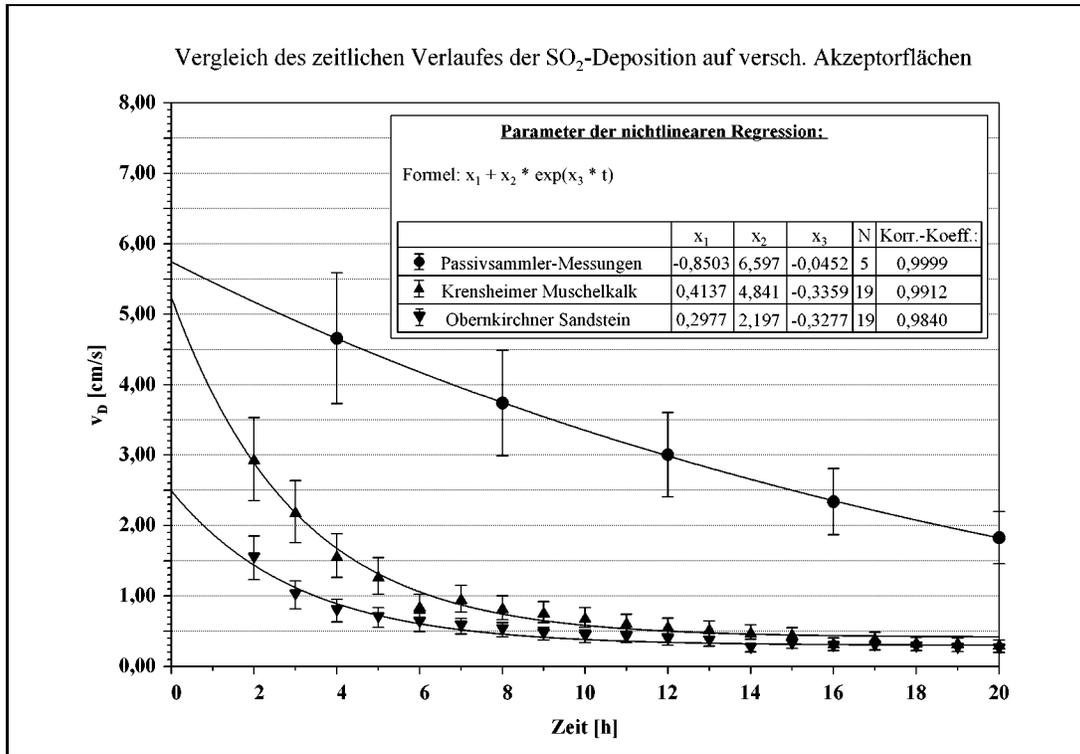


Abbildung 37: Dargestellt sind zwei Versuche mit bruchfrischen Steinen und der Verlauf einer Passivsammlermessung unter im wesentlichen gleichen Bedingungen. Im Experiment mit den Steinplättchen lag die Luftfeuchtigkeit bei 70, für das Passivsammlerexperiment bei 0 % rH. Alle Meßpunkte stammen aus Gasbilanzrechnungen.

lag. In diesem Bereich läuft die Kühlanlage am besten und es treten keine Kondensationsprobleme in der Gasableitung der Abzugsanlage auf. Die Konzentration an SO<sub>2</sub> wurde entsprechend der Versuche mit Passivsammlern aus Kapitel 5 gewählt.

Die Messung mit den Passivsammlern erfolgte unter den gleichen Bedingungen, lediglich die Luftfeuchtigkeit wurde in diesem Versuch bei 0 % rH eingestellt.

Tabelle 26: Versuchsbedingungen für die Untersuchungen an bruchfrischen Gesteinsproben und Passivsammlern.

Parameter:	eingestellter Wert:
Windgeschwindigkeit:	6 m/s
Temperatur:	288 K
Luftfeuchtigkeit:	70 % rH
Konzentration SO <sub>2</sub> :	0,5 ppmV
Exponierungszeit:	20 h

Tabelle 27: Versuchsbedingungen für die Untersuchungen an bruchfrischen und vorbewitterten Gesteinsproben.

Parameter:	eingestellter Wert:
Windgeschwindigkeit:	6 m/s
Temperatur:	288 K
Luftfeuchtigkeit:	70 % rH
Konzentration SO <sub>2</sub> :	0,2 ppmV
Exponierungszeit:	20 h

### 8.3 Vergleich zwischen vorbewitterten und bruchfrischen Gesteinsproben

Um die Auswirkungen der Vorbewitterung auf die Gesteinsplättchen untersuchen zu können, wurden zunächst bruchfrische Steine der ausgewählten Sorten im Kanal exponiert und dann die unterschiedlich lang vorbewitterten Steine aus dem Freilandexperiment.

In der Tabelle 27 sind die Bedingungen zusammengefaßt, unter denen diese Versuche durchgeführt wurden. Im wesentlichen stimmen sie mit den Bedingungen aus dem vorhergehenden Abschnitt überein, lediglich die Konzentration an SO<sub>2</sub> wurde mit 200 ppbV niedriger gewählt. Dabei wurde ein Kompromiß zwischen akzeptabler Nähe zu den Freilandbedingungen und noch ausreichend gutem Regelverhalten im Kanal gewählt. Zur Begründung der Wahl der anderen Parameter sei auf den Abschnitt 8.2 verwiesen.

Die vorbewitterten Gesteinsproben wurden unter den gleichen Bedingungen und unter vollständiger Gleichbehandlung wie die bruchfrischen Proben im Kanal exponiert.

Für diese Versuchsserie wurden die Gesteinsplättchen jeweils einer Freilandexponierungsphase gemeinsam im Kanal untersucht, d.h. es wurde nicht die Gesteinsarten getrennt vermessen. Die Bilanzierung über die Gasdosierung liefert daher keine Werte, die einzelnen Gesteinsvarietäten zuzuordnen wären, sondern nur eine Art Mittelwert.

Zusätzlich wurden die exponierten Gesteinsplättchen wie oben beschrieben nach Versuchsende eluiert und aus den ionenchromatographisch bestimmten Konzentration in den Eluaten die Depositionsgeschwindigkeit für SO<sub>2</sub> für die einzelnen Gesteinsarten getrennt bestimmt.

## 8.4 Ergebnisse der Untersuchung an Gesteinsplättchen

### 8.4.1 Vergleich zwischen Freilandbewitterung und Kanalmessungen

Wie die Tabelle 28 zeigt, liegen die im Depositionskanal ermittelten Ergebnisse für die Deposition von Schwefeldioxid auf Gesteinsplättchen sehr eng bei den Werten aus der Freilandbewitterung für frische Steinoberflächen. Es kann also davon ausgegangen werden, daß die Modellierung der ausgewählten Parameter im Depositionskanal gelungen ist. Dies gilt sowohl für die bei 500 ppbV als auch für die bei 200 ppbV SO<sub>2</sub> erhaltenen Werte (im Rahmen der Fehlerbreite der Untersuchungsmethoden).

Tabelle 28: Vergleich zwischen den in der Freilandbewitterung und im Depositionskanal bestimmten Depositionsgeschwindigkeiten für Schwefeldioxid auf verschiedenen frischen Rezeptoroberflächen. Die im Kanal bestimmten Werte stellen Meßwerte nach Gleichgewichtseinstellung dar, für das Freilandexperiment wurden die Meßwerte der ersten Probenahme herangezogen.

Rezeptor:	$v_d$ [cm/s]			
	Freilandexperiment:	Kanalmessungen:		WITTENBURG:
Ihrlersteiner	$0,60 \pm 4,8 \%$	-	$0,59 \pm 14 \%$	0,4 - 0,8
Krensheimer	$0,40 \pm 4,5 \%$	$0,40 \pm 20 \%$	$0,40 \pm 21 \%$	k.A.
Sander	$0,25 \pm 11,9 \%$	-	$0,23 \pm 10 \%$	0,1 - 0,7
Obernkirchner	$0,24 \pm 13,0 \%$	$0,25 \pm 20 \%$	$0,15 \pm 25 \%$	0,1 - 0,5
Bemerkungen		500 ppbV SO <sub>2</sub>	200 ppbV SO <sub>2</sub>	

Diese Ergebnisse liegen deutlich höher als die Befunde anderer Autoren (siehe auch Tabelle 29), da aber die im Freiland bestimmten Depositionsgeschwindigkeiten zu den unter kontrollierten Bedingungen erhaltenen Werten passen, muß dieser Effekt auf die besondere Konstruktion der verwendeten Anlage zurückgeführt werden. Die Freilandwerte sind plausibel, vergleicht man sie beispielsweise mit den von WITTENBURG (1994) durch die Auswertung einer Vielzahl von Meßkampagnen erhaltenen Depositionsgeschwindigkeiten. Die Bereiche, in denen sich die Zahlenwerte der Depositionsgeschwindigkeit aus dieser Quelle bewegen, sind in die Tabelle mit aufgenommen.

#### 8.4.2 Vergleich mit den Ergebnissen anderer Autoren

In der Tabelle 29 sind die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Depositionsgeschwindigkeiten für Schwefeldioxid auf verschiedene Naturstein-Rezeptoroberflächen den Ergebnissen anderer Autoren gegenübergestellt. Für Untersuchungen auf Passivsammleroberflächen ist ein entsprechender Vergleich mit Hilfe der in der Tabelle 22 aufgeführten Meßwerte möglich.

Soweit möglich wurden dabei die Meßbedingungen mit angegeben, da ohne Kenntnis der genauen Versuchsbedingungen Vergleiche wenig aussagekräftig sind.

Im Vergleich zeigt sich deutlich, daß die in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse höher liegen, als die anderer Autoren. Zwar kann aus den Angaben in den anderen Arbeiten nur schwer auf die realen Strömungsbedingungen in den entsprechenden Versuchsaufbauten geschlossen werden, es scheint aber sicher, daß die Strömung im Depositionskanal erheblich turbulenter ist. Die gute Übereinstimmung mit den Werten für die Depositionsgeschwindigkeit aus Freilandversuchen beweist, daß reale Verhältnisse im Depositionskanal erheblich besser nachgebildet werden können.

Tabelle 29: Vergleich zwischen experimentell ermittelten Depositionsgeschwindigkeiten für SO<sub>2</sub> auf Steinoberflächen aus verschiedenen Arbeiten. Soweit möglich, sind die experimentellen Bedingungen in die Tabelle aufgenommen worden.

Rezeptor:	v <sub>d</sub> [cm/s]				
	MANGELS:	WITTENBURG:	BOTHMANN:	NOWATZKY:	
Ihrlersteiner	0,766	0,42 ± 14 %	0,15	-	0,59 ± 14 %
Krensheimer	-	0,112 ± 16,3 %	0,053	0,40 ± 20 %	0,40 ± 21 %
Sander	0,204	0,32 ± 13,4 %	0,037	-	0,23 ± 10 %
Obernkirchner	0,052	0,052 ± 24,8 %	0,014	0,25 ± 20 %	0,15 ± 25 %
c(SO <sub>2</sub> ) [ppmV]	1	0,15	0,5	0,5	0,2
rH [%]	37	45 - 60	80	70	70
u [m/s]	k.A.	k.A.	k.A.	6	6
Bemerkungen	schätzt den Fehler auf 15 %		Reaktor 2	Bilanzierung	IC-Messung

#### 8.4.3 Vergleich zwischen bruchfrischen und vorbewitterten Gesteinen

Abbildung 38 zeigt den Vergleich zwischen vorbewitterten und bruchfrischen Gesteinen. Vorbewitterte Proben zeigen im Vergleich zu den Messungen an unbelasteten Plättchen keine signifikante Veränderung der Schadstoffaufnahme.

Die aus ionenchromatografischen Messungen bestimmten Depositionsgeschwindigkeiten in den Abbildungen 39 und 40 zeigen für keine Gesteinssorte eine Veränderung mit der Dauer der Freilandexponierung. Bei diesem Meßverfahren ist der Fehler in der Bestimmung von v<sub>d</sub> allerdings relativ groß, da hier eine kleine Differenz zweier großer Zahlen bestimmt wird.

Bei den aus der Gasbilanzierung gewonnenen Werten für die Depositionsgeschwindigkeit ist der Fehler zwar etwas geringer, aber aufgrund der Durchführung des Experimentes kann hier nicht mehr zwischen den einzelnen Gesteinssorten unterschieden werden. In der Grafik 38 sind die über alle Gesteinssorten gemittelten Werte dargestellt. Im Rahmen der Fehlerbreite dieser Bestimmungsmethode bleibt die Depositionsgeschwindigkeit unverändert.

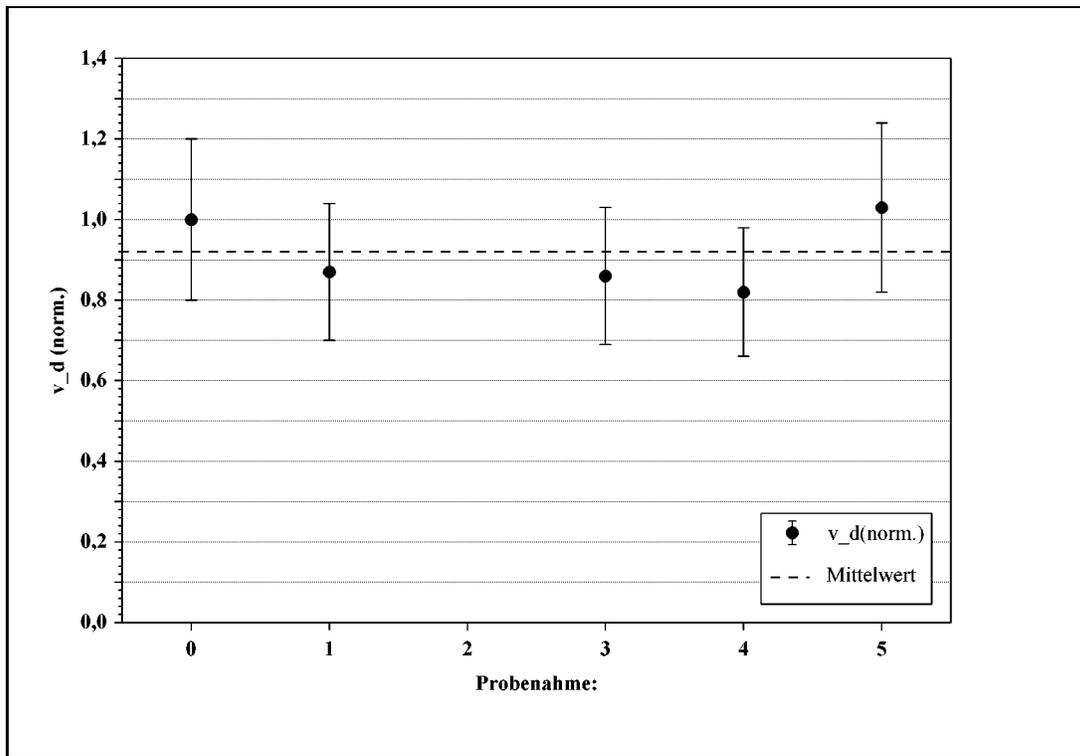


Abbildung 38: Vergleich der Depositionsgeschwindigkeiten auf bruchfrischen und vorbewitterten Gesteinen. Die Ergebnisse in dieser Grafik wurden aus Gasbilanzmessungen berechnet. Diese Bestimmungsmethode liefert unter den Bedingungen dieser Versuchsreihe nur Mittelwerte über alle Gesteinsorten.

### 8.5 Zusammenfassung der Untersuchungen an Gesteinsprüfkörpern

Zusammenfassend läßt sich aus den Untersuchungen an den Steinplättchen die Aussage treffen, daß im Depositionskanal die Verhältnisse hinreichend der Natur nachmodelliert werden können, daß vergleichbare Depositionsgeschwindigkeiten erhalten werden.

Eine Vorbewitterung von bis zu einem Jahr an einem industriellen Standort vermag das Aufnahmeverhalten der untersuchten Steine nicht signifikant zu verändern. Zu einer gleichartigen Einschätzung kommt auch BOTHMANN(1997), der im gleichen Zeitraum flankenversiegelte Blockprüfkörper exponiert hat.

Die ermittelten absoluten Depositionsgeschwindigkeiten liegen dabei höher als die von BOTHMANN (1997) in der Simulationskammer bestimmten Werte, der Trend ist aber derselbe.

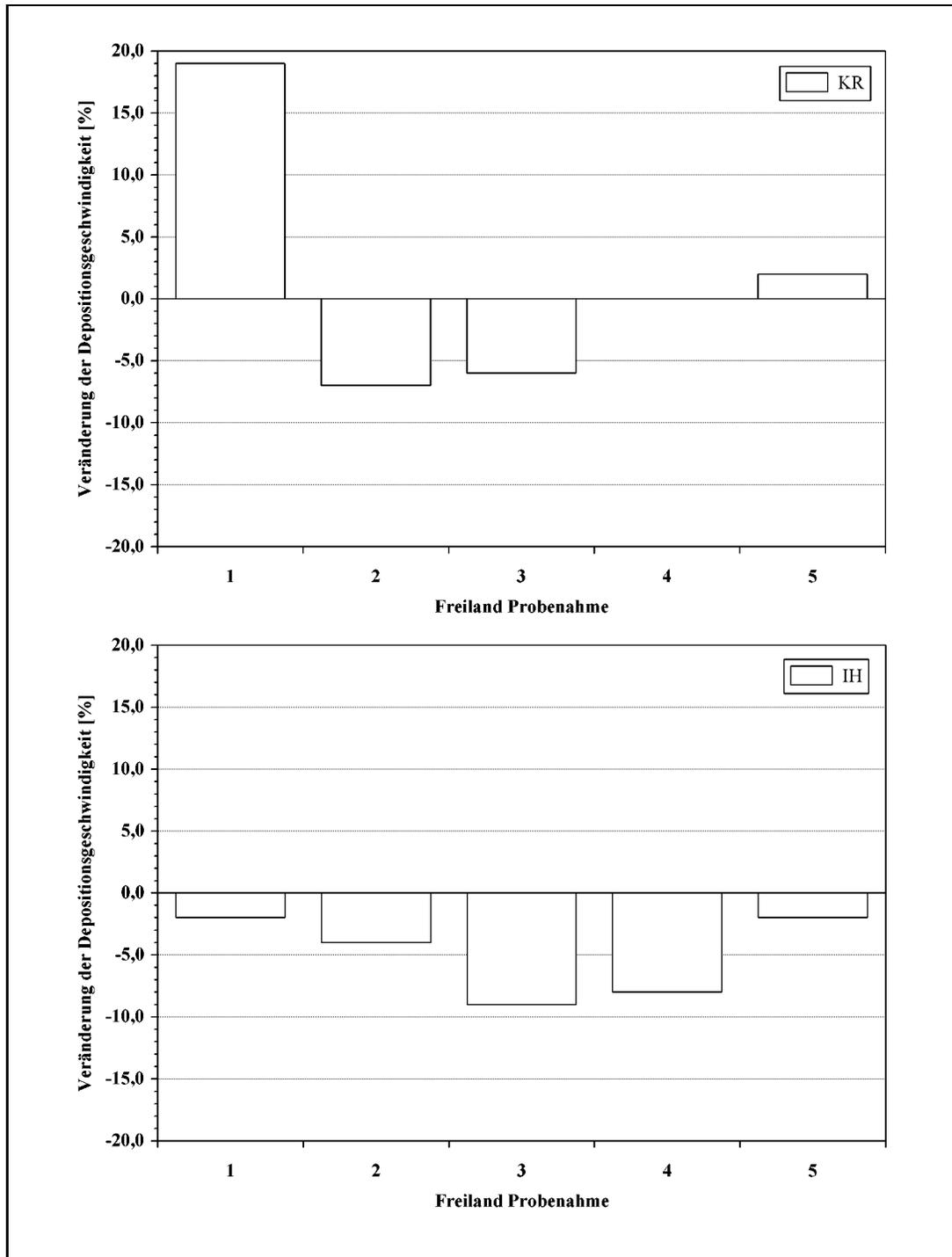


Abbildung 39: Vergleich der Depositionsgeschwindigkeiten auf bruchfrischen und vorbewitterten Gesteinen der Sorten Krensheimer Muschelkalk (oben) bzw. Ihrlersteiner Grünsandstein (unten). Die Meßwerte aus dieser Grafik wurden mittels Elution bestimmt.

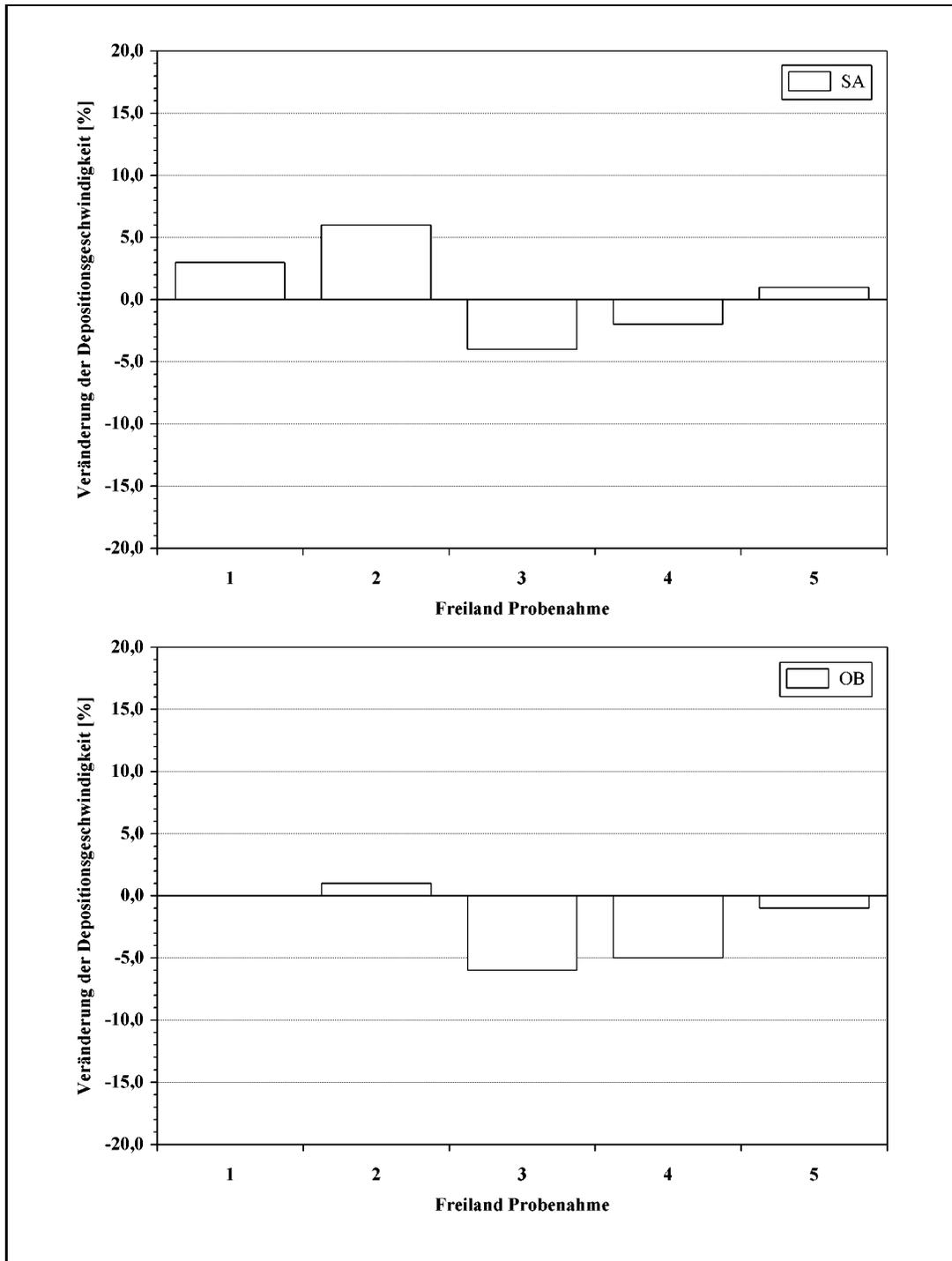


Abbildung 40: Vergleich der Depositionsgeschwindigkeiten auf bruchfrischen und vorbewitterten Gesteinen der Sorten Sander Sandstein (oben) bzw. Oberkirchner Sandstein (unten). Die Meßwerte aus dieser Grafik wurden mittels Elution bestimmt.

## 9 Zusammenfassung der Ergebnisse

### 9.1 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war die Konzipierung, Konstruktion und Einmessung eines Windkanals zur Untersuchung der Deposition von Schwefeldioxid auf Werkstoffproben. Die vorgegebenen Zielvorstellungen über die zu realisierenden Parameter Temperatur, Schadgaskonzentration, relative Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit an der Meßstelle wurden, wie in Abschnitt 4 dargestellt, erreicht.

In zwei Punkten wurden die ursprünglichen Forderungen wegen der unverhältnismäßigen Realisierungskosten etwas zurückgenommen. So kann ein vollständiger Temperaturgang von der höchsten zur tiefsten realisierbaren Temperatur nicht wie ursprünglich geplant in einer, sondern in vier Stunden gefahren werden. Damit konnten die Kosten für die Kühlanlage aber deutlich gesenkt werden, während die Versuchsdauer nicht über Gebühr erhöht werden mußte.

Weiterhin kann als Spitzentemperatur nur 35°C erreicht werden, nicht wie ursprünglich geplant 40°C. Dies ist die Folge einer geringer dimensionierten Heizkörperfläche. Damit nicht durch den Einbau von mehr Heizstäben der Druckverlust über den Kanal aus der Leistungskurve des ausgewählten Gebläses wandert, konnte keine größere Heizkörperfläche realisiert werden. Zwar reicht die elektrische Leistung der Heizungsanlage immer noch aus, aber die Oberflächentemperatur darf nicht so groß werden, daß das Wandmaterial des Kanals seine Formstabilität verliert. Auch diese Einschränkung stellt einen tragbaren Kompromiß dar. Die wichtigen Frost-/Tauwechsel können uneingeschränkt simuliert werden.

Die angestrebten Bereiche der Windgeschwindigkeit wurden erreicht. Windprofil und abgeschätzte Turbulenzgrad zeigten bei mittleren und hohen Windgeschwindigkeiten ausreichend homogene Verteilung über die Meßstelle. Damit entfiel im Rahmen der in dieser Arbeit gestellten Aufgaben die Notwendigkeit, weitere Vergleichmäßigung über zusätzliche Einbauten (Siebe, Leitschaufeln etc.) zu erreichen.

Die vorgegebenen Konzentrationsbereiche von Schwefeldioxid und relativer Luftfeuchte konnten erreicht und stabil geregelt werden. Für die Messung der SO<sub>2</sub>-Deposition konnte außer der Elution mit nachfolgender Ionenchromatographie auch auf die Bilanzierung aus dem Rückmeldesignal des thermischen Massenflußreglers zurückgegriffen werden. Ein geeignetes Berechnungsverfahren wurde vorgestellt und im Vergleich mit ionenchromatographischen Messungen im Rahmen der diskutierten Fehlerbreiten bestätigt.

Versuche an Passivsammlern konnten gute Vergleichbarkeit mit Ergebnissen von anderen Experimentatoren aufzeigen. Außerdem wird die aus den Wind- und Turbulenzgradprofilen abgeleitete Gleichwertigkeit der Exponierungsplätze in allen Versuchen bestätigt. Die Abhängigkeit der SO<sub>2</sub>-Deposition von Windgeschwindigkeit, Schadgaskonzentration und Luftfeuchte ist ausgeprägt. Für die Temperatur findet sich in den Versuchsreihen kein eindeutiger Trend.

Die Untersuchung von SO<sub>2</sub>-Depositionen auf Werksteinproben im Kanal zeigte im Vergleich mit den aus einer Freiland-Vorbewitterung gewonnenen Daten gute Übereinstimmung. Es kann daraus der Schluß gezogen werden, daß die wesentlichen Einflußparameter auf die Deposition von SO<sub>2</sub> ähnlich genug nachgebildet werden. Die Vorbewitterung hat allerdings nicht zu einer meßbaren Veränderung der SO<sub>2</sub>-Aufnahme

geführt. Dies wurde auch von BOTHMANN(1997) gefunden. Es verlaufen die Verwitterungsvorgänge im Freiland augenscheinlich so langsam, daß mit einem signifikanten Unterschied im Rahmen so kurzer Exponierungszeiten (bis zu einem Jahr) keine Unterschiede erkennbar sind. Dabei darf auch die Meßungenauigkeit des gesamten Verfahrens mit etwa 20 % nicht übersehen werden.

Gegenüber Werten aus anderen Simulationsanlagen werden im Depositionskanal deutlich höhere Depositionsgeschwindigkeiten gemessen. Da diese Zahlen mit den Freiland-Werten gut übereinstimmen, kann daraus geschlossen werden, daß die Umweltparameter in der vorgestellten Anlage näher an der natürlichen Umwelt liegen als in den anderen Simulationskammern.

Bei der einfachen Modellierung von Gebäudeumströmungen konnte gezeigt werden, daß die konstruierte Anlage für solche Untersuchungen eingesetzt werden kann. Obwohl diese Versuchsreihe kaum mehr als einen einfachen Vorversuch darstellt, kann doch ein eindeutiger Einfluß der Strömungsbedingungen nachgewiesen werden.

## 9.2 Summary

The goal of this project was the design and construction of a wind tunnel to research the deposition of sulphur dioxide on materials. Initial experiments were carried out to verify the usability of the wind tunnel. The intended ranges of temperature, concentration of SO<sub>2</sub>, air humidity and wind velocity were reached as shown in section four.

In two aspects the original ideas had to be slightly altered to meet budget restrictions. The time to cool down the wind tunnel from highest to lowest temperature was expanded from one to four hours. This cut the costs for the cooling device significantly but did not prolong the duration of experiments too much.

Furthermore the temperature within the wind tunnel cannot excide 35°C instead of the 40°C as originally intended. This is due to a reduced heating surface in order to decrease the aerodynamic resistances of the internal parts of the heater and to stay well within the capability of the selected fan. The electric power of the heating system is still large enough to provide the desired air temperature but the surface temperature of the heating elements had to be limited to ensure stability of the wind tunnel's wall material. Still this is felt to be an acceptable compromise since the important temperature changes around the freezing point of water can be carried out without restrictions.

The planned range of wind velocities was reached in the simulation runs. The distributions of mean air velocity and estimated turbulence intensity were found to be of acceptable homogeneity at the test section for medium and high wind velocities. Thus no attempt was made to further increase homogeneity by means of honeycombs or vanes.

For sulphur dioxide and air humidity the given concentration ranges could be obtained within the wind tunnel. Controlling proved to be stable. SO<sub>2</sub> deposition rate measurement was conducted in two ways. The detection of sulphate after exposure and rinsing off of the samples was compared to the assessment of the mass flow controller's output signal. Both methods proved to be identical within the estimated ranges of error. An applicable method for the determination of SO<sub>2</sub> deposition using the SO<sub>2</sub> mass flow controller's output signal has been given.

Experiments carried out with passive sampling devices showed to be in good agreement with the work of other researchers. Additionally the predicted equivalence of the sample locations in the test section - drawn from wind velocity and turbulence profiles - was confirmed. The dependency of sulphur dioxide deposition on wind velocity, SO<sub>2</sub> concentration and air humidity was found to be pronounced. For temperature no clear dependency could be shown.

The experiments on SO<sub>2</sub> deposition in the wind tunnel show good agreement with data obtained from a field experiment conducted contemporaneous on a test side. This indicates that the relevant parameters for the deposition of sulphur dioxide have been modelled in good correspondence with natural conditions. The SO<sub>2</sub> uptake of stone samples after exposition over periods up to one year at the test site showed no significant alteration compared with fresh samples in the wind tunnel experiments. This is confirmed by BOTHMANN (1997). Stone degradation under natural conditions is obviously too slow to provide significant changes in SO<sub>2</sub> uptake after short term exposition. However, it must be kept in mind that the over-all margin of error for these experiments is estimated to be about 20%.

Compared to the results of other researchers the wind tunnel experiments showed significantly higher deposition rates. Since there is good agreement with the data obtained in the field experiment conducted at the same time it is felt that wind tunnel data is more realistic.

A simple experiment for modelling of wind flow around a building proved the wind tunnel to be usable for the research on such problems. Even in this rather crude experiment the influence of flow conditions was detectable.

## 10 Ausblick und weiterführende Untersuchungen

Mit den hier vorgestellten Experimenten sind die Möglichkeiten, die der Depositionskanal bietet, keinesfalls erschöpfend genutzt worden. Eine Reihe von weiteren Untersuchungen kann mit der hier beschriebenen Anlage, ggf. nach bestimmten technischen Veränderungen, gut durchgeführt werden.

### 1. Untersuchungen zur Absicherung

- (a) Weitere Datenpunkte mit Passivsammlerversuchen sollten aufgenommen werden, um die bisherigen Versuchsergebnisse kritisch zu überprüfen. Dabei kann durch Anwendung der Gasbilanzierungsrechnung, wie gezeigt wurde, der meßtechnische Aufwand deutlich gesenkt werden.
- (b) Die Freilandbewitterung sollte trotz der wenig ergiebigen bisherigen Ergebnisse weitergeführt werden. Dabei wären deutlich längere Exponierungszeiten anzustreben, als in der vorliegenden Arbeit realisiert werden konnten.

### 2. Weiterführende Untersuchungen

- (a) Ausweitung auf andere Rezeptoroberflächen ist leicht möglich, dabei sind insbesondere Werkstoffe interessant, die große wirtschaftliche Bedeutung haben (Beton, Stahl, Kunststoffe etc.).
- (b) Ausdehnung auf weitere Simulationsparameter kann durch zusätzliche Einbauten erreicht werden. Interessant wäre z.B. die Aufnahme von Sonneneinstrahlung über Metallhalogenidstrahler oder auch die Dosierung weiterer Schadgase.
- (c) Untersuchung mit aufgezwungenem Temperaturprofil (Simulation einer Gebäudewand) mit der Möglichkeit, Kondensationseffekte kontrollieren zu können. Durchfeuchtungs- und Trocknungszyklen spielen eine große Rolle im Steinerfallsprozeß.
- (d) Genauere Modellierung der Umströmung von Gebäuden und Gebäudekomponenten. Hierzu wäre das Strömungsprofil allerdings durch geeignete Einbauten noch deutlich zu verbessern.

In Abhängigkeit von den dabei gewonnenen Erkenntnissen können sich weitere Aufgabenstellungen ergeben. Dies ist naturgemäß aus heutiger Sicht kaum vorhersehbar, und so kann auch die obige Aufstellung nur ein Anriß möglicher Einsatzgebiete des Depositionskanals sein. Es bleibt die Aufgabe, weitere Möglichkeiten der Nutzung zu erarbeiten.

## 11 Literaturverzeichnis

- Barrow, G. M.** – Physikalische Chemie, Bd. 2, 5. Auflage 1983, Verlag Fried. Vieweg, Braunschweig.
- Bartsch, H.-J.** – Mathematische Formeln, 14. Auflage 1986, VEB Fachbuchverlag Leipzig.
- Baumbach, Günther** – Luftreinhaltung, 3. Auflage 1993, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest.
- Behlen, Andreas (1996)** – Reaktive Stickstoffverbindungen in der Atmosphäre - Konzentrationsbestimmungen und trockene Deposition auf Natursteine, Dissertation Fachbereich Chemie, Universität Hamburg.
- Böswirth, L.** – Technische Strömungslehre, Lehr und Übungsbuch, 2. verbesserte Auflage 1995, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig / Wiesbaden.
- Bothmann, Thomas (1991)** – Entwicklung und Optimierung eines naßchemischen Verfahrens zur Bestimmung von Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid im Immissionsbereich, Diplomarbeit FB Chemie, Universität Hamburg.
- Bothmann, Thomas (1997)** – Untersuchungen zur Deposition von Schwefeldioxid und Stickoxiden auf Naturwerksteine und pulverförmige Proben, Dissertation FB Chemie, Universität Hamburg.
- Carstens, Michael (1993)** – Untersuchungen zur Stabilisierung und quantitativen Bestimmung von Sulfitspuren in wäßrigen Lösungen, Diplomarbeit FB Chemie, Universität Hamburg.
- Dannecker, W., Düwel, U. (1984)** – Dynamische Erzeugung von wasserdampfhaltigen Prüfgasen mit reaktiven Inhaltsstoffen für die Untersuchung und Kalibrierung von Emissionsmeßgeräten, Staub - Reinhalt. Luft **44** (1984), Nr. 5, S. 229 ff.
- Falbe, J., Regitz, M.** Römpps chemisches Lexikon, 9. Auflage 1995, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York.
- Finnlayson-Pitts, B. J. und Pitts, J. N. jr.** – Atmospheric Chemistry: Fundamentals and experimental techniques, ?. Auflage 1986, John Wiley & Sons, Inc., New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- Fischer, O. E.** – Wärmelehre, Strömungslehre: Lehrbuch, 7., durchgesehene Auflage 1986, Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Grimm, W. D. (1990)** – Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege München, Karl M. Lipp Verlag, München.
- Grimm, W.-D. und Völkl, J.** – Rauigkeitsmessungen zur Kennzeichnung der Natursteinverwitterung, Z. dt. geol. Ges. **134** (1983), S. 387 - 411.

- Grodten, Torsten (1995)** – Minderung monoaromatischer und chloriert-monoaromatischer Kohlenwasserstoffemissionen an Abfallverbrennungsanlagen durch Einsatz der Aktivkokstechnik, Dissertation FB Chemie, Universität Hamburg.
- Hörath, H.** – Gefährliche Stoffe und Zubereitungen, 5. aktualisierte Auflage 1997, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart.
- Hicks, B. B., Wesely, M. L. und Durham, J. L. (1980)** – Critique of methods to measure dry deposition - workshop summary, U.S. Environmental Protection Agency, EPA-600/9-80-050.
- Hunt, J. C. R. (1971)** – The effect of single buildings and structures, Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A. **269** (1971), pp. 457 - 467.
- Ignatowitz, E.** – Chemietechnik, 4. Auflage 1992, Verlag Europa-Lehrmittel, Vollmer GmbH & Co.
- Lahmann, E.** – Immissionsschutzrecht und Luftreinhaltung, CD-Rom Informationssystem, Lieferung 10/97, UB Media.
- Lide, David R. (Hrsg.)** – CRC Handbook of chemistry and physics, 73rd edition, 1992 - 1993, CRC Press, Inc., Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo.
- Lipfert, F. W. (1989)** – Atmospheric damage to calcareous stones: comparison and reconciliation of recent experimental findings, Atmospheric Environment, Vol. 23, No. 2, pp. 415 - 429, 1989.
- Lipfert, F. W.** – Air pollution and materials damage, aus:  
O. Hutzinger (Hrsg.) – The handbook of environmental chemistry, vol. 4, Part B, Verlag Springer, 1980, Berlin, Heidelberg, New York.
- Lipfert, F. W. (1989)** – Dry deposition velocity as an indicator for SO<sub>2</sub> damage to materials, JAPCA **39** (1989), pp. 446 - 4562.
- Lovett, G. M. et al. (1982)** – Cloud droplet deposition in subalpine balsam fir forests: hydrological and chemical inputs, Science, Vol. 218 (1982), pp. 1303 - 1304.
- Luckat, Siegbert (1973)** – Die Wirkung von Luftverunreinigungen beim Steinerfall, Staub - Reinhalt. Luft **33** (1973), Nr. 7, S. 283 ff.
- Luckat, Siegbert (1981)** – Quantitative Untersuchungen des Einflusses von Luftverunreinigungen bei der Zerstörung von Naturstein, Staub - Reinhalt. Luft **41** (1981), Nr. 11, S. 440 ff.
- Mangels, H. (1992)** – Konzeption, Aufbau und Betrieb einer Simulationsanlage für komplexe Schadgasatmosphären, sowie Untersuchungen zur Verwitterung von Natursteinen, Dissertation FB Chemie, Universität Hamburg.
- McCormick, R. A. (1971)** – Air pollution in the locality of buildings, Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A. **269** (1971), pp. 515 - 526.

- Nowatzky, Werner (1989)** – Aufbau einer Experimentieranlage zur Bestimmung der feuchten Deposition an Vegetationskomponenten mit getracertem Aerosol, Diplomarbeit FB Chemie, Universität Hamburg.
- Rumpel, G. und Sonderhausen, H. D.** – Hydro- und Aerodynamik (Strömungslehre, Dynamik der Fluide), aus:  
Beitz, W. und Küttner, K.-H. (Hrsg.), Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, 14. Auflage 1981, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Schatzmann, M. et al. (1986)** – Physikalische Modellierung mikrometeorologischer Vorgänge im Windkanal, Meteorol. Rdsch. **39** (1986), S. 44 ff.
- Schmidt, Dieter (1995)** – Untersuchungen zu einer weitergehenden Rauchgasreinigung mit Braunkohlen-Aktivkoksen an Abfallverbrennungsanlagen, Dissertation, FB Chemie Universität Hamburg.
- Schmidt, Olaf (1994)** – Untersuchungen zur Verminderung von Stickoxiden in Müllverbrennungsabgasen mittels Aktivkoksen, Dissertation, FB Chemie, Universität Hamburg.
- Schoop, K.-M.** – ERSIS: Ein Mehrrechner-System zur Simulation und Echtzeit-Bearbeitung von Prozeßsteuerungen und Prozeßregelungen, Fortschrittsberichte VDI, Reihe 8: Meß-, Steuer- und Regelungstechnik, Nr. 187, VDI Verlag, Düsseldorf 1989.
- Schoop, K.-M.** – ERSIS/S, Simulationssystem für dynamische Systeme, Benutzerhandbuch.
- Siemens** – Ventilatoren Katalog V/79.
- Siemes, Wolfgang** – Strömungslehre, aus:  
Bartholomé, Ernst (Hrsg.), Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, Bd.1, S. 83 - 117, 4., neubearb. u. erw. Auflage 1972, Verlag Chemie, Weinheim.
- Spiker, E. C. et al. (1992)** – Environmental chamber for study of the deposition flux of gaseous pollutants to material surfaces, Atmospheric Environment Vol. 26A, No. 16, pp. 2885 - 2892, 1992.
- Stöcker, H. (Hrsg.)** – Taschenbuch der Physik, 2. völlig überarb. und erw. Aufl. 1994, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, Thun.
- Trautner, F. und Eiden, R. (1988)** – A measuring device to quantify deposition of fogwater and ionic input by fog on small spruce trees, aus:  
Trees - structure and function, Springer-Verlag 1988.
- UBA** – Daten zur Umwelt 1992/1993, Umweltbundesamt Berlin, 1994 Erich Schmidt Verlag, Berlin
- UBA** – Daten zur Umwelt 1994/1995, Umweltbundesamt Berlin, 1996 Erich Schmidt Verlag, Berlin

- VDI (Hrsg.)** – VDI-Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, Loseblattausgabe, 4. neubearbeitete und erweiterte Auflage 1984, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Vincent, J. H. (1977)** – Model experiments on the nature of air pollution transport near buildings, Atmospheric Environm. Vol. 11 (1977), pp. 765 - 774.
- Vortmeyer, Dieter** – Dimensionslose Gruppen, Dimensionsanalyse, Ähnlichkeit und Modelle, aus:  
Bartholomé, Ernst (Hrsg.), Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, Bd.1, S. 197 - 212, 4., neubearb. u. erw. Auflage 1972, Verlag Chemie, Weinheim.
- Weiss, Joachim** – Ionenchromatographie, 2. erw. Auflage 1991, Verlag Chemie, Weinheim
- Winkler, Peter (1985)** – Verfahren der Depositionsmessung, Staub - Reinhalt. Luft 45 (1985) Nr. 6, S. 256 - 260.
- Wittenburg, Christian (1994)** – Trockene Schadgas- und Partikeldeposition auf verschiedene Sandsteinvarietäten unter besonderer Berücksichtigung atmosphärischer Einflußgrößen, Dissertation Fachbereich Chemie, Universität Hamburg.
- Wolf, Falk (1991)** – Bilanzierende Untersuchungen über den Einfluß reaktiver Luftschadstoffe auf das Verwitterungsverhalten von Naturstein-Prüfkörpern zweier Freilandversuchsfelder, Dissertation FB Chemie, Universität Hamburg.
- Zehnder, Konrad** – Verwitterung von Molassesandsteinen an Bauwerken und in Naturaufschlüssen, Beitr. z. Geol. d. Schweiz., Geotechn. Serie 61.

## 12 Anhang

### 12.1 Erläuterungen zur verwendeten Software

Die gesamte Anlage bestehend aus Windkanal, Gasdosierung und Analytik wird über ein ERSIS genanntes Prozeßleitsystem betrieben, das sowohl die Regelung als auch die Meßwerterfassung übernimmt. Die Eigenschaften dieses Systems sind hinlänglich beschrieben [SCHOOP(1989), SCHOOP sowie MANGELS(1992) u.a.], daher soll an dieser Stelle nur eine kurze Einführung gegeben werden.

ERSIS stellt ein an der TU Harburg entwickeltes Mehrrechnersystem dar. Direkt mit dem zu regelnden System verbunden ist der sogenannte Vorprozessor, der die eigentlichen Steuerungsschritte und die Erfassung der gesamten Signale übernimmt. Die in seinem flüchtigen Arbeitsspeicher abgelegten Daten werden in regelmäßigen Abständen über eine schnelle parallele Schnittstelle auf den Plattenrechner übertragen und hier auf den nichtflüchtigen Speicher der internen Festplatte geschrieben. Der Benutzer interagiert mit dem System über den sogenannten Hauptrechner, der die Umsetzung komplexer Regelvorgaben über eine relativ einfach zu bedienende grafische Oberfläche ermöglicht.

Der große Vorteil des Systems ist in der softwareseitigen Nachbildung der Regelblöcke zu sehen. ERSIS erlaubt die flexible und schnelle Veränderung der Regelungsparameter und den unkomplizierten Austausch von Reglertypen gegeneinander ohne Veränderungen im elektrischen und mechanischen Aufbau.

Im Abschnitt 12.2 sind die verwendeten Regelstrukturen dargestellt und kurz beschrieben. Daran anschließend (Abschnitt 12.3) sind die verwendeten Signale zusammengestellt und kurz erläutert.

Innerhalb des ERSIS-Systems sind folgende Signaltypen grundsätzlich zu unterscheiden:

- Eingangssignale sind von der Apparatur an das ERSIS-System geleitete Signale, z.B. die Ausgänge von Meßgeräten. Diese werden ggf. über einen Analog/Digital-Wandler in computerlesbare Daten überführt.
- Ausgangssignale sind von ERSIS an die Anlage gegebene Signale, die das Verhalten der entsprechenden Stellglieder (z.B. Gebläsesteller) beeinflussen. Gegebenenfalls werden diese Signale über einen Digital/Analog-Wandler in Signalformen (Spannungen, Ströme) umgesetzt, die von den angesprochenen Komponenten verwertet werden können.
- Merker sind Signale, die nur innerhalb von ERSIS existieren und keine reale Entsprechung in der zu regelnden Anlage haben. Sie dienen z.B. zur Umrechnung von Eingangssignalen (Spannungen zwischen - 10 und + 10 V) in physikalische Größen wie z.B. Temperatur in Kelvin.

Alle drei Signaltypen können ihrerseits entweder analoge Signale sein, die weitgehend beliebige Werte annehmen können oder binäre Signale, die nur zwei Zustände annehmen können (An oder Aus).



Tabelle 30: Zusammenstellung der Macrofunktionen der Windsteuerung mit den Werten, die im Rahmen dieser Arbeit benutzt wurden. Eingänge werden von der Software mit  $u$  gekennzeichnet, Ausgänge mit  $y$  und Konstanten mit  $a$ , ggf. noch unterschiedlich indiziert. Der besseren Lesbarkeit wegen, wurden in dieser Tabelle Macroeingänge mit  $ein$  und Macroausgänge mit  $aus$  bezeichnet.

Block-Nr.:	Name:	Gleichung:	Parameter:	
			$a_1$	$a_2$
3	Macro 1	$aus = a_1 \cdot ein$	12,0	n.v.
4	Macro 2	$aus = a_1 + a_2 \cdot ein$	-1,1249	0,2745
5	Macro 2	$aus = a_1 + a_2 \cdot ein$	4,0974	3,6424
6	Macro 1	$aus = a_1 \cdot ein$	0,2	n.v.

Tabelle 31: Die konstanten Signale der Blockstrukturseite der Windsteuerung

Signal-Name:	Wert:
gebloffset	0,43
windmin	0,99

deutliche Anlaufschwierigkeiten. Das Signal **windmin** wird daher knapp unter 1 m/s gesetzt.

Mit Macro 2 wird die gewünschte Windgeschwindigkeit mit den Regressionsdaten der Kalibrierung in die Soll-Frequenz umgerechnet, Macro 1 berechnet daraus das Stellsignal **geblsoll** (0 bis 10 V). Da das Gebläse nur mit maximal 50 Hz betrieben werden kann, der Frequenzsteller aber in der Lage ist Frequenzen bis 120 Hz auszugeben, werden in den Macros des unteren Zweiges entsprechend andere Zahlenwerte eingesetzt.

Die aktuellen Werte der Makros und konstanten Signale dieser Blockstrukturseite sind in den Tabellen 30 und 31 angegeben, die Definitionsbereiche der variablen Signale sind den Tabellen 48 und 49 in Kapitel 12.3 zu entnehmen.

Alle anderen Signale werden entweder vom Benutzer für das entsprechende Experiment festgelegt oder im Rahmen der Steuerung/Regelung durch die Software entsprechend den Erfordernissen verändert.

## 12.2.2 Regelung von Heizleistung und Lufttemperatur

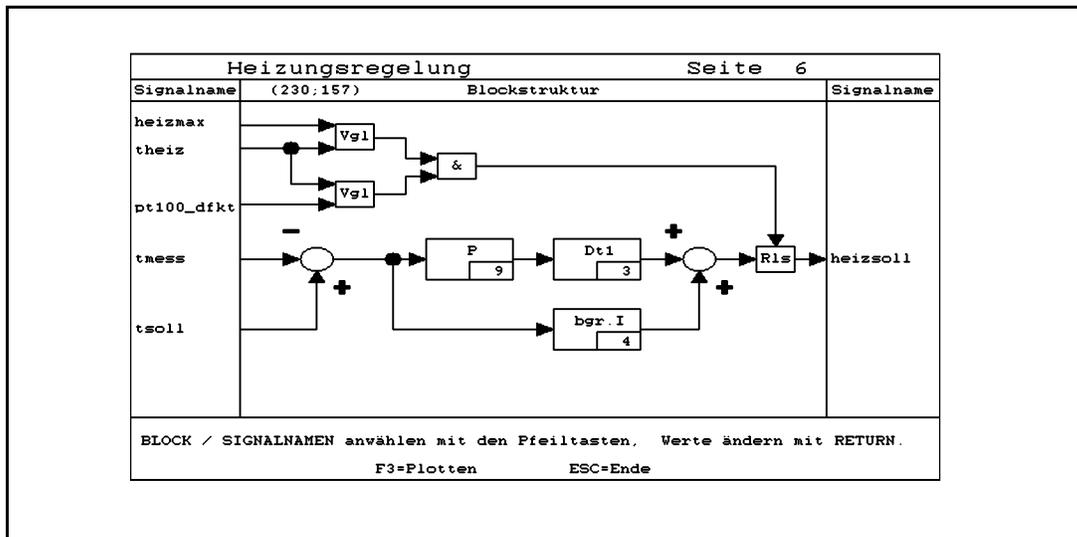


Abbildung 42: Ansteuerung des Leistungsstellers der elektrischen Heizung und Regelung der Lufttemperatur an der Meßstelle

Die Regelung der Lufttemperatur erfolgt, aus den in Kapitel 3.5.1 dargelegten Gründen über die elektrische Heizung. Die Abbildung 42 zeigt die dabei zur Anwendung kommende Blockstrukturseite. Die Kühlanlage wird nur auf eine maximal zulässige Temperaturdifferenz zur Lufttemperatur geregelt, um Kondensationsprobleme zu vermeiden. Die entsprechende Blockstruktur ist in Kapitel 12.2.3 dargestellt.

Im oberen Teil der Blockstrukturseite wird durch einen Vergleichsblock zunächst sichergestellt, daß die Temperatur der Rippenheizkörper **theiz** nicht über der maximal zulässigen Temperatur für das Kanalmaterial **heizmax** liegt. Die Heizkörpertemperatur wird über ein PT100-Element direkt an der Heizkörperoberfläche gemessen (siehe Abbildung 2 in Kapitel 3.2). Ein zweiter Vergleichsblock überprüft die Zuverlässigkeit des Meßsignals. Bei einem Fühlerbruch würde der Signalwert des Meßumformers der niedrigsten Temperatur des Meßbereiches entsprechen. Dieser liegt unterhalb der in der Anlage zu realisierenden Temperaturen. Solange also das Meßsignal größer ist, als der unterste Punkt des Meßbereiches von Umformer und Fühler, liegt kein Bruch vor und die erfaßte Temperatur ist realistisch.

Wenn einer der beiden Vergleiche nicht die oben angeführten Bedingungen erfüllt, wird das Stellsignal für den Leistungssteller der Heizung über den Relaisblock auf Null gezwungen.

Im unteren Bereich erfolgt die Temperaturregelung. Dazu wird über einen PID-Regler (aufgebaut aus den Blöcken 9, 3 und 4, sowie den beiden Addiergliedern) ständig der Sollwert der Lufttemperatur **tsoll** mit dem aktuellen Wert an der Meßstelle **tmess** verglichen und entsprechend das Stellsignal für den Leistungssteller der Heizung **heizsoll** eingeregelt.

Dabei bewirkt Block 9 (P-Regler) eine der Differenz von Sollwert und Istwert proportionale Änderung des Stellsignals, Block 3 sorgt dafür, daß diese Änderung mit der

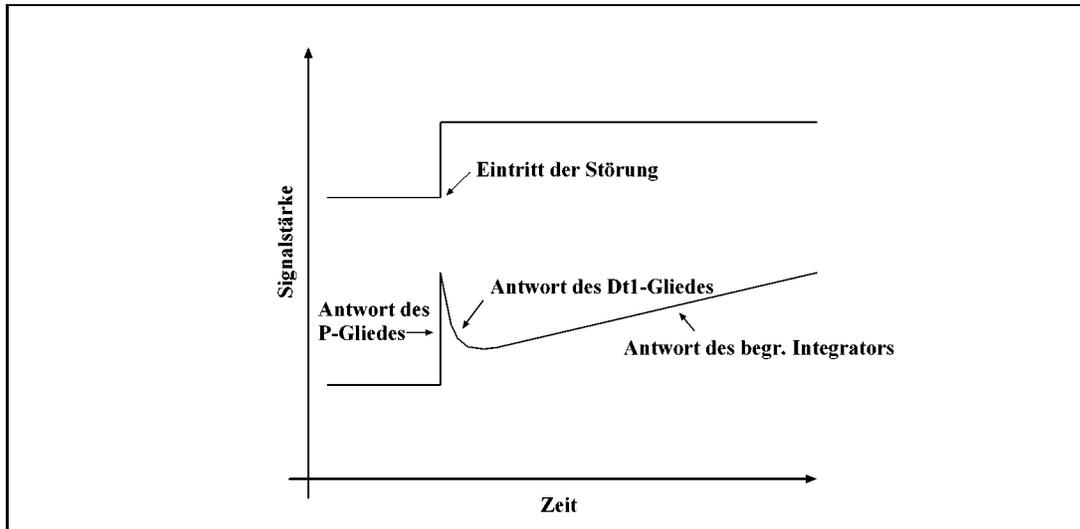


Abbildung 43: Das Verhalten des PID-Reglers wird in dieser Abbildung veranschaulicht. Der Eintritt einer Störung der Regelung (einer Abweichung zwischen Soll- und Istwert) ist im oberen Teil zu sehen, die Antworten der des gesamten Reglers darunter. Die Zeiten, in denen jeweils einzelne Blöcke das Verhalten des gesamten Reglers bestimmen sind gekennzeichnet. Im realen Fall würde die dargestellte Veränderung des Stellsignals natürlich auf die Störung rückwirken.

Zeit exponentiell abklingt und Block 4 erzeugt einen zeitlich linearen Anstieg des Stellsignals. Im Zusammenwirken erhält man also eine sofortige und große Stellwertveränderung beim Auftreten einer Regelabweichung (P-Anteil), eine rasche Rückführung auf eine der Regelabweichung angemessene Stellwertveränderung (D-Anteil) und schließlich die Feinregelung auf den neuen Stellwert (I-Anteil) ohne bleibende Regelabweichung (IGNATOWITZ). Die Verhaltensweisen der einzelnen Komponenten des Reglers sind in Abbildung 43 skizziert. Die Regler-Parameter wurden experimentell optimiert. Dabei wurde die Dämpfung des Reglers so an das Verhalten der Anlage angepaßt, daß ein Überschwingen im gesamten, zu realisierenden Temperaturbereich sicher vermieden wird. Die Regelparameter können für bestimmte Temperaturen weiter optimiert werden, um dann zu schnelleren Einstellzeiten zu kommen, allerdings wird dann der realisierbare Temperaturbereich eingengt.

Die in dieser Arbeit verwendeten Einstellungen sind in der Tabelle 32 aufgelistet, die Werte der konstanten Signale in Tabelle 33 angegeben.

Tabelle 32: Zusammenstellung der Reglerparameter der Heizungsregelung mit den Werten, die im Rahmen dieser Arbeit benutzt wurden.

Block-Nr.:	Block-Name:	Parameter:	Wert:
9	P-Block	Verstärkung	1.0
3	Dt1-Block	T1-Zeitkonstante	60 s
		TD-Zeitkonstante	60 s
4	begr. I-Block	Integrationszeitkonstante	60 s
		untere Grenze	0 V
		obere Grenze	10 V

Tabelle 33: Zusammenstellung der zur Heizungssteuerung eingesetzten konstanten Signale.

Signal-Name:	Wert:
pt100_dfkt	73 K
heizmax	318 K

### 12.2.3 Regelung der Kühlanlage

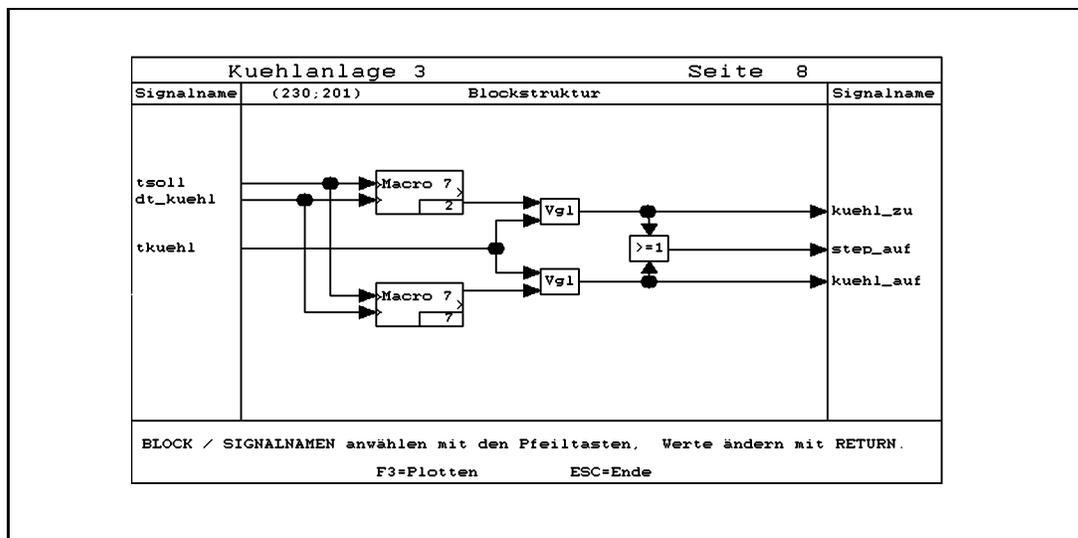


Abbildung 44: Ansteuerung des Bedarfsstellers der Kühlanlage

Die Regelung der Kühlanlage ist vergleichsweise einfach realisiert (siehe Abbildung 44), da die Lufttemperatur über die viel schneller ansprechende elektrische Heizung geregelt wird.

Tabelle 34: Zusammenstellung der Macrofunktionen der Kühlanlagensteuerung mit den Werten, die im Rahmen dieser Arbeit benutzt wurden. Eingänge werden von der Software mit  $u$  gekennzeichnet, Ausgänge mit  $y$  und Konstanten mit  $a$ , ggf. noch unterschiedlich indiziert. Der besseren Lesbarkeit wegen, wurden in dieser Tabelle Macroeingänge mit  $ein$  und Macroausgänge mit  $aus$  bezeichnet.

Block-Nr.:	Name:	Gleichung:	Parameter:		
			$a_1$	$a_2$	$a_3$
2	Macro 7	$aus = a_1 + a_2 \cdot ein_1 + a_3 \cdot ein_2$	0	1	- 1
7	Macro 7	$aus = a_1 + a_2 \cdot ein_1 + a_3 \cdot ein_2$	1	1	- 1

Tabelle 35: Die konstanten Signale der Blockstrukturseite der Kühlanlagensteuerung

Signal-Name:	Wert:
dt_kuehl	2 K

Der Merker **dt\_kuehl** definiert die Temperaturdifferenz zwischen dem Temperatursollwert **tsoll** und **tkuehl**, auf die ERSIS einregelt. Damit Regelschwankungen im Limit bleiben, ist der Wert etwas kleiner gewählt, als die theoretisch möglichen 3 K. Das Signal **tkuehl** stellt dabei die Temperatur am kältesten Punkt in der Anlage, dem untersten Einspritzpunkt des Verdampfers der Kühlanlage dar.

Diese Temperaturdifferenz kann vom Benutzer gegebenenfalls an andere, einzustellende Bedingungen angepaßt werden. Je kleiner der Wert gewählt wird, desto höhere Luftfeuchtigkeiten sind erreichbar, desto geringer wird allerdings auch der Wirkungsgrad der Kühlanlage.

Macro 7 addiert die beiden Eingangssignale und eine Konstante. Das Ergebnis wird in den Vergleicherböcken mit der gemessenen Temperatur am Verdampfer der Kühlanlage verglichen. Im oberen Zweig wird verglichen, ob die Temperatur am Verdampfer kleiner ist, als die Solltemperatur vermindert um die erlaubte Temperaturdifferenz. Ist dies der Fall, dann wird über das Signal **kuehl\_zu** das magnetische Einspritzventil zugefahren. Im unteren Zweig wird verglichen, ob die Temperatur am Verdampfer größer ist als die Summe aus **tsoll**, **- dt\_kuehl** und einer Konstanten. In dem Fall ist die wirkliche Temperaturdifferenz zu gering, um genug Kühlleistung zur Verfügung zu stellen. Es wird daher über das Signal **kuehl\_auf** das Magnetventil wieder aufgefahren.

Über ein logisches ODER-Gatter wird ausgewertet, ob die Ventilstellung verändert werden soll. Nur wenn dieses der Fall ist, wird über das Signal **step\_auf** und ein externes Relais die Verbindung zum Magnetventil geschlossen. Diese Konstruktion ist nötig, da das Ventil zu einer eigenen Regeleinheit der Kühlanlage gehört und sonst undefiniert von dieser Einheit bewegt wird.

## 12.2.4 Regelung des Schadstoffgehaltes

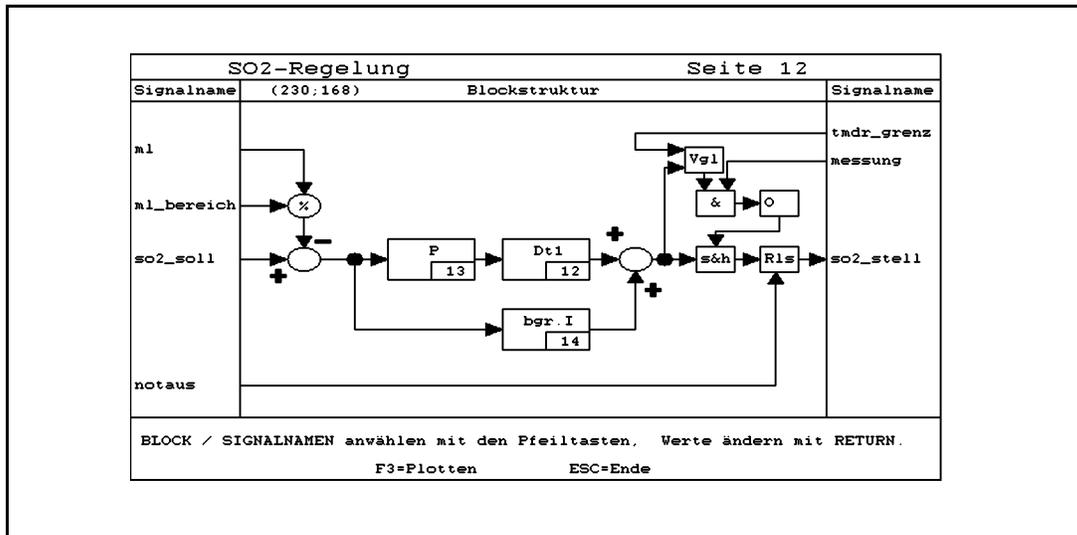


Abbildung 45: Regelung der Schadgaskonzentration im Kanal

Die in Abbildung 45 dargestellte Blockstrukturseite dient der Regelung der Konzentration an  $\text{SO}_2$  in der Kanalluft. Dazu wird zunächst aus dem Ausgangssignal des  $\text{SO}_2$ -Meßgerätes **m1** und dem vom Benutzer entsprechend der Geräteeinstellung vorzugebenen Konstante **m1\_bereich** die reale Konzentration an  $\text{SO}_2$  im Kanal berechnet.

Diese Konstante läßt sich aus dem Meßbereich und dem Ausgangssignal für Vollauschlag nach folgender Beziehung bestimmen:

$$\mathbf{m1\_bereich} = \frac{U_{\text{Voll.}}[\text{V}]}{c_{\text{Voll.}}[\text{ppmV}]}$$

Aus den Blöcken 13, 12 und 14 wird ein PID-Regler aufgebaut. Die Funktion wurde in Kapitel 12.2.2 bereits ausführlich beschrieben. Der Sollwert **so2\_soll** und reale Konzentration werden verglichen und ein entsprechend großes Stellsignal auf den thermischen Massenflußregler für das  $\text{SO}_2$ -Prüfgas (**so2\_stell**) gegeben. Die Massenströme für den Preßlufthauptstrom und den Nebenstrom durch den Blockverdampfer (siehe Kapitel 12.2.5) werden (hardwaremäßig) außerhalb der ERSIS-Software eingestellt, da für diese Ströme kein Regelbedarf besteht. Selbstverständlich werden die aktuellen Stoffströme dieser beiden thermischen Massenflußregler aber erfaßt und gespeichert.

Im rechten Teil der Blockstruktur sind noch einige Sicherheitsmaßnahmen eingebaut, ein Sample-and-Hold-Block friert den Stellwert für das Prüfgas-tMDR ein, wenn über die Ventilschaltung (siehe Kapitel 12.2.7) auf Kalibrierung umgeschaltet wird oder wenn der vom Regler berechnete Stellwert für das Prüfgas-tMDR größer wird als 100 % Durchlaß. Schließlich wird die  $\text{SO}_2$ -Dosierung vollständig abgebrochen, wenn ein Fehler bei der Blockverdampfersteuerung (siehe Kapitel 12.2.5) ein **notaus** auslöst.

Tabelle 36: Zusammenstellung der Reglerparameter der Schadgasdosierung mit den Werten, die im Rahmen dieser Arbeit benutzt wurden.

Block-Nr.:	Block-Name:	Parameter:	Wert:
9	P-Block	Verstärkung	1.0
3	Dt1-Block	T1-Zeitkonstante	60 s
		TD-Zeitkonstante	60 s
4	begr. I-Block	Integrationszeitkonstante	60 s
		untere Grenze	0 V
		obere Grenze	10 V

Tabelle 37: Die konstanten Signale der Schadgasdosierung

Signal-Name:	Wert:
ml_bereich	10 V/ppmV SO <sub>2</sub>
tmdr_grenz	100 %

### 12.2.5 Regelung der Wasserverdampfungseinheit

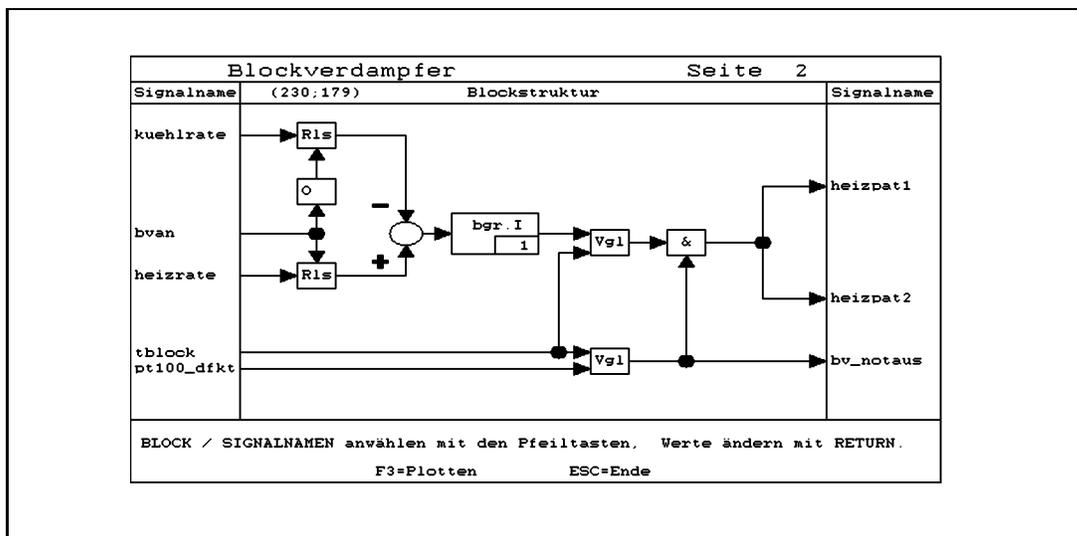


Abbildung 46: Regelung der Heizung des Blockverdampfers zur Wasserdosierung

Die Regelung der Luftfeuchte erfolgt durch gesteuerte Flüssigwasserzufuhr in einen konstant auf etwa 400 K geheizten Aluminiumblock, durch den ein Teilstrom der Preßluftzufuhr in den Kanal geführt wird. Das Prinzip ist bereits mehrfach beschrie-

Tabelle 38: Zusammenstellung der Reglerparameter der Blockverdampfersteuerung mit den Werten, die im Rahmen dieser Arbeit benutzt wurden.

Block-Nr.:	Block-Name:	Parameter:	Wert:
1	begr. I-Block	Integrationszeitkonstante	20 s
		untere Grenze	273 K
		obere Grenze	393 K

Tabelle 39: Die konstanten Signale der Blockverdampfersteuerung.

Signal-Name:	Wert:
heizrate	1 K/s
kuehtrate	400 K/s
pt100_dfkt	73 K

ben [DANNECKER und DÜWEL (1984), SCHMIDT (1994), SCHMIDT (1995) sowie MANGELS (1992)] und die in Abbildung 46 dargestellte Blockstruktur ist weitgehend unverändert von MANGELS (1992) übernommen worden.

Das binäre Signal **bvan** schaltet den Blockverdampfer AN oder AUS. Wird der Blockverdampfer angeschaltet, so wird über den Block 1, einen begrenzten Integrator, der Temperatursollwert langsam von 273 K bis zum Endwert erhöht. Der Merker **heizrate** bestimmt dabei die Aufheizgeschwindigkeit. Ein Vergleichsblock schaltet zwei Heizpatronen über externe Relais ein, wenn der Sollwert über der aktuellen Temperatur des Blockverdampfer **tblock** liegt und schaltet sie im umgekehrten Fall wieder aus. Durch diese Art der Regelung (langsame Sollwerterhöhung) wird ein zu starkes Überschwingen der Heizung vermieden.

Ein Vergleich des aktuellen Meßwertes des PT-100-Fühlers im Blockverdampfer mit dem Signalwert bei Fühlerbruch (**pt100\_dfkt**) löst gegebenenfalls das binäre Signal **notaus** und damit die Abschaltung der Heizpatronen über den Relaisblock auf der rechten Seite, sowie die SO<sub>2</sub>-Dosierung (siehe Kapitel 12.2.4) und die Wasserzufuhr (siehe Kapitel 12.2.6) aus.

Der Merker **kuehtrate** gibt die Änderungsgeschwindigkeit des Stellwertes im begrenzten Integrator bei Abkühlung vor. Er ist so gewählt, daß beim Abschalten praktisch sofort wieder der Startwert des Integrators erreicht wird. Damit wird gewährleistet, daß ein erneutes Anschalten wieder zum langsamen Hochfahren der Heizpatronen führt.

## 12.2.6 Regelung der Luftfeuchtigkeit

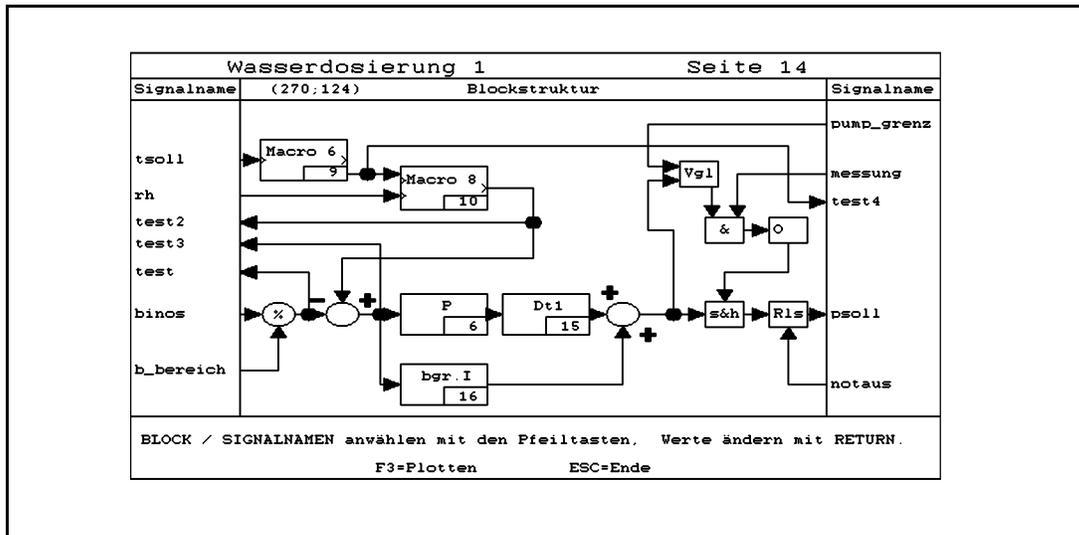


Abbildung 47: Regelung der Luftfeuchte

Die Regelung der Luftfeuchtigkeit erfolgt über die gesteuerte Zufuhr von Flüssigwasser in einen Blockverdampfer (siehe Kapitel 12.2.5). In der Abbildung 47 ist die Blockstrukturseite dargestellt, die die Peristaltikpumpe entsprechend der benötigten Wassermenge ansteuert.

Diese Seite arbeitet im Prinzip wie die  $\text{SO}_2$ -Dosierung (siehe Kapitel 12.2.4): aus dem Ausgangssignal des Wassermessgerätes **binos** und dem vom Benutzer entsprechend der Geräteeinstellung zu wählenden Merker **b\_bereich** wird die aktuelle Wasserdampfkonzentration im Kanal berechnet.

Macro 6 berechnet aus dem Sollwert der Lufttemperatur (**tsoll**) die Sättigungsfuchte (100 % rel. Feuchte) bei dieser Temperatur und Macro 8 berechnet aus diesem Wert und der gewünschten relativen Luftfeuchtigkeit **rh** den Sollwert.

Mit den Blöcken 6, 15 und 16 wird ein PID-Regler aufgebaut, der den Stellwert für die Pumpe (**psoll**) entsprechend der Differenz von Soll- und Istwert der Luftfeuchte berechnet. Die Funktionsweise wurde bereits in Kapitel 12.2.4 erläutert.

Der rechte Teil der Blockstrukturseite enthält einen Sample-and-Hold-Block, der den Stellwert der Pumpe einfriert, wenn von der Betriebsart „Messen“ auf „Kalibrierung“ umgeschaltet wird. Außerdem wird das Stellsignal auf die maximal mögliche Umdrehungszahl der Pumpe (**pump\_grenz**) begrenzt. Weiterhin wird die Wasserdosierung unterbrochen, wenn am Blockverdampfer ein **notaus** ausgelöst wird.

Die verschiedenen Test-Signale dienen nur der Überprüfung der Arbeitsweise und haben keinerlei Regelfunktion.

Tabelle 40: Zusammenstellung der Reglerparameter der Feuchteregelung mit den Werten, die im Rahmen dieser Arbeit benutzt wurden.

Block-Nr.:	Block-Name:	Parameter:	Wert:
6	P-Block	Verstärkung	1.0
15	Dt1-Block	T1-Zeitkonstante	60 s
		TD-Zeitkonstante	60 s
16	begr. I-Block	Integrationszeitkonstante	120 s
		untere Grenze	0 %
		obere Grenze	99 %

Tabelle 41: Die konstanten Signale der Feuchteregelung.

Signal-Name:	Wert:
b_bereich	1
pump_grenz	100 %

Tabelle 42: Zusammenstellung der Macrofunktionen der Feuchteregelung mit den Werten, die im Rahmen dieser Arbeit benutzt wurden. Eingänge werden von der Software mit  $u$  gekennzeichnet, Ausgänge mit  $y$  und Konstanten mit  $a$ , ggf. noch unterschiedlich indiziert. Der besseren Lesbarkeit wegen, wurden in dieser Tabelle Macroeingänge mit  $ein$  und Macroausgänge mit  $aus$  bezeichnet.

Block-Nr.:	Name:	Gleichung:	Parameter:	
			$a_1$	$a_2$
9	Macro 6	$aus = e^{(a_1 - a_2 \cdot ein)}$	-18,5559	-0,0661
10	Macro 8	$aus = ein_1 \cdot ein_2 \cdot a_1$	0,01	n.v.

## 12.2.7 Ansteuerung des magnetischen Mehrwegeventils

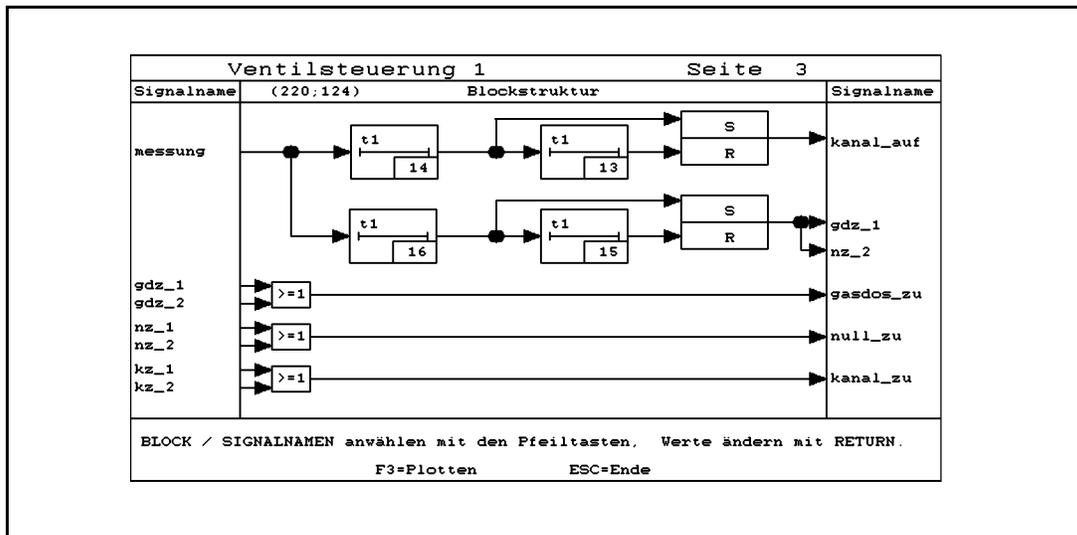


Abbildung 48: Ansteuerung des magnetischen Mehrwegeventils, Teil 1

Das magnetische Dreiwegeventil schaltet den Gasweg von drei Quellen (Kanal, Nullgas und Prüfgas) auf die Meßgeräte. Prinzipiell wäre eine solche Umschaltung einfacher zu realisieren als mit den beiden Blockstrukturseiten aus den Abbildungen 48 und 49, um aber Druckschwankungen zu minimieren war es nötig jeweils erst den neuen Gasweg zu öffnen und dann erst den alten Weg zu schließen.

Diese beiden Blockstrukturseiten enthalten nur binäre Signale. Der Gasweg wird über zwei Merker gesteuert: **messung** und **kalibr**. Wenn **messung** gesetzt ist, spielt der Zustand von **kalibr** keine Rolle. Der Gasweg zum Kanal wird geöffnet und die beiden anderen Wege zeitverzögert geschlossen.

Im oberen Teil der Abbildung 48 wird dieses Verhalten gesteuert. Wird das Signal **messung** gesetzt, so wird mit einer in Block 14 einstellbaren Verzögerungszeit dieses Signal auf den Setzeingang des obersten R/S-Kippgliedes geleitet, damit wird dessen Ausgang (**kanal\_auf**) gesetzt. Mit einer weiteren Verzögerung, die in Block 13 einstellbar ist gelangt das Signal **messung** schließlich auf den Rücksetzeingang des gleichen Kippgliedes und dessen Ausgang fällt auf Low zurück. Damit ist ein Strom-Impuls der Dauer t1 (Block 13) auf das Magnetventil gegeben worden, der den Gasweg zum Kanal öffnet.

Über die Blöcke 16, 15 und das untere Kippglied werden entsprechende Impulse erzeugt, die die beiden anderen Gaswege schließen. Die Dauer ist wieder mit t1 (Block 15) festgelegt, die zeitliche Verzögerung gegenüber dem Signal **kanal\_auf** wird durch t1 (block 16) - t1 (block 14) bestimmt.

In der unteren Hälfte der Abbildung 48 werden die Ausgänge der einzelnen Kippglieder der beiden Seiten zur Ventilsteuerung über ein logisches Oder-Gatter verknüpft. Dies ist nötig, da der Schließimpuls für einen Gasweg von zwei Schaltzuständen hervorgerufen werden kann. So ist z.B. der Gasweg vom Kanal zu den Meßgräten sowohl für die Messung von Nullgas als auch die Prüfgasmessung zu schließen.

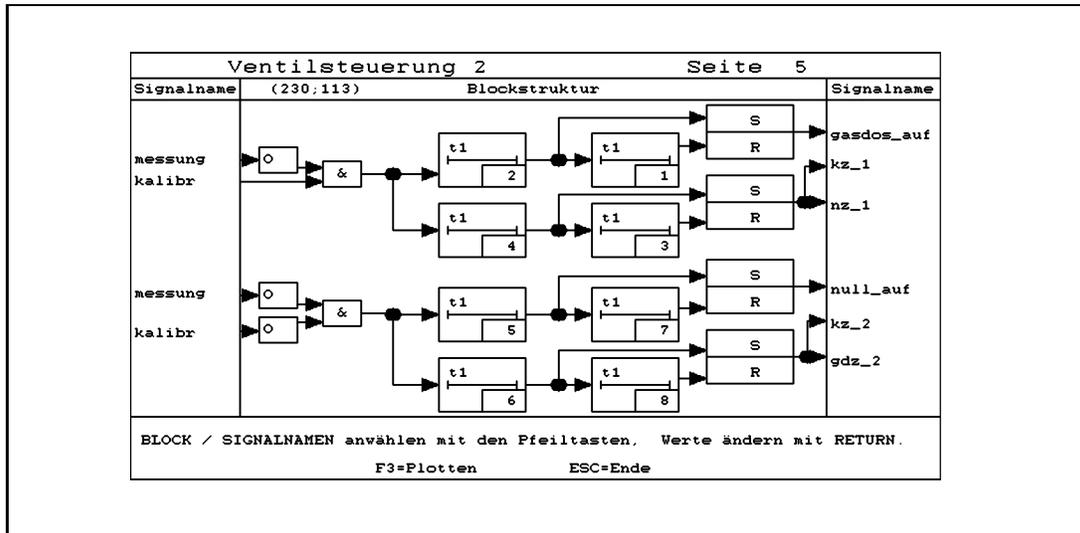


Abbildung 49: Ansteuerung des magnetischen Mehrwegeventils, Teil 2

Die zweite Blockstrukturseite zur Ventilsteuerung ist analog zur ersten aufgebaut und steuert die Wirkung des Signals **kalibr**. Dabei wird bei gesetztem Signal **kalibr** Prüfgas in definierter Verdünnung aus der Gasmischkammer der Gasdosierung auf die Meßgeräte geleitet (siehe auch Kapitel 3.5.4), bei nicht gesetztem Signal dagegen Nullluft aus der Preßluftaufbereitung.

Der Zustand des Signals **kalibr** wird nur dann ausgewertet, wenn **messung** nicht gesetzt ist. Dies wird im linken Teil der Blockstrukturseite Ventilsteuerung 2 durch eine logische UND-Verknüpfung des negierten Signals **messung** mit dem Signal **kalibr** im oberen bzw. dem negierten Signal **kalibr** im unteren Teil der Seite sichergestellt.

Bis auf die binären Ausgangssignale **kanal\_auf**, **gasdos\_zu**, **null\_zu**, **kanal\_zu**, **gasdos\_auf** und **null\_auf** sind alle anderen Signale Merker. Dabei werden die Zustände von **messung** und **kalibr** vom Benutzer oder automatisch (siehe Kapitel 12.2.8) festgelegt, alle anderen werden entsprechend von der Steuerungssoftware verändert.

Tabelle 43: Einstellungen der Timer für die Ventilsteuerung.

Timer-Nr.:	Timer-Name:	Zeitkonstante:
13	Einschaltverzögerung	5 s
14	Einschaltverzögerung	20 s
15	Einschaltverzögerung	5 s
16	Einschaltverzögerung	30 s
1	Einschaltverzögerung	5 s
2	Einschaltverzögerung	20 s
3	Einschaltverzögerung	5 s
4	Einschaltverzögerung	30 s
5	Einschaltverzögerung	20 s
6	Einschaltverzögerung	30 s
7	Einschaltverzögerung	5 s
8	Einschaltverzögerung	5 s

### 12.2.8 Zeitprogramm zur automatischen Ventilschaltung zwischen Meßbetrieb, Nullgas und Prüfgas

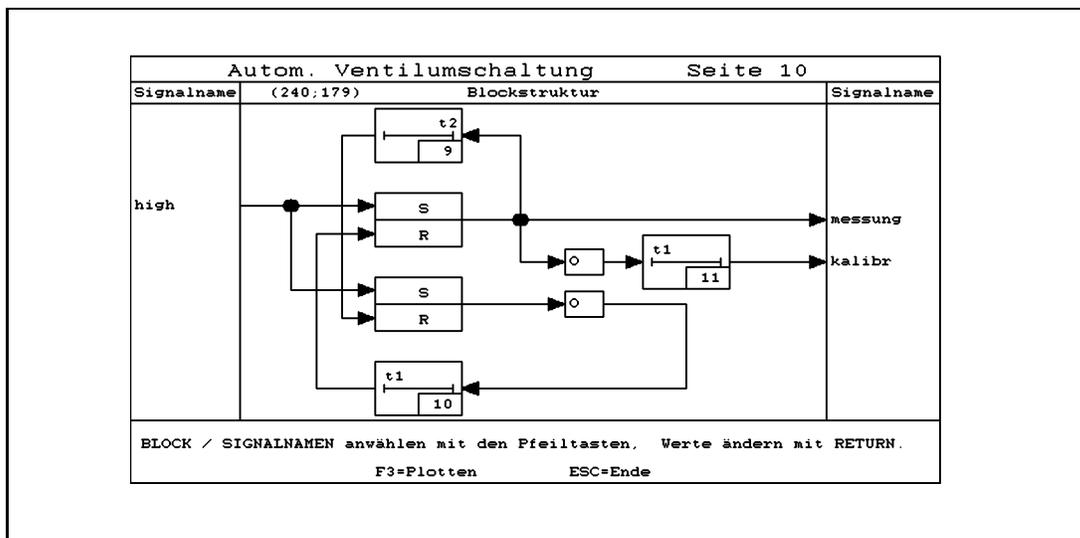


Abbildung 50: Zeitprogramm zur automatischen Ventilschaltung zwischen Meßbetrieb, Nullgas und Prüfgas.

Die in Abbildung 50 gezeigte Blockstrukturseite wurde entwickelt, um während längerer Messungen in regelmäßigen Abständen den Nullpunkt und eine definierte Prüfgasverdünnung aufzunehmen. Auf diese Weise können die Meßgeräte während einer Messung überprüft werden (für das Wassergerät allerdings nur die Nullpunktdrift).

Den Kern bildet ein astabiler Multivibrator, der das Signal **messung** für die in Block 10 festgelegte Zeit setzt und dann für die in Block 9 festgelegte Zeit zurücksetzt.

Tabelle 44: Einstellungen der Timer für das Zeitprogramm zur automatischen Ventilumschaltung zwischen Meßbetrieb, Nullgas und Prüfgas.

Timer-Nr.:	Timer-Name:	Zeitkonstante:
9	Ausschaltverzögerung	20 min
10	Einschaltverzögerung	23:40 h
11	Einschaltverzögerung	10 min

Das Signal **high** dient zur Einstellung eines definierten Startpunktes. Solange **messung** gesetzt ist, wird durch die Negation vor Block 11 **kalibr** zurückgesetzt. Wechselt das Signal **messung** auf Low, dann wird **kalibr** nach der durch Block 11 bestimmten Zeit gesetzt.

Insgesamt wird also für eine Zeit t1 (Block 10) Kanalluft in die Meßgeräte geleitet, danach für t2 (Block 9) - t1 (Block 11) Nullgas und schließlich für t1 (Block 11) Prüfgas aus der Gasmischkammer.

Diese Seite benötigt die Ventilsteuerungen aus den Abbildungen 48 und 49 um arbeiten zu können.

### 12.2.9 Zeitsteuerung für Temperaturgänge

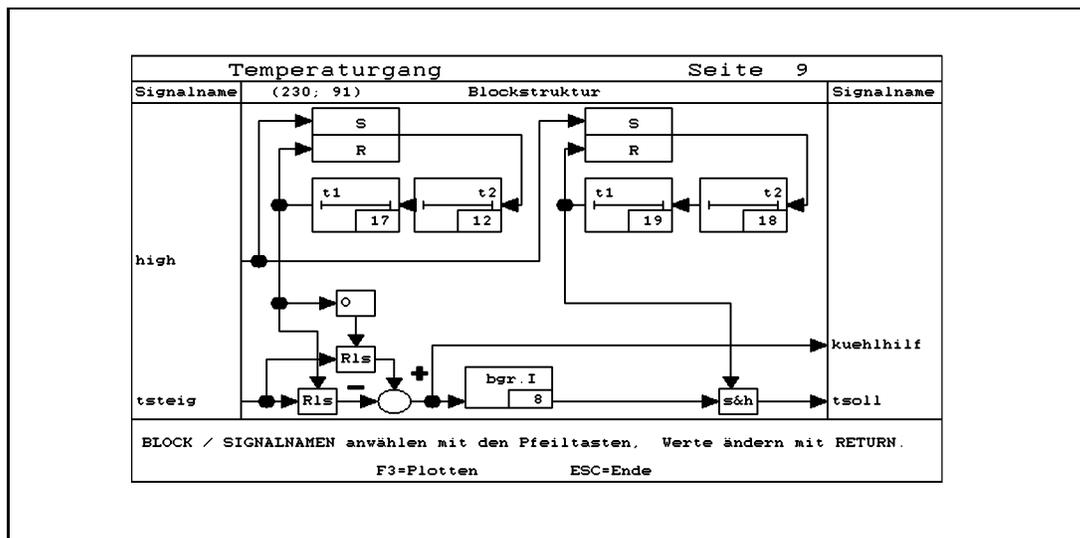


Abbildung 51: Zeitprogramm zum Fahren von Temperaturgängen

Die Abbildung 51 stellt eine Blockstruktur dar, mit der die Temperatur an der Meßstelle im Kanal periodisch zwischen zwei Zuständen gefahren werden kann, um Tag/Nacht-Wechsel, Frost/Tau-Wechsel oder andere zyklische Temperaturänderungen zu simulieren.

In der linken, oberen Ecke bilden das R/S-Kippglied und die beiden Timer (Blöcke 17 und 12) einen astabilen Multivibrator, der das Signal **tsteig** abwechselnd mit posi-

Tabelle 45: Die konstanten Signale der Zeitsteuerung für Temperaturgänge.

Signal-Name:	Wert:
high	HIGH
tsteig	10 K

Tabelle 46: Zusammenstellung der Reglerparameter der Zeitsteuerung für Temperaturgänge mit den Werten, die im Rahmen dieser Arbeit benutzt wurden.

Block-Nr.:	Block-Name:	Parameter:	Wert:
8	begr. I-Block	Integrationszeitkonstante	360 s
		untere Grenze	268 K
		obere Grenze	308 K

tivem bzw. mit negativem Vorzeichen auf den begrenzten Integrator (Block 8) gibt und damit Heiz- bzw. Abkühlphasen startet. Obere und untere Temperaturgrenze werden im Integrator eingestellt. Der Ausgang von Block 8 wird als Temperatursollwert an die Blockstrukturseite zur Temperaturregelung (Kapitel 12.2.2) weitergegeben.

In der rechten oberen Ecke übernimmt ein gleichartig aufgebauter Multivibrator die Einstellung der Plateau-Haltezeiten über ein Sample-and-Hold-Glied. Die Differenz der Zeiten  $t_1$  (Block 17) -  $t_1$  (Block 19) bestimmt die Aufheizzeit, nach der Zeit  $t_1$  (Block 19) beginnt das obere Plateau mit konstanter Temperatur. Es wird für die Zeit  $t_2$  (Block 18) gehalten. Die Zeit  $t_2$  (Block 12) -  $t_2$  (Block 18) bestimmt die Abkühlzeit, an die sich für die Zeit  $t_2$  (Block 18) das untere Plateau anschließt. Das Signal **kuehlhilf** wurde für eine ältere Version der Kühlanlagenregelung benötigt und wird nicht mehr verwendet.

Sowohl die Blockstrukturseite für die Kühlanlagenregelung (vergleiche 12.2.3) als auch die Heizungsregelung (vergleiche 12.2.2) werden benötigt, um diese Seite zu betreiben.

Tabelle 47: Die Einstellungen der Timer für die Zeitsteuerung der Temperaturgänge.

Timer-Nr.:	Timer-Name:	Zeitkonstante:
12	Ausschaltverzögerung	8 h
17	Einschaltverzögerung	8 h
18	Ausschaltverzögerung	4 h
19	Einschaltverzögerung	4 h

### 12.3 Übersicht über die Meß-, Steuer- und Regelungssignale

In den folgenden Tabellen sind die verwendeten elektrischen Signale mit der Kurzbezeichnung aufgeführt, mit der sie in den Blockstrukturseiten definiert sind. Zusätzlich sind eine kurze Beschreibung der Funktion und ihr Definitionsbereich angegeben.

Tabelle 48: Übersicht über die verwendeten binären Signale.

Adresse:	Name:	Beschreibung:	Zustand 0:	Zustand 1:
Eingänge:				
1	flag	Hilfssignal für Zeitauswertungen	AUS	AN
Ausgänge:				
17	geblan	An/Aus-Schalter für das Gebläse	AUS	AN
18	heizpat1	Regelung Heizpatrone 1 im Blockverdampfer	AUS	AN
19	heizpat2	Regelung Heizpatrone 2 im Blockverdampfer	AUS	AN
20	pschalt	AN/AUS-Schalter Ismatec-Pumpe	AUS	AN
21	pricht	Förderrichtung der Ismatec-Pumpe	LINKS	RECHTS
22	null-auf	Dreiwegeventil: Nullluft auf	low	high
23	null-zu	Dreiwegeventil: Nullluft zu	low	high
24	kanal-auf	Dreiwegeventil: Kanalluft auf	low	high
25	kanal-zu	Dreiwegeventil: Kanalluft zu	low	high
26	gasdos-auf	Dreiwegeventil: Mischkammer- ausgang auf	LOW	HIGH
27	gasdos-zu	Dreiwegeventil: Mischkammer- ausgang zu	LOW	HIGH
28	step-auf	Schrittmotor Kühlregler an/aus	AUS	AN
29	kuehl-zu	Verdampferventil auffahren	AUF	ZU
30	kuehl-auf	Verdampferventil zufahren	AUF	ZU
Merker:				
33	bvan	An/Aus-Schalter Blockverdampfer	AUS	AN
34	bv-notaus	Notaussignal vom Blockverdampfer	OK	ALARM!
37	messung	Umschaltung zwischen Meßwerterfassung und Überprüfung der Meßgeräte	Kalibr.	Messen
38	kalibr		Null	Span
39	nz-1	Hilfssignal zur Ventilsteuerung	low	high
40	nz-2	Hilfssignal zur Ventilsteuerung	low	high
41	kz-1	Hilfssignal zur Ventilsteuerung	low	high
42	kz-2	Hilfssignal zur Ventilsteuerung	low	high
43	gdz-1	Hilfssignal zur Ventilsteuerung	low	high
44	gdz-2	Hilfssignal zur Ventilsteuerung	low	high
48	high	Hilfssignal für R/S-Kippglieder	LOW	HIGH
49	notaus	Hilfssignal zur Notabschaltung	Notaus	Betrieb

Tabelle 49: Übersicht über die verwendeten analogen Signale.

Adresse:	Name:	Beschreibung:	Def.-Bereich:	Einheit:
Eingänge:				
1	tmess	Temperatur an der Meßstelle	73.00 bis 373.00	[K]
2	theiz	Temperatur am Heizrippenbogen	73.00 bis 373.00	[K]
3	tkuehl	Temperatur am Kühlanlageneinlaß	73.00 bis 373.00	[K]
4	tblock	Temperatur am Blockverdampfer	73.00 bis 473.00	[K]
5	binos	Ausgangssignal des Binos-Gerätes	-10.00 bis 10.00	[V]
6	pdreh	Drehzahlrückmeldung Ismatec Pumpe	-142.86 bis 142.86	[%]
7	geblast	Istwertrückmeldung vom Gebläse	-10.00 bis 10.00	[V]
8	sondsignal	Ausgangssignal der TSI-Sonde	-10.00 bis 10.00	[V]
9	ml	Ausgangssignal des ML-Gerätes	-10.00 bis 10.00	[V]
10	luft-ist	Istwert des Preßluft-tMDRs	-200.00 bis 200.00	[%]
11	so2-ist	Istwert des SO <sub>2</sub> -tMDRs	-200.00 bis 200.00	[%]
12	h2o-ist	Istwert des Blockverdampfer-tMDRs	-200.00 bis 200.00	[%]
Ausgänge:				
33	geblsoll	Sollwertvorgabe des Gebläses	.00 bis 10.00	[V]
35	heizsoll	Sollwertvorgabe der Heizung	.00 bis 10.00	[V]
36	psoll	Drehzahlvorgabe Ismatec Pumpe	.00 bis 100.00	[%]
37	luft-stell	Stellwert des Preßluft-tMDRs	.00 bis 10.00	[V]
38	so2-stell	Stellwert des SO <sub>2</sub> -tMDRs	.00 bis 10.00	[V]
Merker:				
41	windist	akt. Windgeschwindigkeit	.00 bis 10.00	[m/s]
42	windsoll	Sollwert der Windgeschwindigkeit	.00 bis 10.00	[m/s]
43	windmin	min. sinnv. Windgeschwindigkeit	.00 bis 10.00	[m/s]
44	gebloffset	Nullpunktverschiebung Gebläse	.00 bis 10.00	[V]
46	b-bereich	Messbereich des Binos-Gerätes	-10.00 bis 10.00	[-]
47	heizmax	max. erlaubte Temperatur am Heizkörper	73.00 bis 373.00	[K]
49	heizrate	Anstiegsrate f. Blockverdampfer	.00 bis 20.00	[K/Z.E.]
50	kuehlrate	Abkühlrate f. Blockverdampfer	.00 bis 400.00	[K/Z.E.]
51	pt100-dfkt	PT100-Funktionstest am BV	.00 bis 300.00	[K]
54	tsoll	Temperatursollwert	.00 bis 400.00	[K]
61	dt-kuehl	Sollwertvorgabe für die Kühlanlage	.00 bis 10.00	[K]
65	ml-bereich	Divisionsfaktor für Meßbereich	.00 bis 100.00	[-]
67	so2-soll	Sollwert der SO <sub>2</sub> -Konzentration	.00 bis 1.00	[ppmV]
68	tsteig	Temperatur-Anstiegsrate für Temperaturprogramme	-10.00 bis 10.00	[K]
69	tmdr-grenz	Hilfssignal zur Begrenzung des Sollwertes für tMDRs auf 100 %	.00 bis 10.00	[V]
72	rh	relative Luftfeuchte im Kanal	.00 bis 100.00	[%]

## 12.4 Sicherheitsrelevante Daten der verwendeten Chemikalien

In der folgenden Tabelle sind die Gefahrenmerkmale und Sicherheitsratschläge für die in dieser Arbeit verwendeten Chemikalien zusammengestellt. Zusätzlich ist die CAS-Nummer angegeben, um das Auffinden weitergehender Informationen zu erleichtern.

Tabelle 50: Sicherheitsrelevante Daten der verwendeten Chemikalien nach HÖRATH. Der Eintrag „Stoffliste“ kennzeichnet eine Einstufung gemäß Gefahrstoffverordnung §4a Absatz 1 (Listenprinzip). Für Kaliumcarbonat gibt es in der Stoffliste keine Einstufung, es wurden daher die Herstellerangaben übernommen. Die angefertigten Zubereitungen (IC-Eluent und Passivsammlerabsorptionslösung) wurden gemäß Gefahrstoffverordnung Anhang II Nr. 1.5.1 bzw. 1.5.4 eingestuft (konventionelle Methode). Die so erhaltenen Einstufungen sind mit dem Eintrag „berechnet“ kenntlich gemacht.

Stoff / Zubereitung:	Einstufung/Kennzeichnung:	Quelle:	CAS-Nr.:
SO <sub>2</sub>	T, C R: 23 - 34 S: 9 - 26 - 36/37/38 - 45	Stoffliste	7446 - 09 - 5
Prüfgas (1,5 Vol% SO <sub>2</sub> )	Xi, R: 36/37/38	Stoffliste	
Kanalluft (max. 0,9 ppmV SO <sub>2</sub> )	keine Einstufung	Stoffliste	
Natriumhydrogencarbonat	keine Einstufung	Stoffliste	144 - 55 - 8
Natriumcarbonat	Xi R: 36 S: 22 - 26	Stoffliste	497 - 19 - 8
Eluent (0,006 Gew% NaHCO <sub>3</sub> ; 0,02 Gew% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	keine Einstufung	berechnet	
Triethanolamin	keine Einstufung	Stoffliste	102 - 71 - 6
Kaliumcarbonat	Xn, Xi R: 22-36/37/38 S: 22 - 26	Merck	584 - 08 - 7
Ethylenglycol	Xn R: 22 S: (2)	Stoffliste	107 - 21 - 1
Absorptionslösung (1,9 Gew% Triethanolamin; 1,4 Gew% K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ; 5,4 Gew% Ethylenglycol)	keine Einstufung	berechnet	

## 12.5 Lebenslauf

Werner Nowatzky  
 Odenwaldstr. 10  
 20255 Hamburg  
 Tel.: 040 /491 23 07

### Privat:

09.10.61 geboren in Hannover,  
 als Sohn von Gerd und Irma Nowatzky, geb. Jagst

### Ausbildung:

7/68 - 6/72 Grundschule Kielortallee und Neubergerweg in Hamburg  
 7/72 - 6/81 Gymnasium Langenhorn in Hamburg  
 6/81 Abitur (Note 1.4)  
 7/81 - 9/82 Grundwehrdienst in Heide und Flensburg (Schleswig-Holstein)  
 10/82 - 4/89 Studium der Chemie an der Universität Hamburg  
 1/85 Diplomvorprüfung, Gesamtnote „sehr gut“  
 4/88 Diplomprüfung } Gesamtnote „sehr gut“  
 5/88 - 3/89 Diplomarbeit }  
 5/89 - Promotion

### Bisherige Tätigkeiten:

Studentische Hilfskraft  
 11/86 - 5/89 Inst. f. Anorg. u. Angew. Chemie/Inst. f. Meteorologie  
 Regenuntersuchungen, Schadgasausbreitungen im Windkanal  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
 6/89 - 9/89 Institut für Meteorologie  
 10/89 - 9/92 Institut f. Anorg. u. Angew. Chemie  
 Betreuung des chem. Praktikums für Mediziner  
 Aufsicht über die Gruppenassistenten  
 Abhalten von Seminaren, Entwurf der Klausuren  
 10/92 - 9/94 Institut f. Anorg. u. Angew. Chemie  
 Gerätewartung, Servicemessungen (ICP)  
 Betreuung von Luftqualitätsmessungen  
Weitere Tätigkeiten  
 11/94 - Fremddozent bei DEKRA, Lübeck, Chemie und Luftreinhaltung  
 Fremddozent bei WAK, Kiel, Immissionsschutz  
 02/96 - Leiter Ausbildungslabor DEKRA Akademie, Lübeck