

Verbesserung des
Staubkonzentrations-
messgerätes SKG 5

F-05-9901

Verbesserung des
Staubkonzentrationsmessgerätes SKG 5

Diplomarbeit

von

Madlen Nicklisch

Fachhochschule Mannheim

und

Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und
Arbeitsmedizin

Mannheim, Oktober 2005

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Mannheim, 31. Oktober 2005

(Madlen Nicklisch)

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
1 Einleitung	3
1.1 Allgemeines	3
1.2 Status Quo zu Beginn der Arbeit	4
1.3 Zielsetzung	5
2 Das Messgerät SKG 5	7
2.1 Messprinzip	7
2.2 Aufbau des Gerätes	8
2.2.1 Messeinheit	8
2.2.2 Anzeige- und Steuereinheit	9
2.3 Kalibrierung	11
3 Problematik Kalibrierkurvenerstellung	13
3.1 Auswahl der zu prüfenden Stäube	13
3.2 Kalibrierkurvenerstellung mit Suspensionsmethode	14
3.2.1 Versuchsaufbau	14
3.2.2 Versuchsdurchführung	14
3.2.3 Versuchsergebnisse	14
3.2.4 Versuchsauswertung und Diskussion	14
3.3 Entwicklung einer neuen Kalibriermethode	16
3.3.1 Idee des Messprinzipes	16
3.3.2 Versuche im Vorfeld	16
3.3.2.1 Versuchsaufbau	17
3.3.2.1.1 Partikeldosierer RBG 1000	17
3.3.2.1.2 Ringionisator	18
3.3.2.2 Versuchsdurchführung	19

3.3.2.3	Versuchsergebnisse	20
3.3.2.4	Versuchsauswertung und Diskussion	22
3.3.3	Aufbau einer Apparatur zur Aufnahme von Kalibrierkurven	27
3.3.3.1	Anforderungen an die Apparatur und Konzept	27
3.3.3.2	Aufbau der Messkammer	28
3.3.3.3	Aufbau der Torsionswaage	30
3.3.3.3.1	Auswahl des Wägearms	31
3.3.3.3.2	Auswahl des Torsionsdrahtes	32
3.3.3.3.3	Aufbau der Halterung für das Glasplättchen	36
3.3.3.3.4	Laserlicht als Waagenzeiger	37
3.3.3.3.5	Aufbau der Spiegel und der Skala	38
3.3.3.3.6	Endgültiger Aufbau der Waage	46
3.3.3.4	Erprobung der Apparatur	47
3.3.3.4.1	Versuchsreihe 1	47
3.3.3.4.2	Versuchsreihe 2	48
3.3.3.4.3	Versuchsreihe 3	50
3.3.3.4.4	Versuchsreihe 4	51
3.3.3.5	Aufnahme von Kalibrierkurven mit der Apparatur	54
3.3.3.5.1	Versuchsaufbau	54
3.3.3.5.2	Versuchsdurchführung	54
3.3.3.5.3	Versuchsergebnisse	55
3.3.3.5.4	Versuchsauswertung und Diskussion	55
4	Problematik Linsenverschmutzung	59
4.1	Bisher vorhandene Techniken	59
4.1.1	Standard-Reinigungsvorrichtung, Typ 7	59
4.1.2	Schutzkappen, Typ 7S	59
4.1.3	Schließzylinder, Typ 8	60
4.1.4	Pressluftgesteuerte Schieber, Typ 9	60
4.1.5	Reinigung durch Luftstrom, Typ 10	61
4.2	Anforderungen an den Linsenschutz	61
4.3	Prüfung der Luftstrom-Methode	62
4.3.1	Versuchsreihe 1	62
4.3.1.1	Versuchsaufbau	62
4.3.1.2	Versuchsdurchführung	63

4.3.1.3	Versuchsergebnisse	64
4.3.1.4	Versuchsauswertung und Diskussion	64
4.3.2	Versuchsreihe 2	65
4.3.2.1	Versuchsaufbau	66
4.3.2.2	Versuchsdurchführung	66
4.3.2.3	Versuchsergebnisse	66
4.3.2.4	Versuchsauswertung und Diskussion	67
4.4	Entwicklung einer neuen Methode	69
4.4.1	Prinzip der neuen Schutzmethode	69
4.4.2	Aufbau und Funktion	69
4.4.3	Experimentelle Prüfung des neuen Systems	72
4.4.3.1	Versuchsreihe 1	72
4.4.3.1.1	Versuchsaufbau	72
4.4.3.1.2	Versuchsdurchführung	72
4.4.3.1.3	Versuchsergebnisse	73
4.4.3.1.4	Versuchsauswertung und Diskussion	73
4.4.3.2	Versuchsreihe 2	74
4.4.3.2.1	Versuchsaufbau	74
4.4.3.2.2	Versuchsdurchführung	74
4.4.3.2.3	Versuchsergebnisse	74
4.4.3.2.4	Versuchsauswertung und Diskussion	76
4.4.3.3	Versuchsreihe 3	76
4.4.3.3.1	Versuchsaufbau	77
4.4.3.3.2	Versuchsdurchführung	77
4.4.3.3.3	Versuchsergebnisse	77
4.4.3.3.4	Versuchsauswertung und Diskussion	78
4.4.3.4	Versuchsreihe 4	78
4.4.3.4.1	Versuchsaufbau	78
4.4.3.4.2	Versuchsdurchführung	78
4.4.3.4.3	Versuchsergebnisse	79
4.4.3.4.4	Versuchsauswertung und Diskussion	79
4.4.4	Ein systematischer Messfehler oder die Definition der wahren Messweite	80
4.4.4.1	Fehlerbeschreibung und Definition der Eindringtiefe K	80
4.4.4.2	Experimentelle Bestimmung der Eindringtiefe K	81

4.4.4.2.1	Versuchsaufbau	81
4.4.4.2.2	Versuchsdurchführung	82
4.4.4.2.3	Versuchsergebnisse	82
4.4.4.2.4	Versuchsauswertung und Diskussion	83
5	Diskussion der Ergebnisse und Ausblick	84
5.1	Diskussion der Ergebnisse	84
5.1.1	Problematik Kalibrierkurvenerstellung	84
5.1.1.1	Suspensionsverfahren	84
5.1.1.2	Sedimentationsverfahren	84
5.1.1.3	Aufbau einer Apparatur zur Kalibrierkurvenerstellung	85
5.1.1.4	Messkammer	85
5.1.1.5	Torsionswaage	86
5.1.1.6	Messergebnisse	87
5.1.2	Problematik Linsenverschmutzung	87
5.1.2.1	Reinigung durch Luftstrom, Messeinheit Typ 10	87
5.1.2.2	Messeinheit Typ 11	88
5.1.2.3	Ein systematischer Messfehler beim SKG 5 Typ 7	88
5.2	Ausblick	88
5.2.1	Apparatur zur Kalibrierkurvenerstellung	89
5.2.2	SKG 5-Messeinheit Typ 11	90
	Literaturverzeichnis	92
	A Messergebnisse	93
A.1	Messdaten zu Abschnitt 3.2	93
A.2	Messdaten zu Abschnitt 3.3	94
A.2.1	Einfluss von Dispergierbürste und Ionisator	94
A.2.2	Kalibrierkurvenerstellung mit dem vorläufigen Versuchsaufbau .	97
A.2.3	Messdaten zu Abschnitt 3.3.3.4.3.3	99
A.2.4	Messdaten zu Abschnitt 3.3.3.4	99
	B Konstruktionszeichnungen	102
B.1	Messkammer	102
B.2	Messeinheit Typ 11	114

Liste der Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	$^{\circ}$, rad	Auslenkung des Wägearms aus der Ruhelage
α_{\max}	$^{\circ}$, rad	Maximale Auslenkung des Wägearms aus der Ruhelage
a	m^2	Durchleuchtete Fläche auf dem Glasplättchen
A	m^2	Gesamtfläche des Glasplättchens
β	$^{\circ}$	Einfallswinkel des Lasers
b	mm	Messausschlag
B_1, B_2, B_3	-	Koeffizienten
$B_{2\text{neu}}$	-	Auf eine neue Messweite umgerechneter Koeffizient
B_{Sp}	mm	Breite des Spiegels
c	g/m^3	Konzentration allgemein
δ	rad	Winkel des Ausschnittes
D	Nm	Richtmoment
DE_i	-	Vektoren bei der Berechnung der Wägeeinheit
ϵ	$\text{m}^3/\text{g} \cdot \text{mm}$	Extinktionskoeffizient
E	-	Extinktion
E_0, E_1, E_2	-	Einheitsvektoren bei der Berechnung der Wägeeinheit
F	N	Gewichtskraft
γ	$^{\circ}$	Auslenkung des oberen Spiegels gegen die Horizontale
g	g/s^2	Fallbeschleunigung
G	N/m^2	Torsionsmodul
h	m	Länge des Strahlengangzylinders
h_1	cm	Länge des Hebels der Ausgleichsseite
h_2	cm, mm	Länge des Wägearms
h_{Pendel}	m	Länge des Pendelgewichtes
I	W/m^2	Intensität des transmittierten Lichtes
I_0	W/m^2	Intensität des ausgesandten Lichtes
J	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	Trägheitsmoment eines Körpers um seine Drehachse
K	mm	Eindringtiefe des Staubes in die Distanzhülsen
λ	nm	Wellenlänge
l	m	Länge der durchleuchteten Strecke
l_1	m	Messweite der Messeinheit des SKG 5
l_2	m	Abmessung des Kalibriergefäßes in Richtung der optischen Achse der Messeinheit des SKG 5
l_a	mm	Messweite einer SKG 5-Messeinheit

l_b	mm	Messweite einer SKG 5-Messeinheit
l_{Tors}	m	Länge des Torsionsdrahtes
l_u	mm	Messweite unbekannter Länge einer SKG 5-Messeinheit
l_x	mm	Reflexionsabstand in x -Richtung
l_y	mm	Reflexionsabstand in y -Richtung
L_{Aus}	m	Länge des Lichtstrahls zwischen oberem Spiegel und der Skala
L_{Austritt}	mm	x -Koordinate, bei der der Lichtstrahl den Spiegelaufbau verlässt
L_{Ein}	m	Länge des Lichtstrahls zwischen Spiegel am Wägearm und unterem Spiegel
LE_i	-	Vektoren bei der Berechnung der Wä geeinheit
L_{links}	mm	Länge des zweiseitig eingespannten Torsionsdrahtes links
L_{Lichtges}	m	Gesamtlänge des Lichtstrahls
L_{RD}	m	Länge eines Lichtstrahls zwischen unterem und oberem Spiegel
L_{rechts}	mm	Länge des zweiseitig eingespannten Torsionsdrahtes rechts
L_{Ref}	m	Länge des reflektierten Strahls in der Spiegelanordnung
L_{SD}	m	Länge der Diagonale zwischen einer x - und y -Reflexion
L_{Skala}	mm	Skalenausschlag
L_{Sp}	mm	Länge des unteren und oberen Spiegels
L_{Spiegel}	mm	Abstand zwischen oberem und unterem Spiegel
L_{SS}	mm	Entfernung des oberen Spiegels von der Skala
L_{TSS}	mm	Vertikaler Abstand zwischen dem unteren Spiegel und dem Spiegel am Wä gearm
m	mg	Eingewogene Staubmasse
m_1	g	Masse des Ausgleichsgewichtes am Wä gearm
m_2	g	Gewicht am Wä gearm
m_G	mg	An Glasplättchen und dessen Halterung angelagerte Staubmasse
m_H	mg	An der Glasplättchenhalterung angelagerte Staubmasse
m_{Pendel}	kg	Masse des Pendelgewichtes
m_{Staub}	mg	Masse des Staubes der durchleuchteten Glasfläche
M_1	Nm	Drehmoment des Torsionsdrahtes links
M_2	Nm	Drehmoment des Torsionsdrahtes rechts
M_{Hebel}	Nm	Drehmoment des Wä gearms
M_{Staub}	mg	Staubmasse auf dem Glasplättchen
M_{Tors}	Nm	rücktreibendes Drehmoment
n	1/min	Drehzahl der Scheibe
N	-	Anzahl der Reflexionen
r	mm	Radius
r_{Pendel}	m	Radius des Pendelgewichtes
r_{Tors}	m	Radius des Torsionsdrahtes
R	mm	Radius (Strecke bis zur Mittellinie des Ausschnittes der Scheibe)
s	mm	Weg

$S_1 E_i, S_2 E_i$	-	Vektoren bei der Berechnung der Wä geeinheit
t	s	Messdauer
t_{Staub}	s	Dauer des Staubeintrages in die Messkammer
T	s	Periodendauer
U	mV, V	Spannung allgemein
U_{SKG}	mV	Angezeigte Spannung am SKG 5
U_{SKG}^*	mV	Auf die Messweite l_1 umgerechnete Spannung U_{SKG}
$U_{\text{SKG},a}$	mV	Angezeigte Spannung am SKG 5 mit Messweite l_a
$U_{\text{SKG},b}$	mV	Angezeigte Spannung am SKG 5 mit Messweite l_b
v	mm/s	Geschwindigkeit
V	ml, l, m ³	Volumen allgemein
\dot{V}	l/min	Volumenstrom
ϕ	rad	Winkel der Auslenkung des Pendelgewichtes
φ	°, rad	Auslenkung des Spiegels am Torsionsdraht
ω	1/s	Winkelgeschwindigkeit
σ	°, rad	Winkel des Lichtstrahls nach der ersten Reflexion

Vorwort

Als abschließenden Schritt meines Verfahrenstechnik-Studiums der Fachrichtung Anlagenbau eröffnete sich mir die Möglichkeit, eine Diplomandenstelle bei der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V. (FSA) bzw. im Zentrallabor der Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel und Gaststätten (BGN) anzunehmen. Die angebotene Themenstellung umfasste die messtechnische Ermittlung von Staubkonzentrationen in der Luft bzw. die Verbesserung des schon vorhandenen Staubkonzentrationsmessgerätes SKG 5. In diesem Zusammenhang wurde umfassendes Wissen benötigt, wie etwa Sensorik, Mechanik, Physik oder Elektronik. Hier konnte während des Studiums erlangtes Wissen eingebracht werden, jedoch war es auch notwendig, sich neues Wissen anzueignen und anzuwenden.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen, die mich während meines Studiums und bei der Diplomarbeit unterstützt haben, bedanken. Insbesondere bei meinen Eltern, ohne die das Studium so nicht möglich gewesen wäre. Großer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Schmitt, der mir nicht nur diese Diplomarbeit vermittelte, sondern auch durch seinen besonderen Einsatz die erfolgreiche Durchführung des Praxissemesters sicherte. Mein besonderer Dank gilt dem Betreuer dieser Arbeit, Herrn Dirk Lorenz. Durch seine hervorragende Betreuung war es möglich, eine Arbeit auf hohem Niveau anzufertigen. Weiterhin möchte ich mich bei den Herren Michael Seithel, Sigurd Kleinhans, Hermann Schiebler, Helmut Ott, Dr. Markus Wenzel, den Damen Dorothea Kauffelt, Elke Danhamer und allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der FSA/BGN bedanken, die mich während meiner Diplomarbeit in irgendeiner Form tatkräftig unterstützten.

„Es ist nicht gesagt, dass es besser wird, wenn es anders wird. Wenn es aber besser werden soll, muss es anders werden.“

Georg Christoph Lichtenberg (1742 - 1799), dt. Aphoristiker u. Physiker

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden zwei Sachverhalte im Zusammenhang mit dem Staubkonzentrationsmessgerät SKG 5 behandelt.

Das Messgerät, bestehend aus einer optoelektronischen Messeinheit sowie einer Anzeige- und Steuereinheit, wurde zur Bestimmung von Staubkonzentrationen in Silos, Rohrleitungen und Räumen entwickelt. Die Zuordnung des Messwertes in Form einer Spannung zu der entsprechenden Konzentration macht eine Kalibrierung, d. h. Erstellen eines Konzentrations-Spannungs-Diagramms, erforderlich.

Für die in dieser Arbeit durchgeführten Versuchsreihen werden die Stäube Maisstärke, Formpuderstärke, Weizenmehl und Puderzucker benutzt. Vor allem am Beispiel von Puderzucker zeigt sich, dass das bisher eingesetzte Kalibrierverfahren (Herstellen einer Staub/Ethanol-Suspension mit bekannter Konzentration) nicht immer anwendbar ist. Deshalb wird eine neue Methode entwickelt und eine entsprechende Apparatur aufgebaut. Bei diesem Verfahren wird der Staub in eine Messkammer eingeblasen, um auf einem Glasplättchen zu sedimentieren. Danach wird die Masse des auf dem Glas abgelagerten Staubes durch Wägung bestimmt und daraus eine Staubkonzentration abgeleitet. Das Einbringen des Glasplättchens in die Messeinheit des SKG 5 liefert die zur Staubkonzentration gehörige Spannung.

Übereinstimmungen der mit beiden Verfahren erstellten Kalibrierkurven werden nur für Maisstärke erreicht. Die Abweichungen der Kurven haben verschiedene Ursachen: Quellen, Auflösen und Ändern der optischen Eigenschaften der Staubpartikel in Ethanol sowie Messfehler, die beim Arbeiten mit der Apparatur entstehen.

Der zweite Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der unerwünschten Verschmutzung der Optik der SKG 5-Messeinheit beim Messeinsatz. Da die Messeinheit über keinen wirklich wirksamen Staubschutz verfügt, lagern sich sehr schnell Staubpartikel auf den Linsen der optoelektronischen Messeinheit ab, was zu einer Verfälschung der gemessenen Staubkonzentration führt.

Zunächst wird ein bestehendes, noch nicht ausreichend untersuchtes System geprüft, bei dem ein kontinuierlicher Luftstrom zur Reinigung von Fenstern verwendet wird, die vor den Linsen angebracht sind. Tests des Systems erfolgen mit verschiedenen Luftvolumenströmen. Ein ausreichender Schutz der Linsen geht bei diesem System mit einem nicht vertretbaren Einfluss auf das zu untersuchende Staub/Luft-Gemisch einher.

Daher wird eine neue Methode zum Schutz der Linsen entwickelt und umgesetzt. Das Vordringen des Staubes zu den Linsen wird durch eine Kombination von rotierenden Scheiben in geschlossenen Gehäusen und Blendenöffnungen verhindert. Vergleichsmessungen mit einer SKG 5-Standardmesseinheit zeigen einen befriedigenden Schutz der Linsen durch diese Vorrichtung, ohne die zu untersuchende Staubwolke zu beeinflussen.

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Allgemeines

In der Vergangenheit kam es in der Industrie und im Handwerk immer wieder zu Staubexplosionen mit verheerenden Folgen. Mit zunehmender sozialer Verantwortung den Arbeitnehmern gegenüber, aber auch, um die zum Teil sehr hohen Kosten durch Produktionsausfall und zerstörte Anlagen zu vermeiden, begann man mit der Erforschung der Ursachen von Staubexplosionen und Bränden. Man fand heraus, dass bestimmte Bedingungen erfüllt sein müssen, damit es überhaupt zu einer Staubexplosion kommen kann: Es müssen ausreichend Sauerstoff, wobei der 21 %ige Anteil in der Luft genügt, eine Zündquelle (zum Beispiel: heiße Oberflächen, elektrostatische oder mechanisch erzeugte Funken, offenes Feuer) und Staub, das sind Partikel, deren Durchmesser kleiner 0,5 mm ist, vorhanden sein. Diese drei Punkte sind nachstehend vereinfacht im so genannten Gefahrendreieck dargestellt.

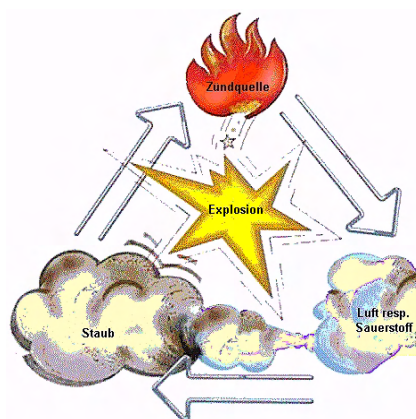


Abbildung 1.1: Bildliche Darstellung des Gefahrendreiecks.

Die Unterschreitung einer bestimmten Partikelgröße reicht jedoch nicht aus, damit ein Staub eine Staubexplosion hervorrufen kann. Der Staub muss außerdem brennbar sein, in der Luft feinverteilt vorliegen und die Staubkonzentration in der Luft muss innerhalb der so genannten unteren und oberen Explosionsgrenze liegen. Die Explosionsgrenzen

sind charakteristische Kenngrößen für brennbare Stäube. Liegt die Staubkonzentration in der Luft unter der unteren Explosionsgrenze des betrachteten Staubes, befindet sich zu wenig Brennstoff in der Luft, um eine Staubexplosion bzw. eine sich ausbreitende Flammenfront aufrecht zu erhalten. Liegt die Staubkonzentration in der Luft über der oberen Explosionsgrenze des Staubes, so ist der Sauerstoffgehalt im Brennstoff/Luft-Gemisch zu gering, um eine sich ausbreitende Flammenfront aufrecht zu erhalten. In der Regel spannen die untere und obere Explosionsgrenze einen weiten Staubkonzentrationsbereich auf, innerhalb dessen Staubexplosionen auftreten können. In diesem Bereich ist die Staubkonzentration in der Luft von entscheidender Bedeutung für die Heftigkeit einer ablaufenden Staubexplosion. Aus den genannten Gründen ist die Messung von Staubkonzentrationen in der Luft von fundamentaler Bedeutung für die Erkennung von Explosionsgefahren bzw. für die Durchführung entsprechender Gefährdungsanalysen. Letztere sind die Grundlage für die gezielte Erarbeitung von Explosionsschutzkonzepten [1, 11].

1.2 Status Quo zu Beginn der Arbeit

Zur kontinuierlichen Messung der Staubkonzentration in Silos, Rohrleitungen, Räumen oder auch in der freien Umgebung wurde ein Staubkonzentrationsmessgerät (SKG) von der FSA¹ entwickelt. Dieses Gerät wurde über die Jahre stetig fortentwickelt und liegt seit einiger Zeit in seiner 5. Ausführung vor, weshalb das Gerät die Bezeichnung SKG 5 trägt (siehe Abbildung 1.2). Das Messprinzip beruht auf der Messung der Lichtschwächung, die eine in der Luft dispergierte Staubmasse in einem bestimmten Luftvolumen hervorruft. Dieses Luftvolumen wird durch den Abstand zwischen einem Infrarot-Sender und -Empfänger definiert, die in der optoelektronischen Messeinheit des SKG 5 eingebaut sind. Die Messergebnisse in mV werden mit einer daran angeschlossenen Anzeigeeinheit dargestellt. Um von der gemessenen Lichtschwächung auf die gesuchte Staubkonzentration in der Luft schließen zu können, muss für den gemessenen Staub eine so genannte Kalibrierkurve erstellt werden, welche im Wesentlichen ein Konzentrations-Spannungs-Diagramm ist. Dazu gibt man eine bestimmte Staubkonzentration vor und misst die dazugehörige Spannung. Dieser Arbeitsschritt kann vor oder nach der eigentlichen Messung mit einer Probe des zu vermessenden Staubes durchgeführt werden.

Bisher wird die Kalibrierkurve erstellt, indem eine bestimmte Masse an Feststoff (Staub) in ein definiertes Flüssigkeitsvolumen dispergiert wird. Als Flüssigkeit wird Ethanol (96 %) eingesetzt, da dieses über ausreichend gute Transmissionseigenschaften im verwendeten Frequenzbereich ($\approx 1 \mu\text{m}$) verfügt und gegenüber anderen Flüssigkeiten die zu untersuchenden Stäube relativ wenig verändert, wie umfassende Versuchsreihen der FSA zeigen. Allerdings musste man feststellen, dass durch das Ethanol manche Stoffe doch stark verändert werden, so zum Beispiel Puderzucker, so dass die Exaktheit der Kalibrierkurve und damit die richtige Zuordnung der Messwerte zu den Konzentrationen nicht mehr gegeben ist.

¹Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V.

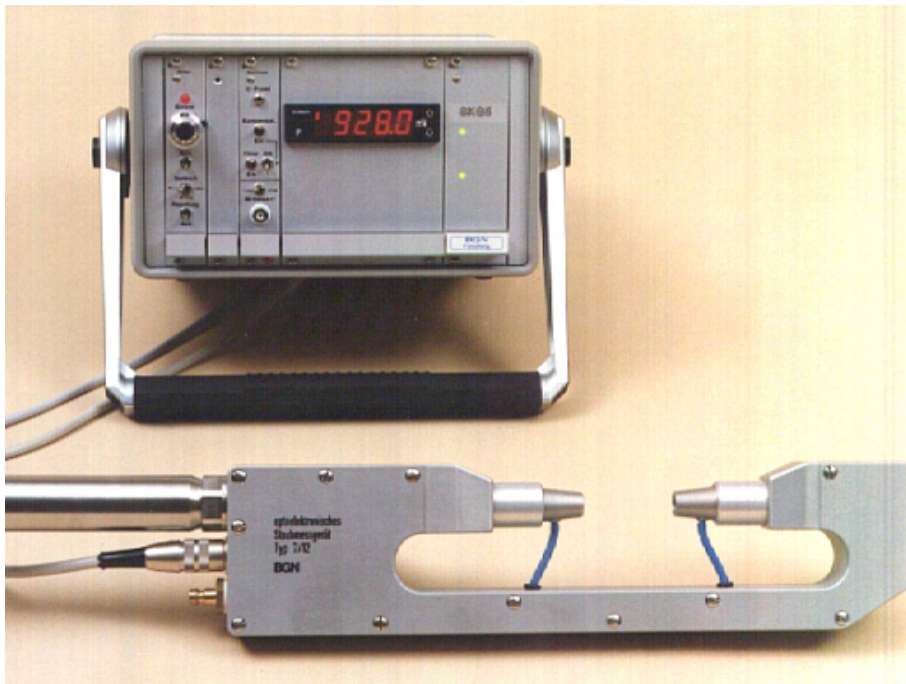


Abbildung 1.2: Das SKG 5 der FSA, bestehend aus Anzeigeeinheit (hinten) und optoelektronischer Messeinheit (vorne rechts).

Ein weiteres Problem bei der Staubkonzentrationsmessung in Staubwolken besteht darin, dass die Linsen der optoelektronischen Messeinheit des SKG 5 während der Messung kontinuierlich verschmutzen. Der auf der Linse abgelagerte Staub verursacht eine ungewollte zusätzliche Lichtschwächung im Messvolumen und verfälscht damit die Messergebnisse in Richtung zu hoher Staubkonzentration (erhöhte Spannungsanzeige). Wie stark und wie schnell sich die Linsen zusetzen, hängt von der Höhe der Massenkonzentration, von der Messdauer und von den Eigenschaften des Staubes (z. B. Haftung) ab. Bei der Auswertung der gemessenen Staubkonzentrationskurven muss die durch die Linsenverschmutzung erzeugte stetige Nullpunktverschiebung zu höheren Konzentrationswerten hin berücksichtigt werden. Dies geschieht, indem eine Gerade durch den Anfangs- und Endwert der Messung gelegt wird. Der zu einem bestimmten Zeitpunkt der Messung gewünschte Staubkonzentrationswert ergibt sich, indem man an dieser Stelle auf die Zeitachse lotet. Der Schnittpunkt des Lotes mit der zuvor eingezeichneten Geraden ergibt einen neuen Nullpunkt für die Staubkonzentration. Die Differenz zwischen dem maximalen Wert und dem ermittelten Nullpunkt ergibt die gesuchte Staubkonzentration (siehe Abbildung 1.3). Bei höheren Verschmutzungsgraden erhält man wegen der linearen Zurückrechnung ein zu großes Ergebnis, da die Verschmutzung nicht exakt linear ansteigt, d. h., die Messung wird vergleichsweise ungenau [8].

1.3 Zielsetzung

Die Lösung der im vorigen Abschnitt 1.2 ausgeführten Probleme stellt das Ziel dieser Arbeit dar. Demnach gliedert sich diese Diplomarbeit in zwei Teilbereiche:

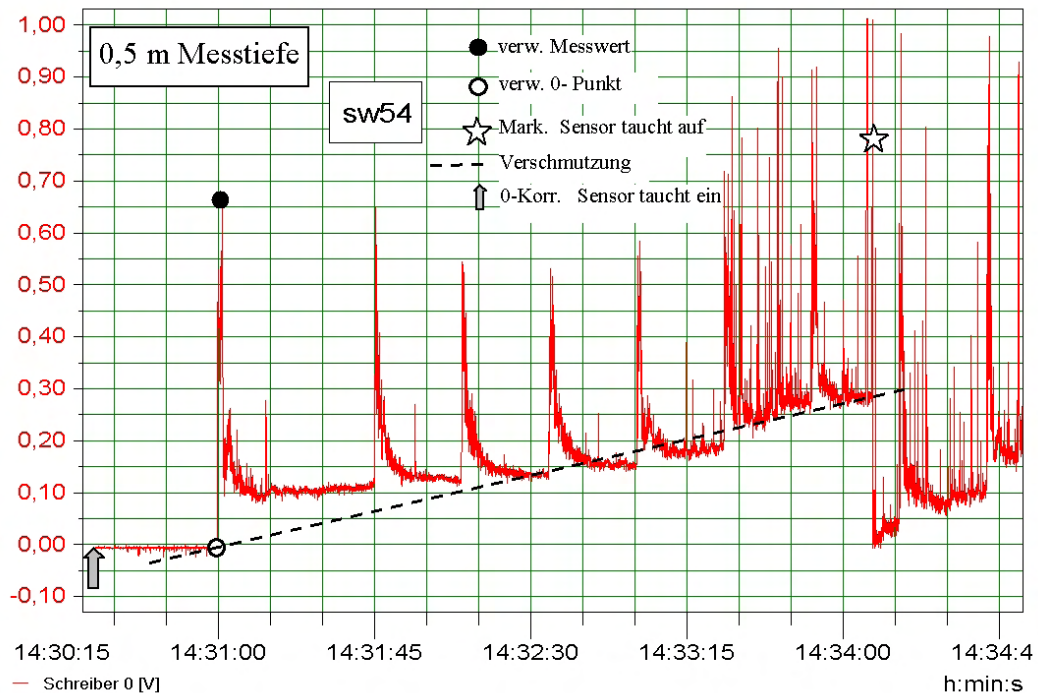


Abbildung 1.3: Staubkonzentration in Abhängigkeit der Zeit, gemessen mit dem SKG 5. Die gestrichelte Linie definiert den neuen Nullpunkt, der durch die Verschmutzung der Linsen der Messeinheit entsteht. Die gezeigten Messwerte entstanden bei der Staubkonzentrationsmessung von Kartoffelstärke in einem Filter.

Der erste Teil der Arbeit befasst sich mit der Erstellung der Kalibrierkurven. Auf Grund der Erkenntnis, dass die Kalibriermethode mit Ethanol (auch Suspensionsmethode genannt) nicht immer korrekt funktioniert, soll eine alternative Methode gefunden werden. Dabei soll zunächst eine neue Kalibriermethode erdacht und theoretisch (physikalisch-mathematisch) geprüft werden. Anschließend sollen Versuchsreihen mit primitivem Versuchsaufbau folgen, bei denen die Ergebnisse der neuen Verfahrensweise mit denen der Suspensionsmethode verglichen werden. Ist eine funktionstüchtige alternative Kalibriermethode gefunden worden, soll diese Lösung in Form einer Apparatur aufgebaut werden.

Im zweiten Teil der Arbeit gilt es, eine mögliche Lösung für das Verschmutzungsproblem der Linsen der Messeinheit zu erarbeiten. Einige Ansätze zur Lösung dieses Problems wurden zuvor schon von der FSA aufgebaut, aber deren Funktionstüchtigkeit zum Teil noch nicht ausreichend untersucht. Dies betrifft vor allem ein System, welches zur Reinigung der Linsen einen kontinuierlichen Luftstrom vor den Linsen verwendet. Hier soll zunächst angesetzt werden. Stellt sich heraus, dass dieses vorhandene System unbefriedigend funktioniert oder die Messergebnisse durch Störung des zu untersuchenden Staub/Luft-Gemischs durch die Reinigungsvorrichtung verfälscht werden, soll eine neue Methode zur Lösung des Problems gefunden, umgesetzt und geprüft werden.

Kapitel 2

Das Messgerät SKG 5

2.1 Messprinzip

Wie bereits in Abschnitt 1.2 kurz dargestellt, wird beim SKG 5 zur Staubkonzentrationsmessung in der Luft eine Messeinheit verwendet, deren Messprinzip auf der Absorption von infrarotem Licht durch Staubpartikel beruht (siehe auch Abbildung 1.2). Die Sonde besteht aus einem Infrarot-Sender und einem genau gegenüber positionierten Empfänger. Der Sender emittiert Licht einer bestimmten Intensität I_0 durch das zu untersuchende Medium in Richtung des Empfängers. Ist das zu untersuchende Medium ein Staub/Luft-Gemisch, so wird das Licht auf dem Weg vom Sender zum Empfänger an den Staubpartikeln gestreut und teilweise absorbiert. Der Empfänger registriert in diesem Fall eine geringere Lichtintensität I als diejenige, welche von der Laser-Diode in Richtung des Empfängers abgestrahlt wurde. Dieses Messprinzip ist in Abbildung 2.1 dargestellt:

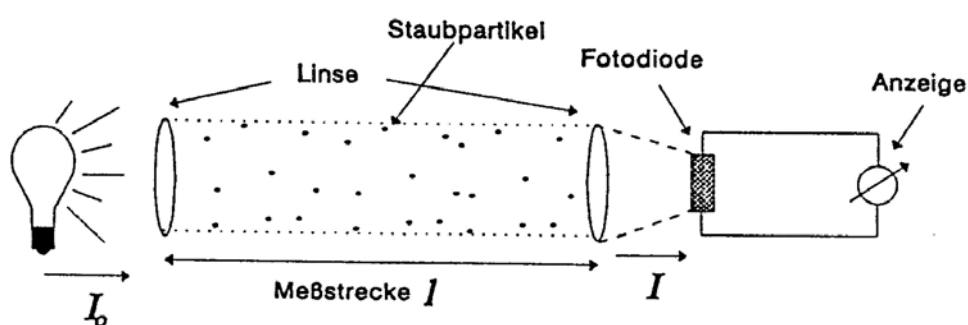


Abbildung 2.1: Schematisch dargestelltes Messprinzip der Staubkonzentrationsmessung. Die Photodiode misst die Lichtintensität, die über die Messweite von den Staubpartikeln nicht gestreut oder absorbiert wurde.

Diese Lichtschwächung bezeichnet man auch als Extinktion E oder optische Dichte. Sie wird durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschrieben:

$$I = I_0 \cdot e^{-\epsilon \cdot c \cdot l} \quad (2.1)$$

Aus (2.1) folgt die Extinktion durch Umstellen und Logarithmieren:

$$E = -\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = c \cdot \epsilon \cdot l \quad (2.2)$$

Wie man den Gleichungen entnimmt, wird die Extinktion von den drei Größen Staubkonzentration c , Länge l der durchleuchteten Strecke sowie vom Extinktionskoeffizienten ϵ bestimmt. Letzterer ist eine Stoffkonstante und muss über eine Kalibrierung am zu prüfenden Staub ermittelt werden. Zusammen mit dem bekannten Abstand zwischen Infrarot-Sender und -empfänger l und der am Empfänger registrierten Intensität I_0 bei Abwesenheit von Staub kann so aus der Messung der Intensität I die Staubkonzentration c errechnet werden.

2.2 Aufbau des Gerätes

Das Staubkonzentrationsmessgerät SKG 5 besteht im Wesentlichen aus zwei Komponenten, einer Messeinheit (Sensorkopf), mit der die Messdaten erfasst werden, und einer Anzeige- und Steuereinheit, mit der die Daten verarbeitet und angezeigt werden.

2.2.1 Messeinheit

Die Messeinheit, in Abbildung 2.2 schematisch dargestellt, enthält die optoelektronischen Elemente, die zum Messen der Lichtschwächung durch den Staub bzw. die Bestimmung der Staubkonzentration nötig sind. Dies ist zum einen die Sendediode und zum anderen die Empfängerdiode. Die Sendediode ist eine Laserdiode, welche Infrarotlicht in einem schmalen Wellenlängenbereich um 950 nm abstrahlt. Die gegenüberliegende Empfängerdiode ist eine Fotodiode, die im genannten Spektralbereich empfindlich ist. Vor beiden Dioden befindet sich jeweils eine Linse zur Bündelung bzw. Wiedervereinigung des Lichtes. Die Spannungsversorgung der Dioden sowie das Auslesen der von den Dioden kommenden Daten erfolgt über eine sieben-polige Leitung vom Steuergerät aus.

Vor jeder Linse ist eine konisch zulaufende Distanzhülse in den Linsenschacht eingeschraubt. Sie schirmt die Diode vor Fremdlicht ab und schützt die Linse weiterhin vor stärkerer Verschmutzung. Die Linsen können mit Hilfe eines speziellen Reinigungssystems während der Messung gesäubert werden. Zu diesem Reinigungssystem, wie es in Abbildung 2.2 schematisch dargestellt ist, gehören der zylinderförmige Druckluftbehälter, das Schnellentlüftungsventil, Schläuche zur Leitung der Luft und die in den Distanzhülsen eingearbeiteten Düsen. Ein Reinigungsvorgang erfolgt in zwei Schritten, wobei das Schnellentlüftungsventil, ein 3/2-Wege-Ventil, die zentrale Rolle spielt. Im ersten Schritt ist das Ventil so geschaltet, dass über die an der Messeinheit angeschlossene Druckluftleitung (6 bis 8 bar) der Druckluftbehälter (Volumen = 100 cm³) mit Luft gefüllt wird. Die verwendete Luft muss öl- und kondensatfrei sein, weil es sonst zu einer Verklebung der Optik kommen würde. Im zweiten Schritt wird das Schnellentlüftungsventil umgeschaltet und es erfolgt die schlagartige Entleerung der

gespeicherten Luft aus dem Vorratsbehälter durch die Düsen direkt auf die Linsen. Der so entstehende Luftstoß an den Linsen beseitigt dort abgelagerten Staub in den meisten Fällen ausreichend gut. Der Zeitpunkt der Reinigung ist dabei frei wählbar. Das Schnellentlüftungsventil kann entweder manuell oder elektrisch geschaltet werden [3, 10].

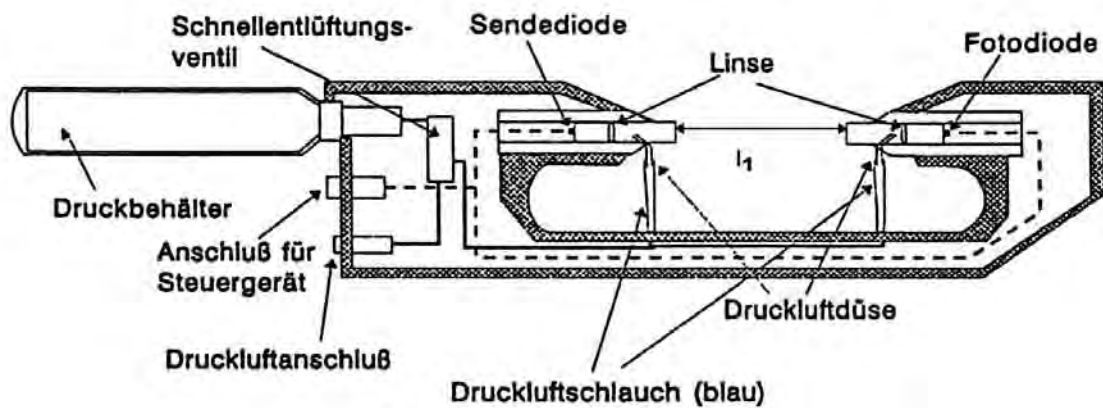


Abbildung 2.2: Skizze des Aufbaus der Standard-Messeinheit des SKG 5

2.2.2 Anzeige- und Steuereinheit

Die Anzeige- und Steuereinheit des SKG 5 ist ein tragbares Gerät, in dem das Netzteil, zwei Elektronikarten für die Sende- und Empfängerdiode sowie ein digitales Display zur Anzeige der gemessenen Spannung in mV untergebracht sind. Die beiden Platinen für die Dioden besitzen jeweils an ihrer Frontpartie Regelelemente, die der Steuerung der Dioden dienen (siehe Abbildung 2.3, links).

Die von vorn gesehene linke Elektronikarte innerhalb des Gerätegehäuses dient der Steuerung der Sendediode. Die Leuchtdiode auf der Frontplatte dieser Platine (Abb. 2.3, Pos. 1) zeigt an, ob ein Strom durch den Schaltkreis der Sendediode fließt. Je größer dieser Strom ist, umso heller leuchtet die Diode. Mit dem Schalter (Abb. 2.3, Pos. 3) lässt sich die Sendediode zwecks Überprüfung des Gerätes bzw. der Dioden ein- bzw. ausschalten, ohne den Strahlengang optisch unterbrechen zu müssen.

Vor jeder Messung ist ein Nullabgleich des im digitalen Display angezeigten Spannungswertes notwendig. Dieser Nullabgleich erfolgt über die Regelung des Stromes durch die Sendediode. Für die Grobregelung des Stromes durch die Sendediode benutzt man den Bereichswahlschalter (Abb. 2.3, Pos. 4). Mögliche Stellungen sind hier „min“, „Mitte“ und „max“. Mit dem 10-Gang-Potentiometer (Abb. 2.3, Pos. 2) wird der Strom durch die Sendediode nach erfolgter Grobeinstellung so lange weiter geregelt, bis eine Spannung von 0 mV im Display angezeigt wird, womit der Abgleich beendet ist. Der Schalter „Regelung“ (Abb. 2.3, Pos. 5) ist für eine nachfolgende Stromregelung im Schaltkreis der Sendediode vorgesehen, aber derzeit noch nicht aktiv.

Die Empfänger- bzw. Fotodiode der Messeinheit wird über die Elektronikarte rechts neben derjenigen für die Sendediode angesteuert. Auf der Frontplatte dieser Platine befindet sich ganz oben ein Potentiometer, mit dem der Nullpunkt des Empfängers

eingestellt werden kann (Abb. 2.3, Pos. 6). Dies geschieht, indem sowohl die Sendediode (siehe oben) als auch der Umschalter „Kompensation“ (Abb. 2.3, Pos. 7) auf „Aus“ geschaltet werden und dann das Potentiometer so lange betätigt wird, bis in der Anzeige der Wert 0 mV erscheint. Ausgeschaltete Kompensation bedeutet die Anzeige eines minimalen Messwertes (ideal 0 mV), wenn der Empfänger keine Strahlung registriert, bzw. die maximale Anzeige (ideal 1000 mV) bei maximaler Lichteinstrahlung. Bei eingeschalteter Kompensation ist dies genau umgekehrt. Rechts unterhalb des Kompensations-Schalters befindet sich der Schalter „0,5/1 V“ (Abb. 2.3, Pos. 7). Mit diesem kann die maximal mögliche Messspannung wahlweise auf 500 mV oder 1000 mV eingestellt werden. Links unterhalb des Kompensations-Schalters befindet sich der Schalter „Filter“ (Abb. 2.3, Pos. 9), welcher der Aktivierung einer Filterung des Messausganges (1000 Hz Tiefpass) dient. Die Sektion „Mittelwert“ auf der Frontplatte der Empfängerkarte (Abb. 2.3, Pos. 10, 11) gibt die Möglichkeit, den Messwert in gemittelter Form abzugreifen. Der Mittelwert wird nach Wahl alle zehn oder jede Sekunde gebildet.

Rechts neben der Karte für die Empfängerdiode ist der Einschub für die digitale Messwertanzeige im Steuergerät des SKG 5 untergebracht. Wiederum rechts davon ist die Spannungsversorgung für das Gerät lokalisiert (siehe Abb. 1.2).

Auf der Rückseite des Steuergerätes befinden sich der Anschluss für die Netzspannung mit Sicherung und Netzschalter (Abb. 2.3, Pos. 19) sowie der Anschluss für die Leitung zum Messkopf, ebenfalls mit Sicherung (Abb. 2.3, Pos. 16, 17). Außerdem sind ein 5-poliger Zusatzausgang für Versorgungsspannung (12 V) und Messausgang (Abb. 2.3, Pos. 18) zur weiteren Verarbeitung der Messwerte in einem Zusatzgerät sowie ein analoger Messausgang (Abb. 2.3, Pos. 18) zur Datenerfassung durch Nachschalten eines Schreibers, Loggers, etc. (Anschluss: BNC oder Bananenbuchsen) herausgeführt [3].

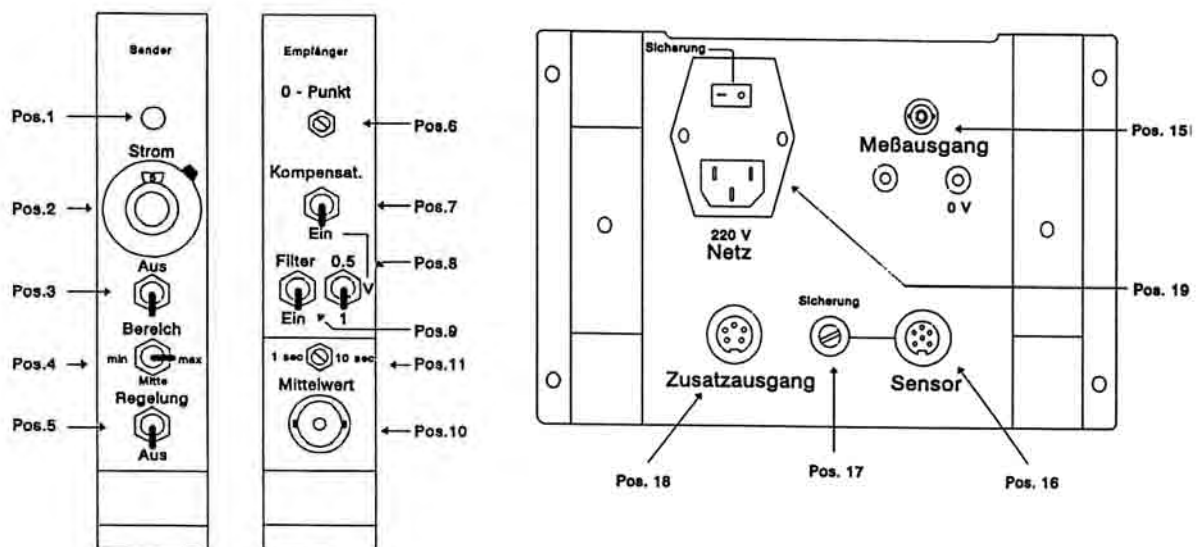


Abbildung 2.3: Skizze der Frontpartien der Platinen für die Sende- und Empfängerdiode (links) und der Rückansicht des SKG 5-Steuergerätes (rechts).

2.3 Kalibrierung

Um von einer mit dem SKG 5 gemessenen Spannung auf eine Staubkonzentration schließen zu können, muss eine Kalibrierkurve für den vermessenen Staub erstellt werden. Dazu bringt man als ersten Schritt ein infrarotdurchlässiges Kalibriergefäß, welches auf einer Rührplattform steht, in den Strahlengang der Messeinheit des SGK 5 (Abbildung 2.4). In das Kalibriergefäß werden 240 ml Ethanol (96 %) gefüllt¹. Bei eingeschalteter Kompensation (siehe Abschnitt 2.2) wird die Messeinheit des SGK 5 so in der Halterung justiert, dass sowohl Kalibriergefäß als auch das darin enthaltene Ethanol optimal durchstrahlt wird, was sich an einer minimalen Spannungsanzeige an der Steuereinheit erkennen lässt. Anschließend wird das Präzisionspotentiometer an der Anzeige- und Steuereinheit so lange betätigt, bis 0 V im Display angezeigt werden (Nullabgleich, siehe Abschnitt 2.2).

Der zweite Schritt besteht darin, mit der Präzisionslaborwaage Staubportionen von 2×6 mg, 12 mg, 2×24 mg und 72 mg abzuwiegen, die dann sukzessiv unter ständigem Rühren in das Ethanol gegeben werden. Auf diese Weise wird die Staubkonzentration im Kalibriergefäß von 0 g/m^3 über 25 g/m^3 , 50 g/m^3 , 100 g/m^3 , 200 g/m^3 , 300 g/m^3 bis 600 g/m^3 systematisch erhöht. Nach jeder Zugabe einer Staubportion wird das Flüssigkeits/Staub-Gemisch kurz und kräftig aufgerührt, um alle Partikel gleichmäßig im gesamten Volumen zu verteilen. Zum Ablesen des Messwertes an der SKG 5-Anzeigeeinheit wird der Rührer auf einen kleinen Wert geschaltet, damit nicht versehentlich der durch das Rühren entstehende Flüssigkeitskegel in den Strahlengang der Messeinheit gerät. Dieser Vorgang muss möglichst zügig geschehen, da die Teilchen zu sedimentieren beginnen bzw. unter Umständen vom Ethanol in ihren Eigenschaften verändert werden. Letzteres betrifft vor allem kristalline Stäube, bestehend aus transparenten Körnern, weil das Ethanol deren Brechungsindex verändern kann.

Das Erstellen der eigentlichen Kalibrierkurve kann mit einem beliebigen Rechnerprogramm erfolgen, welches Regressionsrechnungen durchführen kann². Die Regressionsgleichung entspricht in der Form dem Lambert Beer'schen Gesetz:

$$U_{\text{SKG}} = B_1 \cdot e^{B_2 \cdot c} + B_3 \quad (2.3)$$

Das Programm muss also eine Funktion der Form (2.3) finden, welche die mit dem Kalibriergefäß gemessenen, zu einer bestimmten Staubkonzentration gehörigen Spannungswerte wiedergibt. Diese Aufgabe entspricht dem Auffinden der Koeffizienten B_1 , B_2 und B_3 . Ist dies geschehen, muss die Kalibrierkurve bzw. der Koeffizient B_2 noch auf den Abstand zwischen Sender und Empfänger l_1 der SKG 5-Messeinheit (siehe Abb. 2.2) korrigiert werden, weil das Kalibriergefäß die Messweite nicht komplett ausfüllt, sondern nur auf der Länge $l_2 = 85,4$ mm entlang des Strahlenganges. Die Korrektur entspricht der Multiplikation von B_2 mit l_1/l_2 . Dadurch ist der Zusammenhang zwischen gemessener Spannung und Staubkonzentration in der Luft festgelegt. Ein Beispiel für solch eine Kalibrierkurve ist in Abbildung 2.5 zu sehen [3, 8].

¹Zu beachten beim Umgang mit dem Alkohol ist, dass die Messungen unter einem Abzug durchzuführen sind und das verschmutzte Ethanol vor der Entsorgung in spezielle Behälter filtriert werden muss.

²Die FSA verwendet PlotIt oder TableCurve 2D

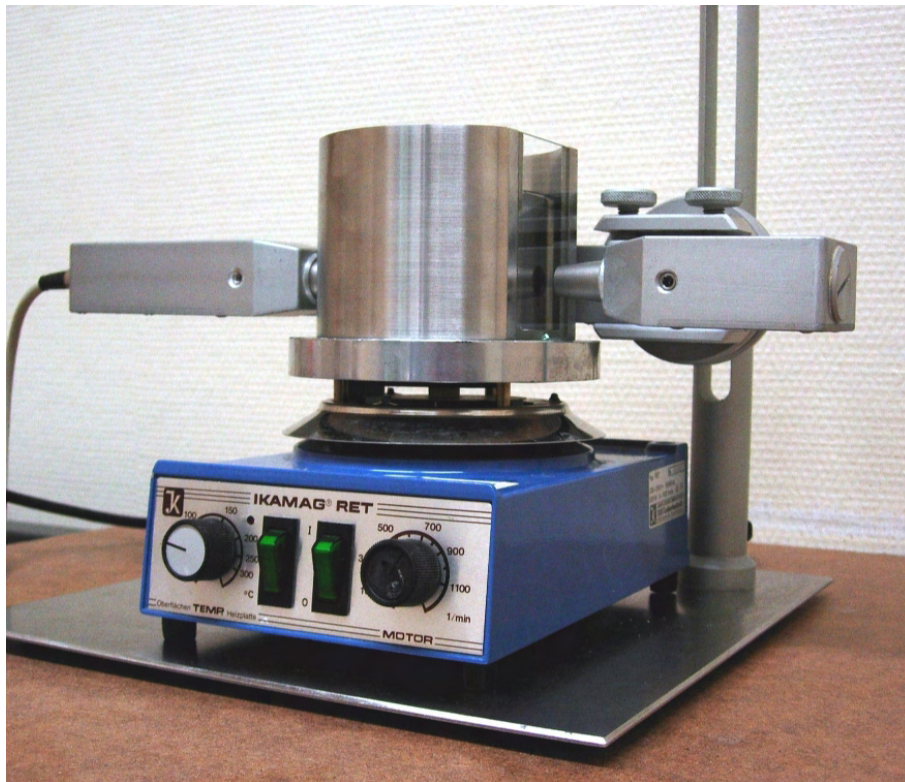


Abbildung 2.4: Vorrichtung zur Erfassung der Kalibrierkurve des SKG 5.

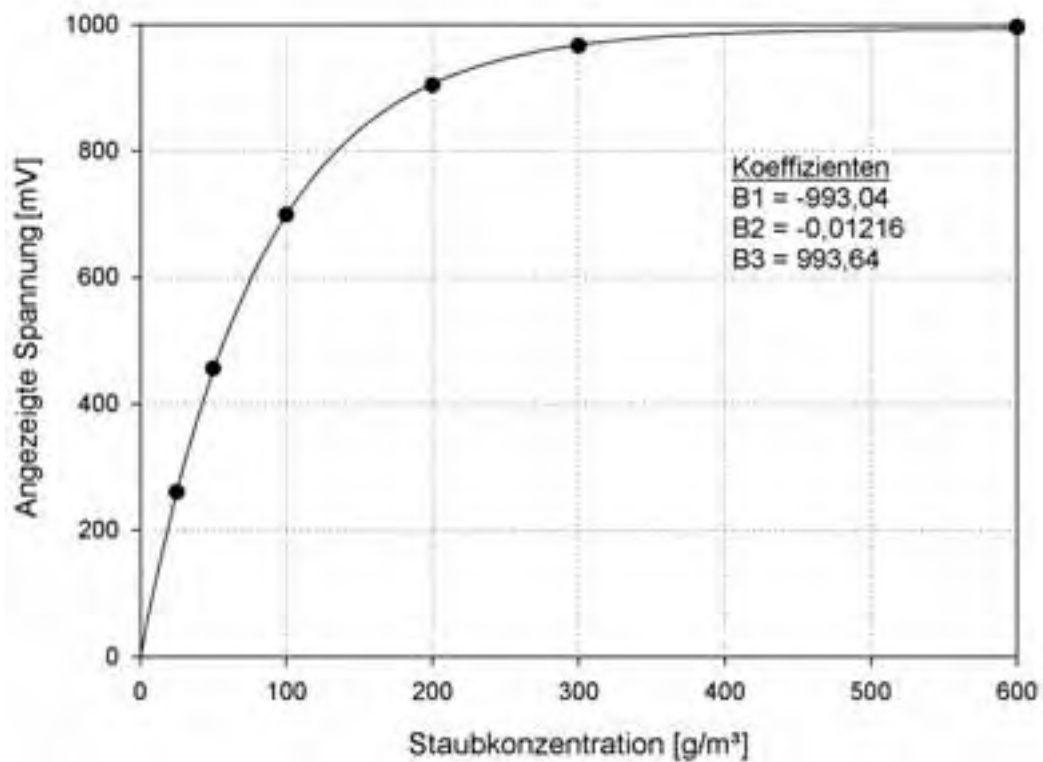


Abbildung 2.5: Kalibrierkurve des SKG 5 für Maisstärke.

Kapitel 3

Problematik

Kalibrierkurvenerstellung

In diesem Kapitel wird der ersten der in Abschnitt 1.3 beschriebenen Zielsetzungen nachgegangen, das heißt, es wird gezeigt, dass die Kalibrierung des SKG 5 mit Hilfe einer Staub/Ethanol-Suspension mit verschiedenen Staubkonzentrationen nicht in jedem Fall einsetzbar ist. Diese Kalibriermethode wird im Folgenden als Suspensionsmethode bezeichnet. Weiterhin werden die Entwicklungsschritte eines neuen Verfahrens zur Erstellung von Kalibrierkurven dargelegt.

3.1 Auswahl der zu prüfenden Stäube

Um einen Überblick über die Schwächen der Suspensionsmethode zu gewinnen und um später eine hinreichend umfassende Datenbasis für Vergleiche mit einem potentiellen neuen Kalibrierverfahren zu besitzen, sollten mindestens drei, in ihren Eigenschaften möglichst verschiedene Stäube untersucht werden. Deshalb wurde bei der Auswahl darauf geachtet, dass die Stäube unterschiedliche Staubungsneigungen¹ aufweisen, verschiedene Widerstände besitzen bzw. sich verschieden stark elektrostatisch aufladen und dass sie sich in ihrem Aufbau (z. B. amorph oder kristallin) unterscheiden. Desweiteren sollten Stäube verwendet werden, die in der Nahrungsmittelindustrie häufig vorkommen und damit leicht zu beschaffen sind. Auf Grund der genannten Kriterien wurden folgende Stäube ausgewählt:

- Maisstärke: C* Dry Gel von Cerestar, getrocknet
- Formpuderstärke: C* Cleanset von Cerestar Benelux B. V.
- Weizenmehl: Typ 550, getrocknet
- Puderzucker: feinst zermahlener Zucker aus dem Handel

¹Maisstärke oder Formpuderstärke neigen stärker zur Staubwolkenbildung als z. B. Weizenmehl [1].

3.2 Kalibrierkurvenerstellung mit der Suspensionsmethode

In diesem Teil wird die Aufnahme von Kalibrierkurven für die im vorigen Abschnitt 3.1 ausgewählten Stäube dargestellt.

3.2.1 Versuchsaufbau

Der experimentelle Aufbau zur Aufnahme von Kalibrierkurven mit der Suspensionsmethode ist im Wesentlichen in Abschnitt 2.3 beschrieben bzw. in Abb. 2.4 gezeigt.

3.2.2 Versuchsdurchführung

Die Staubkonzentrationen 0 g/m^3 , 25 g/m^3 , 50 g/m^3 , 100 g/m^3 , 200 g/m^3 , 300 g/m^3 und 600 g/m^3 wurden sukzessiv im Kalibriergefäß (Abb. 2.4) realisiert, d. h. im darin befindlichen Ethanol in Suspension gebracht. Anschließend wurde an der Anzeige- und Steuereinheit des SKG 5 der zugehörige Spannungswert abgelesen. Die Erstellung der Kalibrierkurven aus den gemessenen Werten erfolgte wie in Abschnitt 2.3 beschrieben. Für Puderzucker wurde die Messung insgesamt viermal wiederholt.

3.2.3 Versuchsergebnisse

Die Messwerte für Maisstärke und Formpuderstärke ließen sich ohne Probleme aufnehmen. Bei Weizenmehl wurde eine Tendenz zur Sedimentation bei schwacher Rühreraktivität beobachtet, weshalb das Bestimmen des genauen Messwertes recht zügig geschehen musste. Im Gegensatz zu diesen Stäuben war mit Puderzucker die Aufnahme einer korrekten Kalibrierkurve nicht möglich. Die Zugabe einer Staubportion rief kurzzeitig einen Anstieg des Spannungswertes am SKG 5 hervor, jedoch sank der Messwert in kürzester Zeit bzw. schon beim Einrühren wieder drastisch ab. Die Messdaten für die untersuchten Stäube finden sich im Anhang A.1 in Tabelle A.1. Die daraus resultierenden Kalibrierkurven sind teilweise in Abbildung 3.1 dargestellt.

3.2.4 Versuchsauswertung und Diskussion

Aus dem Verlauf der Kurven in Abb. 3.1 ist zu entnehmen, dass die Suspensionsmethode für Puderzucker nicht anwendbar ist. Die Einbrüche in der Kurve für Puderzucker (hellblau) dokumentieren eindeutig, dass die Absorptionseigenschaften des Puderzuckers zumindest im Wellenlängenbereich um $1 \mu\text{m}$ durch das Ethanol verändert werden. Ein weiterer Beweis dafür ist folgender: Bei Stäuben, die durch das Ethanol nicht oder nur wenig verändert werden, bleibt der am SKG 5 angezeigte Messwert in der Rührphase ungefähr konstant. Eine Änderung der Messwertes tritt hier erst durch Sedimentation der Partikel nach Drosseln des Rührers ein. Ein erneutes Aufwirbeln der Staubpartikel führt wieder zur gleichen Spannungsanzeige wie zuvor. Bei Maisstärke,

Formpuderstärke und Weizenmehl war dies ohne Einschränkung möglich. Beim erneuten Aufrühren des Puderzuckers gelang es nicht, wieder auf den Spannungswert zu gelangen, wie er im Moment der Zugabe vorlag.

Verschiedene Mechanismen können dazu führen, dass Stäube durch Ethanol verändert werden. Beispielsweise können die Partikel auf- oder angelöst werden, sie können Aufquellen oder vorhandene Staubagglomerate können zerfallen. Auch eine Änderung des Brechungsindexes - vor allem bei kristallinen Stoffen - ist möglich. Das starke Absinken der Spannungsanzeige am SKG 5 bei der Aufnahme der Kalibrierkurve für Puderzucker (> 95% bei längerer Messdauer) legt den Schluss nahe, dass die Zuckerpartikel in dem verwendeten Ethanol teilweise gelöst bzw. angelöst wurden. Ein so starkes Absinken der Absorption kann durch eine alleinige Änderung des Brechungsindexes nicht erklärt werden.

Neben den beschriebenen Effekten birgt die Suspensionsmethode weitere Fehlerquellen, wie z. B. den Verlust von abgewogenem Staub durch Transport und Haften auf dem Wägebepapier, Schwankungen beim Auffüllen des Messvolumens mit Ethanol, Variationen im Ethanol selbst, Veränderungen, die durch geringfügige mechanische Variationen beim Aufbau der Apparatur hervorgerufen werden etc.. Die Entwicklung einer alternativen Kalibriermethode erscheint also notwendig.

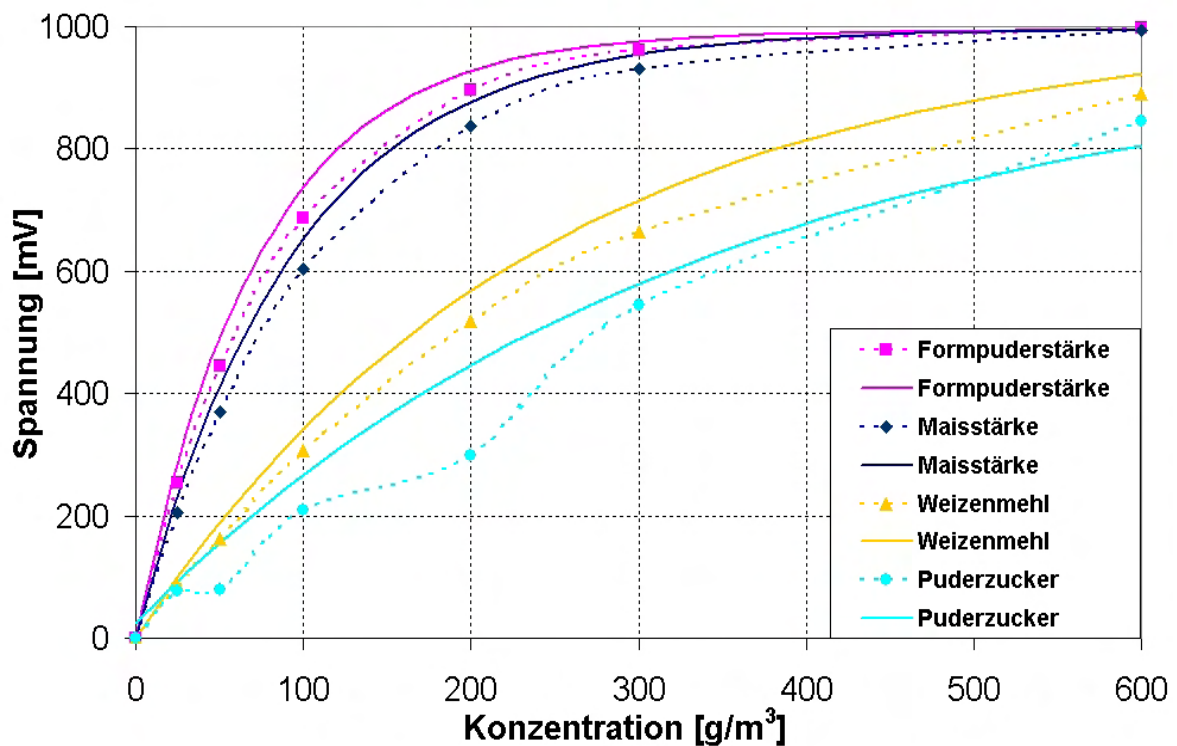


Abbildung 3.1: Darstellung der Kalibrierkurven des SKG 5 für die vier untersuchten Stäube (durchgezogen). Die gestrichelten Kurven und die dazugehörigen Messpunkte stellen die Messwerte dar, die direkt mit dem Kalibriergefäß erhalten wurden. Von den vier aufgenommenen Kurven für Puderzucker wurde wegen der besseren Übersichtlichkeit nur eine ausgewählt.

3.3 Entwicklung einer neuen Kalibriermethode

Weil die Suspensionsmethode für einige Stoffe gänzlich ungeeignet ist und auch andere Schwächen zeigt, wurde ein neues Verfahren entwickelt, um Konzentrations-Spannungskurven für Stäube aufzunehmen (vgl. voriges Kap. 3.2). Dieses Verfahren wird im Folgenden Sedimentationsverfahren genannt. Die Etappen der Entwicklung sowie die Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

3.3.1 Idee des Messprinzipes

Bei der Aufnahme von Kalibrierkurven besteht das mit Abstand größte Problem stets darin, unter Wirkung der irdischen Schwerkraft eine homogene, über ausreichend lange Zeiträume anstehende Staubwolke zu erzeugen. Es war also erstrebenswert, diese Schwierigkeit zu umgehen. Dies geschah basierend auf der Annahme, dass die Lichtabsorption durch Staubpartikel unabhängig davon ist, ob die Partikel in Luft dispergiert vorliegen oder in einer dünnen Schicht. Dass diese Annahme zumindest in sehr guter Näherung gerechtfertigt ist, zeigt ein Blick in Lehrbücher der Astronomie (kosmischer Staub, Säulendichten) oder der Streuungstheorie [7].

Die Idee der neuen Methode besteht darin, dass auf ein infrarot-durchlässiges Trägermaterial eine homogene Staubschicht aufgetragen wird. Dies sollte durch die gleichmäßige Sedimentation des Staubes auf ein Glasplättchen verwirklicht werden. Das bestäubte Objekt wird anschließend in den Strahlengang des Staubkonzentrationsmessgerät gebracht und die Messspannung U_{SKG} erfasst. Die zur gemessenen Spannung gehörende Staubkonzentration errechnet sich dann wie folgt (siehe auch Abb. 3.2):

Auf der gesamten Fläche A des Glasplättchens befindet sich die Staubmasse M_{Staub} , welche durch Wägung ermittelt wird. Von der Messeinheit des SKG 5 wird aber nur die wesentliche kleinere Fläche a durchleuchtet, also der Teil a/A . Somit befindet sich auch nur der Massenanteil

$$m_{\text{Staub}} = M_{\text{Staub}} \cdot \frac{a}{A} \quad (3.1)$$

im Strahlengang der Messeinheit. Für die Staubkonzentration c gilt unter der Annahme, dass sich die Staubmasse m_{Staub} im Strahlengang verteilt befindet

$$c = \frac{m_{\text{Staub}}}{V} = \frac{M_{\text{Staub}}}{A \cdot l_1} \quad (3.2)$$

mit $V = a \cdot l_1$ als Volumen des Strahlengang-Zylinders.

3.3.2 Versuche im Vorfeld

Damit die im vorigen Abschnitt 3.3.1 beschriebene neue Kalibriermethode als anwendbar eingestuft werden konnte, mussten die damit erzielten Kalibrierkurven zum einen reproduzierbar sein und zum anderen nicht allzu stark von den Kalibrierkurven abweichen, die mit der Suspensionsmethode für wenig veränderliche Stäube (durch Ethanol)

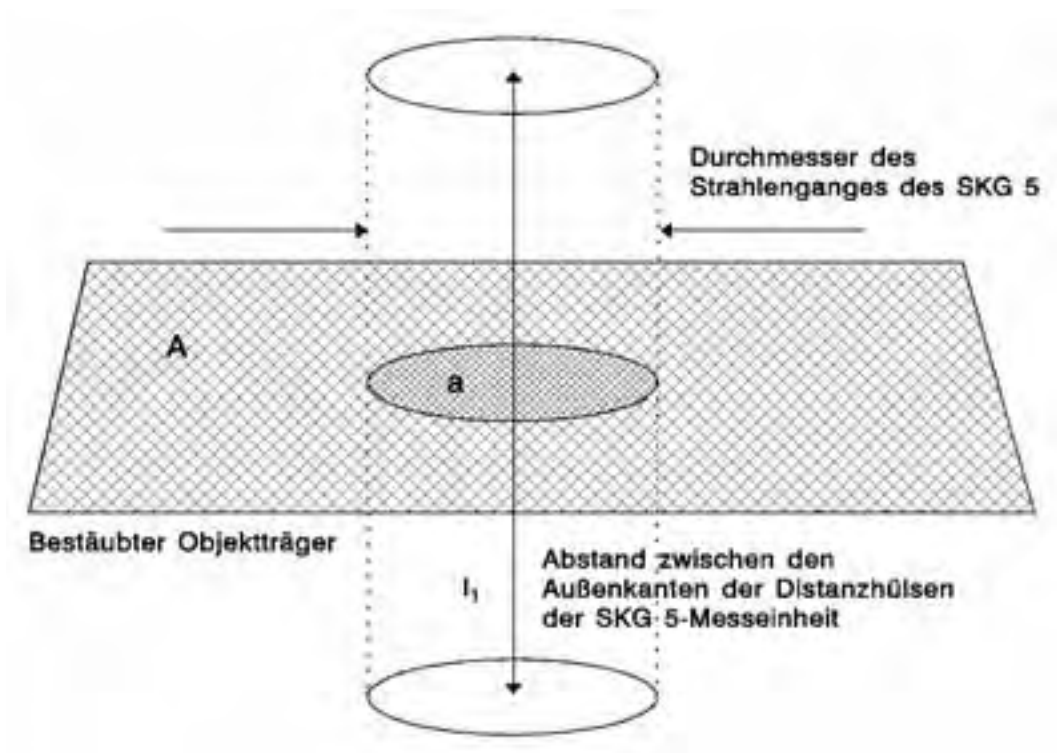


Abbildung 3.2: Skizze zur Bestimmung der Staubkonzentration mit der neuen Methode.

gemessen wurden. Zur Prüfung, ob die Methode tatsächlich diese Anforderungen erfüllt, wurde eine einfache Versuchsreihe durchgeführt.

3.3.2.1 Versuchsaufbau

Als Trägermaterial für eine aufzubringende homogene Staubschicht wurden handelsübliche Objektträger aus Glas für die Mikroskopie verwendet (Maße: 76 mm × 26 mm × 1 mm). Pro Versuch wurde einer dieser Objektträger in einer Messkammer aus Karton so auf einem Stativ positioniert, dass der in der Messkammer befindliche dispergierte Staub homogen darauf sedimentieren konnte. Das Staub/Luft-Gemisch wurde mit Hilfe eines Partikeldosierers RBG 1000 (Abschnitt 3.3.2.1.1) erzeugt und in die Messkammer eingebracht. Vor dem Eintritt in die Messkammer wurden die Staubpartikel durch die Ringelektrode eines Ionisators (Abschnitt 3.3.2.1.2) geblasen. Dies hatte den Sinn, den eingeblasenen - elektrostatisch aufgeladenen - Staub zu neutralisieren, um Staubwolken-Inhomogenitäten in der Messkammer und auf dem Objektträger aufgrund elektrostatischer Effekte zu unterbinden. Zum Versuchsaufbau gehörten weiterhin eine Laborwaage zum Bestimmen der Staubmasse auf dem Objektträger und das Staubkonzentrationsmessgerät SKG 5 (siehe Abbildung 3.3).

3.3.2.1.1 Partikeldosierer RBG 1000

Mit dem Partikeldosierer Palas RBG² 1000 ist es möglich, auf einfachem Wege

²Rotating Brush und Generator

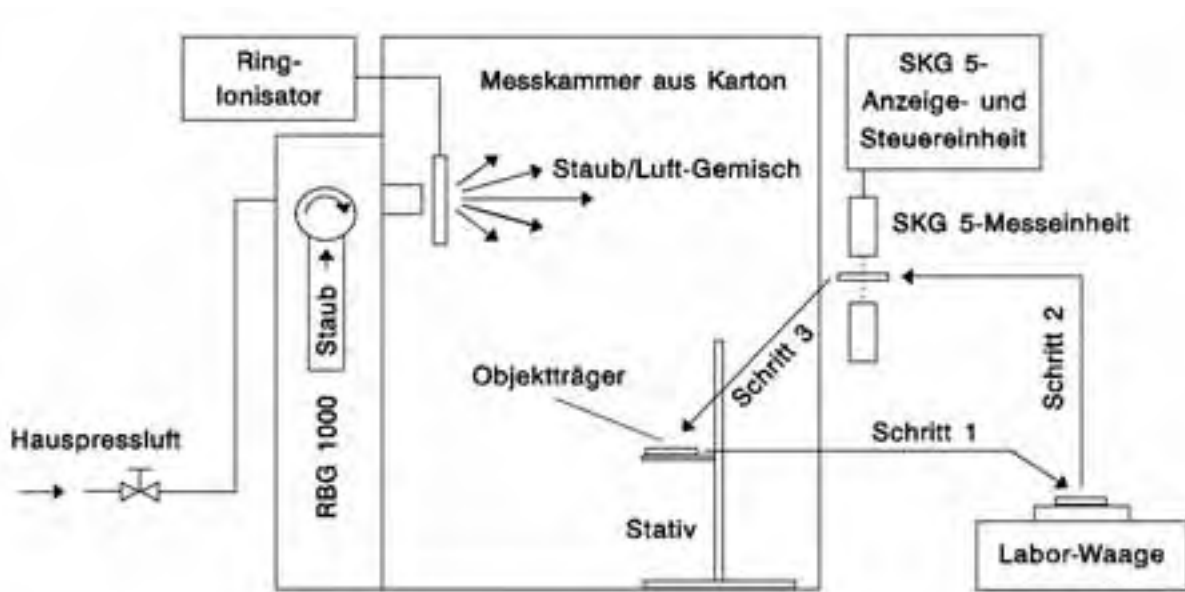


Abbildung 3.3: Blockbild des Versuchsaufbaus für erste Tests der neuen Methode zur Erstellung von Kalibrierkurven.

sowohl Pulver als auch Stäube nahezu als Einzelpartikel in einen luftgetragenen Zustand zu überführen. Dabei wird eine gleichmäßige, kontinuierliche Dispergierung von Partikeln in Luft und eine genaue Dosierung des Stoffes erreicht. Für die Arbeit mit dem RBG 1000 eignen sich Stäube bzw. Pulver mit Partikeldurchmessern kleiner als 1 mm, die weiterhin trocken, nicht klebend und nicht aggressiv gegenüber Edelstahl sind.

Herz des RBG 1000 ist der Dispergierkopf, welcher aus dem Dispergierdeckel und einer rotierenden Dispergierbürste besteht. Unterhalb des Dispergierkopfes befindet sich ein Feststoffbehälter mit Transportkolben (Abb. 3.4). Während des Dispergiervorganges wird kontinuierlich Staub mit Hilfe des Transportkolbens, der von unten auf die Staubsäule im Feststoffbehälter drückt, an die Dispergierbürste herangefördert. Der Vorschub kann dabei genau eingestellt werden. Die rotierende Dispergierbürste transportiert den Staub vom Feststoffbehälter in den Dispergierdeckel, durch den kontinuierlich Luft strömt und von wo die Staubpartikel durch den über die Bürste blasenden Luftstrom in den Außenraum abtransportiert werden. Detailliertere Informationen zum RBG 1000 findet man in [12].

3.3.2.1.2 Ringionisator und die Beseitigung der Elektrostatik

Elektrostatische Aufladungen entstehen, wenn zwei nichtleitende oder gegen Erde isolierte, leitende Materialien aneinander reiben und anschließend wieder getrennt werden. Bei der Staubwolkenerzeugung mit dem RBG 1000 passiert genau dies, weshalb sich die Staubpartikel in der Regel elektrostatisch aufladen, was hier unerwünscht ist. Zur Neutralisation von elektrostatischen Aufladungen können Ionisatoren verwendet werden. Ionisatoren erzeugen freie positive und negative Ionen, die sich mit geladenen Teilchen an der Oberfläche eines Gegenstandes vereinen, wodurch eine vollständige

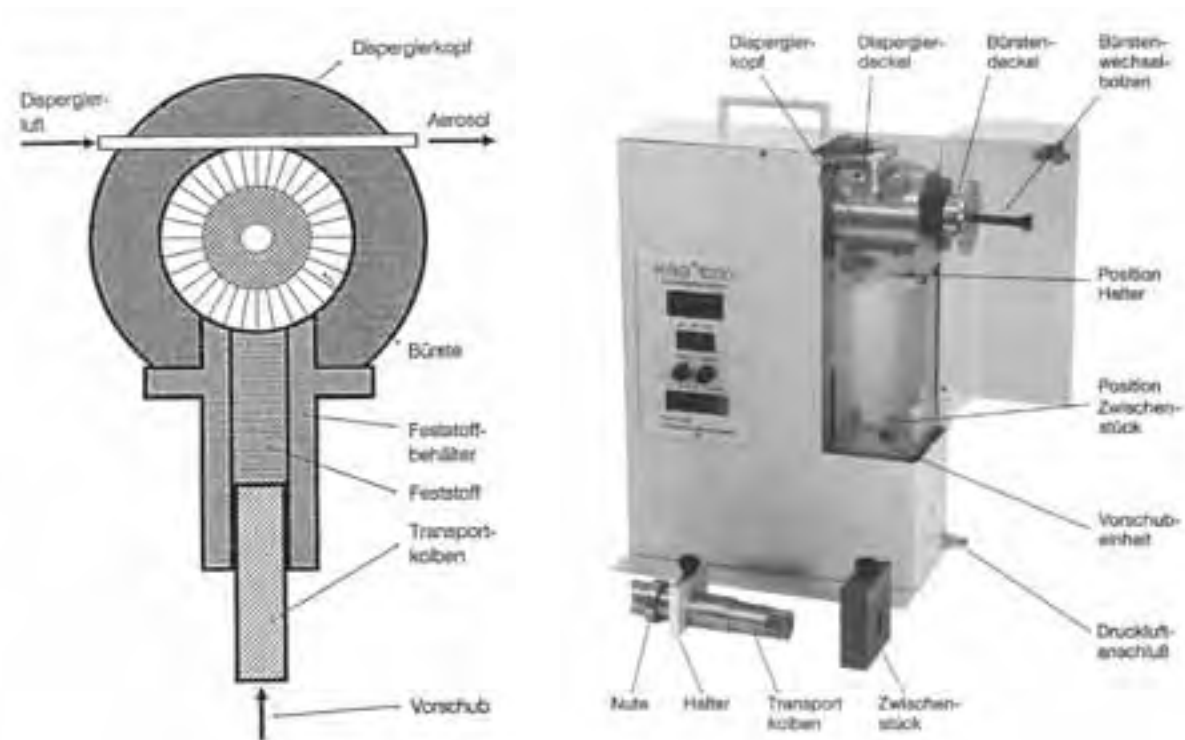


Abbildung 3.4: Schematisch dargestelltes Funktionsprinzip des Partikeldosierers (links), Foto des RBG 1000 mit Beschreibung diverser Baugruppen (rechts). Bilder aus [12].

Neutralisation aller Gegenstände erfolgt, die im Einflussbereich der Ionisatorelektrode hinreichend lange verweilen. Der im Versuchsaufbau verwendete Ionisator ist als Ringelektrode (Außendurchmesser: 140 mm) ausgeführt. Im Ring sind zahlreiche Nadelelektroden so angeordnet, dass sie radial nach innen auf das Zentrum des Ringes zeigen. An die Ringelektrode wird eine Wechselfspannung (50 Hz) von 7 kV angelegt, was zur Folge hat, dass sich freie Ionen im gesamten Ringquerschnitt befinden. Alle Gegenstände, die sich durch die Ringelektrode bewegen, werden auf diese Art und Weise entladen [1, 13].

3.3.2.2 Versuchsdurchführung

Zu Beginn der Versuchsreihe wurden die Betriebsparameter aus Tabelle 3.1 am Partikeldosierer RBG 1000 eingestellt und für alle Versuche beibehalten.

Vorschub [mm/h]	Bürstendrehzahl [U/min]	Druckluft [bar]
500	900	1,5

Tabelle 3.1: Eingestellte Betriebsparameter am RBG 1000.

Weiter wurde so verfahren, dass zunächst das Gewicht eines sauberen, staubfreien Objektträgers mit der Laborwaage bestimmt wurde. Danach wurde dieser in den Strahlengang der SKG 5-Messeinheit gebracht, um Sender und Empfänger in der Messeinheit

aufeinander abzustimmen, was gleichbedeutend mit der Definition des Nullpunktes des Messgerätes ist. Die Vorgehensweise beim Einstellen des Nullpunktes ist analog zu der, die für die Suspensionsmethode praktiziert wurde (siehe Abschnitt 2.3). Nach anschließendem Positionieren des Objektträgers in der Messkammer wurde diese verschlossen, der Ringionisator eingeschaltet und für ein bis zwei Minuten der RBG 1000 in Betrieb genommen und Staub in die Messkammer eingeblasen. Nach Abschalten des RBG 1000 wurde die Sedimentation des Staubes abgewartet, um dann den bestäubten Objektträger zum erneuten Wiegen zu entnehmen. Diesen Zyklus abschließend wurde der Objektträger in den Strahlengang der SKG 5-Messeinheit gebracht und der am Gerät angezeigte Spannungswert notiert. Die Prozedur: Staubschicht auftragen - Wiegen - Lichtschwächung messen - weiter bestäuben wurde solange wiederholt, bis genügend sinnvolle Messpunkte vorhanden waren, um eine Messkurve zu erstellen. Dieser Versuchsablauf wurde für die vier Stäube, Formpuderstärke, Maisstärke, Weizenmehl und Puderzucker abgearbeitet.

Vor der eigentlichen Aufnahme der Kalibrierkurven wurde untersucht, welchen Einfluss die Dispergierbürste des RBG 1000 auf die elektrostatische Aufladung der Staubproben hat und ob der Staub mechanisch durch diese Bürste verändert wird. Dies geschah, indem Kalibrierkurven von Maisstärke und Formpuderstärke nach oben beschriebener Methode mit und ohne Bürste im Partikeldosierer und jeweils mit und ohne Ionisator erstellt wurden.

3.3.2.3 Versuchsergebnisse

Die Messpunkte, die die Untersuchung des Einflusses der Dispergierbürste und des Ionisators ergaben, wurden in jeweils einer Grafik für einen Staub aufgetragen und in Abbildung 3.5 dargestellt. Außerdem finden sich die Ergebnisse in Tabellenform im Anhang A.2.1. Im oberen Diagramm kann ein deutlicher Einfluss der Dispergierbürste auf die Kalibrierkurve der Maisstärke abgelesen werden. Dieser Einfluss muss auf elektrostatischer Aufladung der Maisstärkekörner aufgrund der Bürstenrotation beruhen, da er verschwindet, wenn der Ionisator eingesetzt wird. Dafür spricht auch der hohe elektrische Widerstand von Maisstärke, der elektrostatische Aufladung stark begünstigt. Bei der Formpuderstärke mit ihrem geringeren elektrischen Widerstand konnte dieser Effekt im Rahmen der Messgenauigkeit nicht nachgewiesen werden. Dieses Versuchsergebnis zeigte dennoch deutlich, dass der Einsatz des Ionisators für die Richtigkeit der Messungen wichtig ist. Als weiteres Ergebnis stand fest, dass die Anwesenheit der Dispergierbürste nicht zwingend erforderlich ist, um ausreichend homogene Staubwolken in der Messkammer zur Kalibrierkurvenerstellung zu erzeugen.

Mit allen vier Stäuben konnten mit der Sedimentationsmethode problemlos reproduzierbare Spannungs- und Staubmassenwerte aufgenommen werden. Bei Puderzucker trat allerdings das versuchstechnische Problem auf, dass der Staub aufgrund seiner hygroskopischen Eigenschaft die Dispergierbürste des RBG 1000 so stark verklebte, dass diese nach kurzer Zeit festgefahren und eine Reinigung erforderlich war. Nach dieser Erfahrung wurden die Messwerte für Puderzucker ohne die Dispergierbürste aufgenommen, was keinen Einfluss auf die Messergebnisse hatte (siehe Beginn des Abschnittes).

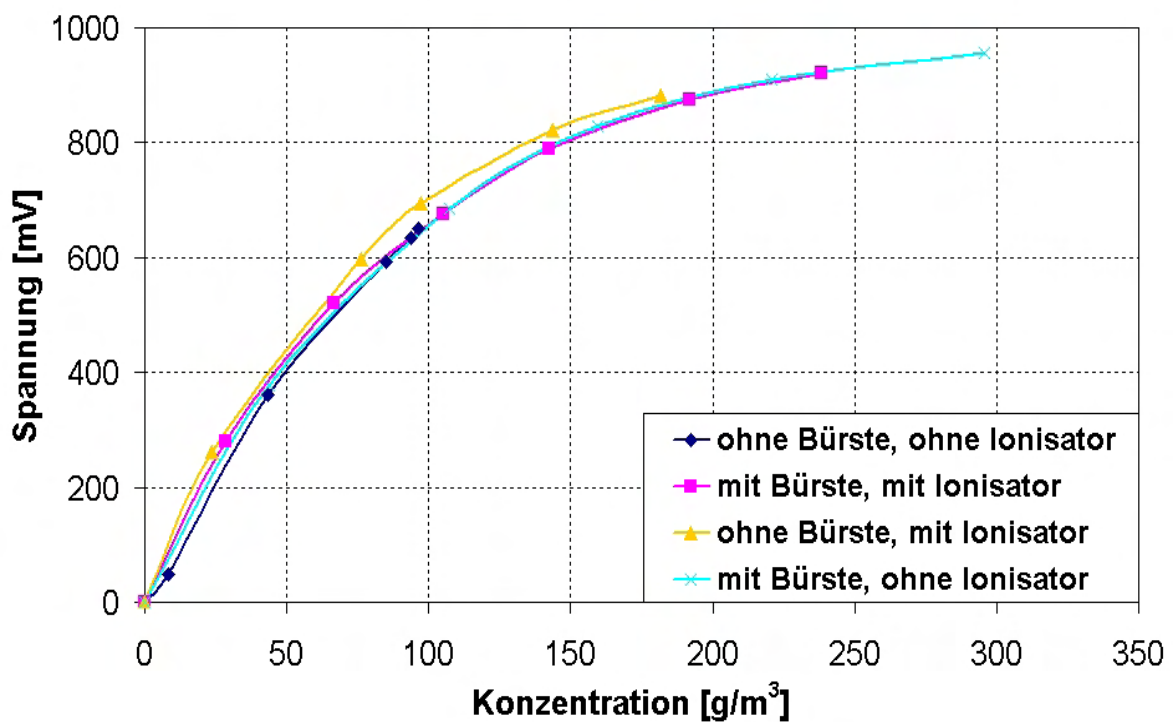
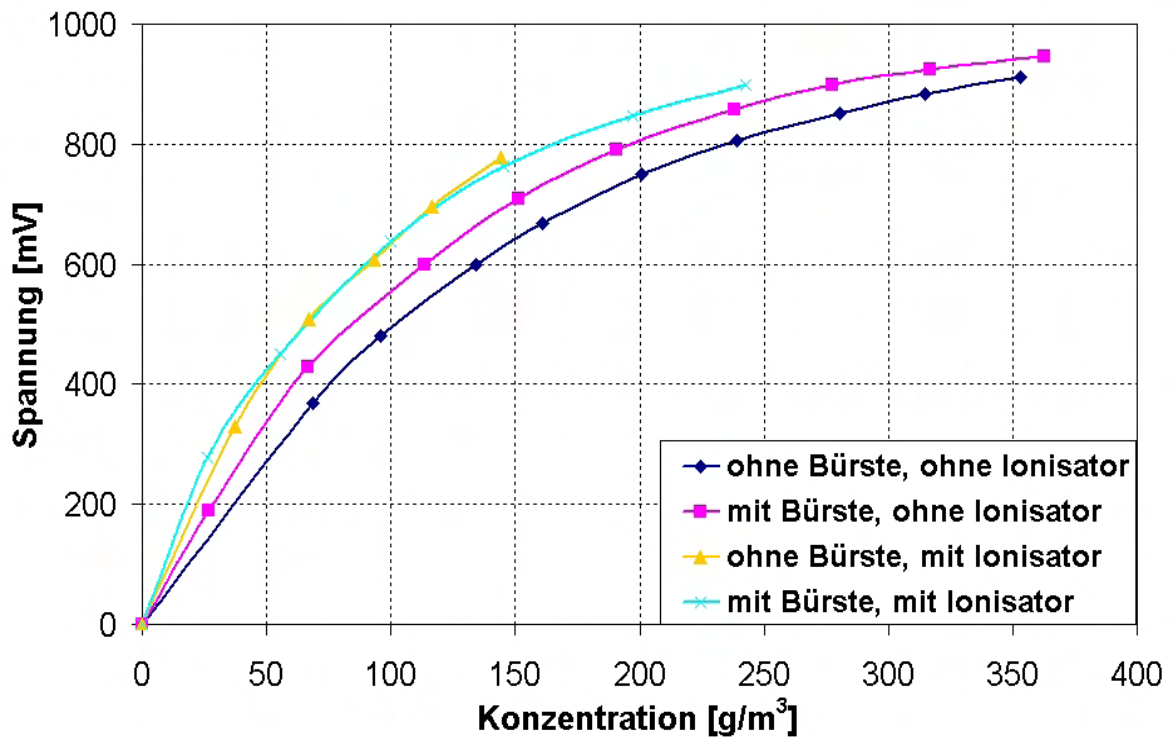


Abbildung 3.5: Kalibrierkurven für Maisstärke (oben) und Formpuderstärke (unten), erstellt mit und ohne Ionisator bzw. mit und ohne Dispergierbürste im Dispergierkopf des RBG 1000. Die Messdaten hierzu befinden sich im Anhang A.2.

Aus den auf dem Objektträger sedimentierten Staubmassen wurden gemäß Abschnitt 3.3.1 die zugehörigen Staubkonzentrationen ermittelt und daraus zusammen mit den gemessenen Spannungswerten gemäß Gleichung (2.3) die Kalibrierkurven bzw. die Koeffizienten B_1 , B_2 und B_3 bestimmt. Die gemessenen Spannungen, Staubmassen und die daraus errechneten Staubkonzentrationen c der untersuchten Stäube sind in A.2.2 aufgelistet.

Um zu sehen, wie brauchbar die mit der Sedimentationsmethode gewonnen Kalibrierkurven sind, sollten sie mit denjenigen der vier Teststäube verglichen werden, die sich mit Hilfe der Suspensionsmethode ergaben. In den Abbildungen 3.6 bis 3.9 sind jeweils zwei Kalibrierkurven für einen der Stäube abgebildet, wobei eine Kurve die Kalibrierung mit dem Sedimentationsverfahren wiedergibt, die andere die Kalibrierung mit dem Suspensionsverfahren.

3.3.2.4 Versuchsauswertung und Diskussion

Beim Betrachten der Kalibrierkurven der Abbildungen 3.6 bis 3.9 fällt zunächst auf, dass die beiden unterschiedlichen Kalibrierverfahren nur für Maisstärke identische Ergebnisse liefern. Bei den anderen drei Stäuben weichen die Kalibrierkurven mehr oder weniger stark voneinander ab, wobei die mit dem Suspensionsverfahren gewonnenen Kurven für Formpuderstärke und Weizenmehl über denjenigen liegen, die mit der Sedimentationsmethode bestimmt wurden. Beim Puderzucker ist dies genau umgekehrt. Letzteres Phänomen ist einfach zu erklären, denn Puderzucker löst sich in Ethanol weitgehend auf (siehe mikroskopische Aufnahmen in Abbildung 3.13), wodurch die mit dem Suspensionsverfahren erhaltene Kalibrierkurve in der Grafik nach unten wandert.

Schwieriger ist die Deutung der Diskrepanzen in den Kurven für Formpuderstärke und Weizenmehl. Vor einer eingehenden Diskussion der Ursachen für diese Unterschiede, soll zunächst eine Fehlerabschätzung für die Sedimentationsmethode durchgeführt werden. Eine wichtige Fehlerquelle bei der Aufnahme der Kalibrierkurven mit Hilfe der Sedimentationsmethode muss im Einfluss des seitlichen Randes des Objektträgers gesehen werden. Dort angelagerter Staub wird bei der Wägung mit berücksichtigt, kommt aber bei der Messung der Lichtschwächung durch die Staubschicht auf der großen Objektträgerfläche $A = 1.976 \text{ mm}^2$ (siehe Abb. 3.2) nicht zum Tragen. Die Fläche des seitlichen Randes beträgt $A_R = 2 \cdot (76 \text{ mm} \cdot 1 \text{ mm}) + 2 \cdot (26 \text{ mm} \cdot 1 \text{ mm}) = 204 \text{ mm}^2$. Diese 204 mm^2 machen 10,3 % der bestäubten Fläche A aus und können die aus der Wägung bestimmte Staubkonzentration nach zu hohen Werten hin verschieben. Weitere Fehlerquellen sind durch den Verlust von Staub beim Transport zwischen Messkammer und Waage, durch Schwankungen bei der Messung der Lichtschwächung in Folge nicht exakt gleicher Objektträgerpositionen von Messung zu Messung gegeben und durch Inhomogenitäten in der Staubschicht auf dem Objektträger. Insgesamt sollte ein Fehler in der Staubkonzentration mit maximal 15 % vollständig erfasst sein. Auch bei Berücksichtigung dieses Messfehlers können die Kalibrierkurven für Formpuderstärke und Weizenmehl nicht zur Deckung gebracht werden, d. h., es muss physikalische Ursachen für diese Diskrepanz geben. Wie mikroskopische Untersuchungen (Abb. 3.10 bis 3.13) von Formpuderstärke- und Weizenmehlparkeln in Ethanol und Luft ergaben, quellen die Formpuderstärkepartikel mäßig und die Weizenmehlparkel in Ethanol teilweise stark auf, was eine stärkere Lichtabsorption und damit eine höhere Messspannung zur Folge

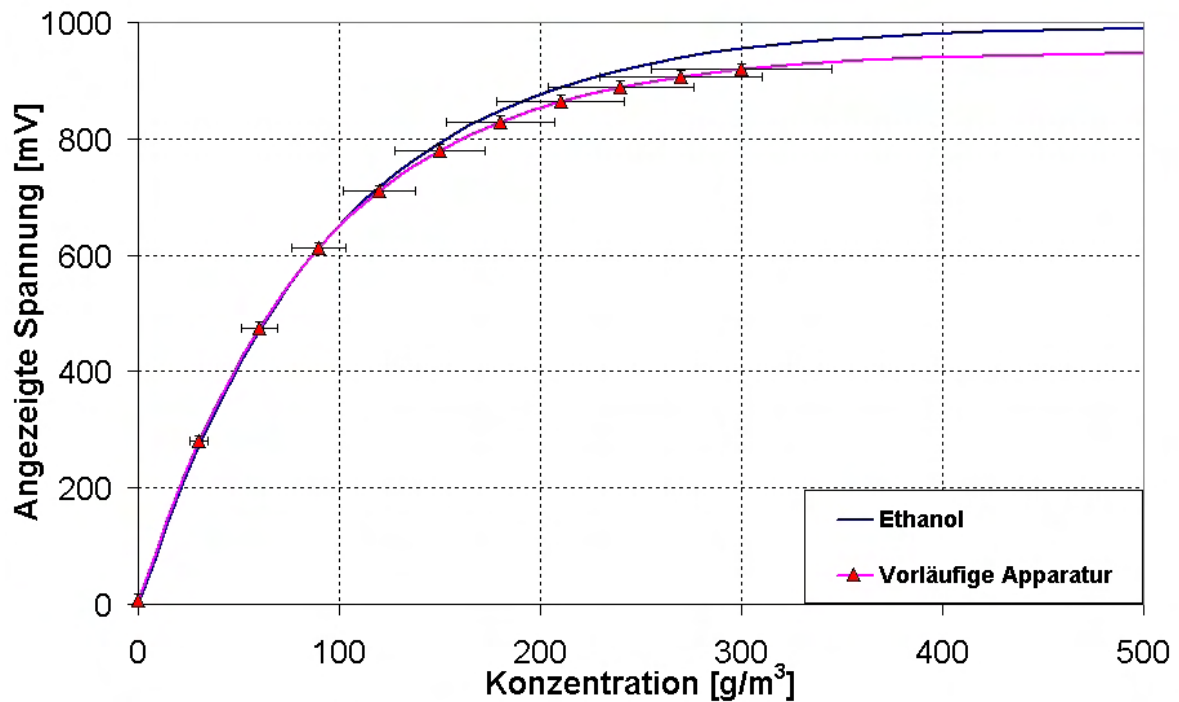


Abbildung 3.6: Kalibrierkurven für Maisstärke, erstellt mit dem Sedimentations- und Suspensionsverfahren. Die rote Kurve ist das Mittel aus mehreren Einzelkurven.

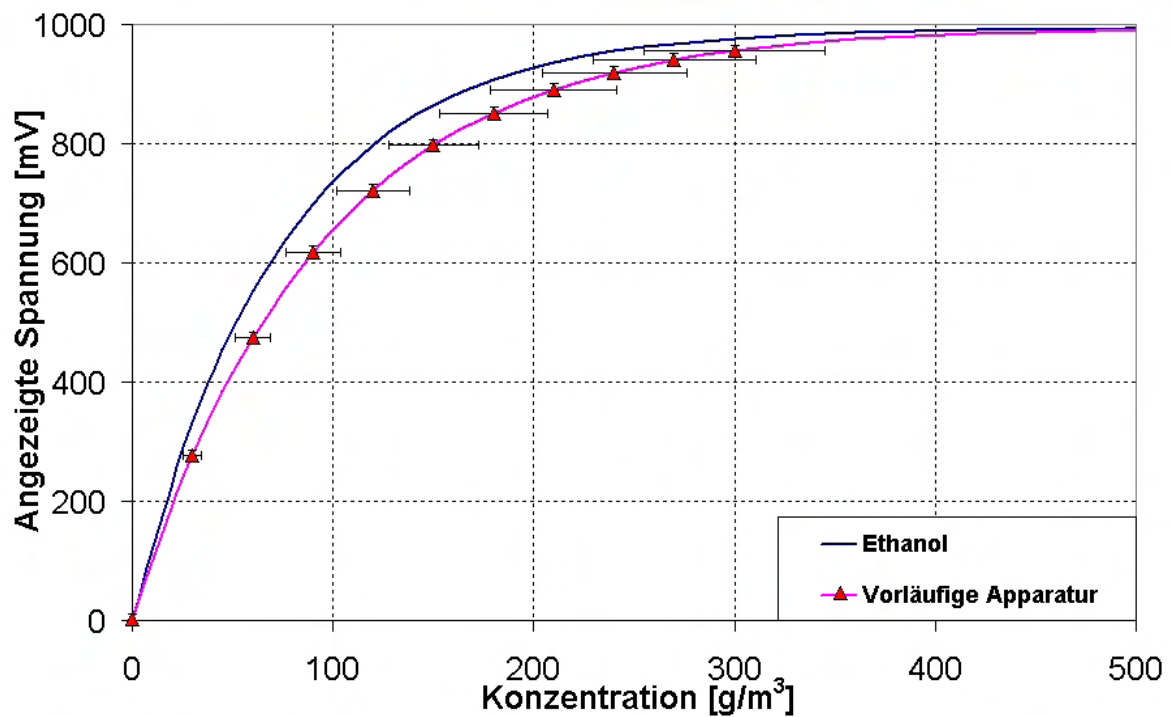


Abbildung 3.7: Kalibrierkurven für Formpuderstärke, erstellt mit dem Sedimentations- und Suspensionsverfahren. Die rote Kurve ist das Mittel aus mehreren Einzelkurven.

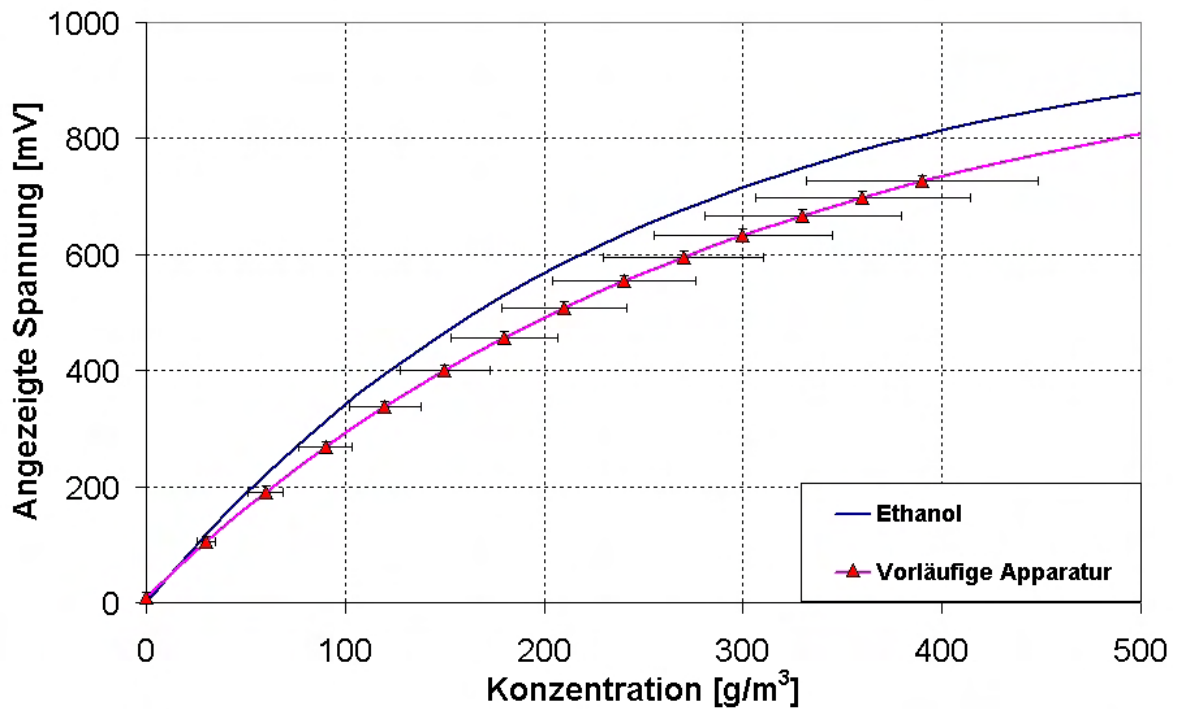


Abbildung 3.8: Kalibrierkurven für Weizenmehl, erstellt mit dem Sedimentations- und Suspensionsverfahren. Die rote Kurve ist das Mittel aus mehreren Einzelkurven.

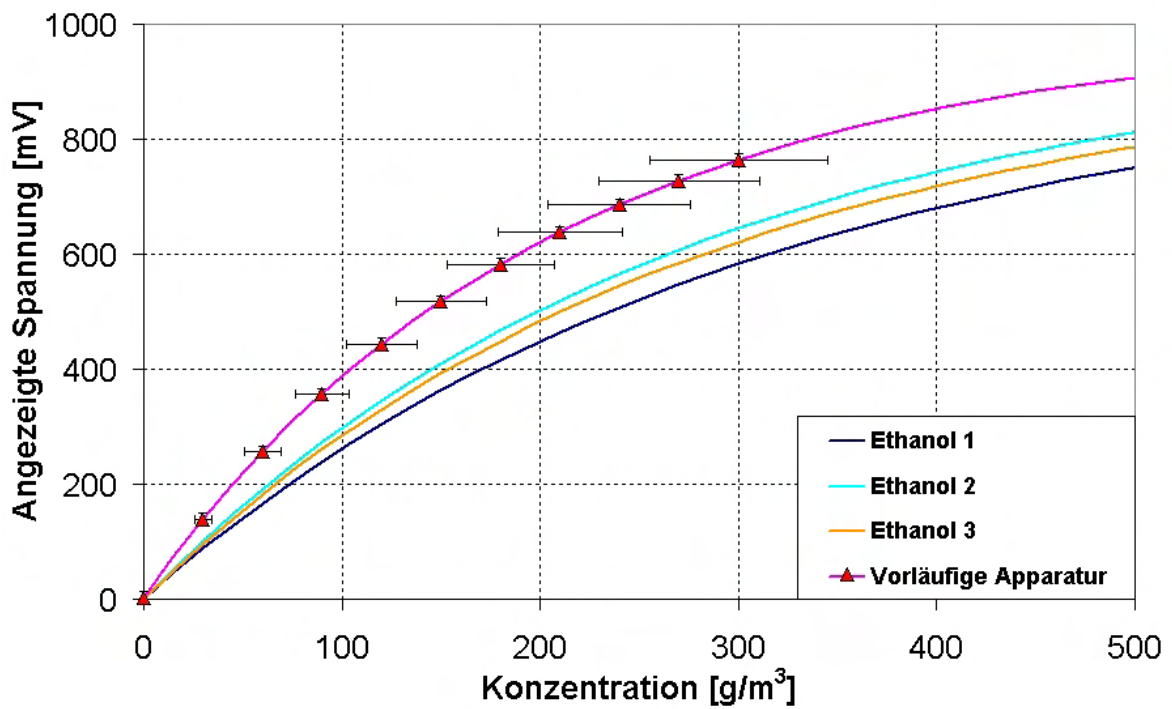


Abbildung 3.9: Kalibrierkurven für Puderzucker, erstellt mit dem Sedimentations- und Suspensionsverfahren. Die rote Kurve ist das Mittel aus mehreren Einzelkurven.

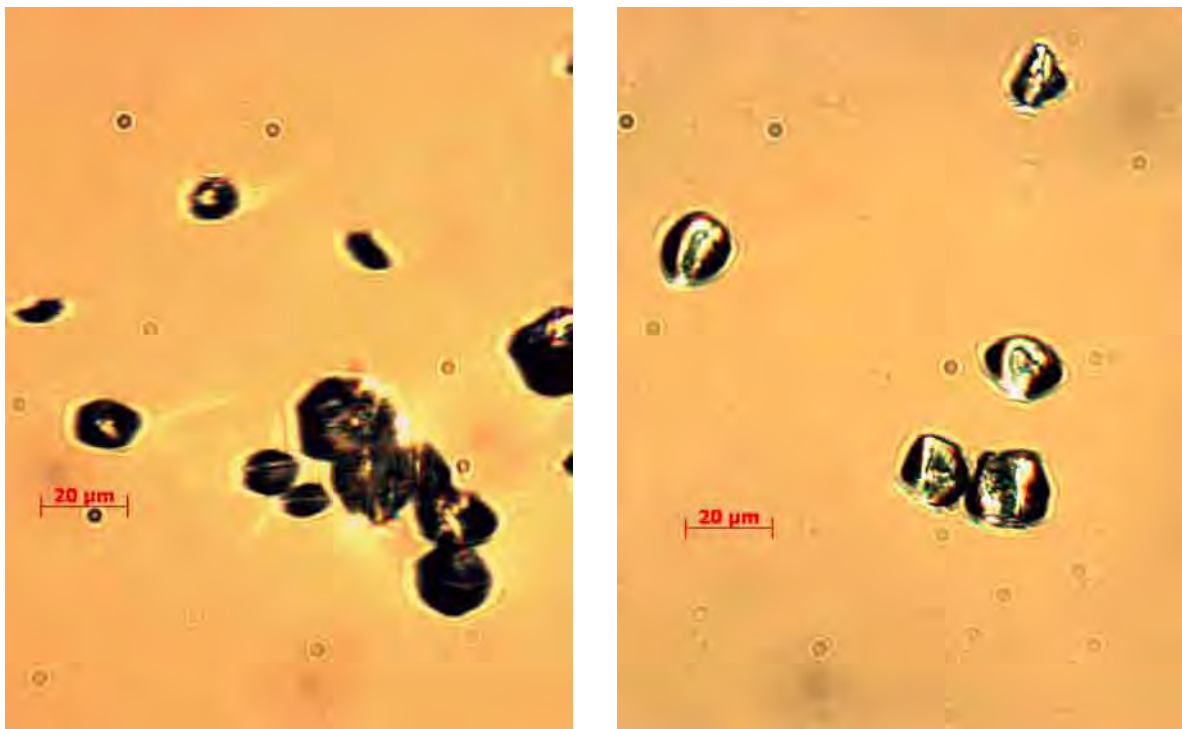


Abbildung 3.10: Maisstärkepartikel, wie sie bei der Sedimentations- und Suspensionsmethode erzeugt worden sind. Links in Luft, rechts in Ethanol. Die Größe der Partikel ändert sich in Ethanol nicht, jedoch wirken die Teilchen transparenter als in Luft.

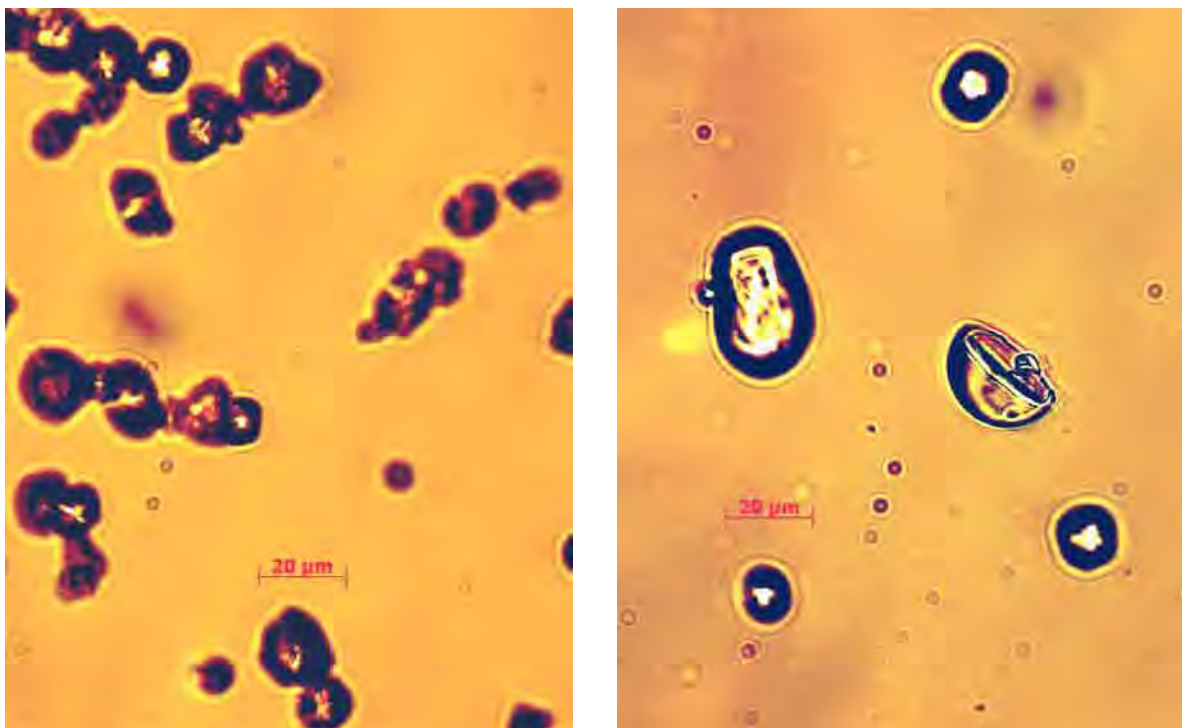


Abbildung 3.11: Formpuderstärkepartikel, wie sie bei der Sedimentations- und Suspensionsmethode erzeugt worden sind. Links in Luft, rechts in Ethanol. Die Formpuderstärkepartikel quellen in Ethanol geringfügig auf und erscheinen transparent.

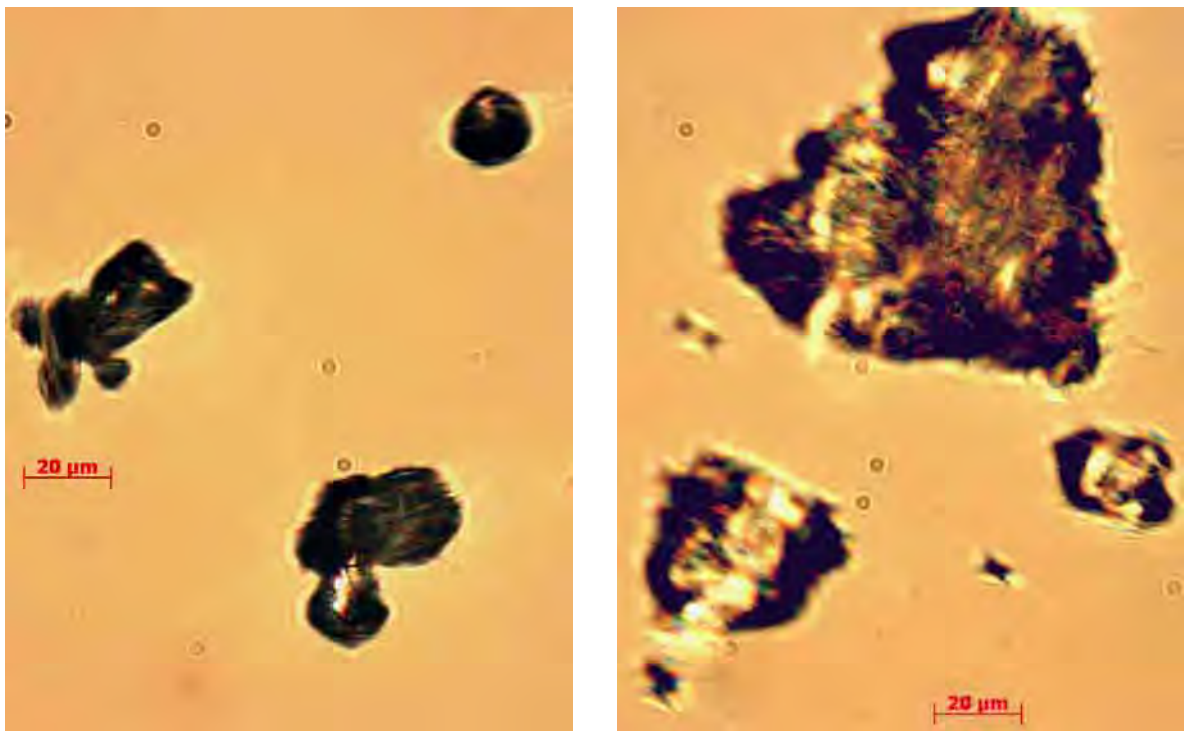


Abbildung 3.12: Weizenmehlpartikel, wie sie bei der Sedimentations- und Suspensionsmethode erzeugt worden sind. Links in Luft, rechts in Ethanol. Die Weizenpartikel quellen in Ethanol auf und erscheinen gleichzeitig transparenter.

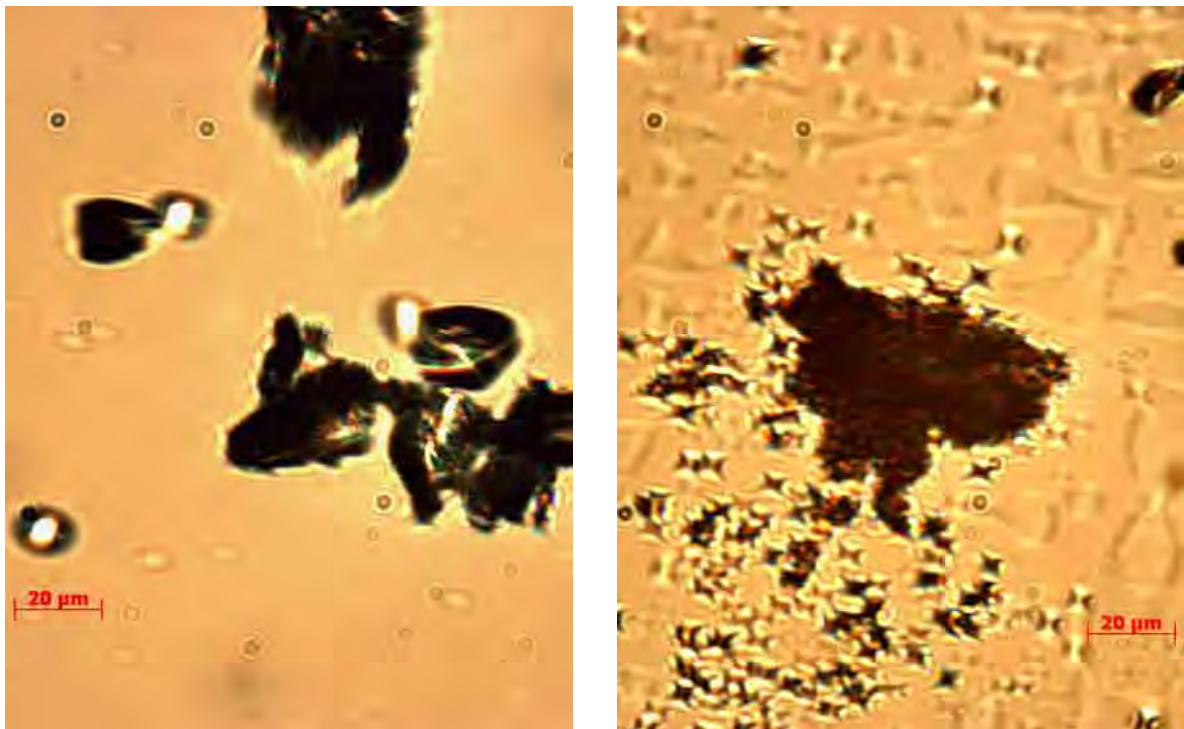


Abbildung 3.13: Puderzuckerpartikel, wie sie bei der Sedimentations- und Suspensionsmethode erzeugt worden sind. Links in Luft, rechts in Ethanol. Sehr schön ist das Auflösen der Puderzuckerpartikel in Ethanol zu erkennen.

hatte. Auch der Brechungsindex sowie die Streu- und Absorptionseigenschaften der Partikel sind in Ethanol anders als in Luft. In den mikroskopischen Aufnahmen ist dies an der mehr transparenten Erscheinung der Partikel im Ethanol im Gegenlicht zu erkennen. Die Partikel absorbieren in Ethanol weniger Licht als in Luft, was dazu führen sollte, dass die Messspannung sinkt. Aufquellen und Transparenzerhöhung wirken also entgegengesetzt. Je nach Dominanz des ein oder anderen Vorganges rutschen die „wahren“ Kalibrierkurven nach unten oder oben im Diagramm. Das erklärt, warum die Kalibrierkurven für Maisstärke übereinander liegen, obwohl die mit der Sedimentationsmethode gewonnenen Kurve nach obiger Fehlerbetrachtung unterhalb der Kurve nach Suspensionsmethode liegen sollte. Durch die transparenter werdenden Partikel im Ethanol rutscht diese Kalibrierkurve nach unten und deckt sich mit der Kurve nach Sedimentationsmethode. Die Fehler beider Methoden heben sich hier zufällig auf. Trotz der Messfehler lieferte dieser provisorische Messaufbau viel versprechende Ergebnisse, d. h., die Messwerte waren reproduzierbar und folgten dem Zusammenhang (2.3). Dies ermutigte dazu, eine Apparatur zur Bestimmung von Kalibrierkurven für das SKG 5, basierend auf der Sedimentationsmethode aufzubauen.

3.3.3 Aufbau einer Apparatur zur Aufnahme von Kalibrierkurven

Nachdem der Nachweis erbracht war, dass sich das Sedimentationsverfahren gut zur Kalibrierkurvenerstellung für das SKG 5 eignet, sollte - basierend auf den Erfahrungen mit dem vorläufigen Versuchsaufbau - ein Kalibrierstand entwickelt werden.

3.3.3.1 Anforderungen an die Apparatur und Konzept

Die Apparatur sollte so gestaltet sein, dass während der Aufnahme einer Kalibrierkurve der Bediener in die Messkammer selbst nicht mehr eingreifen muss. Weiterhin wurde gefordert, dass bei der Bestimmung von Staubmasse und Spannung der bestäubte Objektträger nicht mehr bewegt werden muss. Außerdem sollte der verwendete Objektträger möglichst dünn sein. All diese Forderungen entsprangen dem Ziel, die in Abschnitt 3.3.2.4 beschriebenen Fehlerquellen möglichst weitgehend auszuschalten.

Damit eine Verschmutzung des Laborraumes unterbunden wird und dennoch Benutzerfreundlichkeit gewährleistet ist, sollte die Messkammer ein geschlossener, aber gut zugänglicher Raum sein.

Aus den genannten Forderungen an die Apparatur ergab sich folgendes Konzept für deren Aufbau: In eine geschlossene, gut zugängliche Messkammer aus Stahl wird der zu untersuchende Staub mit Hilfe des RBG 1000 eingeblasen. Der Staub wird beim Eintritt in die Messkammer mit der Ringelektrode bzw. dem Ionisator elektrisch entladen. In der Messkammer hängt ein äußerst dünnes Glasplättchen (Objektträger) an vor Staubanlagerung geschützten Fäden, auf dem der eingeblasene Staub sedimentiert. Die Fäden führen oben aus der Kammer hinaus zum Wägearm einer Torsionswaage, an der permanent die Gewichtsveränderung des Objektträgers angezeigt wird. Nach einer gewissen Dauer des Staubeintrages wird der RBG 1000 abgeschaltet und nach Beendigung der Sedimentation die Messeinheit des SKG 5 so zum Objektträger gefahren,

dass der Lichtstrahl der Messeinheit genau senkrecht zur großen Fläche A des Objektträgers steht und diesen durchstrahlt. Nach Aufnahme des Spannungswertes wird die Messeinheit zurück gefahren in eine staubdicht verschließbare Kammer innerhalb der Messkammer. So wird eine Verschmutzung der Messeinheit während eines weiteren Staubeintrages in die Messkammer durch erneutes Einschalten des RBG 1000 verhindert. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis genügend Messpunkte zur Erstellung einer Kalibrierkurve vorhanden sind. Das hier erarbeitete Konzept könnte durch einen apparativen Aufbau, wie er in Abbildung 3.14 skizziert ist, verwirklicht werden.

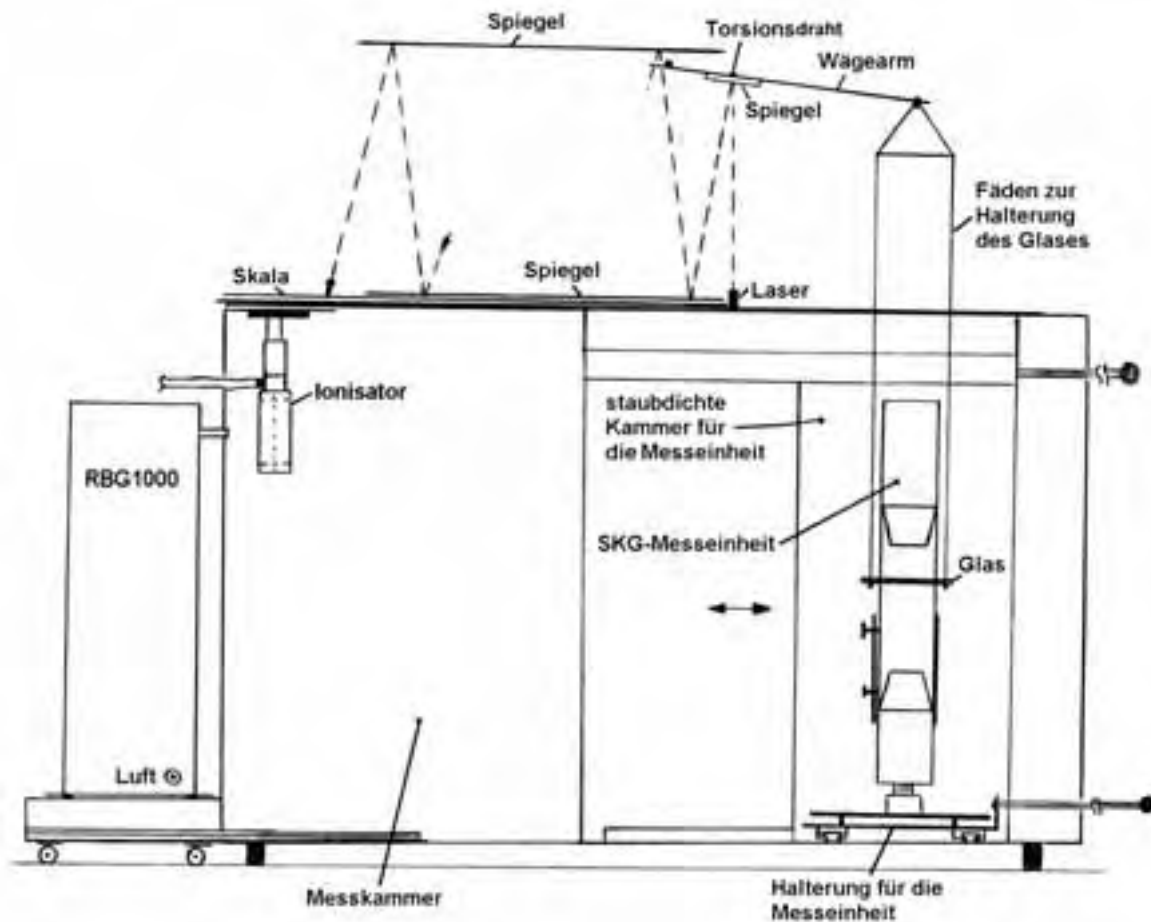


Abbildung 3.14: Skizze einer möglichen Umsetzung des geplanten Konzeptes für eine Kalibrierapparatur auf Basis der Sedimentationsmethode.

3.3.3.2 Aufbau der Messkammer

Nach Überlegungen zur Gestaltung eines Messraumes, in den während der Messung kein direkter Eingriff durch den Bediener mehr erfolgen muss, sowie zum Thema Größe der Kammer und die damit verbundene nötige Festigkeit des verwendeten Materials und die sich dann ergebende Masse, sowie eventuell nötig werdende Versteifungen, wurde die Kammer wie folgt konstruiert (siehe auch Abb. 3.14 und 3.15 und Konstruktionszeichnungen im Anhang B.1): Die Messkammer wurde aus einem 3 mm starken VA-Stahl



Abbildung 3.15: Die geöffnete Messkammer mit dem RBG 1000 (links im Bild). Rechts von der Mitte erkennt man die geöffnete Kammer, in der sich die Messeinheit des SKG 5 befindet.

gefertigt. Ihre Außenmaße betragen $785 \text{ mm} \times 610 \text{ mm} \times 715 \text{ mm}$. Eine gute Zugänglichkeit wird durch zwei große Türen auf der Frontseite gewährleistet. Wie im vorigen Abschnitt erwähnt, wird der Staub mittels Partikeldosierer RBG 1000 in die Kammer eingeblasen. Um einen optimalen Abstand – je nach Flugeigenschaften des verwendeten Staubes – zwischen Glasplättchen und der Düse des RBG 1000 einstellen zu können, sitzt der RBG 1000 auf einem Schlitten, der auf Führungsschienen bewegt werden kann (wegen des hohen Gewichtes des RBG 1000). Der Schlitten bzw. der RBG 1000 kann an mehreren Positionen so arretiert werden, dass der Abstand zwischen der Ausblasdüsenvorderkante des RBG 1000 und der Mitte des Glasplättchens 500 mm, 600 mm oder 70 mm beträgt. An einer auf dem Schlitten montierten Blechwand zum Verschluss der Messkammer ist die Ringelektrode zur Entladung des in die Messkammer eintretenden Staubes angebracht. Führungsschienen, Schlitten, RBG 1000 und Ringelektrode sitzen auf einer fahrbaren Einheit und können nach Lösen einer für diese Einheit vorgesehenen Arretierung komplett entfernt werden.

In die Messkammer führen von oben vier Fäden durch entsprechende Bohrungen hinein, an deren unterem Ende das zu bestäubende Glasplättchen ($60 \text{ mm} \times 24 \text{ mm} \times 0,1 \text{ mm}$) aufgehängt ist. Zum Messen der durch die Staubschicht auf dem Glasplättchen hervorgerufenen Lichtabsorption wird die auf einem Schlitten sitzende Messeinheit des SKG 5 auf Führungsschienen von der Messkammerrückwand her nach vorn so weit an das bestäubte Glas herangefahren, bis sich das Glasplättchen im Strahlengang der Messeinheit befindet. Dieser Ort des Schlittens entspricht der Endposition dieser Bewegungsrichtung. Der Schlitten, auf dem die Messeinheit in der Vertikalen fixiert ist, wird über einen seitlich angebrachten Hebel von außen bewegt.

Vor dem Staubeintrag in die Messkammer wird die Messeinheit mit Hilfe des Schlittens zurück in eine staubdichte Kammer gefahren, in der die Optik der Messeinheit vor Verschmutzung geschützt ist. Öffnen und Schließen der Kammer wird durch eine Schiebetür bewerkstelligt, die von außerhalb der Messkammer über einen seitlich angebrachten Hebel bewegt wird.

In der rechten Seitenwand der Messkammer ist eine mit Filtermaterial verschlossene Öffnung integriert, die dafür sorgt, dass sich während der Staubeinblasphasen in der Messkammer kein Überdruck aufbauen kann.

Damit während des Staubeintrages aus der Messkammer kein Staub in den Außenraum tritt, sind alle Öffnungen in der Kammeraußenwand, die aus konstruktionstechnischen Gründen nicht zu vermeiden waren, mit Dichtungsmaterial versiegelt. Dies gilt in besonderem Maße für die Kammer, in der die SKG 5-Messeinheit untergebracht ist, da schon kleinste Ritzen ein Eindringen von Staub und damit eine Verschmutzung der Linsen bewirken. Um den in der Messkammer befindlichen Teil der Fäden zur Halterung bzw. Wägung des Glasplättchens vor Staubanlagerungen zu schützen, werden diese innerhalb langer, dünner Metallröhrchen geführt.

3.3.3.3 Aufbau der Torsionswaage

Die Waage zur Bestimmung der auf dem Glasplättchen abgelagerten Staubmasse musste zum einen so empfindlich sein, dass Massenunterschiede von 1 mg bequem abgelesen werden können, und zum anderen einen Messbereich von mindestens $0 \text{ mg} < m_{\text{Staub}} < 250 \text{ mg}$ aufweisen. Weiterhin zwang die Begrenztheit des für dieses Projekt zur Verfügung stehenden Etats dazu, die Waage selbst aufzubauen, d. h. es konnten keine kostspieligen Waagenkonstruktionen bei der Privatwirtschaft in Auftrag gegeben werden. Diese Umstände führten zum Entschluss des Baues einer Torsionswaage.

Eine Torsionswaage besteht im Wesentlichen aus einem gespannten Draht (Torsionsdraht), an dem ein Wägearm befestigt ist. Wägearm und Draht bilden einen rechten Winkel zueinander und der Wägearm befindet sich bei Abwesenheit einer Masse im Gleichgewichtszustand. Wird das eine Ende des Wägearms mit einer Masse bzw. Gewichtskraft belastet, so wird auf den Draht ein Drehmoment ausgeübt. Der Draht verdrillt sich aufgrund dieses Drehmomentes so lange, bis sich ein Gleichgewicht zwischen diesem Drehmoment und dem rücktreibenden Drehmoment aufgrund der Drahtverdrillung einstellt. Die Verdrillung des Drahtes ist proportional zur angreifenden Kraft bzw. zur angehängten Masse und bietet damit die Möglichkeit einer Massenbestimmung. Um die oft sehr kleine Verdrillung des Drahtes bzw. den Winkel α der Wägearmauslenkung mit guter Auflösung messen zu können, benötigt man „lange Zeiger“, wie man aus der Definition des Bogenmaßes

$$\alpha = \frac{b}{r} = \frac{\text{Messausschlag}}{\text{Zeigerlänge}} \quad (3.3)$$

ersieht mit b als Kreisbogen, r als Radius und α als Winkel in Radian. Ein langer Zeiger lässt sich einfach mit einem Laserstrahl verwirklichen, welcher auf einen kleinen Spiegel gerichtet ist, der wiederum mit dem Wägearm am Ort des Torsionsdrahtes fest verbunden ist. Der Laserstrahl wird an diesem Spiegel hin zu einer Skala reflektiert,

d. h. bei Auslenkung des Spiegels wandert der Leuchtpunkt des Laserstrahls auf der Skala. Je größer der Abstand zwischen Skala und Spiegel ist, desto größer wird der Messausschlag und damit die Empfindlichkeit der Waage. Diese Gegebenheit ist in Abbildung 3.16 schematisch dargestellt.

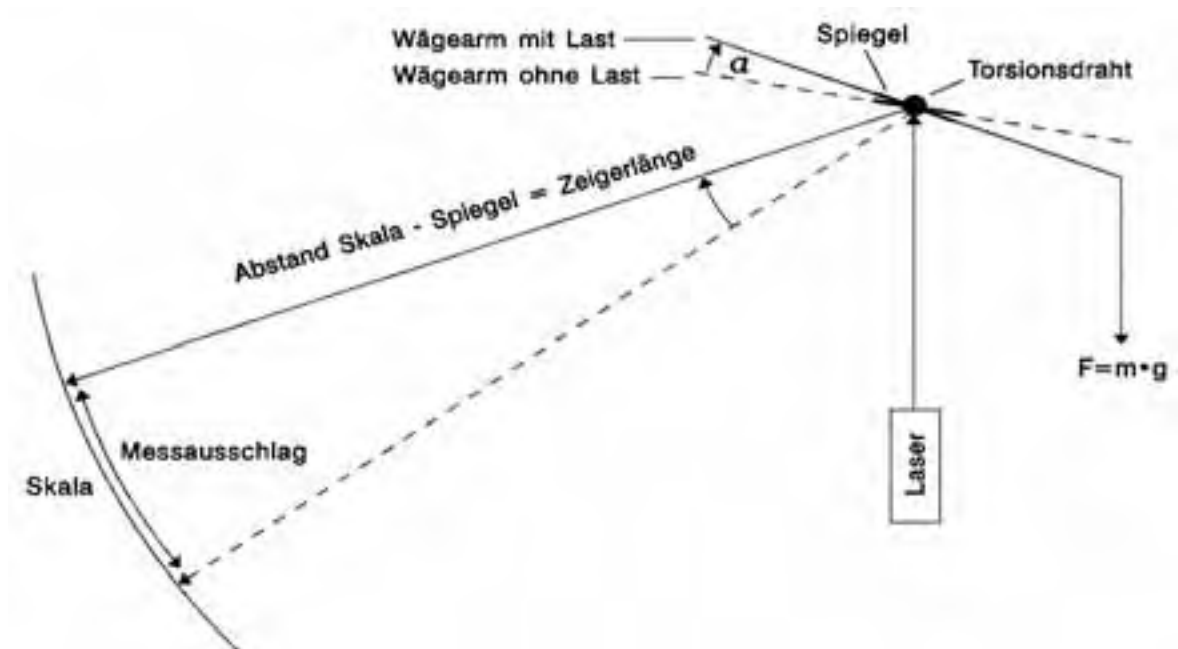


Abbildung 3.16: Funktionsweise einer Torsionswaage mit Laserstrahl als Zeiger schematisch dargestellt. Den Torsionsdraht muss man sich senkrecht zur Papierebene vorstellen.

Um die Skala nicht allzu weit vom Spiegel am Torsionsdraht entfernt anbringen zu müssen, kann ein langer Zeiger (langer Lichtweg) auch durch häufige Reflexionen zwischen zwei Spiegeln erreicht werden (siehe Abb. 3.23). Ein weiterer Weg, die Empfindlichkeit einer Torsionswaage zu erhöhen ist, einen Torsionsdraht mit kleinem Torsionsmodul und/oder kleinem Durchmesser auszuwählen. Je kleiner das Torsionsmodul bzw. Durchmesser des Drahtes ist, desto größer ist die Verdrillung des Drahtes bei gleichbleibender Masse. Der Absenkung des Torsionsmodules bzw. Durchmessers sind jedoch durch die größte Masse Grenzen gesetzt, die man mit der Waage noch bestimmen möchte, d. h. der Ausschlagswinkel α des Wägearms darf bei maximaler Masse nicht zu groß werden. Es galt also, sowohl die Länge des Lichtweges als auch die Größe des Torsionsmoduls bzw. Durchmessers des Drahtes optimal auszuwählen, um oben gestellte Anforderungen an die Waage bestmöglich zu erfüllen.

3.3.3.3.1 Auswahl des Wägearms

Weil der Wägearm fest mit dem Torsionsdraht verbunden ist und deshalb von diesem getragen wird, sollte ein sehr leichtes Material für den Wägearm verwendet werden. Verformungen des Torsionsdrahtes und des Wägearms selbst waren nach Möglichkeit zu vermeiden, weshalb Kohlefaser verstärkter Kunststoff (CFK) als Material ausgewählt wurde.

Die Länge des Wägearms wurde im Wesentlichen durch die Geometrie der geplanten Torsionswaage bzw. die darunter befindliche Messkammer festgelegt. Eine Länge von $h_2 = 150$ mm für den Teil des Wägearmes, an dem das Glasplättchen hängt, war ein guter Kompromiss zwischen einem möglichst großen Drehmoment - hervorgerufen durch die zu wiegende Masse - und den Platzverhältnissen in der Torsionswaage. Aus Platzgründen musste der gegenüberliegende Teil des Wägearms mit der Länge h_1 kürzer ausgeführt werden, nämlich $h_1 = 30$ mm. Am äußeren Ende von h_1 wurde eine Ausgleichsmasse gemäß

$$m_1 = \frac{m_2 \cdot h_2}{h_1} \quad (3.4)$$

angehängt, um den gesamten Wägearm im Gleichgewicht zu halten wenn sich kein Staub auf dem Glasplättchen befindet. Zur Veranschaulichung der beschriebenen Verhältnisse dient Abbildung 3.17.



Abbildung 3.17: Skizze der Verhältnisse am Wägearm der aufzubauenden Torsionswaage. Der Torsionsdraht steht senkrecht auf der Papierebene.

3.3.3.3.2 Auswahl des Torsionsdrahtes

Wegen der Geometrie der SKG 5-Messeinheit und der Abmessungen und Anordnung von Messeinheit, Glasplättchen ($60 \text{ mm} \times 24 \text{ mm} \times 0,1 \text{ mm}$) und dessen Aufhängung in der Messposition musste eine begrenzte Auslenkung des Glasplättchens in vertikaler und horizontaler Richtung beachtet werden. Die geometrischen Verhältnisse sind Abbildung 3.18 zu entnehmen. Eine Berührung von Messeinheit und Fäden war unbedingt zu vermeiden, um nicht ungewollt zusätzlichen Staub von den Fäden auf das Glasplättchen zu befördern. Zusammen mit der im vorigen Abschnitt festgelegten Länge h_2 des Wägearms ergab sich aus diesen Randbedingungen als maximaler Torsionswinkel $\alpha_{\max} = 14^\circ$.

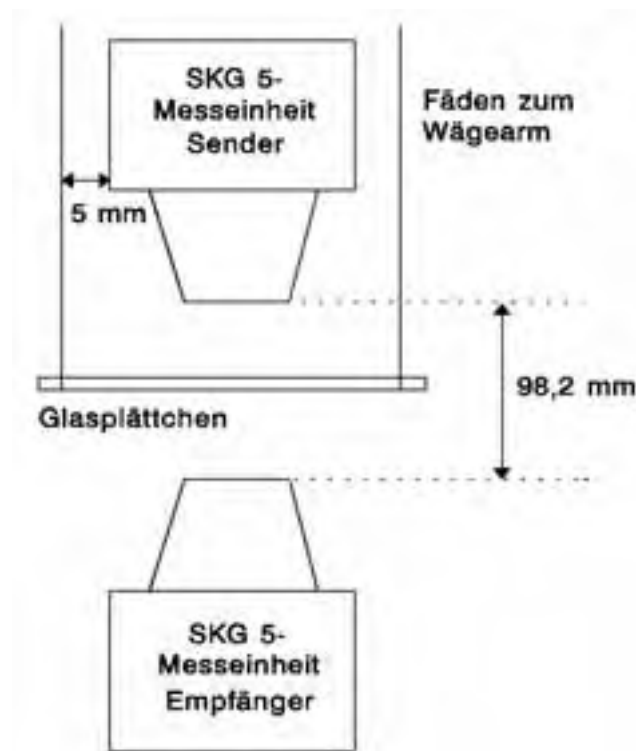


Abbildung 3.18: Skizze der geometrischen Verhältnisse am Messort der SKG 5-Messeinheit.

Die Waage ist hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit dann optimal aufgebaut, wenn der Wägearm sich um 14° neigt bei der maximal vorgesehenen Staubmasse von 250 mg. Es musste also ein geeigneter Torsionsdraht ausgewählt werden, der sich bei der genannten Masse und dem gegebenen Wägearm um möglichst 14° verdrillt. Die Verdrillung eines Drahtes ϕ ist proportional zum angreifenden Drehmoment M_{Hebel} und zur Länge des Drahtes l_{Tors} . Umgekehrt proportional ist sie zum Torsionsmodul G und zur vierten Potenz des Drahradius. Es ergibt sich also

$$\phi = - \frac{2 \cdot M_{\text{Hebel}} \cdot l_{\text{Tors}}}{\pi \cdot r_{\text{Tors}}^4 \cdot G} \quad (3.5)$$

Die Länge des Torsionsdrahtes $l_{\text{Tors}} = 285$ mm war durch die Geometrie des geplanten Waagenaufbaus festgelegt. Als Drehmoment auf den Torsionsdraht ergab sich somit

$$M_{\text{Hebel}} = m \cdot g \cdot h_2 \cdot \cos \alpha = 0,00025 \cdot 9,81 \cdot 0,15 \cdot \cos(14) = 0,00036 \text{ Nm} \quad (3.6)$$

Diese Zahlen eingesetzt in (3.5) lieferten Wertepaare für G und r_{Tors} für geeignete Torsionsdrähte. Einige dieser berechneten Wertepaare sind in Tabelle 3.2 aufgelistet. Eine weitere Forderung an die Eigenschaften des Torsionsdrahtes war, dass das Torsionsmodul nicht zeitlich variiert, was verschiedene Ausschläge bei gleicher Masse zur Folge gehabt hätte. Außerdem sollte sich der Torsionsdraht nach Wegnahme der Belastung in seine Ausgangslage zurück bewegen, d. h. eine geringe Hysterese zeigen.

r_{Tors} [mm]	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
$G \cdot 10^9$ [N/m ²]	2.670	528	167	68,4	33	17,8	10,4	6,52	4,28

Tabelle 3.2: Werte für Radius r_{Tors} und Torsionsmodul G von Torsionsdrähten, die für die Torsionswaage in Frage kamen.

Als Torsionsdraht standen verschiedene Nylonfäden ($\varnothing = 0,5$ mm, 0,6 mm und 0,9 mm) sowie ein Federstahldraht ($\varnothing = 0,3$ mm) und ein Stahldraht ($\varnothing = 0,6$ mm) zur Auswahl. Da für diese Fäden und Drähte die Torsionsmodule unbekannt waren, mussten diese experimentell bestimmt werden.

3.3.3.3.2.1 Bestimmung der Torsionsmodule

3.3.3.3.2.1.1 Versuchsaufbau

Torsionsmodule von Fäden, Drähten, Stäben etc. lassen sich mit Hilfe von Torsionspendeln bestimmen. Dazu wird der zu untersuchende Draht mit dem Durchmesser $2 \cdot r_{\text{Tors}}$ einseitig eingespannt. An seinem anderen Ende befestigt man ein Gewicht mit bekanntem Trägheitsmoment J in dessen Schwerpunkt. Der Abstand Einspannung - Gewicht entspricht der Länge l_{Tors} des Drahtes. Eine Versuchsskizze zeigt Abbildung 3.19.

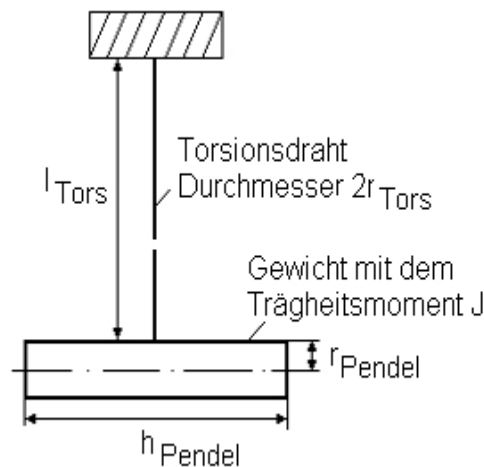


Abbildung 3.19: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Torsionsmoduls eines Drahtes oder Fadens.

3.3.3.3.2.1.2 Versuchsdurchführung

Der Draht mit bekanntem Radius r_{Tors} wird, wie im vorigen Abschnitt beschrieben, eingespannt und seine l_{Tors} gemessen. Anschließend wird das Gewicht um seine vertikale Symmetrieachse, welche gleichzeitig auch die Achse des Drahtes ist, um den Winkel ϕ ausgelenkt. Der Draht übt dann auf das Gewicht ein rücktreibendes Drehmoment M_{Tors} gemäß (3.5) aus. Das Loslassen des Gewichtes führt zu einer Drehschwingung desselben mit der Schwingungsdauer T . Mit einer Stoppuhr wird die Dauer für mehrere vollständige Schwingungen gemessen. Diesen Vorgang wiederholt

man zum Beispiel fünf Mal und bildet anschließend das arithmetische Mittel der gemessenen Zeitspannen und dividiert diese durch die Anzahl der Schwingungen, wodurch man die Schwingungsperiode T erhält. Dieser Vorgang wurde für alle Drähte und Fäden wiederholt, für die das Torsionsmodul bestimmt werden sollte.

3.3.3.3.2.1.3 Versuchsergebnisse

Die Parameter und Messergebnisse der durchgeführten Versuche sind in Tabelle 3.3 zusammengestellt.

Material	Nylon	Nylon	Nylon	Stahldraht	Stahlfederdraht
r_{Tors} [mm]	0,25	0,3	0,45	0,3	0,15
l_{Tors} [mm]	221	295	251	312	275
$J \cdot 10^{-4}$ [kg · m ²]	3,517	3,517	3,517	3,517	3,517
\bar{T} [s]	37,19	23,8	11,89	3,96	7,73

Tabelle 3.3: Ergebnisse der Messungen zur Bestimmung der Torsionsmodule diverser Fäden und Drähte.

3.3.3.3.2.1.4 Versuchsauswertung und Diskussion

Die Schwingungsperiode T hängt mit den anderen Größen zusammen gemäß

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{J}{D}} \quad (3.7)$$

mit J als Trägheitsmoment des Gewichtes bezogen auf die Drehachse (Drahtachse) und mit

$$D = \frac{\pi \cdot r_{\text{Tors}}^4 \cdot G}{2 \cdot l_{\text{Tors}}} \quad (3.8)$$

als Richtmoment. Durch Umstellen der Gleichungen 3.5 und 3.7 und ineinander Einsetzen erhält man die Beziehung

$$G = 8 \cdot \pi \cdot \frac{l_{\text{Tors}}}{r_{\text{Tors}}^4} \cdot \frac{J}{T^2} \quad (3.9)$$

mit welcher die gesuchten Torsionsmodule G berechnet werden können. Es folgte:

Material	Nylon	Nylon	Nylon	Stahldraht	Stahlfederdraht
r_{Tors} [mm]	0,25	0,3	0,45	0,3	0,15
$G \cdot 10^9$ [N/m ²]	0,3616	0,5682	0,3827	21,69	80,35

Tabelle 3.4: Aus den Messdaten berechnete Torsionsmodule für die untersuchten Fäden und Drähte.

Ein Vergleich der Tabelle 3.2 mit Tabelle 3.4 würde den Stahldraht mit 0,6 mm Durchmesser für die Torsionswaage prädestinieren, weil dieser in r_{Tors} und G den Idealwerten am nächsten kommt. Jedoch ging der Wägearm bei Verwendung dieses Stahldrahtes nach einer Wägung nicht wieder in seine Ausgangslage zurück. Ähnliches gilt für die Nylonfäden, bei denen noch eine stetige Drift der Wägearmposition hinzukam. Diese Eigenschaften disqualifizierten die Nylonfäden und den Stahldraht. Weil der untersuchte Stahlfederdraht den Idealwerten auch recht nahe kommt und die genannten Eigenschaften wie bleibende Verformung nach Wägung und/oder Drift nicht zeigte, wurde er als Torsionsdraht für die Waage ausgewählt.

3.3.3.3 Aufbau der Halterung für das Glasplättchen

Am Ende des Wägearmes sollte die Halterung für das Glasplättchen angebracht werden. Bei Belastung des Armes dreht dieser um seinen Drehpunkt (Torsionsdraht) und beschreibt einen Kreisbogen. So führt die Halterung bzw. das Glasplättchen folglich neben der vertikalen auch eine horizontale Bewegung aus. Diese Tatsache musste bei der Konfiguration der Halterung beachtet werden. Eine Berührung mit der Messeinheit des SKG 5 musste wegen einer möglichen Beeinflussung der Messung ausgeschlossen werden (siehe hierzu auch Abschnitt 3.3.3.2).

Ein weiteres Gestaltungskriterium sollte ein minimales Gewicht der Halterung sein, um noch in einem akzeptablen Gewichtsverhältnis zu der zu wiegenden Staubmasse zu stehen. Ein weiterer Grund für eine möglichst leichte Bauweise war, dass ein geringes Gewicht m_1 zum Ausgleichen der Masse m_2 von Wägearm, Aufhängung und Glasplättchen benötigt wurde.

Erreicht wurden diese Ziele durch den Aufbau eines leichten Rahmens aus Kohlefaser verstärktem Kunststoff, der über eine Öse und vier dünne Drähte am Wägearm befestigt ist. Ausgehend von den vier Ecken des Rahmens laufen vier hauchdünne Nylonfäden ($\varnothing = 0,1 \text{ mm}$) zum Glasplättchen. Die Fädchen sind an den Ecken des Rahmens fest mit diesem verbunden (Abb. 3.20, links). Am unteren Ende der Fäden ist das Glasplättchen mit Hilfe einer speziellen Vorrichtung positioniert. Bei der Staubwägung ist nur die Masse des Staubes relevant, der sich auf den großen oberen und unteren Flächen A auf dem Glasplättchen ablagert. Zusätzliche gewogene Staubmassen an den Fäden oder der Haltevorrichtung des Glases haben einen Messfehler zur Folge, weshalb die Anlagerung von Staub an diesen Objekten nach Möglichkeit vermieden werden musste.

Die erste Variante einer Haltevorrichtung für das Glasplättchen war ein sehr leichter und stabiler Rahmen aus Kohlefaser verstärktem Kunststoff, auf dem das Glasplättchen einfach aufgelegt wurde. Der Rahmen besaß in etwa die gleichen Abmessungen wie das Glas. Durch die relativ große Materialdicke des Rahmens konnte sich an dessen Seiten viel Staub anlagern, weshalb diese Lösung wieder verworfen wurde.

Die zweite Variante einer Glasplättchenhalterung war, das Glasplättchen in die bloßen, zu Schlaufen gebundenen Fäden zu legen. Der Wegfall der stabilen Unterlage machte es allerdings schwierig, das Glasplättchen in den Schlaufen exakt waagrecht zur Messeinheit des SKG 5 auszurichten, da es aufgrund seiner geringen Masse immer wieder verrutschte.

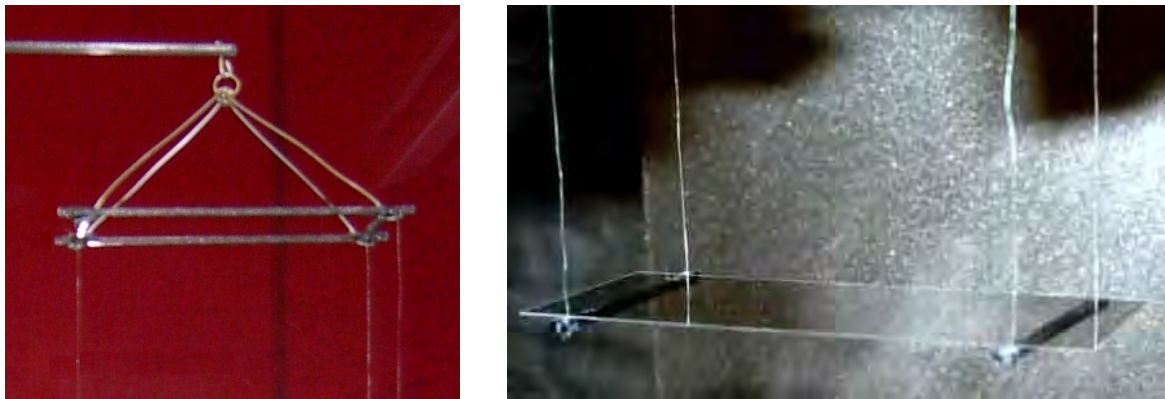


Abbildung 3.20: Oberer Teil der Halterung für das Glasplättchen mit Öse und Rahmen angebracht am Wägearm (links) und unterer Teil der Halterung mitsamt Glasplättchen (rechts).

Bei der dritten, zunächst viel versprechenden Variante wurden die Fäden am Glas festgeklebt. Einmal ausgerichtet, blieb die Stellung des Glasplättchens relativ zur SKG 5-Messeinheit immer gleich. Diese Version hatte den Nachteil, dass das bestäubte Glasplättchen schwer zu reinigen war. Es kam dabei häufig zum Zerschlagen des hauchdünnen Glasplättchens und es musste stets mühsam alles erneut aufgebaut werden. Letztendlich stellte diese Variante keine auf Dauer praktikable Lösung dar.

Schließlich setzte sich folgende Variante durch: Jeweils zwei der Fäden wurden mit einem flachen dünnen Stift aus Kohlenstoff verstärktem Kunststoff fest verbunden. Die beiden Stifte waren leichter als der komplette Rahmen, boten weniger Fläche für sich anlagernden Staub und stellten gleichzeitig eine stabile Auflage für das zu bestäubende Glasplättchen dar. Zur Reinigung konnte das Glas einfach entnommen werden (Abb. 3.20, rechts).

3.3.3.3.4 Laserlicht als Waagenzeiger

Als Zeiger der Torsionswaage sollte, einen Laserstrahl zum Einsatz kommen. Licht als Zeiger bot die Möglichkeit, durch mehrfaches Umlenken des Lichtstrahls den Lichtweg so zu verlängern, dass eine breite Skalenteilung auf einer nah angebrachten Skala verwirklicht werden konnte. So wurden auch kleinste Auslenkungen erkennbar. Als Laserquelle wurde ein handelsüblicher Laserpointer verwendet. Mit Batteriebetrieb und Taster zur Aktivierung des Lichtstrahls entsprach er aber nicht ganz den Anforderungen. Deshalb wurde die Laserdiode des Pointers aus diesem aus- und in eine spezielle Hülse aus Stahl eingebaut. Um stets die gleiche Lichtintensität vom Laser zu erhalten, wurde auf die Batterien als Spannungsquelle verzichtet und stattdessen eine Netzspannungsversorgung gebaut. Die Laserdiode in der Stahlhülse wurde mit dieser Spannungsquelle verbunden. Eine Fotografie des Lasers, der Spannungsquelle sowie deren Schaltplan finden sich in den Abbildungen 3.21 und 3.22.

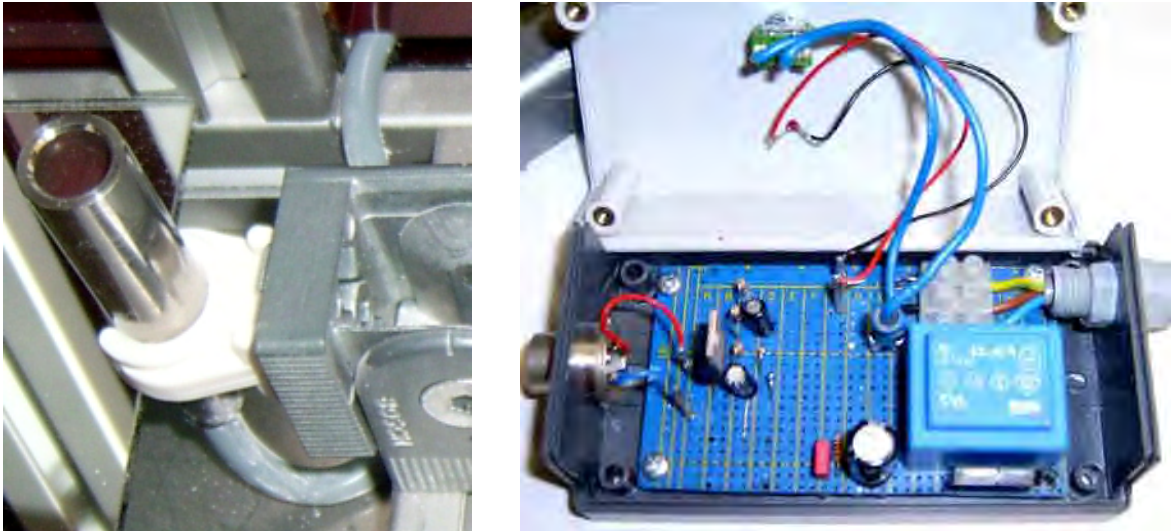


Abbildung 3.21: Links: Laserdiode eines Laserpointers in speziellen Hülse aus Stahl. Rechts: Innenleben der Spannungsversorgung für die Laserdiode.

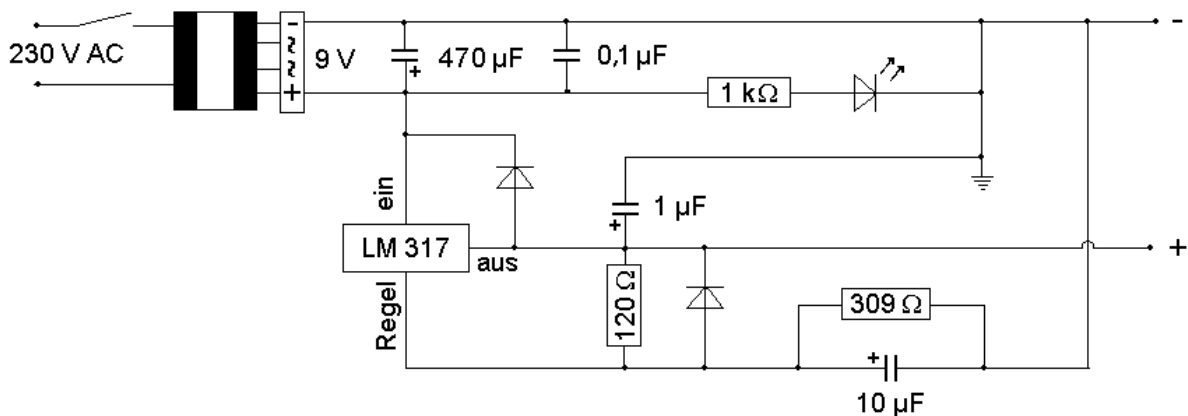


Abbildung 3.22: Schaltplan der Spannungsversorgung für den Laserzeiger.

3.3.3.3.5 Aufbau der Spiegel und der Skala

Um den Lichtweg weit und so die Skalenteilung groß zu machen (siehe Abschnitt 3.3.3.3), kann man den Lichtstrahl mehrfach zwischen zwei Spiegeln reflektieren, anstatt die Skala weit von der eigentlichen Waage aufzustellen. Der Abstand der Spiegel, sowie die Orientierung der Spiegel zueinander und gegen die Horizontale bestimmen, wie oft der Lichtstrahl zwischen den Spiegeln hin und her reflektiert wird, wo er aus dem Spiegelaufbau austritt, wo er auf die Skala trifft und wie die Skala beschaffen sein muss. Sehr viele Reflexionen erhöhen zwar die Empfindlichkeit der Waage durch den langen Lichtweg, jedoch geht bei jeder Reflexion Lichtintensität durch Absorption und Streuung verloren, so dass der Anzahl der Reflexionen eine Grenze gesetzt ist. Neben dem Abstand der Spiegel beeinflusst auch das Material der Spiegelfläche die Güte und Helligkeit der Lichtpunkte. Zu Beginn des Spiegelaufbaus sollten aus Gründen einer möglichst leichten Konstruktion auf Kunststoffflächen

aufgebrachte Spiegelfolien als Reflektoren dienen. Diese Idee musste aber verworfen werden, weil die Punkte nicht verzerrungsfrei abgebildet wurden. Durch die Folie wurde ein übermäßig großer Teil des Lichtes absorbiert, und so war ein eindeutiges Erkennen der Lichtpunkte nicht gewährleistet. Es kamen stattdessen handelsübliche Spiegel zur Verwendung, die die Anforderungen hinsichtlich Verzerrungsfreiheit und geringer Absorption des Laserlichtes ausreichend gut erfüllten.

Nachdem das Licht die Spiegelanordnung durchlaufen hatte, wurde es auf eine speziell angefertigte und großflächig angelegte Skala reflektiert. Mit Hilfe der Skala war ein direktes Ablesen der Masse in mg möglich. Zur Erstellung der einzelnen Skalenpunkte wurde das Glasplättchen mit Eichgewichten beschwert und die zugehörige Position des Lichtpunktes auf der Skala markiert. Das Papier mit der aufgezeichneten Skala wurde auf einem festen Untergrund (Spanplatte, dicke Pappe) aufgebracht.

3.3.3.3.5.1 Erste Version des Spiegelaufbaus

Bis die Spiegel und die Skala der Torsionswaage in der endgültigen Konfiguration aufgebaut waren, wurden mehrere Etappen der Entwicklung durchlaufen, die im Folgenden beschrieben werden.

In einer ersten Version war die Waage so aufgebaut, dass beide Spiegel exakt horizontal und parallel zueinander standen (Abb. 3.23). Nachdem der vom Laser senkrecht nach oben ausgesandte Lichtstrahl an dem mit dem Wägearm bzw. Torsionsdraht verbundenen kleinen Spiegel in die Spiegelanordnung reflektiert wurde, durchlief er diese geradlinig mit zunehmenden Reflexionswinkel und traf nach einigen Reflexionen auf die am anderen Ende der Spiegel angebrachte Skala. Wegen des relativ großen Winkelbereichs von 0° bis 14° , den der Wägearm bei zu wägenden Staubmassen von 0 mg bis maximal 250 mg durchläuft, wurde die Skala sehr lang, was aus Platzgründen vermieden werden sollte. Außerdem variierte die Anzahl der Reflexionen N zwischen den Spiegeln mit dem Ausschlag des Wägearms. Das hatte zur Folge, dass die Leuchtpunkte auf der

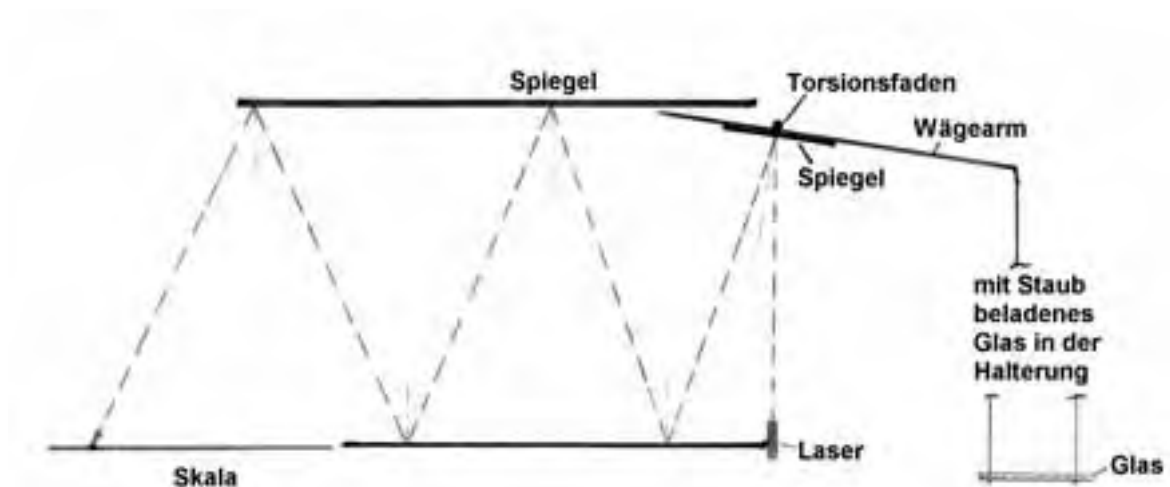


Abbildung 3.23: Erste Version des Spiegelaufbaus. Die Spiegel stehen horizontal und parallel zueinander. Der Lichtstrahl durchläuft die Anordnung geradlinig.

Skala zurückspringen beim Wegfall oder Zuwachs einer Reflexion, sprich bei Veränderung der Reflexionszahl N . Eine eindeutige Zuordnung zwischen Staubmasse und Skalenteil war so nicht möglich. Aus diesen Gründen wurde diese Variante des Spiegelaufbaus wieder verworfen.

3.3.3.3.5.2 Zweite Version des Spiegelaufbaus

Aufgrund der Erfahrungen mit dem ersten Spiegelaufbau wurde die Idee verfolgt, verschiedene Skalenabschnitte zu erzeugen und darzustellen, und somit die Skalenlänge und die Skalenüberlagerung zu reduzieren bzw. weitgehend zu vermeiden. Dieses Ziel wurde erreicht, indem die weiterhin parallel zueinander stehenden Spiegel gleichsinnig um einen Winkel γ geneigt wurden (siehe Abb. 3.24).

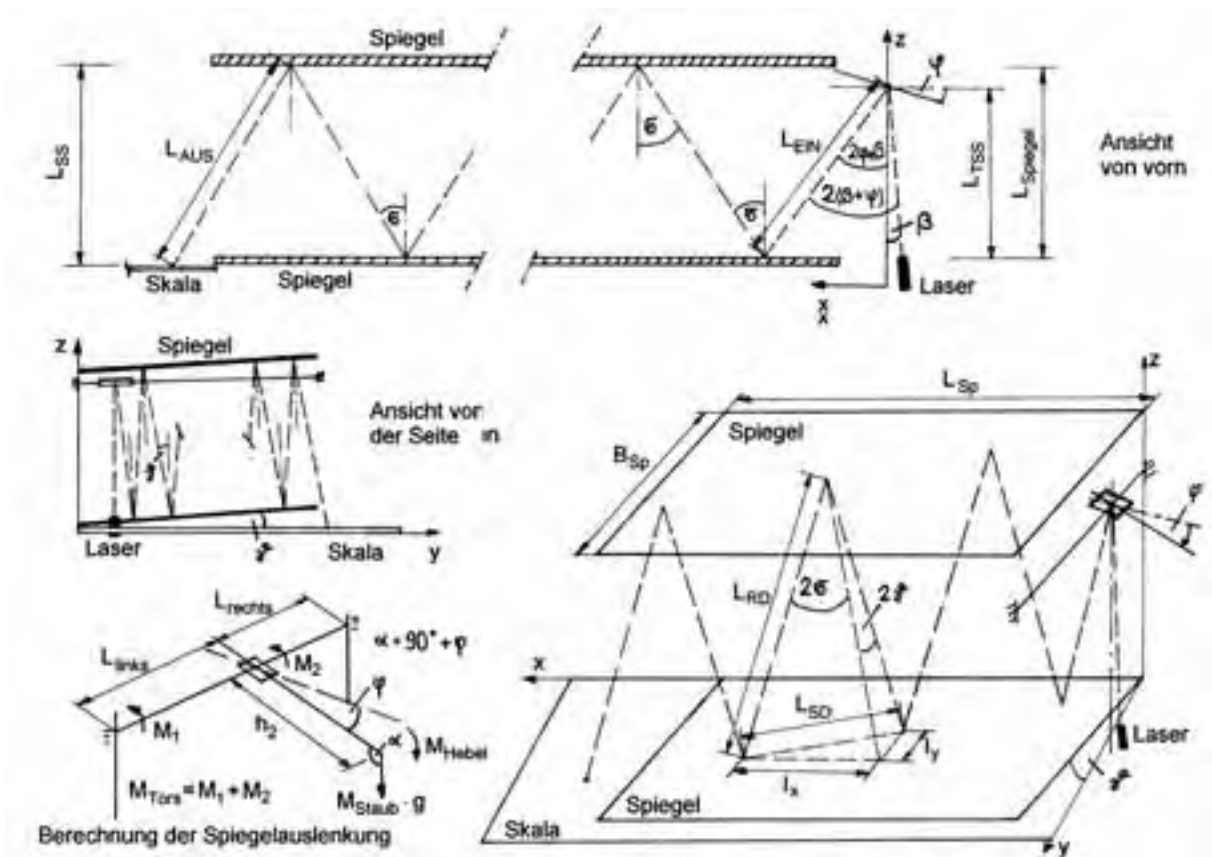


Abbildung 3.24: Zweite Version des Spiegelaufbaus. Die Spiegel stehen parallel zueinander, sind jedoch gegen die Horizontale geneigt. Der Lichtstrahl wandert durch die Schräge der Spiegel zunächst seitlich aus diesen heraus. Der Messbereich wird so in mehrere Skalenabschnitte zerlegt. Details siehe laufenden Text.

An welcher Stelle der Laserstrahl nach wieviel Reflexionen aus dem Spiegelaufbau tritt, hängt von einigen Parametern ab, wie z. B. Ort des Wägearms auf dem Torsionsdraht, Neigungswinkel γ der Spiegel gegen die Horizontale, Neigungswinkel φ des Wägearms, Größe der Spiegel usw.. Die Optimierung eines solchen Spiegelaufbaus war

wegen der Komplexität der Zusammenhänge nur mit Hilfe eines Rechner-Programms relativ schnell und ohne viele Fehlerquellen zu bewerkstelligen. Um ein solches Programm zu schreiben, mussten zunächst alle fundamentalen Zusammenhänge in Form von Gleichungen hergeleitet werden:

Der Neigungswinkel des Wägearms gegen die Horizontale bzw. Torsionsdrahtes ist im Wesentlichen schon durch Gleichung (3.5) gegeben. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass der Wägearm nicht am Ende des Torsionsdrahtes mit diesem verbunden ist, sondern mit einem gewissen Abstand zum linken und rechten Ende des Drahtes. Daraus ergeben sich zwei rücktreibende Drehmomente M_1 und M_2 , die der Draht auf den Wägearm bei Verdrillung ausübt (siehe Abb. 3.24).

$$M_1 = \frac{\pi \cdot G \cdot r_{\text{Tors}}^4 \cdot \varphi}{2 \cdot L_{\text{links}}} \quad (3.10)$$

$$M_2 = \frac{\pi \cdot G \cdot r_{\text{Tors}}^4 \cdot \varphi}{2 \cdot L_{\text{rechts}}} \quad (3.11)$$

L_{links} und L_{rechts} ist die Länge des Drahtes links und rechts des Wägearms. Das gesamte rücktreibende Drehmoment des Drahtes M_{Tors} ist dann

$$M_{\text{Tors}} = M_1 + M_2 = \frac{\pi \cdot G \cdot r_{\text{Tors}}^4 \cdot \varphi \cdot (L_{\text{links}} + L_{\text{rechts}})}{2 \cdot L_{\text{rechts}} \cdot L_{\text{rechts}}} \quad (3.12)$$

Dem Drehmoment M_{Tors} wirkt das Drehmoment

$$\begin{aligned} M_{\text{Hebel}} &= M_{\text{Staub}} \cdot g \cdot h_2 \cdot \sin \alpha \\ &= M_{\text{Staub}} \cdot g \cdot h_2 \cdot \sin 90^\circ \cdot \cos \varphi + \cos 90^\circ \cdot \sin \varphi \\ &= M_{\text{Staub}} \cdot g \cdot h_2 \cdot \cos \varphi \end{aligned} \quad (3.13)$$

entgegen, welches auf Grund der auf dem Glasplättchen befindlichen Staubmasse M_{Staub} über die Hebelwirkung des Wägearmteiles mit der Länge h_2 zustande kommt. Zur Berechnung des Neigungswinkels φ des Wägearms bzw. des daran angebrachten Spiegels gegen die Horizontale wird M_{Tors} und M_{Hebel} gleichgesetzt und diese Gleichung iterativ durch wiederholtes, probeweises Einsetzen von φ gelöst.

Der Winkel σ (Abb. 3.24), unter dem der Lichtstrahl nach der Reflexion am kleinen Spiegel am Wägearm in die Spiegelanordnung trifft, setzt sich zusammen aus dem Einfallswinkel $\beta = 1,5^\circ$ des Laserstrahls gegen die Vertikale und zwei Mal der Spiegelauslenkung φ , d. h.

$$\sigma = \beta + 2 \cdot \varphi \quad (3.14)$$

Mit (3.14) können die Reflexionsabstände l_x in x -Richtung und l_y in y -Richtung mit Hilfe von

$$l_x = 2 \cdot L_{\text{Spiegel}} \cdot \tan \sigma \quad (3.15)$$

$$l_y = 2 \cdot L_{\text{Spiegel}} \cdot \tan \gamma \quad (3.16)$$

berechnet werden. Mit (3.15) und (3.16) folgt die Anzahl der Reflexionen N_x in x -Richtung und N_y in y -Richtung bevor der Lichtstrahl aus den Spiegeln austritt aus

$$N_x = \frac{L_{\text{Sp}}}{l_x} \quad (3.17)$$

$$N_y = \frac{B_{\text{Sp}}}{l_y} \quad (3.18)$$

mit L_{Sp} und B_{Sp} als Länge und Breite der gleich großen Spiegel. Die Anzahl der Reflexionen N zwischen den beiden Spiegeln ergibt sich aus (3.17) wenn $N_x \leq N_y$ gilt, ansonsten ist $N = N_y$, berechnet sich also gemäß (3.18).

An welchem Ort der Lichtstrahl in x -Richtung aus der Spiegelanordnung austritt, beschreibt die Austrittslänge L_{Austritt} . Diese ergibt sich aus der Anzahl der Reflexionen multipliziert mit dem Reflexionsabstand in x -Richtung zu

$$L_{\text{Austritt}} = N \cdot l_x \quad (3.19)$$

Die Gesamtlänge L_{Lichtges} des Lichtstrahls in der Torsionswaage (die „Zeigerlänge“) setzt sich aus verschiedenen Lichtwegen zusammen, nämlich aus der Eintrittslänge L_{Ein} (Spiegel am Wägearm - unterer Spiegel), der Länge des reflektierten Strahls in der Spiegelanordnung L_{Ref} und der Austrittslänge L_{Aus} (oberer Spiegel - Skala). Zur Veranschaulichung dieser Lichtwege kann wieder Abbildung 3.24 herangezogen werden. Es gilt

$$L_{\text{Lichtges}} = L_{\text{Ein}} + L_{\text{Ref}} + L_{\text{Aus}} = \frac{L_{\text{TSS}}}{\cos \sigma} + 2 \cdot L_{\text{RD}} \cdot N + \frac{L_{\text{SS}}}{\cos \sigma} \quad (3.20)$$

mit den Beziehungen

$$L_{\text{SD}} = \sqrt{l_x^2 + l_y^2} \quad (3.21)$$

$$L_{\text{RD}} = \sqrt{L_{\text{Spiegel}}^2 + \left(\frac{L_{\text{SD}}}{2}\right)^2} \quad (3.22)$$

Aus (3.20) folgt für den Ausschlag L_{Skala} des Lichtpunktes auf der Skala

$$L_{\text{Skala}} = L_{\text{Lichtges}} \cdot \sin \sigma \quad (3.23)$$

Bestimmung des Torsionsmoduls

Trägheitsmoment [Nm]:	0.000351659	Schwingsperiode [s]:	7.73	rechnen
Stärke des Fadens [mm]:	0.3	Torsionsmodul [N/m ²]:	8.03471E+10	speichern
Länge des Fadens [mm]:	275	beenden	drucken	laden

Berechnung der Waagenparameter

Länge Waagenarm [mm]:	150	Spiegelauslenkung [°]:	3.094E-1	rechnen
Fadenlänge links [mm]:	60	Reflexionsabstand x [mm]:	2.462E+1	speichern
Fadenlänge rechts [mm]:	225	Reflexionsabstand y [mm]:	4.094E+1	laden
Staubmasse [mg]:	5	Reflexionsanzahl [-]:	6	drucken
Einfallswinkel Laser [°]:	3	Austrittslänge [mm]:	1.477E+2	beenden
Entfernung Tor - Spi [mm]:	210	Strahlgesamtlänge [m]:	3.033E+0	
Spiegelabstand [mm]:	234	Skalenausschlag [mm]:	1.593E+2	
Entfernung Spi - Mes [mm]:	237			
Winkel Spi - Horizontale [°]:	5			
Spiegelvermaßung [mm]:	380	×	250	

FSA

Abbildung 3.25: Benutzeroberfläche des Rechner-Programms „Planung der Torsionswaage“ zur Planung der Torsionswaage. Die Berechnungsergebnisse werden in den gelben und orangefarbenen Feldern angezeigt.

Die Gleichungen (3.10) bis (3.23) wurden in dem Rechner-Programm „Planung der Torsionswaage“ umgesetzt [7]. Abbildung 3.25 zeigt die Benutzeroberfläche des Programms. Im oberen Teil der Eingabemaske sind die Eigenschaften des verwendeten Torsionsdrahtes einzugeben (siehe hierzu auch Abschnitt 3.3.3.3.2.1). Der untere Teil der Eingabemaske ist mit den fundamentalen Daten des Waagenaufbaus zu füttern, wie etwa der Länge des Torsionsdrahtes links und rechts vom Wägearm oder der Staubmasse auf dem Glasplättchen. Aus diesen Daten können per Tastenklick der Ausschlag des Lichtpunktes auf der Skala und weitere Daten von Interesse berechnet werden.

Diese Variante des Waagenaufbaus liefert eine Skala direkt neben der langen Seite der Spiegel (für kleine Staubmassen) und eine Skala an der kurzen Seite der Spiegel (für mittlere und große Staubmassen). Das Problem, dass Skalenabschnitte übereinander abgebildet werden, wie das bei der ersten Version der Waage der Fall war, sollte so verhindert werden. Es zeigte sich aber, dass beim Aufkommen größerer Staubmassen auf dem Glasplättchen einzelne Skalenabschnitte immer noch auf der Skalenfläche übereinander abgebildet wurden. Die Problematik bestand darin, zu erkennen, in welchem Abschnitt man sich gerade befand.

3.3.3.3.5.3 Dritte Version des Spiegelaufbaus

Durch die Idee, die Spiegel nicht mehr parallel zueinander anzuordnen, sondern nur den oberen der beiden Spiegel aus der Waagerechten zu drehen, konnte die gewünschte Auffächerung der Skala realisiert werden (siehe Abbildung 3.26). Der in die beiden Spiegel eintretende Lichtstrahl wird durch die Neigung des oberen Spiegels in y -Richtung nichtlinear abgelenkt. Bei Veränderung der Reflexionsanzahl N springt also der Lichtpunkt nicht nur entlang der Skala zurück, sondern verrutscht auch seitlich zu dieser Skala, so dass viele nebeneinander liegende Skalenabschnitte entstehen.

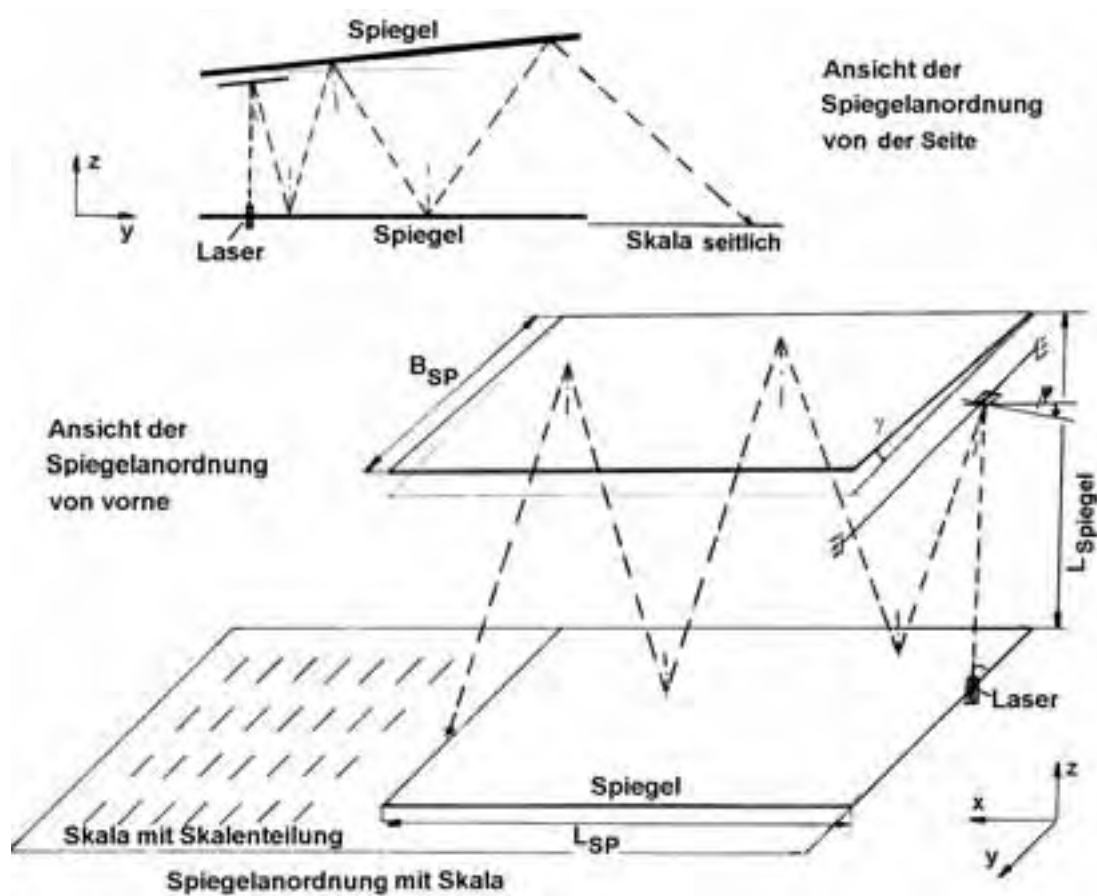


Abbildung 3.26: Dritte Version des Spiegelaufbaus. Der untere Spiegel ist waagrecht montiert, der obere Spiegel dazu in y -Richtung geneigt. Der Lichtstrahl wird nichtlinear in y -Richtung abgelenkt. Alle Skalenabschnitte werden nebeneinander dargestellt.

Die Lichtwege, die Reflexionswinkel, der Skalenausschlag und andere für die Planung des Spiegel- und Skalenaufbaus wichtige Größen sind bei dieser Variante nicht mehr analytisch darstellbar, weshalb man sich der Vektoralgebra und eines weiteren Rechner-Programms namens „TorBal3D“ bedienen musste [9]. Die Benutzeroberfläche dieses Programms zeigt die Abbildung 3.27. Zur Simulation des Strahlenganges in der Torsionswaage ist diese in drei Ebenen (unterer und oberer Spiegel, sowie Display) unterteilt. In der Eingabemaske stellt E_0 den Ursprungspunkt einer Ebene dar. E_1 und E_2 sind die Vektoren, die eine Ebene aufspannen, ausgehend vom Ursprungspunkt E_0 .

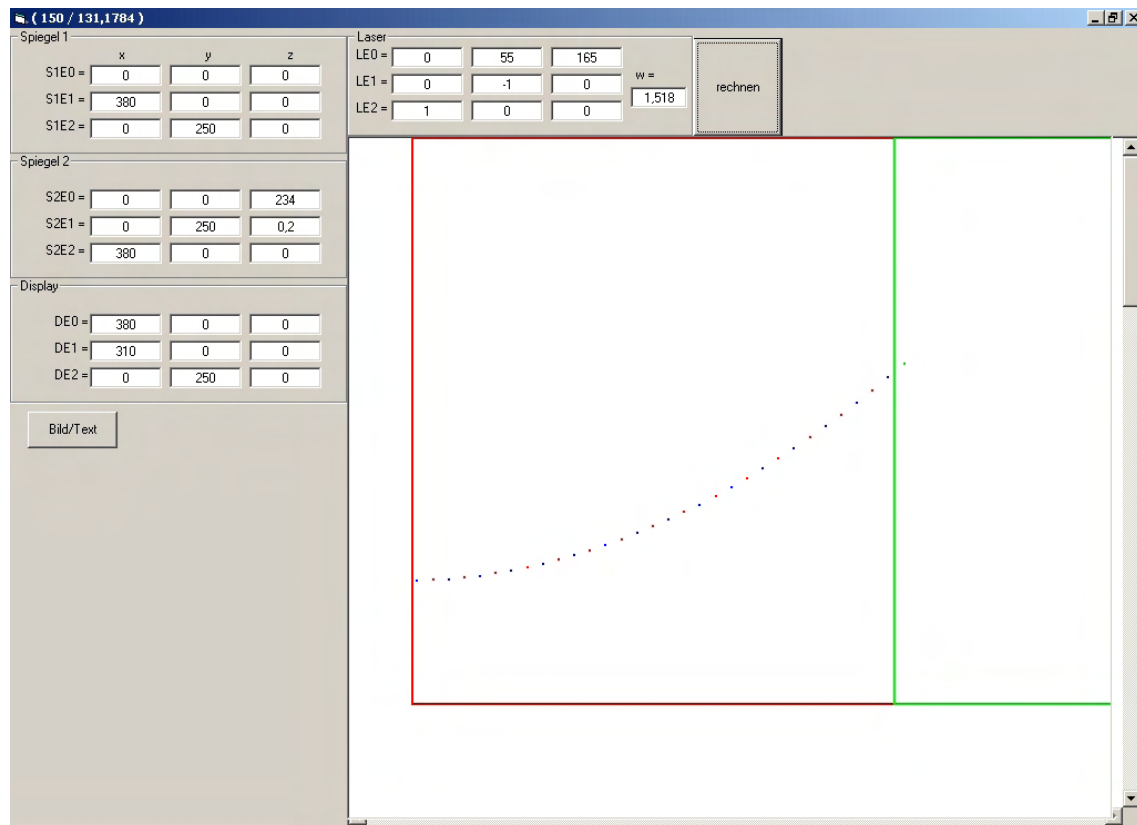


Abbildung 3.27: Benutzeroberfläche des Rechner-Programms „TorBal3D“ zur Planung der Torsionswaage. Die blauen und roten Punkte repräsentieren die Orte auf dem unteren und oberen Spiegel, an denen der Laserstrahl reflektiert wird.

E_1 und E_2 stehen orthogonal aufeinander und zeigen entlang der Spiegel- bzw. Skalenseiten. Nach diesem Schema werden die Flächen der beiden Spiegel und die der Skala mit Hilfe der Vektoren S_1E_i , S_2E_i und DE_i mit $i = 1, 2, 3$ definiert. Die einzugebenden Vektorkomponenten entsprechen den tatsächlichen Seitenlängen der Spiegel bzw. der Skala (Display). Ort und Richtung des einfallenden Laserstrahls werden ebenfalls mit Hilfe dreier Vektoren beschrieben, wobei zusätzlich noch der Drehwinkel des Wägearms (in rad) benötigt wird, der zuvor in einem gesonderten Arbeitsschritt berechnet werden muss. LE_0 stellt den Drehpunkt des Spiegels am Wägearm dar, LE_1 zeigt parallel zur Drehachse, also entlang des Torsionsdrahtes, und LE_2 weist parallel entlang des Wägearms, wenn das Glasplättchen staub- bzw. massefrei ist.

Als Ergebnisse der Berechnungen werden die Punkte (Vektorkomponenten) der einzelnen Reflexionen auf den Spiegelebenen, die Länge des Lichtweges und die Anzahl der Reflexionen in Form einer Liste oder wahlweise als Skizze ausgegeben. In der Skizze ist zu erkennen, an welchen Orten innerhalb der Spiegelebenen Reflexionen stattfinden und an welcher Stelle der Lichtstrahl auf die Skala trifft. Dieses Programm ermöglicht auf einfache Weise Abschätzungen, wie sich bestimmte Stellungen der Spiegel zueinander auf den Ausschlag und den Ort des Lichtpunktes auf der Skala auswirken bei einer bestimmten Gewichtsänderung auf dem Glasplättchen.

Diese dritte Version des Spiegel- und Skalenaufbaus erfüllte alle Anforderungen in ausgezeichneter Weise, weshalb diese Konfiguration letztendlich verwirklicht wurde.

3.3.3.3.6 Endgültiger Aufbau der Waage

Die Abbildung 3.28 zeigt den Aufbau der Torsionswaage, wie er unmittelbar nach Beendigung der Diplomarbeit bestand. Die Torsionswaage ist aus einem Gerüst aus leichten Aluminium-Strebenprofilen aufgebaut. Um die Wägung nicht durch Luftzug zu verfälschen, wurden verschiedene rechteckige Stücke aus 3 mm starkem (rotem) Plexiglas so angefertigt, dass sie die offenen Flächen zwischen den Strebenprofilen verschließen. Die elektrostatische Aufladung, die Plexiglas gewöhnlich zeigt, und die die Wägung empfindlich gestört hätte, wurde durch den Einsatz von Antistatikspray ausgeschaltet.

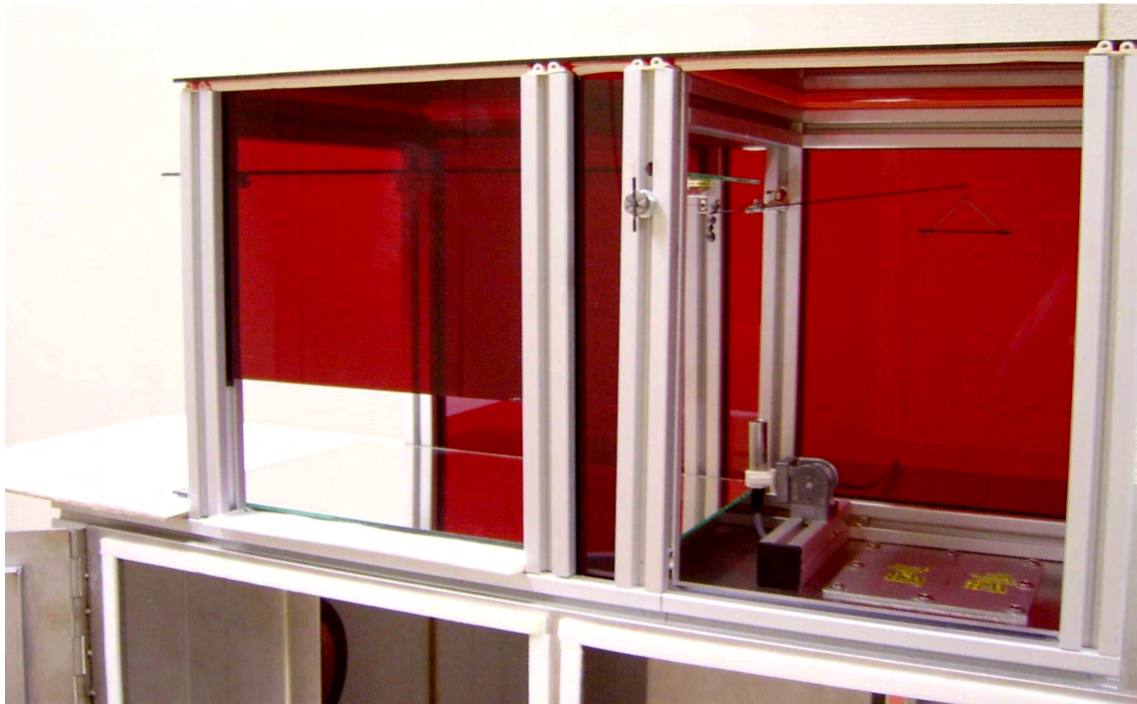


Abbildung 3.28: Endgültiger Aufbau der Torsionswaage. Rechts im Bild ist der Wägearm und der Laser zu erkennen, links der Spiegelaufbau. Unten im Bild ist das obere Ende der geöffneten Messkammer zu sehen.

Der Torsionsdraht ist im oberen Drittel der Wägeeinheit horizontal zwischen zwei vertikal eingebauten Aluminium-Strebenprofilen eingespannt. Dabei ist er an einem Ende unveränderbar fixiert und am anderen Ende an einer Stellschraube befestigt. Die Schraube dient der Straffung des Drahtes durch Verschieben in der Richtung entlang des Drahtes und zur Einstellung des Waagennullpunktes durch Verdrehen.

Am Torsionsdraht ist der Wägearm mit Hilfe einer Klemmschraube befestigt. Die Seite des Arms $h_1 = 3 \text{ cm}$ ist eine Halterung für Ausgleichsgewichte³; die andere Seite des Wägearms $h_2 = 15 \text{ cm}$ dient der Aufnahme des Glasplättchens bzw. seiner Halterung⁴. Abbildung 3.29 zeigt eine Fotografie dieses Aufbaus.

³Zwei Bleikügelchen mit insgesamt 7 g Masse.

⁴Die Gesamtmasse von Glasplättchen und Halterung beträgt 1,4 g.



Abbildung 3.29: Das Bild zeigt den gespannten Torsionsdraht mit angebrachtem Wägearm, Ausgleichsgewichten und Spiegel.

An der Unterseite des Wägearms am Ort des Torsionsdrahtes ist ein kleiner Spiegel (20 mm × 25 mm) mit Klebstoff befestigt. Dieser dient der Reflexion des von der Laserdiode (Abschnitt 3.3.3.3.4) kommenden Lichtstrahls in den Spiegelaufbau (Abschnitt 3.3.3.3.5.3).

Der untere der beiden großen Spiegel (250 mm × 380 mm) des Spiegelaufbaus liegt einfach auf langen Gummipolstern auf, die wiederum auf zwei horizontal am Boden der Waage liegenden Strebenprofilen aufgeklebt sind. Der obere Spiegel wird auf vier speziellen Halterungen gelagert, die sich in den Führungsschienen der Strebenprofile bewegen und fixieren lassen. Der mittlere Abstand der beiden Spiegel beträgt $L_{\text{Spiegel}} = 230$ mm.

Die in einer Stahlhülse untergebrachte Laserdiode (Abschnitt 3.3.3.3.4) ist mit Hilfe einer Rohrschelle an einem Gelenk auf einer Profilstrebe am Boden der Wägeinheit angebracht (Abb. 3.21, links).

Die Skala (Abschnitt 3.3.3.3.5.2) besteht aus Papier, welches auf einer dünnen Spanplatte aufgeklebt ist. Diese Spanplatte befindet sich direkt vor und neben dem unteren Spiegel.

3.3.3.4 Erprobung der Apparatur

Nachdem die Messkammer und die Waage fertig aufgebaut und die beiden Einheiten zusammengeführt worden waren, sollte die neue Apparatur getestet werden. Die Phase der Erprobung setzte sich aus mehreren Teilschritten zusammen, wobei Probleme beim Umgang mit der neuen Apparatur aufgedeckt und gelöst werden sollten.

3.3.3.4.1 Versuchsreihe 1

Zunächst sollte geprüft werden, ob die Forderung nach einer nach außen geschlossenen Messkammer erfüllt wird.

3.3.3.4.1.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist im Wesentlichen durch die Abbildungen 3.14 und 3.15 gegeben, wobei die in die Messkammer reichenden Teile der Waage entfernt wurden. An die Messeinheit des SKG 5 denke man sich die zugehörige Anzeige- und Steuereinheit angeschlossen.

3.3.3.4.1.2 Versuchsdurchführung

Die Dichtheit der Kammer wurde geprüft, indem in den Messraum wiederholt und über längere Zeit ein Staub/Luft-Gemisch (Maisstärke) eingeblasen wurde. Um die Dichtheit der zur Unterbringung der SKG 5-Messeinheit vorgesehenen Kammer zu prüfen, wurde das SKG 5 während des Staubeintrages bei geschlossener Kammer betrieben. Sollte an der Anzeigeeinheit des SKG 5 trotz verschlossener Kammer ein Spannungswert von $U_{\text{SKG}} > 0$ mV angezeigt werden, würde dies auf eine Verschmutzung der Linsen hinweisen und damit auf Lecks in der Kammer.

3.3.3.4.1.3 Versuchsergebnisse

Für die Dichtheitsprüfung wurden keine Messwerte notiert. Die Beurteilung erfolgte nach jedem Versuch visuell bzw. bei der Kammer für die SKG 5-Messeinheit durch Kontrolle der Anzeige auf dem Display der SKG 5-Anzeigeeinheit. Es wurde festgestellt, dass weder die Messkammer selbst noch die Kammer zum Schutz der SKG 5-Messeinheit staubdicht waren. Außerdem drang Staub in die Torsionswaage durch die kleinen Löcher in der oberen Wand der Messkammer ein, die der Fadendurchführung dienen.

3.3.3.4.1.4 Versuchsauswertung und Problemlösung

Anhand der Versuchsergebnisse konnten alle Lecks lokalisiert werden. Diese wurden mit verschiedenen Dichtungsmaterialien verschlossen. Weiterhin musste unbedingt verhindert werden, dass Staub in die Torsionswaage eindringt (Messwertverfälschung). Dies wurde annähernd erreicht, indem spezielle Schutzröhrchen an den Bohrungen der oberen Messkammerwand angebracht wurden (siehe Abschnitt 3.3.3.4.4).

3.3.3.4.2 Versuchsreihe 2

Als nächster Schritt wurde die erste Kalibrierkurve mit der Apparatur aufgenommen.

3.3.3.4.2.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist im Wesentlichen durch die Abbildung 3.14 gegeben. An die Messeinheit des SKG 5 denke man sich die zugehörige Anzeige- und Steuereinheit angeschlossen.

3.3.3.4.2.2 Versuchsdurchführung

Der Partikeldosierer RBG 1000 wurde für den Staubeintrag (Maisstärke) in die Messkammer präpariert. Ein sauberes Glasplättchen wurde in die vorgesehene Halterung in der Messkammer gelegt. Durch Drehen des Torsionsdrahtes an der dafür vorgesehen Schraube wurde der Nullpunkt an der Waage eingestellt. Anschließend brachte man die Messeinheit des SKG 5 an die Messposition und führte den Nullabgleich durch (Abschnitt 2.3). Danach wurde die SKG 5-Messeinheit wieder in der staubdichten Kammer positioniert. Der Ringionisator wurde eingeschaltet. Für die Dauer von zwei Minuten war anschließend der Staubeintrag in die Messkammer aktiv. Nach Abschalten des Partikeldosierers RBG 1000 wurde die Sedimentation des Staubes abgewartet und das Staubgewicht an der Torsionswaage abgelesen sowie der zugehörige Spannungswert ermittelt durch erneutes Heranfahen der SKG 5-Messeinheit an das bestäubte Glasplättchen. Dieser Vorgang wurde solange wiederholt bis genügend Messpunkte zum Erstellen einer Messkurve vorlagen.

3.3.3.4.2.3 Versuchsergebnisse

Schon nach den ersten Versuchen, mit der Apparatur eine Kalibrierkurve aufzunehmen, war erkennbar, dass ohne die Fäden in irgendeiner Form vor Verschmutzung und dem starken Luftstrom des Partikeldosierers zu schützen, keine zufrieden stellenden Ergebnisse erzielt werden können. Die gesamte Halterung (die langen Fäden mit dem leichten Glasplättchen) schwankte während des Einblasvorganges im Luftstrom, was aber nicht das eigentliche Problem war. Störend war das „Flattern“ der Fäden im Luftstrom, bewirkte es doch, dass der an den Fäden angelagerte Staub teilweise auf das Glasplättchen fiel. Damit war eine homogene Staubablagerung auf dem Glasplättchen unmöglich, was aber Voraussetzung für die Berechnung der Staubkonzentration ist.

3.3.3.4.2.4 Versuchsauswertung und Problemlösung

Aus den Versuchsergebnissen ergab sich die Notwendigkeit, das Flattern der Halterungsfäden zu unterbinden. Eine vor den Fäden und dem Glas positionierte Platte aus Metall sollte verhindern, dass der mit Staub beladene Luftstrom direkt auf die Fäden traf. Wie ein erneuter Versuch mit der installierten Platte zeigte, konnte mit dieser Vorrichtung das Schwanken der Halterung und das Flattern der Fäden weitgehend unterdrückt werden. Es zeigte sich jedoch der Nachteil, dass auch die Staubablagerung auf dem Glasplättchen behindert wurde. Diese Lösung konnte also nicht als ideal angesehen werden. Zusätzlich trat nun das Problem in Erscheinung, dass sich auch an den Fäden bzw. der gesamten Glasplättchenhalterung eine gleichmäßige dünne Staubschicht anlagerte. Diese zusätzliche Staubmasse wird von der Torsionswaage mitgewogen und verfälscht so die aus der Massenbestimmung errechnete Staubkonzentration. Deshalb musste eine Methode gefunden werden, entweder die Staubanlagerung an der Halterung zu unterbinden oder die Fehlmessung nachträglich zu korrigieren.

3.3.3.4.3 Versuchsreihe 3

Nach Durchführung der Versuchsreihe 2 war klar, dass die Staubanlagerungen an der Glasplättchenhalterung einen erheblichen Einfluss auf die zu erstellenden Kalibrierkurven haben. Deshalb sollte der zeitliche Verlauf der Staubanlagerung an der Glasplättchenhalterung und auf dem Glasplättchen untersucht werden.

3.3.3.4.3.1 Versuchsaufbau

Den Versuchsaufbau zeigt Abbildung 3.14. Zusätzlich wurde die Dauer der Staubeintragsperioden in die Messkammer mit Hilfe einer Stoppuhr bestimmt.

3.3.3.4.3.2 Versuchsdurchführung

Der Partikeldosierer RBG 1000 wurde für den Staubeintrag (Maisstärke) in die Messkammer vorbereitet, ein Glasplättchen in der Halterung postiert, die Kammer geschlossen und die Torsionswaage tariert sowie der Ringionisator eingeschaltet. Anschließend wurde für eine gewisse Dauer der Staubeintrag aktiviert und diese Zeitspanne gemessen. Nach dem Abschalten des Partikeldosierers wurde die vollständige Sedimentation in der Messkammer abgewartet und anschließend die Staubmasse mit und ohne Glasplättchen ermittelt. Dieser Vorgang wurde mehrmals wiederholt.

3.3.3.4.3.3 Versuchsergebnisse

Die Messergebnisse wurden als Diagramm in Abbildung 3.30 dargestellt und in Tabellenform in Anhang A.2.3 zusammengestellt. An der Glasplättchenhalterung mit ihren sehr dünnen, aber langen Fäden (400 mm davon in der Messkammer) lagerte sich etwa 35 % (!) der bestimmten Staubgesamtmasse m_G an.

3.3.3.4.3.4 Versuchsauswertung und Problemlösung

Aus dem Verlauf der Kurven in Abbildung 3.30 ist ersichtlich, dass die Massenzunahme des Staubes auf dem Glasplättchen und an dessen Halterung linear verläuft. Wurde eine bestimmte Dauer des Staubeintrages in die Messkammer eingehalten bei konstanten Betriebsparametern des Partikeldosierers RBG 1000 (siehe Tabelle 3.1), so war die Staubmasse, die sich bei jedem Zyklus an Glasplättchen und Halterung anlagerte, weitgehend konstant. Dieses Ergebnis eröffnete die Möglichkeit, die Staubanlagerung an der Glasplättchenhalterung mit einer Geradengleichung zu beschreiben und damit auf einfache Weise eine Korrekturrechnung durchzuführen: Durch Ermitteln der Staubmasse an der Halterung des Glasplättchens zu Beginn und am Ende einer Kalibrierkurvenbestimmung kann eine zugehörige lineare Funktion abgeleitet werden. Damit ist die Staubmasse an der Glasplättchenhalterung zu jedem Zeitpunkt bekannt. Bildet man für einen bestimmten Zeitpunkt die Differenz zwischen der gemessenen Gesamtmasse und der Staubmasse an der Halterung, so erhält man die Masse des Staubes, welche sich zu diesem Zeitpunkt auf dem Glasplättchen befand.

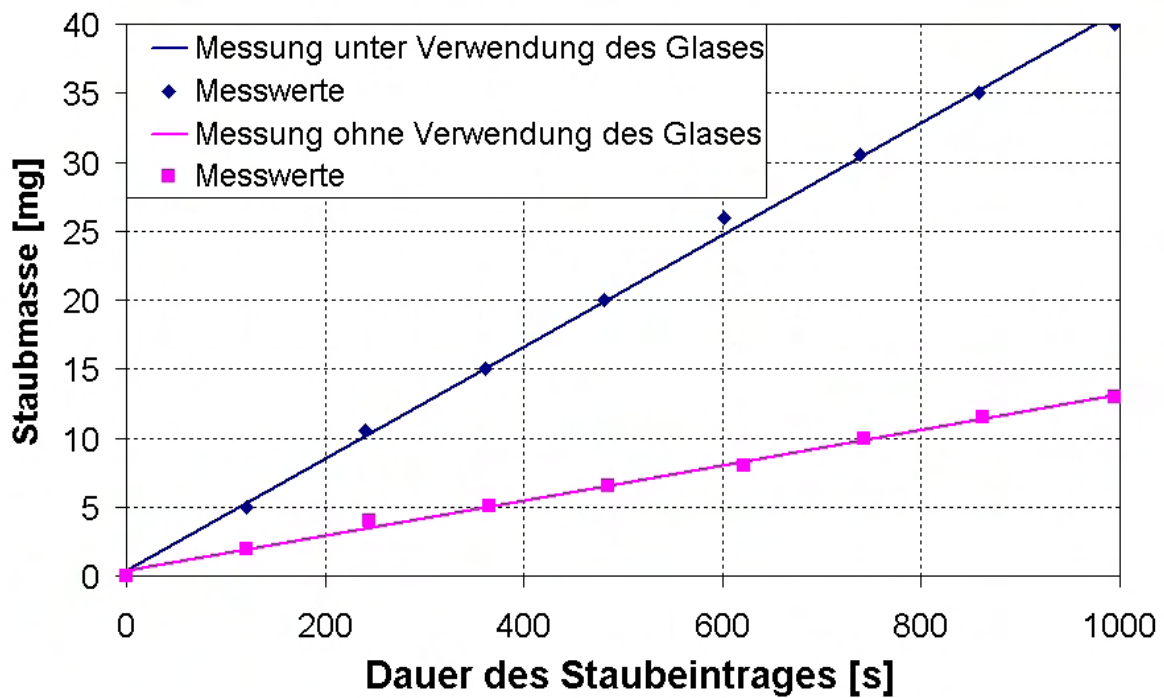


Abbildung 3.30: Verlauf der Staubanlagerung am Glasplättchen und der Halterung desselben bei der Aufnahme einer Kalibrierkurve.

3.3.3.4.4 Versuchsreihe 4

Ausgehend von den Resultaten der Versuchsreihe 3 war das Ziel dieser Versuchsreihe die Aufnahme von Kalibrierkurven, wobei die Verschmutzung der Glasplättchenaufhängung mit verschiedenen Methoden möglichst reduziert und anschließend rechnerisch korrigiert werden sollte.

3.3.3.4.4.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau entsprach dem der Versuchsreihe 3 (Abschnitt 3.3.3.4.3.1). Zum Schutz der Glasplättchenaufhängung wurde die bei der Versuchsreihe 2 beschriebene Metallplatte verwendet (Abschnitt 3.3.3.4.2.4) sowie verschiedene Röhren und spezielle Profile.

3.3.3.4.4.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung geschah in Anlehnung an die der Versuchsreihe 2 (Abschnitt 3.3.3.4.2.2). Zusätzlich wurde in einem abschließenden Arbeitsschritt die Masse des Staubes ermittelt, die sich nach dem kompletten Messgang an der Glasplättchenhalterung angelagert hatte. Dazu wurde die nach Beendigung des Messganges an der Torsionswaage angezeigte Masse notiert. Danach erfolgte eine vorsichtige Reinigung der Glasplättchenhalterung vom Staub und das erneute Notieren der angezeigten Masse. Die Differenz der beiden Massenwerte ergab die gesuchte Staubmasse,

die sich am Ende der Messreihe an der Glasplättchenhalterung angelagert hatte. Außerdem wurden die Dauern t_{Staub} der Staubeintragsperioden dokumentiert. Dieser Versuchsablauf wurde mit verschiedenen Schutzvorrichtungen (siehe Tabelle 3.5) für die Glasplättchenhalterung bzw. deren Fäden wiederholt.

Versuch	Schutzmaßnahme			
	Metallplatte	Röhrchen/Profile		
		Material	Querschnitt	Durchmesser/Seitenlängen
1	ja	-	-	-
2	-	Messing	rund	5 mm
3	-	Glas	rund	5 mm
4	-	Kunststoff	rechteckig	10 mm × 15 mm
5	-	Messing	rechteckig	3 mm × 5 mm
6	ja	Kunststoff	rechteckig*	10 mm × 15 mm

Tabelle 3.5: Auflistung der verschiedenen Schutzmaßnahmen bei den Versuchen zur Kalibrierkurvenerstellung der Versuchsreihe 4. Als Staub wurde Maisstärke verwendet. Das mit * gekennzeichnete Profil wurde am unteren Ende mit Klebefolie verengt.

3.3.3.4.4.3 Versuchsergebnisse

Nachdem die an der Glasplättchenhalterung angelagerte Staubmasse m_H und daraus die Staubmasse M_{Staub} auf dem Glasplättchen ermittelt war, konnte die Konzentration c des Staubes berechnet werden (siehe Abschnitt 3.3.1). In den Tabellen 3.6 und 3.7 sind die Ergebnisse der Messung und Rechnung dokumentiert.

t_{Staub} [s]	m_G [mg]	m_H [mg]	M_{Staub} [mg]	c [g/m ³]	U_{SKG} [mV]	m_H/m_G
0	0	0	0	0	0	0
121	5	2,43	2,57	11,36	250	0,48
241	10,5	4,84	5,66	25,02	406	0,46
361	15	7,26	7,74	34,25	517	0,48
481	20	9,67	10,33	45,7	598	0,48
601	26	12,08	13,92	61,57	681	0,46
738	30,5	14,83	15,67	69,29	732	0,49
858	35	17,25	17,75	78,53	766	0,49
995	40	20	20	88,47	800	0,5

Tabelle 3.6: Messergebnisse einer Kalibrierkurvenaufnahme für Maisstärke mit Korrekturrechnung. Es ist t_{Staub} die Dauer des Staubeintrages und m_G die an Glasplättchen und dessen Halterung angelagerte Staubmasse. Alle anderen Größen siehe laufenden Text. Verwendung einer Metallplatte zum Schutz der Fäden der Glashalterung.

t_{Staub} [s]	m_G [mg]	m_H [mg]	M_{Staub} [mg]	c [g/m ³]	U_{SKG} [mV]	m_H/m_G
0	0	0	0	0	0	0
120	2,5	0,24	2,26	15,93	204	0,096
240	5	0,48	4,52	31,87	373	0,096
360	8	0,72	7,28	51,32	506	0,09
480	11	0,96	10,04	70,78	603	0,087
600	13	1,2	11,8	83,19	681	0,092
720	15,5	1,44	14,06	99,12	740	0,093
840	18	1,68	16,32	115,06	785	0,093
1000	21	2	19,0	133,95	827	0,095

Tabelle 3.7: Messergebnisse einer Kalibrierkurvenaufnahme für Maisstärke mit Korrekturrechnung. Verwendung der Metallplatte und Profile zum Schutz der Fäden der Glshalterung.

3.3.3.4.4 Versuchsauswertung und Problemlösung

Betrachtet man die rechte Spalte der Tabelle 3.6, so stellt man fest, dass das Verhältnis der an der Glasplättchenhalterung angelagerten Staubmasse m_H zur gewogenen gesamten Staubmasse m_G rund 0,5 beträgt, d.h. 50% der gemessenen Staubmasse befindet sich nicht auf dem Glasplättchen. Ein ähnliches Resultat lieferte schon die Versuchsreihe 3, wobei dort keine Metallplatte als Schutz für die Fäden der Halterung verwendet wurde. Darin ist der Grund für den Unterschied in m_H/m_G zwischen beiden Versuchsreihen zu sehen. Der Wert von $m_H/m_G \approx 0,5$ ist zu groß, als dass man von einer hohen Messsicherheit sprechen könnte. Es mussten also Schutzmaßnahmen - vor allem für die langen Fäden der Aufhängung - ergriffen werden.

Die Staubanlagerung an den Halterungsfäden wurde bei Versuch Nr. 2 durch den Einsatz der Messingröhrchen weitgehend unterbunden, jedoch lagerte sich an den Messingröhrchen eine dicke Staubschicht an. Dadurch bestand stets die Gefahr, dass Staub bei der kleinsten Erschütterung oder Vibration auf das Glasplättchen fiel und die Messung damit verfälschte bzw. zunichte machte.

Der Einsatz der Glasröhrchen bei Versuch Nr. 3 brachte insofern eine Besserung, als dass sich an diesen Röhrchen deutlich weniger Staub anlagerte als an den Messingröhrchen. Hier ergab sich jedoch folgendes Problem: Mit zunehmender Staubmasse trat die seitliche Bewegung der Glasplättchenhalterung zunehmend in Erscheinung und führte dazu, dass die Halterungsfäden die Innenwände der Glasröhrchen berührten, was zu fatalen Fehlmessungen führte.

Deshalb kamen bei Versuch Nr. 4 Profile mit größerem Innenquerschnitt zum Einsatz. Die Fäden der Halterung berührten die Innenwände der Profile nicht mehr, allerdings war deren Innenquerschnitt zu groß, als dass sie die Fäden wirksam vor Staubanlagerung schützen konnte.

Die rechteckigen Profile mit kleinerem Querschnitt, die beim folgenden Versuch Nr. 5 verwendet wurden, sollten einen Kompromiss zwischen Schutz vor Staubanlagerung

und ausreichendem Spielraum für die Seitwärtsbewegung der Halterung darstellen. Leider gelang es nicht, die Profile so exakt auszurichten, dass die Berührung der Halterungsfäden mit den Innenwänden der Profile gänzlich vermieden werden konnte. Deshalb wurde bei Versuch Nr. 6 wieder auf die dicken Profile zurückgegriffen, wobei nun zusätzlich die Profilöffnungen verengt wurden. Um die Schutzmaßnahme zu verstärken, wurde den Profilen wieder die Metallplatte vorangestellt. Diese Maßnahme führte zu einer erheblichen Verminderung der Staubanlagerung an der Glasplättchenhalterung bzw. deren Fäden, wie ein Vergleich der Tabellen 3.6 und 3.7 zeigt. Das Verhältnis m_H/m_G sank von 0,5 auf unter 0,1. Allerdings konnte hierbei nicht die gesamte Staubmasse m_H erfasst werden, weil die Teile der Glasplättchenaufhängung innerhalb der Profile und der Torsionswaage nicht von angelagertem Staub für die Bestimmung von m_H befreit werden konnten. Bei der Anwendung der im Rahmen der Versuchsreihe 3 entwickelten Methode zur Korrekturrechnung bleibt also ein Restfehler. Dennoch sollten mit dieser Schutzmaßnahme in Kombination mit nachträglicher Korrekturrechnung Kalibrierkurven mit einem mäßig großen Fehler aufgenommen werden können.

Eine weitere Verbesserung der Messfehlerunterdrückung war aus Zeitgründen an dieser Stelle nicht möglich.

3.3.3.5 Aufnahme von Kalibrierkurven mit der Apparatur

Abschließend wurden mit der Apparatur Kalibrierkurven für die zuvor verwendeten vier Prüfstäube aufgenommen und diese mit den Ergebnissen aus den Versuchen aus Abschnitt 3.2 und 3.3.2 verglichen.

3.3.3.5.1 Versuchsaufbau

Den prinzipiellen Versuchsaufbau zeigt die Skizze in Abbildung 3.14. An die Messeinheit des SKG 5 denke man sich die zugehörige Anzeige- und Steuereinheit angeschlossen. Um die Glasplättchenhalterung der Torsionswaage vor Verstaubung so weit wie möglich zu schützen, wurde der Aufbau von Versuch Nr. 6 aus der Versuchsreihe 3 verwendet (Tabelle 3.5, letzte Reihe).

3.3.3.5.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung erfolgte wie in Abschnitt 3.3.3.4.4.2 beschrieben, wobei das ganze Prozedere mehrmals durchgeführt wurde für die Stäube Maisstärke, Formpuderstärke, Weizenmehl und Puderzucker. Bei den Kalibrierkurvenaufnahmen für Weizenmehl und Puderzucker wurde die Metallplatte zum Schutz der Glasplättchenhalterung vor Staubanlagerung entfernt, weil die Staubablagerung auf dem Glasplättchen durch die Platte zu stark behindert wurde.

3.3.3.5.3 Versuchsergebnisse

Die Messwerte für die vier Prüfstäube wurden in Form von Staubkonzentrations-Spannungskurven aufgearbeitet, wobei eine rechnerische Korrektur des Koeffizienten B_2 aufgrund leicht verschiedener Messweiten der hier und bei den Messungen mit der vorläufigen Apparatur (Abschnitt 3.3.2) verwendeten SKG 5-Messeinheit notwendig war. In den Abbildungen 3.31 bis 3.34 sind die Kalibrierkurven für Maisstärke, Formpuderstärke, Weizenmehl und Puderzucker gezeigt, wobei es sich dabei um das Mittel mehrerer berechneter Einzelkurven gemäß Gleichung 2.3 handelt. Zu deren Erstellung verwendete Punkte sind im Diagramm im gleichen Farbton dargestellt. Messdaten hierzu sind im Anhang A.2.4 aufgelistet.

3.3.3.5.4 Versuchsauswertung und Diskussion

Gemäß den mit der vorläufigen Apparatur erzielten Resultate und aufgrund der mikroskopischen Untersuchungen der Stäube (Abschnitt 3.3.2.4) war für die mit der neuen Apparatur gemessenen Kalibrierkurven Folgendes zu erwarten:

Weil die Maisstärkepartikel in Ethanol nicht quellen, jedoch transparenter als in Luft sind, sollte die mit dem Suspensionsverfahren erhaltene mittlere Kurve zu tief im Konzentrations-Spannungs-Diagramm liegen. Weil die mit der neuen Apparatur bestimmten Staubmassen- bzw. Staubkonzentrationswerte auf zu viel gewogene Staubmassen durch Staubanlagerung an der Glasplättchenhalterung korrigiert wurden, sollte die so erhaltene Kalibrierkurve links neben oder über derjenigen der Suspensionsmethode liegen. Die Kalibrierkurve, die mit der vorläufigen Apparatur aufgenommen wurde, liegt zu weit rechts bzw. zu tief wegen der seitlich am Objektträger angelagerten Staubmasse. Im Rahmen ihrer Fehlergrenzen sollten sich aber beide mit der Sedimentationsmethode erhaltenen Kalibrierkurven vereinigen lassen. Wie man Abbildung 3.31 entnimmt, erfüllen die Kalibrierkurven genau die Erwartungen.

Ähnliches gilt für die Formpuderstärke, wie man aus Abbildung 3.32 ersieht. Weil die Partikel der Formpuderstärke zusätzlich zur zunehmenden Transparenz in Ethanol etwas quellen, liegt die mit der Suspensionsmethode gewonnene Kalibrierkurve etwas näher an der mit der neuen Apparatur ermittelten Kalibrierkurve, als das bei Maisstärke der Fall ist.

Bei Weizenmehl liegen die mit der vorläufigen und neuen Apparatur gemessenen Kalibrierkurven nah beieinander, bestätigen sich also gegenseitig. Deutlich über diesen beiden Kurven liegt die Kalibrierkurve, welche mit der Suspensionsmethode erstellt wurde. Der Grund hierfür ist in dem relativ starkem Aufquellen von Teilen der Weizenmehlpartikel zu sehen (Abb. 3.33).

Durch das Lösen bzw. Anlösen der Puderzuckerpartikel in Ethanol liegen die mit der Suspensionsmethode gemessenen Kalibrierkurven deutlich zu tief im Konzentrations-Spannungs-Diagramm. Die beiden mit der Sedimentationsmethode erzielten Kalibrierkurven stimmen im Rahmen ihrer Messfehler gut überein (Abb. 3.34). Jedoch liegt die mit der neuen Apparatur gemessene Kurve unterhalb derjenigen, die mit der vorläufigen Apparatur bestimmt wurde. Dieses Verhalten bildet damit eine Ausnahme

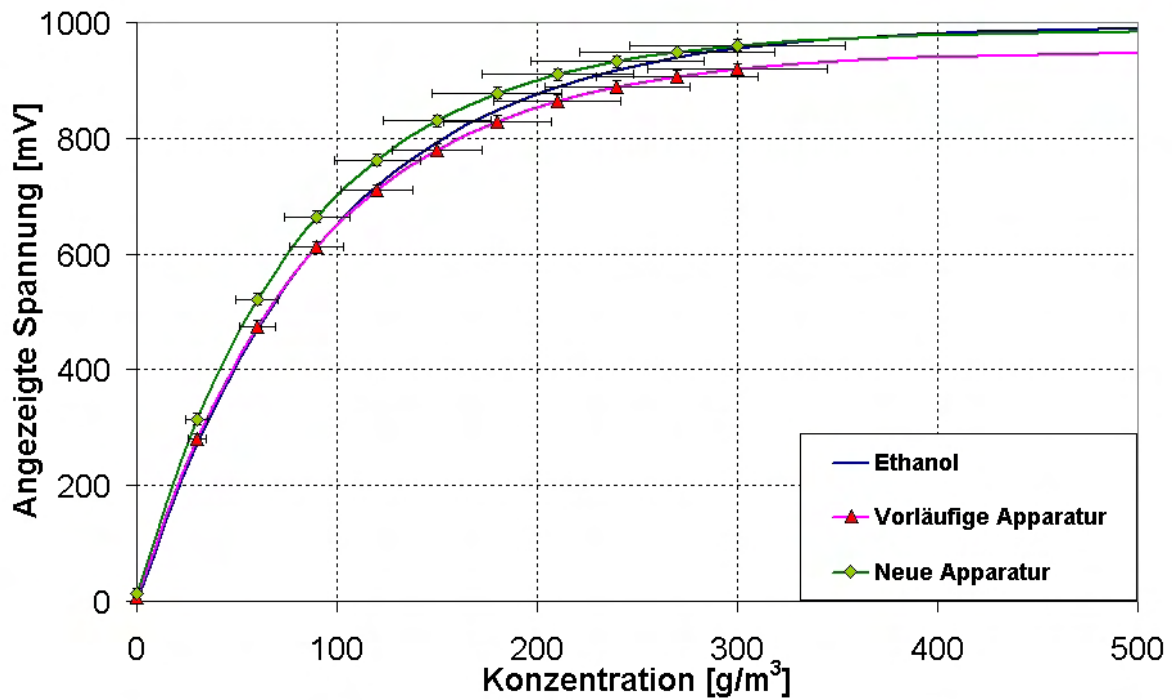


Abbildung 3.31: Kalibrierkurven für Maisstärke, aufgenommen mit der neuen Apparatur, der vorläufigen Apparatur und der Suspensionsmethode. Die rote und die grüne Kurve stellen das Mittel aus einigen Einzelkurven dar.

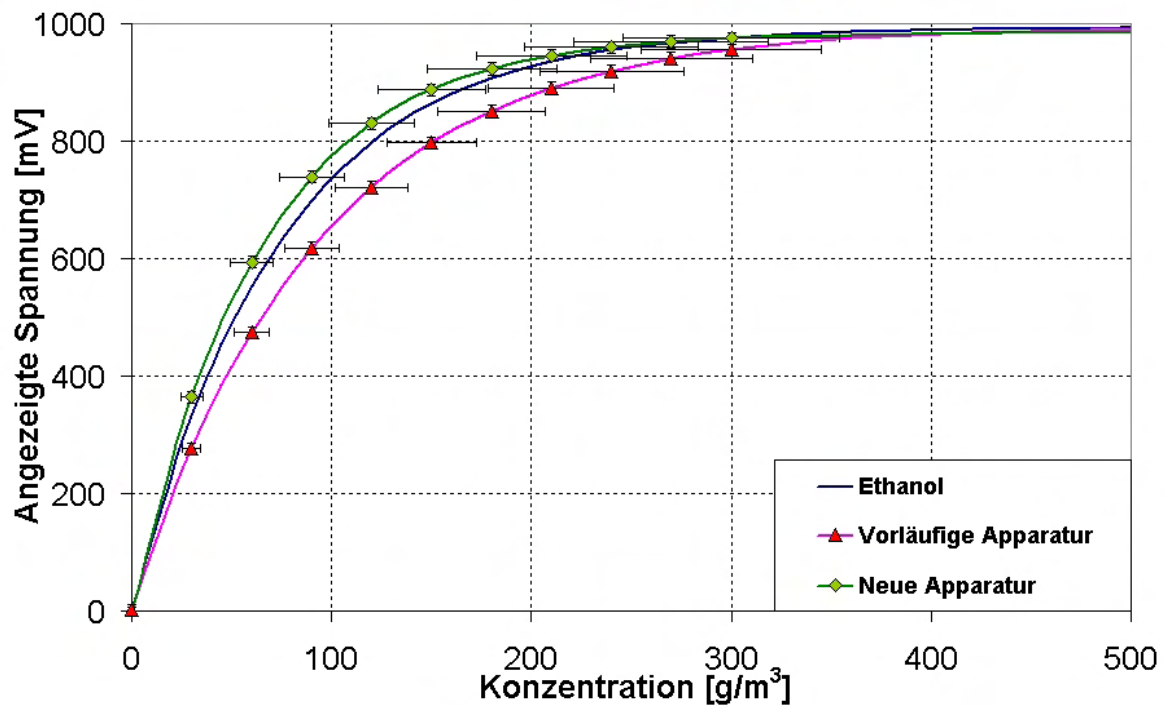


Abbildung 3.32: Kalibrierkurven für Formpuderstärke, aufgenommen mit der neuen Apparatur, der vorläufigen Apparatur und der Suspensionsmethode. Die rote und die grüne Kurve stellen das Mittel aus einigen Einzelkurven dar.

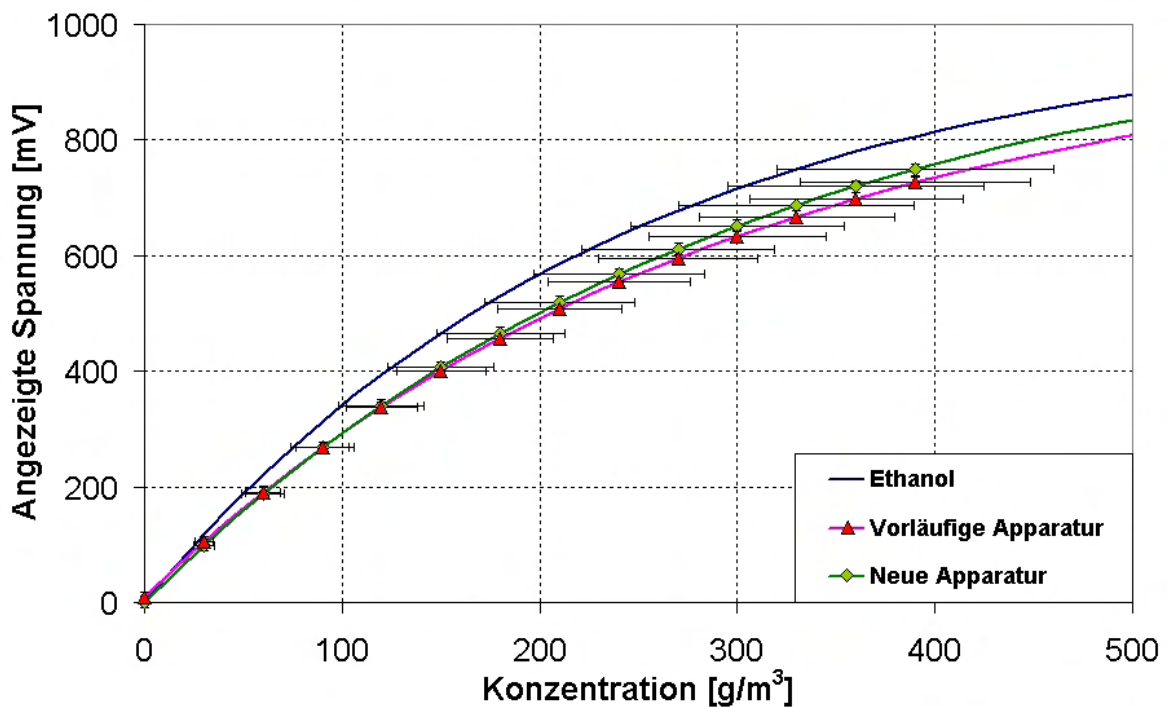


Abbildung 3.33: Kalibrierkurven für Weizenmehl, aufgenommen mit der neuen Apparatur, der vorläufigen Apparatur und der Suspensionsmethode. Die rote und die grüne Kurve stellen das Mittel aus einigen Einzelkurven dar.

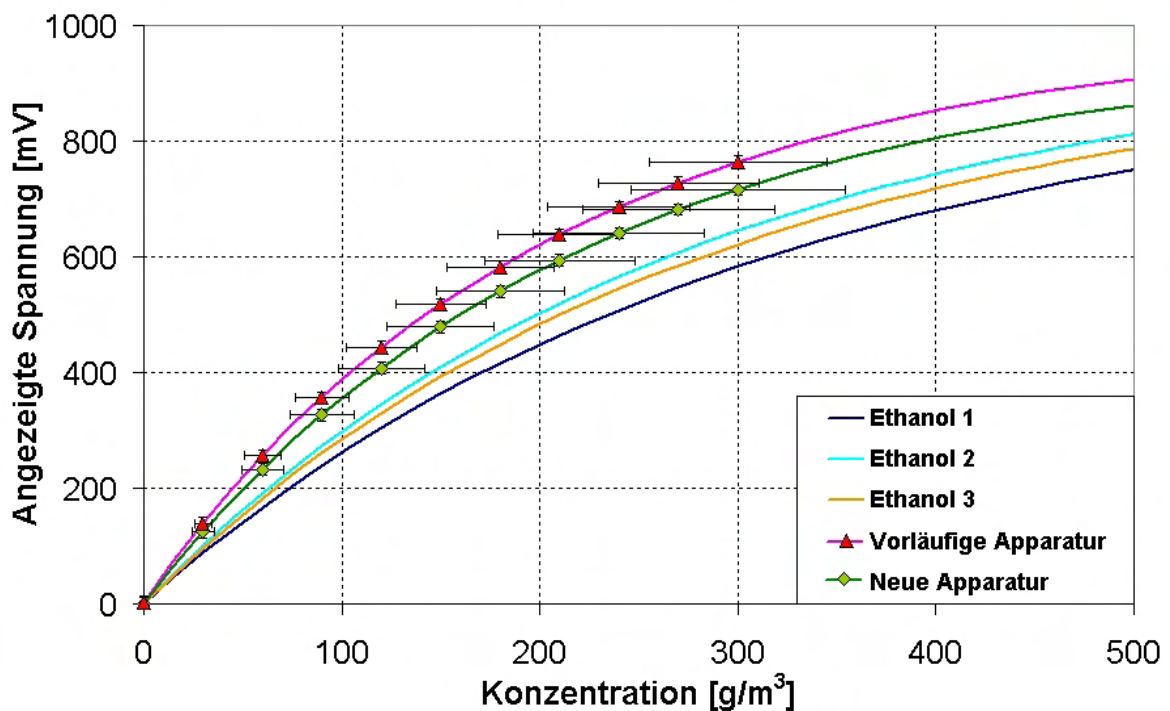


Abbildung 3.34: Kalibrierkurven für Puderzucker, aufgenommen mit der neuen Apparatur, der vorläufigen Apparatur und der Suspensionsmethode. Die rote und die grüne Kurve stellen das Mittel aus einigen Einzelkurven dar.

innerhalb der vier untersuchten Stäube. Angesichts des Messfehlers und der geringen Zahl an aufgenommenen Einzelkurven kann diese Ausnahme als Ergebnis der statistischen Schwankung aufgefasst werden.

Der Messfehler von 18 %, der bei der Kalibrierkurvenerstellung mit der neuen Apparatur auftritt, summiert sich über verschiedene Einzelfehler auf. Etwa 5 % Fehler ergeben sich durch Staubanlagerungen, die sich innerhalb der Schutzprofile an den Fäden der Glasplättchenhalterung befinden. Diese Staubmasse wird mit der in Abschnitt 3.3.3.4.3 entwickelten Korrekturmethode nicht erfasst. Dazu kommt ein Messfehler, der aufgrund des Torsionsdrahtes bzw. dessen Aufhängung auftritt und der zu einer Nullpunktdrift der Waage führt. Dieser Fehler muss ebenfalls mit 5 % veranschlagt werden. Weiterhin ist ein Ablesen der Staubmasse auf der gegenwärtig vorhandenen Skala der Torsionswaage nur bis auf etwa 5 % Genauigkeit möglich. Schließlich führt eine Ungenauigkeit von circa 3 % in den Eichgewichten, die zur Kalibrierung der Torsionswaage dienten, zu einem weiteren Messfehler.

Kapitel 4

Problematik Linsenverschmutzung

Das Problem der Staubablagerung auf den Linsen der optoelektronischen Messeinheit des SKG 5 ist seit geraumer Zeit bekannt und bis heute nicht befriedigend gelöst. Praktisch bei jeder länger andauernden, kontinuierlichen Staubkonzentrationsmessung verschmutzen die Linsen der Messeinheit stetig, was sich darin widerspiegelt, dass die Spannungsanzeige an der Steuer- und Anzeigeeinheit des SKG 5 nicht mehr auf den Nullpunkt (0 mV) zurückkehrt bei Abwesenheit von Staub im Strahlengang der Messeinheit. Die mit dem Gerät gemessenen Staubkonzentrationen liegen durch den Effekt der Linsenverschmutzung höher als die tatsächlich während der Messung vorhandenen Staubkonzentrationen (siehe auch Abschnitt 1.2).

4.1 Bisher vorhandene Techniken zur Reinigung der Linsen und deren Wirksamkeit

Während der letzten Jahre wurden verschiedene Vorrichtungen entwickelt, um den Messwert verfälschenden Einfluss der Linsenverschmutzung an der Messeinheit des SKG 5 so weit wie möglich zu unterdrücken. Im Folgenden werden diese Vorrichtungen kurz beschrieben.

4.1.1 Standard-Reinigungsvorrichtung, Typ 7

In den allermeisten Fällen einer Staubkonzentrationsmessung mit dem SKG 5 wird die Standard-Messeinheit vom Typ 7 verwendet. Deren Aufbau und das Funktionsprinzip der Linsenreinigungsvorrichtung ist in Abschnitt 2.2.1 beschrieben. Der Reinigungserfolg, der mit dieser Vorrichtung erzielt wird, ist nicht immer befriedigend, so dass es einer zusätzlichen Reinigung der Linsen der SKG 5-Messeinheit bedarf [8, 10].

4.1.2 Schutzkappen, Typ 7S

Im Prinzip handelt es sich bei dieser Variante der Messeinheit um das Standard-System, jedoch werden vor der Messung die Distanzhülsen der Messeinheit mit spezi-

ellen Schutzkappen verschlossen, so dass kein Staub bis zu den Linsen im Inneren der Distanzhülsen vordringen kann (siehe auch Abb. 2.2). Die Messeinheit wird am vorgesehenen Messort positioniert, z. B. in einem Silo. Die Staubkonzentrationsmessung beginnt, indem die Schutzkappen durch einen Druckluftstoß von den Distanzhülsen „gesprengt“ werden und den Strahlengang der Messeinheit freigeben. Im Moment direkt nach Entfernen der Schutzkappen wird die wahre vorherrschende Staubkonzentration ermittelt. Danach wirken auf das Messergebnis wieder die Auswirkungen der Linsenverschmutzungen ein. Dieses System ist geeignet für zeitlich punktuelle Staubkonzentrationsmessungen innerhalb von Volumina, in denen hohe Staubkonzentrationen vorherrschen. Für zeitlich andauernde Messungen eignet es sich nicht [8].

4.1.3 Schließzylinder, Typ 8

Typ 8 der SKG 5-Messeinheit besitzt einen beweglichen Hohlzylinder, der den Strahlengang mitsamt der Empfänger- und Sendediode komplett verschließen und wieder freigeben kann (Abb. 4.1). Dieser Schließzylinder kann von beiden Seiten pneumatisch angesteuert, d. h. zu einem beliebigen Zeitpunkt während einer Messung geöffnet und verschlossen werden. Das Problem der Staubanlagerung an den Linsen kann auch mit dieser Vorrichtung nicht gänzlich verhindert werden, weil es schon nach einer relativ kurzen Messdauer zu einer erheblichen Verschmutzung der Linsen kommt [10].

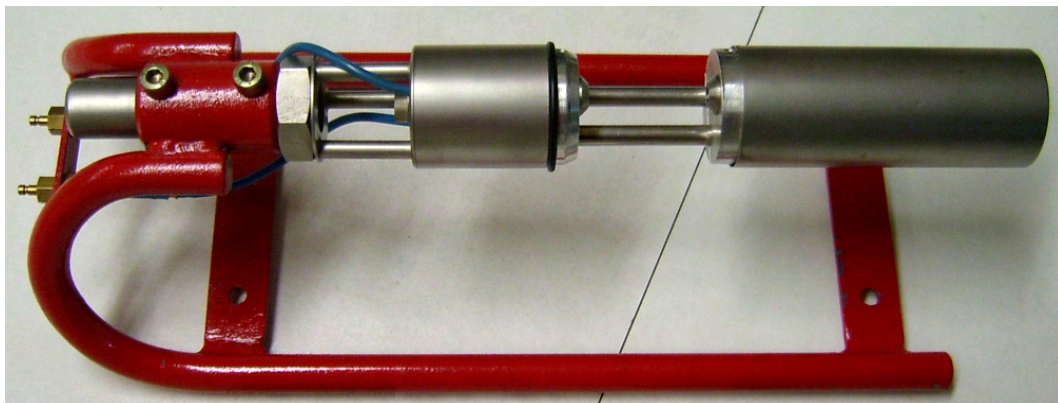


Abbildung 4.1: Messeinheit SKG 5, Typ 8 bei geöffnetem Schließzylinder.

4.1.4 Pressluftgesteuerte Schieber, Typ 9

Anstatt den kompletten Strahlengang der Messeinheit des SKG 5 mit einem Zylinder auf Wunsch zu verschließen oder zu öffnen, werden bei der Variante Typ 9 nur die Linsen mit Hilfe von Schieber-Blenden verschlossen bzw. geöffnet. Diese Vorrichtung wird anstelle der Distanzhülsen vor den Linsen der Standard-Messeinheit montiert. Die Schieber-Blenden werden mit Hilfe von Pneumatikzylindern geöffnet und via Federzug wieder geschlossen (Abb. 4.2). Leider stellt auch die Variante Typ 9 keinen Durchbruch hinsichtlich der Vermeidung der Linsenverschmutzung dar, weil zum einen der Staub die mechanischen Teile wie Schieber und Zylinderstange zusetzt und somit deren Funktion

stört und zum anderen Staubanlagerungen auf den Linsen während der Messzeit nicht vermieden werden können [10].

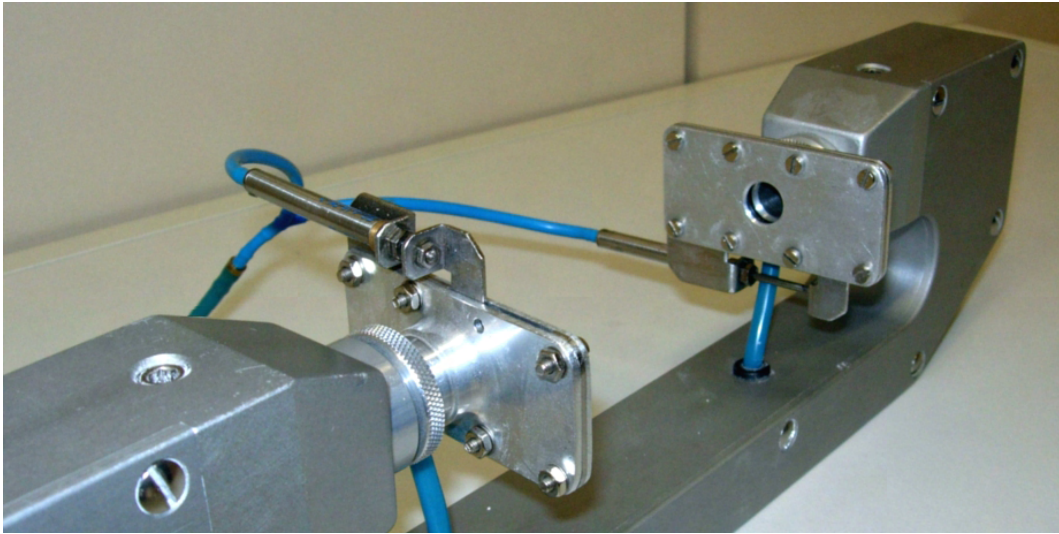


Abbildung 4.2: Messeinheit SKG 5, Typ 9.

4.1.5 Reinigung durch Luftstrom, Typ 10

Eine weitere Variante einer Reinigungsvorrichtung - bezeichnet mit Typ 10 - basiert auf einem permanenten Luftstrom, der über die Oberfläche von Fenstern streicht, die vor den Linsen der Messeinheit des SKG 5 sitzen. Jede Linse ist durch jeweils ein Fenster vor direktem Kontakt mit dem Staub geschützt; die Fenster wiederum sollen durch den Luftstrom, der parallel zur Oberfläche dieser Fenster geführt wird, frei von Staub gehalten werden (Abb. 4.3). Die Luft wird dabei über Schläuche bis in die Reinigungsvorrichtung an der Messeinheit geführt und wird nach Überstreichen der Fenster in die Umgebung geblasen. Diese Vorrichtung kann, wie auch bei Typ 9, anstelle der Distanzhülsen an der Standard-Messeinheit angeschraubt werden [10].

Die korrekte Funktion dieser Vorrichtung und eine mögliche Beeinflussung der Staubwolke am Messort durch das ständige Ausblasen der Luft war zu Beginn dieser Arbeit noch nicht untersucht. Bevor die Entwicklung einer völlig neuartigen Reinigungs- bzw. Schutzvorrichtung in Angriff genommen wurde, sollte im Rahmen dieser Arbeit zunächst diese mögliche Lösung auf ihre Eignung hin untersucht werden.

4.2 Anforderungen an den Linsenschutz

Bei einer Lösung des Verschmutzungsproblems soll nach Möglichkeit ganz verhindert werden, dass sich Staub an den Linsen der SKG 5-Messeinheit anlagern kann, beziehungsweise eine Reinigungsmöglichkeit geschaffen werden, die in kurzer Zeit die Linsen zuverlässig und vollständig vom Staub befreit. Dabei sollte das umgebende Staub/Luft-Gemisch so wenig wie möglich verändert oder beeinflusst werden.



Abbildung 4.3: Messeinheit SKG 5, Typ 10.

Bei der Konstruktion sollte darauf geachtet werden, dass ein glatter Abschluss nach außen verwirklicht wird, damit es möglich ist, die Messweite l zwischen Infrarotsender und -empfänger genau zu definieren (siehe Abschnitte 2.1, 2.2.1 und 2.3). Weiterhin sollte die Vorrichtung möglichst klein gestaltet sein und sich auch für Dauermessungen eignen.

4.3 Experimentelle Prüfung der SKG 5-Messeinheit Typ 10

Wie bereits in Abschnitt 4.1.5 erwähnt wurde, liegen bisher noch keine fundierten Kenntnisse über die Funktionstüchtigkeit der SKG 5-Messeinheit Typ 10 vor. Das gilt sowohl für den Reinigungseffekt als auch für die Beeinflussung (Verfälschung) der Messergebnisse durch den Luftstrom. Diese Kenntnisse wurden anhand der im folgenden beschriebenen Versuchsreihen geschaffen.

4.3.1 Versuchsreihe 1

4.3.1.1 Versuchsaufbau

Die Messungen erfolgten mit einem ähnlichen Versuchsaufbau wie er in Abschnitt 3.3.2.1 beschrieben ist. In einem großen Karton, der als Messkammer fungierte, wurde die Messeinheit des SKG 5 vom Typ 10 und anschließend zu Vergleichszwecken die Messeinheit vom Typ 7 positioniert. Durch eine Öffnung im oberen Drittel der Messkammerwand wurde ein Staub/Luft-Gemisch (Maisstärke) mit Hilfe des Partikel-dosierers RBG 1000 (Abschnitt 3.3.2.1.1) in die Messkammer so eingeblasen, dass am Ort der SKG 5-Messeinheit eine zeitlich nahezu konstante Staubkonzentration herrscht. Die Luft zur Reinigung der Fenster des Typs 10 wurde von der Hausdruckluft über

ein Handventil und einen nachgeschalteten Durchflussmesser geliefert. Außerhalb der Messkammer befanden sich das Anzeige- und Steuergerät zum Betrieb der SKG 5-Messeinheit. Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 4.4 dargestellt.

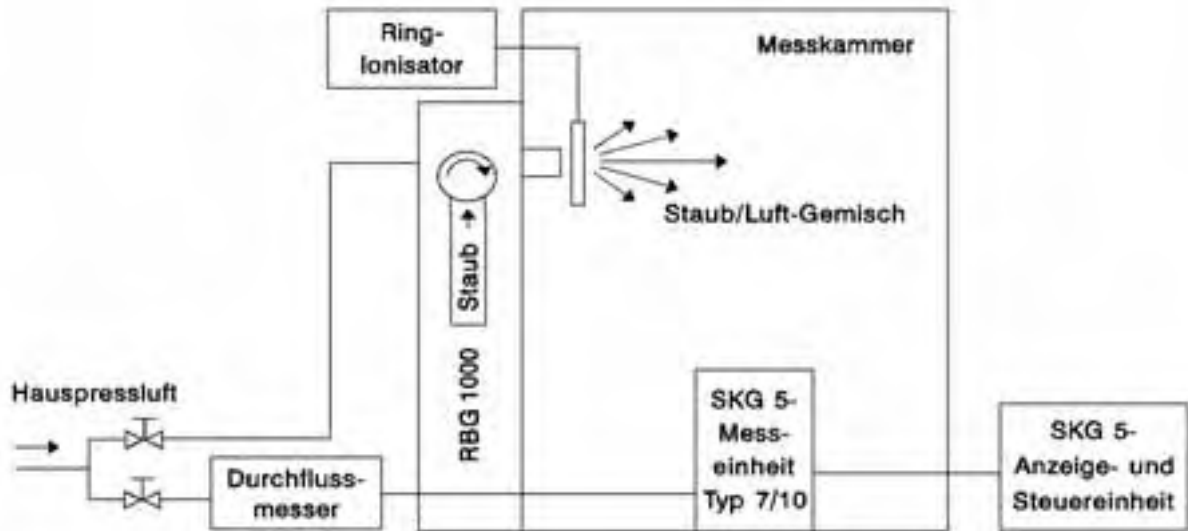


Abbildung 4.4: Schematisierter experimenteller Aufbau bei der Versuchsreihe 1 zur Untersuchung der Eigenschaften der SKG 5-Messeinheit vom Typ 10.

4.3.1.2 Versuchsdurchführung

Zu Beginn jeder Messreihe wurde der Staubvorratszylinder des RBG 1000 mit Maisstärke gefüllt, die Bürstendrehzahl auf 900 U/min, der Staubvorschub auf 500 mm/h und die Druckluft auf 1,5 bar eingestellt. Anschließend wurde am SKG 5 Typ 10 der Nullabgleich durchgeführt. Danach wurde die Messkammer verschlossen, wobei das SKG 5 betriebsbereit war. Mit dem Einblasen des Staub/Luft-Gemisches in die Messkammer durch Einschalten des RBG 1000 begann der eigentliche Versuch. Der RBG 1000 wurde über eine Zeitspanne von 8 min kontinuierlich betrieben, d. h. Staub in die Messkammer eingeblasen, wobei in regelmäßigen Zeitintervallen der aktuell an der Steuereinheit des SKG 5 angezeigte Messwert notiert wurde. Nach dem Abschalten des RBG wurde die vollständige Sedimentation abgewartet und danach ein erneuter Versuch vorbereitet. Dieser Versuchsablauf wurde für verschiedene Luftvolumendurchsätze \dot{V} durch die Reinigungsvorrichtung der Messeinheit Typ 10 wiederholt (siehe Tabelle 4.1). Abschließend wurde zu Vergleichszwecken eine zusätzliche Messung bei sonst gleichen Randbedingungen mit der SKG 5-Messeinheit Typ 7 durchgeführt.

Versuch	1	2	3	4
\dot{V} [l/min]	17	23	32	52

Tabelle 4.1: Luftvolumenstrom durch die Reinigungsvorrichtung der Messeinheit des SKG 5 Typ 10 bei den Versuchen Nr. 1 bis 5.

4.3.1.3 Versuchsergebnisse

Mit dem RBG 1000 konnten sehr homogene und zeitlich stabile Staubwolken erzeugt werden, deren Staubkonzentration im unteren Viertel des Messbereiches des SKG 5 lagen. Dementsprechend ergaben sich relativ leichte Verschmutzungen der Linsen der SKG 5-Messeinheit, jedoch waren diese groß genug, um die Funktionstüchtigkeit der Messeinheit Typ 10 zu prüfen. Die aufgenommen Messwerte wurden auf die gleiche Messlänge l umgerechnet und in einem Diagramm aufgearbeitet, welches in Abbildung 4.5 gezeigt ist.

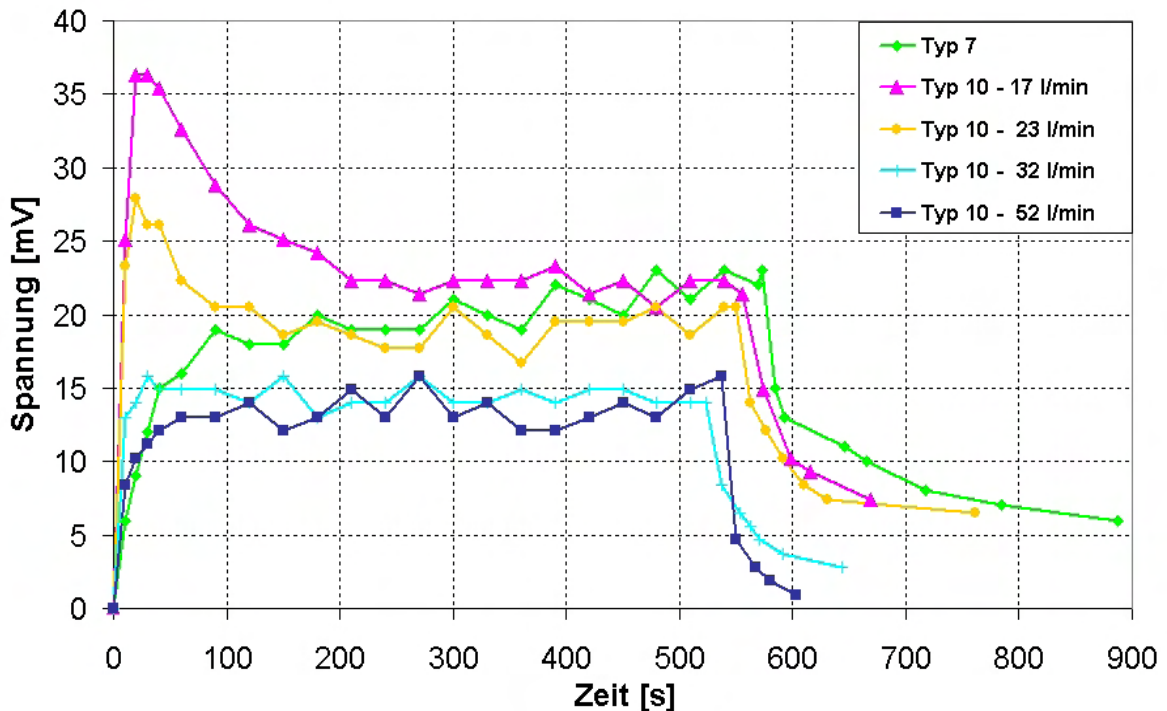


Abbildung 4.5: Messergebnisse der Versuchsreihe 1.

Der Abbildung 4.5 ist zu entnehmen, dass der Erfolg bei Reinigung der Linsen bzw. der vorgesetzten Fenster mit zunehmenden Luftvolumenstrom steigt. Bei den Luftvolumenströmen von 17 l/min und 23 l/min sowie bei der Messeinheit Typ 7 gehen die Kurven nach der Sedimentation nicht auf Null zurück, sondern verharren bei Werten zwischen 5 mV und 10 mV. Dies bedeutet, dass sowohl die Fenster (bei Typ 10) als auch die Linsen (bei Typ 7) in ähnlicher Stärke verschmutzt sind. Demgegenüber liegt das Niveau der Kurven bei den Luftvolumenströmen von 32 l/min und 52 l/min deutlich unter dem der anderen Kurven und fällt nach der Sedimentation wieder nahezu auf 0 mV ab. Das kann als guter Reinigungserfolg gewertet werden.

4.3.1.4 Versuchsauswertung und Diskussion

Aus dem vorigen Abschnitt geht hervor, dass lediglich bei hohen Luftvolumenströmen durch die Reinigungsvorrichtung ein befriedigender Reinigungserfolg der Typ 10-Optik

erzielt werden kann. Es muss nun der Frage nachgegangen werden, wie stark die Staubwolke im Messvolumen dieser SKG 5-Messeinheit beeinflusst, bzw. die Messwerte dadurch verfälscht werden. Zu diesem Zweck müssen die Kurven aus Abbildung 4.5 korrigiert werden, d.h. der Anteil der gemessenen Spannung, welcher auf der Verschmutzung der Optik beruht, subtrahiert werden (siehe hierzu Abschnitt 1.2). Eine Umrechnung der Spannungskurven auf Staubkonzentrationskurven anhand einer Kalibrierkurve (Abschnitt 2.3) ist für diese Betrachtung nicht notwendig, da die dadurch hervorgerufene Kurvenverschiebung für alle Kurven gleich wäre. Vergleicht man die Kurven für die Luftvolumenströme 32 l/min und 52 l/min mit derjenigen, welche mit der Messeinheit Typ 7 aufgenommen wurde, so stellt man eine Abweichung von rund 30 % fest. Diese Abweichung kann nur auf eine Veränderung der Staubwolke innerhalb des Messvolumens durch die Luft, die durch die Reinigungsvorrichtung des Typs 10 geblasen wird, zurückgeführt werden. Zieht man zusätzlich die Tatsache mit in Betracht, dass bei den geringeren Luftvolumenströmen von 17 l/min bzw. 23 l/min eine erhebliche Verschmutzung der Optik auftritt (Abb. 4.5), so bleibt nur der Schluss, dass die Messeinheit Typ 10 nicht den Anforderungen genügt.

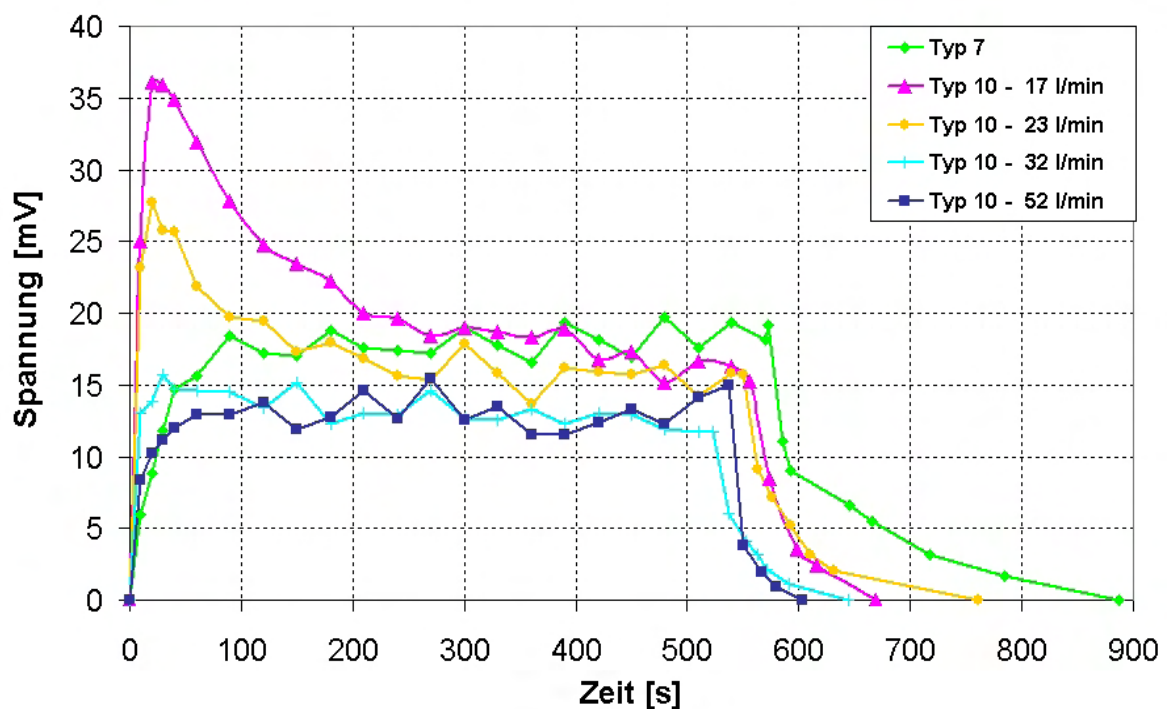


Abbildung 4.6: Aufgearbeitete Messergebnisse der Versuchsreihe 1. Der Anteil der gemessenen Spannung, welcher auf der Verschmutzung der Optik der SKG 5-Messeinheit Typ 10 beruht, wurde subtrahiert.

4.3.2 Versuchsreihe 2

Zur Überprüfung der Ergebnisse aus dem vorigen Abschnitt 4.3.1 wurde eine weitere Versuchsreihe mit leicht abgewandeltem Versuchsaufbau durchgeführt, welche im folgenden Abschnitt beschrieben ist.

4.3.2.1 Versuchsaufbau

Als experimenteller Aufbau wurde im Wesentlichen derjenige aus Versuchsreihe 1 verwendet (Abschnitt 4.3.2.1). Jedoch wurden in der Messkammer zwei Messeinheiten gleichzeitig (Typ 10 und Typ 7) auf dem Kammerboden positioniert und zwar so nah wie möglich beieinander. Sinn dieses Aufbaus war es, dass am Ort beider Messeinheiten nahezu die gleiche Staubkonzentration zum selben Zeitpunkt vorliegt. Auf diese Art und Weise war der direkte Vergleich zwischen Typ 7 und Typ 10 hinsichtlich des Linsenverschmutzungsgrades bzw. der gemessenen Staubkonzentrationen möglich. Außerhalb der Messkammer befanden sich zwei Anzeige- und Steuergeräte zum Betrieb der beiden SKG 5-Messeinheiten. An diese waren nachfolgend ein zweikanaliger Transienten-Rekorder sowie ein Rechner zur Datenerfassung angeschlossen. Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 4.7 dargestellt.

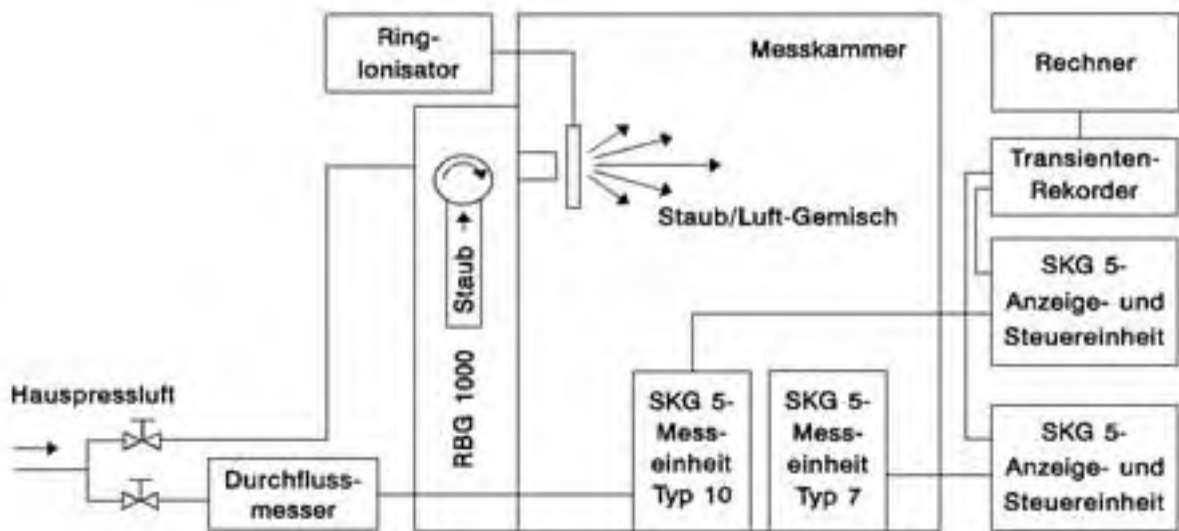


Abbildung 4.7: Schematischer Versuchsaufbau zur Untersuchung der Eigenschaften der SKG 5-Messeinheit vom Typ 10.

4.3.2.2 Versuchsdurchführung

Abgesehen davon, dass die abschließende Vergleichsmessung mit der SKG 5-Messeinheit Typ 7 hier überflüssig war, unterschied sich die Versuchsdurchführung von derjenigen der Versuchsreihe 1 nur dadurch, dass die Messdaten elektronisch erfasst wurden.

4.3.2.3 Versuchsergebnisse

Wie schon zuvor (Abschnitt 4.3.1.3) wurden alle Messwerte zunächst auf die gleiche Messlänge l umgerechnet. Anschließend wurden die Kurven geglättet und in einem Diagramm bzw. in Abbildung 4.8 dargestellt. Beim Blick auf die Kurven in Abbildung 4.8 fällt als augenscheinliches Ergebnis auf, dass eine echte Reinigungswirkung an der Optik des Typs 10 nur bei 52 l/min Luftvolumenstrom erzielt wurde (Anzeige geht nach

Sedimentation auf 0 mV zurück). Bei geringeren Volumenströmen war die Säuberung der Optik unvollständig. Damit bestätigt sich dieses erste Resultat aus Versuchsreihe 1. Auffällig ist das hohe Niveau der Kurve für die Messeinheit Typ 7 bei 52 l/min Luftvolumenstrom durch die Messeinheit Typ 10, was auf eine starke Verschmutzung der Linsen bei Typ 7 schließen lässt.

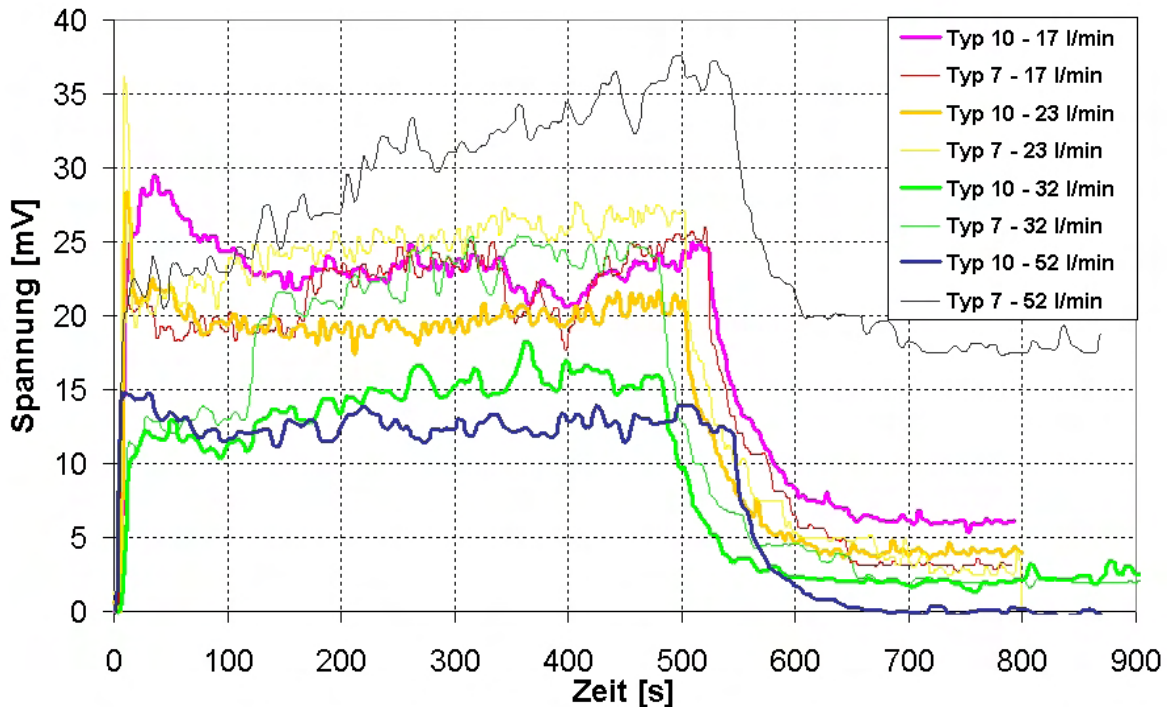


Abbildung 4.8: Messergebnisse der Versuchsreihe 2. Die Kurven wurden geglättet.

4.3.2.4 Versuchsauswertung und Diskussion

Vergleicht man den zeitlichen Verlauf der Kurven aus Abbildung 4.8, die zu jeweils einem Messdurchlauf gehören, so stellt man fest, dass am Messort der beiden Messeinheiten Typ 7 und Typ 10 annähernd die gleiche Staubkonzentration zum gleichen Zeitpunkt erzeugt wurde. Zumindest gilt das ab dem Zeitpunkt 200 s. Erkennbar ist dies an der zeitlichen Abfolge von Minima und Maxima in den zusammengehörigen Kurven, was besonders gut an den Kurven der Versuche mit 52 l/min und 17 l/min zu erkennen ist. Dies sollte durch das gleichzeitige Messen mit den SKG 5-Messeinheiten Typ 7 und 10 auch erreicht werden.

Wie auch bei der Versuchsreihe 1 wurden die Kurven aus Abbildung 4.8 von dem Anteil befreit, der aufgrund der Verschmutzung der Optiken in Erscheinung tritt. Anschließend wurden die so aufbereiteten Messergebnisse in Abbildung 4.9 (nur Typ 10) und in Abbildung 4.10 (nur Typ 7) zusammengetragen. Aus den Kurvenlagen in Abbildung 4.9 muss man schließen, dass mit zunehmenden Luftvolumenstrom durch die Reinigungsvorrichtung des Typs 10 die Messwerte abnehmend in Richtung zu geringer Staubkonzentration bzw. Spannung verschoben werden. Die Abweichung beträgt hier bis zu 40%. Dass dies ein echter Effekt ist und nicht etwa durch generell unter-

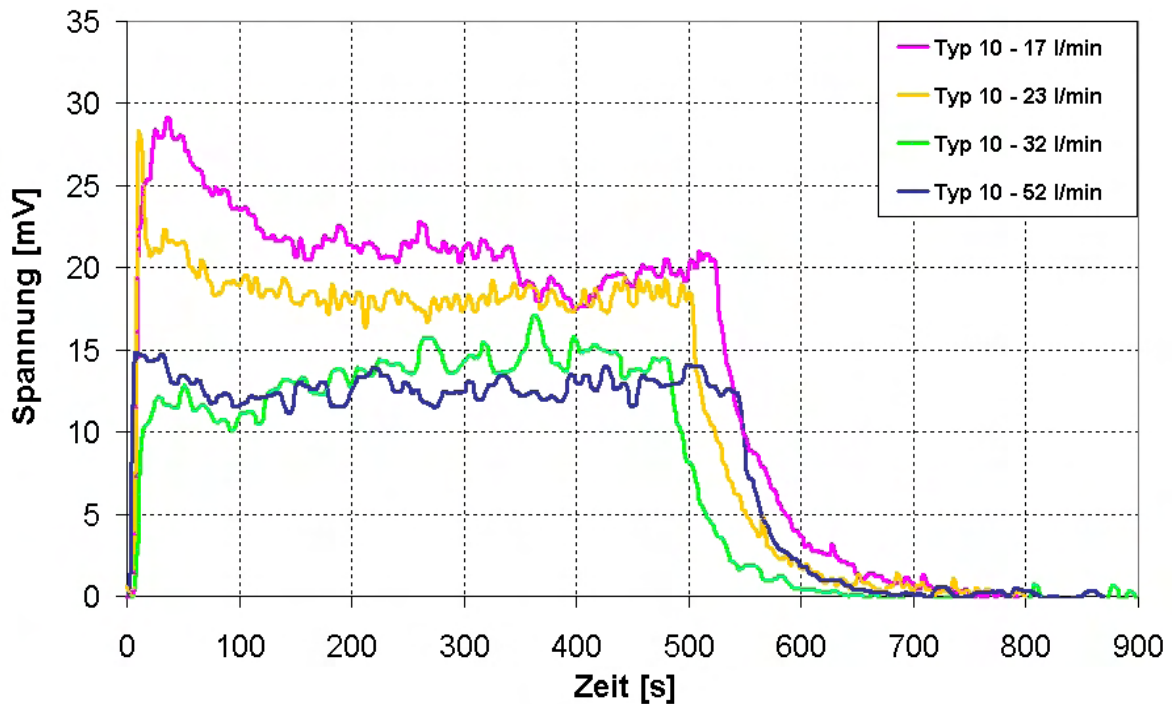


Abbildung 4.9: Aufgearbeitete Messergebnisse, die von der Messeinheit Typ 10 bei der Versuchsreihe 2 geliefert wurden. Der Anteil der gemessenen Spannung, welcher auf der Verschmutzung der Optik der SKG 5-Messeinheit Typ 10 beruht, wurde subtrahiert.

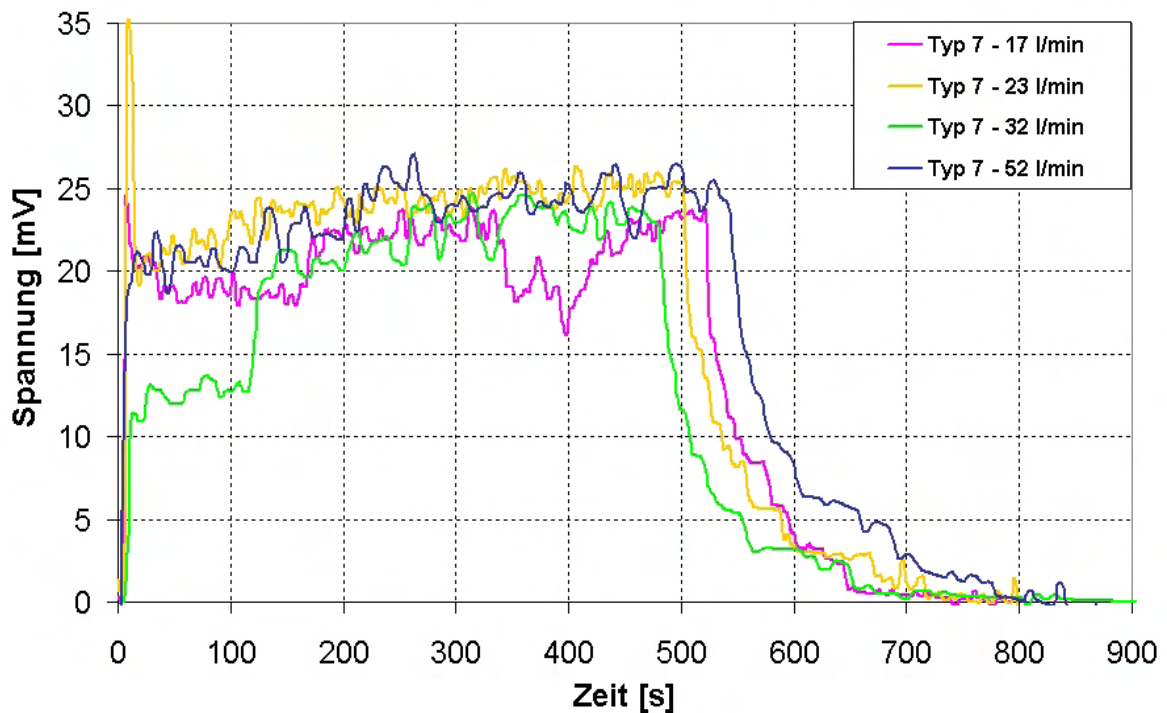


Abbildung 4.10: Aufgearbeitete Messergebnisse, die von der Messeinheit Typ 7 bei der Versuchsreihe 2 geliefert wurden. Der Anteil der gemessenen Spannung, welcher auf der Verschmutzung der Optik der SKG 5-Messeinheit Typ 7 beruht, wurde subtrahiert.

schiedliche Staubkonzentrationen bei den verschiedenen Versuchen vorgetäuscht wird, zeigt ein Blick auf die Kurvenlagen in Abbildung 4.10. Alle Kurven verlaufen hier nahezu auf dem selben Messspannungsniveau, sieht man mal von den ersten 120 s beim Versuch mit 52 l/min ab. Die Staubkonzentration an den Messorten des Typ 7 und 10 war also während aller Versuche ungefähr gleich groß.

Aus diesem Befund muss der Schluss gezogen werden, dass die SKG 5-Messeinheit Typ 10 nicht den Anforderungen genügt, da bei niedrigen Luftvolumenströmen durch die Reinigungsvorrichtung ein unbefriedigender Reinigungseffekt erzielt wird und bei hohen Luftvolumenströmen die zu messende Staubwolke nicht vernachlässigbar beeinflusst wird. Diese Schlussfolgerung deckt sich mit derjenigen, die sich aus der Versuchsreihe 1 ergab.

4.4 Entwicklung einer neuen Methode zur Vermeidung der Linsenverschmutzung

Wie aus dem vorigen Abschnitt 4.3 hervor geht, genügt die Messeinheit Typ 10 nicht den Anforderungen, wie sie in Abschnitt 4.2 beschrieben sind. Aus diesem Grund wurde nach einer neuen Möglichkeit gesucht, die Linsen der SKG 5-Messeinheit während der Messungen sauber zu halten.

4.4.1 Prinzip der neuen Schutzmethode

Ausgehend von den Erfahrungen mit den schon vorhandenen Messeinheiten der Typen 7-10 (Abschnitt 4.1) sollte eine Schutz- bzw. Reinigungsvorrichtung entwickelt werden, welche in irgendeiner Form auf einem Zyklus „Messen - Schließen - Reinigen - Messen...“ basiert. Die Verwirklichung dieser Idee würde folgende Vorteile bringen:

- Die Linsen werden nur periodisch und kurzzeitig der Staubwolke ausgesetzt, wodurch die Zeitspanne, die für die Anlagerung von Staub auf den Linsen zur Verfügung steht, drastisch verringert wird.
- Das Reinigen der Linsen nach einem Schließvorgang der Optik verhindert, dass die zu vermessende Staubwolke durch den Reinigungsvorgang beeinflusst wird.

Bei der Realisierung eines solchen Reinigungs- und Schutzkonzeptes muss man allerdings in Kauf nehmen, dass die bisher vorhandene Messwerterfassung mit hoher bzw. kontinuierlicher Abtastrate durch eine periodische Messwerterfassung innerhalb kleiner Zeitfenster ersetzt wird. Bei den bisher vorkommenden Messaufgaben, für die das SKG 5 eingesetzt wurde, war eine solche hohe Messwertabtastrate aber nie erforderlich, weshalb das neue Konzept im Rahmen dieser Arbeit umgesetzt werden sollte.

4.4.2 Aufbau und Funktion

Zu Beginn stand die Idee im Raum, das neue Reinigungs- und Schutzkonzept mit Hilfe einer Kombination der Methoden zu verwirklichen, wie sie bei den SKG 5-Messeinheiten

Typ 9 und 10 genutzt werden. Es sollte also ein Schließmechanismus mit Hilfe von Schiebern oder Blenden (pneumatisch oder elektromechanisch) kombiniert mit einer Reinigung über Druckluft für die SKG 5-Messeinheit aufgebaut werden. Jedoch wurde dieses Vorhaben wieder verworfen, vor allem aufgrund der Erfahrungen mit Typ 9 (siehe Abschnitt 4.1.4).

Stattdessen wurde ein völlig neuer mechanischer Aufbau erdacht, der zunächst lediglich dem Linsenschutz dienen soll. Diese neue Schutzvorrichtung wird im Weiteren als „Typ 11“ bezeichnet. Damit wurde nur ein Teil des eingangs beschriebenen Konzeptes verwirklicht, wofür zwei Gründe ausschlaggebend waren: Erstens war die zur Verfügung stehende Zeit zu kurz, um das Konzept vollständig zu realisieren. Zweitens kann die Mechanik von Typ 11 später leicht um eine Reinigungsvorrichtung auf Druckluftbasis erweitert werden, sofern dieser Schutzmechanismus funktioniert.

Der Aufbau und die genaue Funktionsweise des Typs 11 wird aus den folgenden beiden Abbildungen 4.11 und 4.2 ersichtlich. Vor den Linsen von Sender und Empfänger befinden

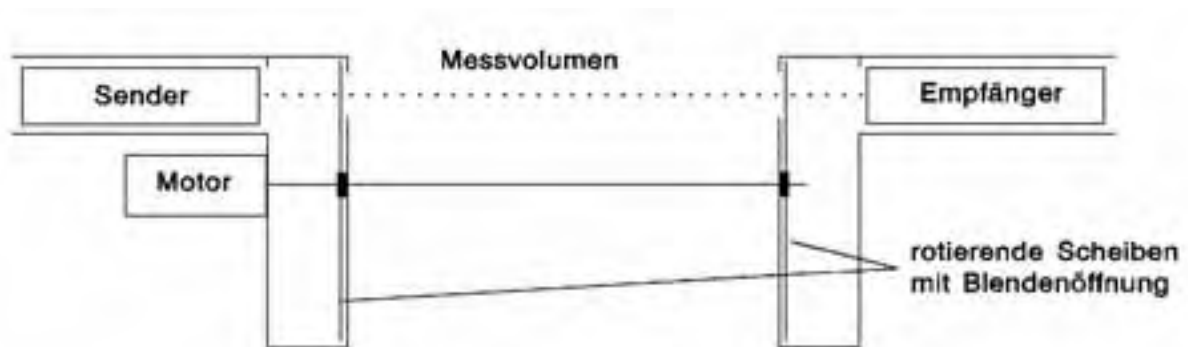


Abbildung 4.11: Skizze des Linsenschutzsystems für die SKG 5-Messeinheit Typ 11.

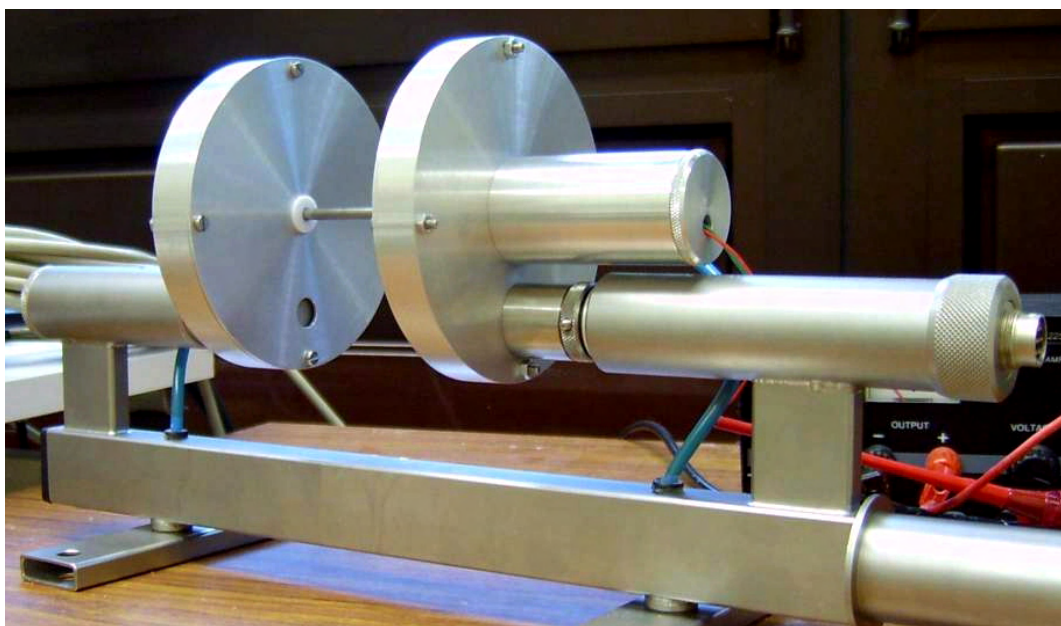


Abbildung 4.12: SKG 5-Messeinheit Typ 11 auf dem Kopf stehend.

det sich jeweils eine hohle Dose mit kreisförmigen Querschnitt. Die Front- und Rückplatten dieser Dosen besitzen eine Bohrung, durch die das Laser-Licht vom Sender durch die Dosen und das Messvolumen hindurch zum Empfänger gelangen kann. Unmittelbar hinter den Frontplatten der beiden Dosen befinden sich je eine drehbar gelagerte Scheibe mit einer nierenförmigen Blendenöffnung. An der Außenseite einer der Dosen ist ein kleiner Elektromotor¹ montiert, der die beiden über eine Welle verbundenen Scheiben in Drehung versetzt. Bei der Rotation der Scheiben wird der Strahlengang durch das Messvolumen periodisch für die Messwerterfassung immer dann freigegeben, wenn die Blendenöffnungen in den Scheiben sich vor den Öffnungen der Dosenfrontplatten vorbei bewegen. Bei bedecktem Strahlengang sedimentiert der während der Messung in das Dosengehäuse eingedrungene Staub innerhalb desselben und sollte sich deshalb kaum an die Linsen anlagern können. Auf diese Art und Weise sollte sich die Verschmutzung der Linsen während einer Messung zumindest klein halten lassen.

Die Vorrichtung wird durch Einschrauben anstelle der konischen Hülsen vor den Linsen befestigt (siehe Abb. 4.12 und B.2). Die nötige Spannung für den Motor wird derzeit aus dem Zusatzausgang auf der Rückseite der SKG 5-Steuer- und Anzeigeeinheit geliefert (siehe Abschnitt 2.2).

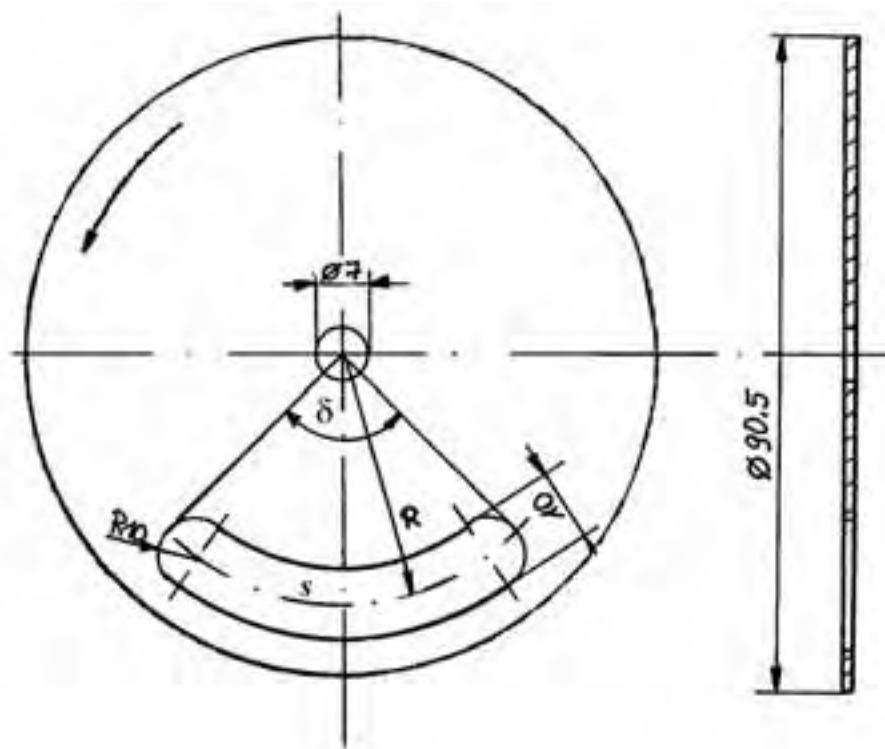


Abbildung 4.13: Zeichnung einer der rotierenden Scheiben mit Blendenöffnung.

Die Messdauer t innerhalb einer Scheibenumdrehung wird zum einen durch die Drehzahl des Motors bestimmt und zum anderen durch die Größe (Länge) der nierenförmigen Blendenöffnung in der Scheibe. Legt man sich auf eine gewünschte Messdauer t

¹12 V, DC, Nenndrehzahl 40 U/min, hohes Drehmoment.

fest und ist die Motordrehzahl n bzw. die Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$ gegeben, so errechnet sich die Länge der Blendenöffnung s in den Scheiben

$$s = \omega \cdot R \cdot t = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot R \cdot t \quad (4.1)$$

mit R als Abstand zwischen Scheibenzentrum und Blendenöffnungsmittellinie (siehe Abb. 4.13). Ausgedrückt im Bogenmaß ergibt sich der Winkel δ der Blendenöffnung aus (4.1) zu

$$\delta = \omega \cdot t = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot t \quad (4.2)$$

Die Blendenöffnung wurde so ausgelegt, dass eine Messdauer $t \approx 1$ s bei einer Drehzahl von 35 U/min realisiert ist. Das heißt, alle 2 Sekunden befinden sich die Messöffnungen in der Position, in der das Infrarotlicht vom Sender zum Empfänger gelangen kann.

4.4.3 Experimentelle Prüfung des neuen Systems

Wie gut die SKG 5-Messeinheit Typ 11 hinsichtlich Verschmutzungsschutz in der Realität funktioniert, sollte anhand dreier Versuchsreihen in Erfahrung gebracht werden, bei denen der Typ 11 verschiedenenartigen Staubkonzentrationen ausgesetzt wurde.

4.4.3.1 Versuchsreihe 1

4.4.3.1.1 Versuchsaufbau

In Anlehnung an die erfolgreiche Versuchsreihe 2 mit dem Typ 10 wurde jener Versuchsaufbau mit kleinen Veränderungen für die hier durchzuführende Untersuchung übernommen (Abschnitt 4.3.2.1). Schematisch ist der Versuchsaufbau im Wesentlichen in Abb. 4.7 gezeigt, wobei hier naturgemäß kein Durchflussmesser bzw. kein Druckluftanschluss für den Typ 11 vorhanden war, stattdessen aber eine Spannungsversorgung. Außerdem wurde der Transientenrekorder aufgrund seiner begrenzten Kapazität durch einen Daten-Logger ersetzt. Als Messkammer diente diesmal kein Pappkarton, sondern die Messkammer, die in Abschnitt 3.3.3.2 beschrieben ist. Anstelle der SKG 5-Messeinheit Typ 10 in Abb. 4.7 denke man sich die Messeinheit Typ 11.

4.4.3.1.2 Versuchsdurchführung

Auch die Durchführung des Versuches wurde in Anlehnung an der in Abschnitt 4.3.2.2 bzw. 4.3.1.2 beschriebenen Vorgehensweise abgearbeitet, wobei hier anstelle von vier lediglich drei Versuche mit jeweils gleichen Randbedingungen durchgeführt wurden. Bei der Messung wurde wieder Maisstärke als Staub verwendet.

4.4.3.1.3 Versuchsergebnisse

Die mit dem Daten-Logger aufgenommenen Rohdaten wurden um den Teil reduziert, der bei verschlossener Messeinheit Typ 11 (Strahlengang unterbrochen) aufgenommen wurde. Anschließend wurden die Daten geglättet, auf ein und dieselbe Messweite umgerechnet und schließlich in einem Diagramm aufgetragen. Die Messdaten der drei durchgeführten Versuche ähneln sich außerordentlich stark, so dass der besseren Darstellbarkeit wegen lediglich die Ergebnisse eines Versuches gezeigt werden, wie man Abbildung 4.14 entnimmt.

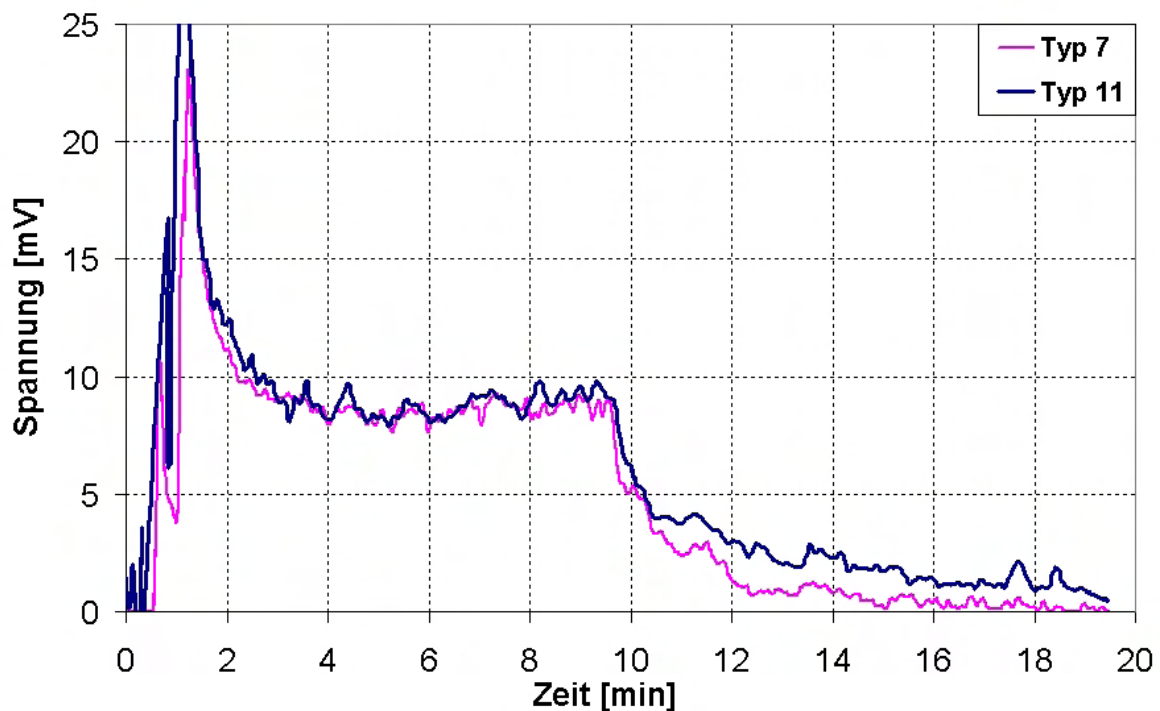


Abbildung 4.14: Ergebnisse der 1. Versuchsreihe zum Vergleich von Typ 11 und Typ 7.

4.4.3.1.4 Versuchsauswertung und Diskussion

Bei der Analyse der Kurven in Abb. 4.14 fällt zunächst auf, dass der Kurvenverlauf (Lage, Niveau) unabhängig davon ist, mit welcher der beiden SKG 5-Messeinheiten die Daten aufgenommen wurden. Weil aber auch an den Linsen des Typs 7 keine Verschmutzung festzustellen war (Messwert ging nach Sedimentation auf 0 mV zurück), muss daraus geschlossen werden, dass die Staubkonzentration während der Messzeit zu gering war, als dass eine nennenswerte Linsenverschmutzung hätte auftreten können. Ein Vergleich der Abb. 4.10 mit Abb. 4.14 untermauert diese Interpretation: Die Staubkonzentration war bei den Versuchen, die Abb. 4.10 zugrunde lagen, mehr als doppelt so groß wie beim hier diskutierten Versuch. Der Grund dafür ist in der hier verwendeten deutlich größeren Messkammer und der abweichenden Messkammergeometrie zu sehen. Anhand der Ergebnisse dieser Versuchsreihe 1 konnte

folglich nicht entschieden werden, ob die SKG 5-Messeinheit Typ 11 tatsächlich einen wirksamen Schutz vor Linsenverschmutzung bietet.

4.4.3.2 Versuchsreihe 2

Um die Eignung der SKG 5-Messeinheit Typ 11 zu prüfen, musste eine Möglichkeit geschaffen werden, definierte Staubwolken von höherer Konzentration in einer ausreichend großen Messkammer zu schaffen - das war die Konsequenz aus der 1. Versuchsreihe (siehe vorigen Abschnitt 4.4.3.1). Dazu wurde auf eine Apparatur zurückgegriffen, die zur Bestimmung der Staubungsneigung von Schüttgütern dient. Diese Kenngröße spielt bei der Beschreibung der Explosionsseigenschaften eines brennbaren Staubes eine wichtige Rolle [1].

4.4.3.2.1 Versuchsaufbau

Mit der so genannten Staubungsneigungsapparatur ist es möglich, dichtere Staubwolken als mit dem RBG 1000 herzustellen. Die Apparatur besitzt eine Dosiereinrichtung (Vorratsbehälter und Förderschnecke) zur kontinuierlichen Förderung eines Staubes in eine darunter positionierte Messkammer. Der Staub fällt frei auf den Messkammerboden und wird dadurch aufgewirbelt.

Je eine SKG 5-Messeinheit vom Typ 11 und Typ 7 wurden in der Messkammer der so genannten Staubungsneigungsapparatur so nah wie möglich beieinander untergebracht. Die Einbaulage der Messeinheiten war dabei diesmal zwangsweise senkrecht, weil zur waagerechten Montierung nicht genügend Platz in dieser Messkammer zu Verfügung stand (Abb. 4.15). Außerhalb der Messkammer befanden sich zwei Anzeige- und Steuereinheiten des SKG 5, welche mit den Messeinheiten innerhalb der Kammer verkabelt waren. An die Anzeige- und Steuereinheiten war ein Daten-Logger angeschlossen, welcher der Datenzwischenspeicherung diente. Zur endgültigen Speicherung und Auswertung der Messdaten wurde dem Daten-Logger ein Rechner nachgeschaltet. Schematisch ist dieser Versuchsaufbau in Abbildung 4.16 dargestellt.

4.4.3.2.2 Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Versuches wurde der Vorratsbehälter der Staubungsneigungsapparatur mit etwa 5 kg Maisstärke aufgefüllt. Anschließend wurde die Messkette (SKG 5-Anzeige- und Steuereinheiten, Daten-Logger, Rechner) eingeschaltet und mit der Staubförderung in die Messkammer durch Starten der Förderschnecke bei 500 U/min begonnen. Nach 5 Minuten Förderdauer wurde die Dosierschnecke abgeschaltet und die vollständige Sedimentation abgewartet. Abschließend erfolgte der Transfer der Messdaten vom Daten-Logger zum Rechner.

4.4.3.2.3 Versuchsergebnisse

Das Aufarbeiten der Messdaten erfolgte in der gleichen Weise wie es unter Abschnitt 4.4.3.1.3 beschrieben ist. Das Ergebnis dieser Bemühungen zeigt Abb. 4.17.



Abbildung 4.15: Messeinheiten Typ 11 und Typ 7 vertikal eingebaut in die Messkammer der Staubungsneigungsapparatur.

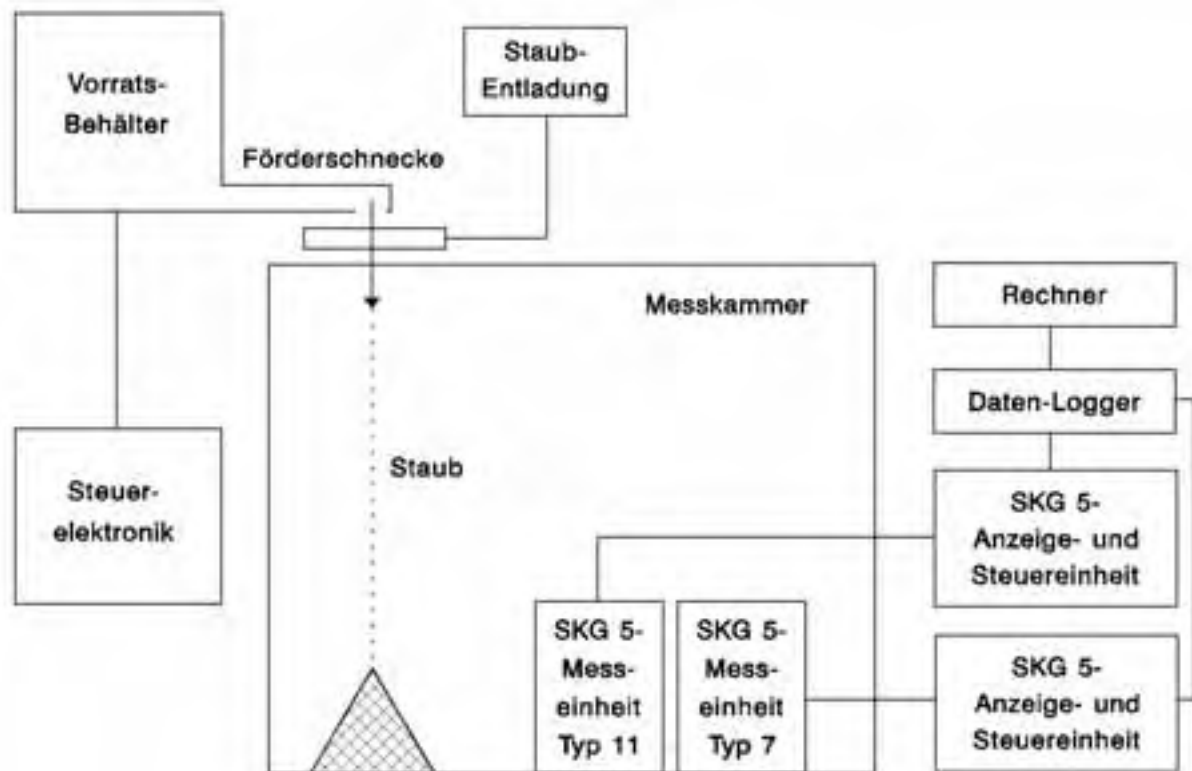


Abbildung 4.16: Blockbild des experimentellen Aufbaus der Versuchsreihe 2 zur Prüfung der SKG 5-Messeinheit Typ 11.

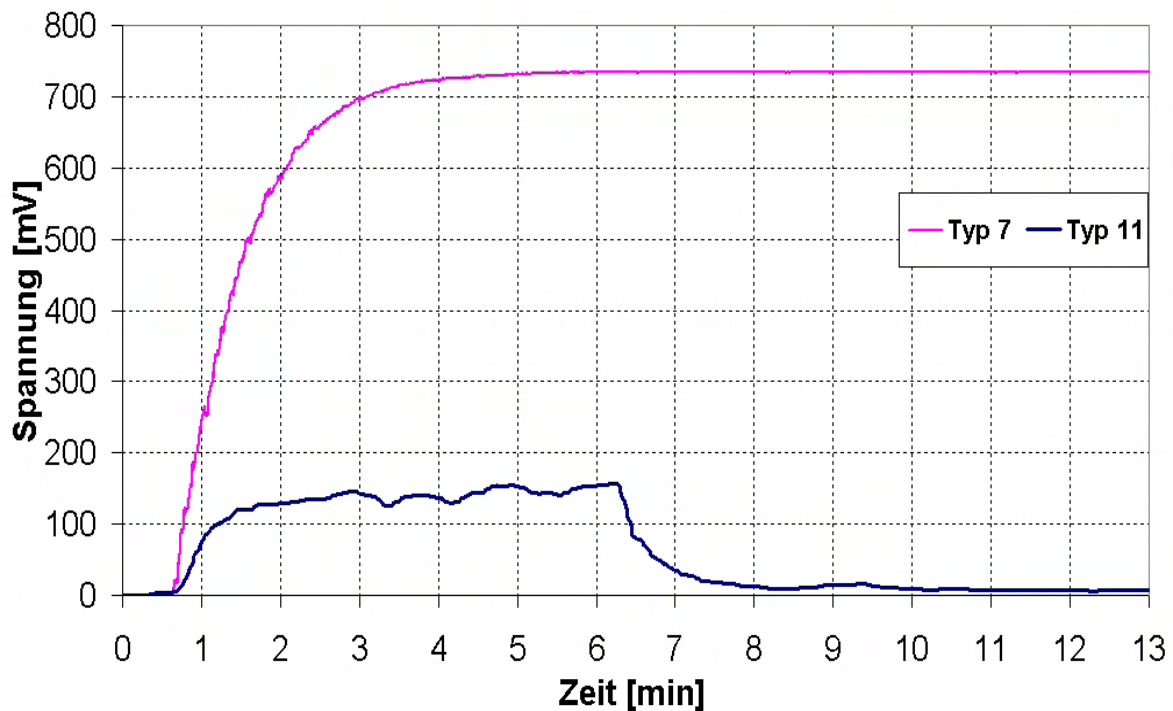


Abbildung 4.17: Ergebnisse der Versuchsreihe 2 zum Vergleich der Messeinheiten Typ 11 und Typ 7. Das Messwertmaximum beträgt bei Typ 7 nur rund 730 mV, weil der Messabstand der Optik auf den Abstand des Typs 11 umgerechnet wurde, um die gemessenen Lichtschwächungen vergleichen zu können.

4.4.3.2.4 Versuchsauswertung und Diskussion

In der Messkammer der Staubungsneigungsapparatur konnten Messwerte um 160 mV erreicht werden, was etwa der zwanzigfachen Staubkonzentration entspricht, die während Versuchsreihe 1 in der dort verwendeten Messkammer erzielt wurde (vergl. Abb. 4.14). Wegen der vertikalen Einbaulage der beiden Messeinheiten sedimentierte der Staub auf die jeweils untere Linse. Das hatte zur Folge, dass das SKG 5 Typ 7 schnell erblindete (rote Kurve in Abb. 4.17) und dass der Staub beim Typ 11 direkt auf die rotierende Scheibe der Schutzvorrichtung gelangte. Dennoch verschmutzten die Linsen der Messeinheit Typ 11 nur leicht, wie man am Verlauf der blauen Kurve in Abb. 4.17 erkennen kann. Daraus kann geschlossen werden, dass sich die SKG 5-Messeinheit Typ 11 in jedem Falle für Messungen eignet, bei denen die Messeinheit in vertikaler Einbaulage untergebracht werden muss.

4.4.3.3 Versuchsreihe 3

Die Messergebnisse aus Versuchsreihe 2 waren insofern unbefriedigend, als dass die Messeinheit Typ 7 so schnell verschmutzte und so eine echte Vergleichsmessung zur Überprüfung der Messdaten des Typs 11 nicht zur Verfügung stand. Deshalb wurde der Versuch aus Reihe 2 mit leicht abgewandelten Randbedingungen wiederholt.

4.4.3.3.1 Versuchsaufbau

Im Wesentlichen wurde der Versuchsaufbau verwendet, wie er schematisch in Abbildung 4.16 gezeigt ist. Jedoch wurden die beiden Messeinheiten Typ 7 und 11 während eines Versuches nicht parallel in der Messkammer betrieben, sondern einzeln, wobei die Messeinheit Typ 7 hier in der horizontalen Einbaulage montiert war.

4.4.3.3.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung erfolgte genau wie unter Abschnitt 4.4.3.2.2 beschrieben, jedoch befand sich jeweils nur eine SKG 5-Messeinheit in der Messkammer der Staubungsneigungsapparatur. Die Einbaulage des Typ 7 war horizontal, die des Typ 11 wieder vertikal. Insgesamt wurden vier Versuche durchgeführt, je zwei mit einem Messeinheitstypen. Die Staubförderdauer variierte von Versuch zu Versuch zwischen 5 und 8 Minuten.

4.4.3.3.3 Versuchsergebnisse

Die Messdaten wurden in gewohnter Weise auf gleichen Messabstand umgerechnet, reduziert, geglättet und in einem Diagramm gemeinsam aufgetragen. In Abbildung 4.18 sind zwei repräsentative Ergebnisse der vier Versuche dargestellt.

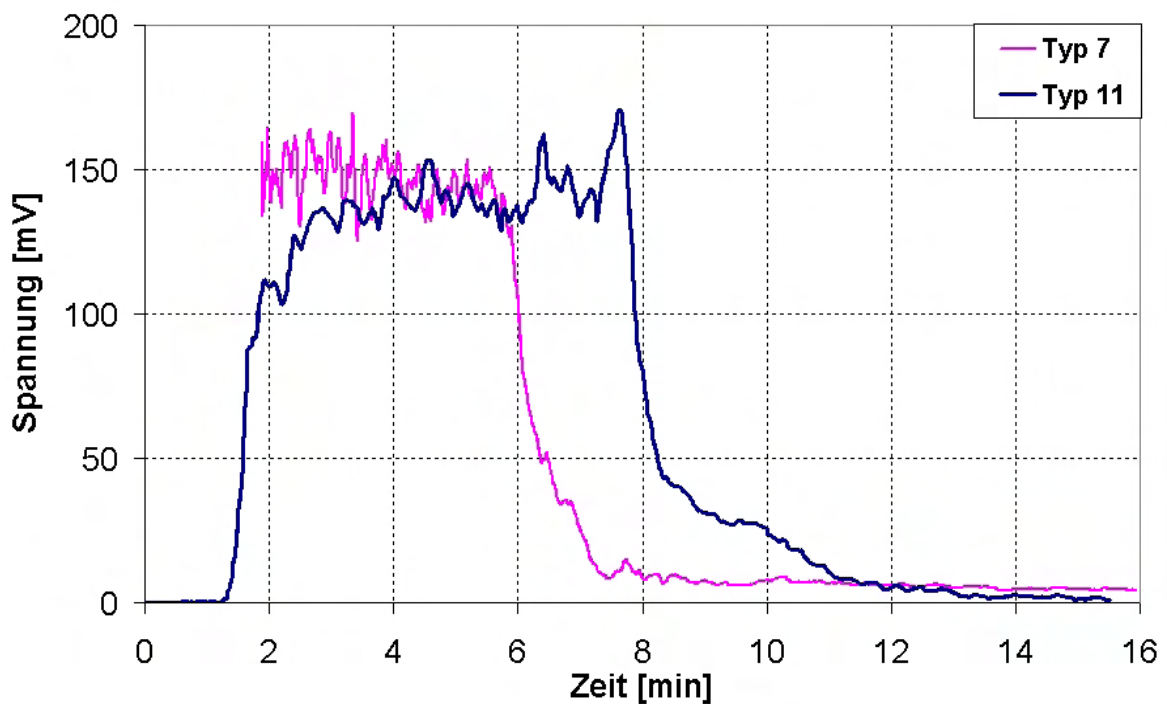


Abbildung 4.18: Ergebnisse der Versuchsreihe 3 zum Vergleich der Messeinheiten Typ 11 und Typ 7.

4.4.3.3.4 Versuchsauswertung und Diskussion

Wie man aus dem Verlauf der zu Typ 11 gehörigen Kurve in der Abbildung 4.18 ersieht, blieben die Linsen dieser Messeinheit während der Messungen nahezu frei von Staub, wofür der Rückgang der Kurve auf nahezu 0 mV (1 mV - 2 mV) nach der Sedimentation ein Indiz ist. Das ist umso erstaunlicher, als dass die Messeinheit vertikal in der Messkammer orientiert war und der Staub frei in die untere Blendenöffnung sedimentieren konnte. Der eingedrungene Staub sammelte sich zum einen auf der hinter der Blendenöffnung rotierenden Scheibe, zum anderen wurde der Staub durch die Scheibenrotation radial nach außen an die Innenseite der Dosen-Gehäusewand befördert. Dass die vom Typ 11 gelieferten Messdaten richtig sind, d. h. die Schutzvorrichtung nicht die Messwerte verfälscht, zeigt der Vergleich mit der zu Typ 7 gehörigen Messwertkurve in Abbildung 4.18. Während der Staubbörderungsphase zeigen beide Messgeräte in etwa das gleiche Spannungsniveau (die gleiche Staubkonzentration) an, wobei die Verschmutzung der Linsen bei Typ 7 vernachlässigbar war (4 mV - 5 mV nach Sedimentation). Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass die SKG 5-Messeinheit Typ 11 bei den hier realisierten Staubkonzentrationen und Messdauern zufriedenstellend funktioniert. Die beobachtete geringe Verschmutzung der Linsen bei Typ 7 lässt auf der anderen Seite allerdings nicht sicher den Schluss zu, dass die Schutzvorrichtung von Typ 11 in jedem Falle funktioniert.

4.4.3.4 Versuchsreihe 4

Um den Staubkonzentrations- und Messdauerbereich weiter auszuloten, innerhalb dessen die Messeinheit Typ 11 zuverlässig funktioniert, wurde eine weitere Versuchsreihe durchgeführt.

4.4.3.4.1 Versuchsaufbau

Wie schon zuvor bei Versuchsreihe 1 wurden die Messeinheiten Typ 11 und Typ 7 gleichzeitig und so nah wie möglich beieinander in einer Messkammer untergebracht (siehe Abschnitt 4.4.3.1.1). Die Messeinheiten wurden mit außerhalb der Messkammer positionierten SKG 5-Anzeige- und Steuereinheiten betrieben. Alle aufkommenden Messdaten wurden von diesen Geräten über einen Daten-Logger letztendlich in einen Rechner transferiert. Anstelle des früher verwendeten Partikeldosierers RBG 1000 wurde jetzt eine einfache Schale benutzt, in der eine definierte Staubmasse deponiert wurde. Mit Hilfe von Druckluftstößen wurde der Staub aus der Schale, welche sich in der Messkammer befand, in der Luft fein verteilt. Schematisch ist dieser Aufbau in Abbildung 4.19 gezeigt.

4.4.3.4.2 Versuchsdurchführung

Die beiden Messeinheiten Typ 7 und Typ 11 wurden so nah wie möglich nebeneinander in der Messkammer positioniert. Eine Schale auf dem Messkammerboden diente der Deposition einer definierten Masse an Maisstärke. Nach Verschließen der

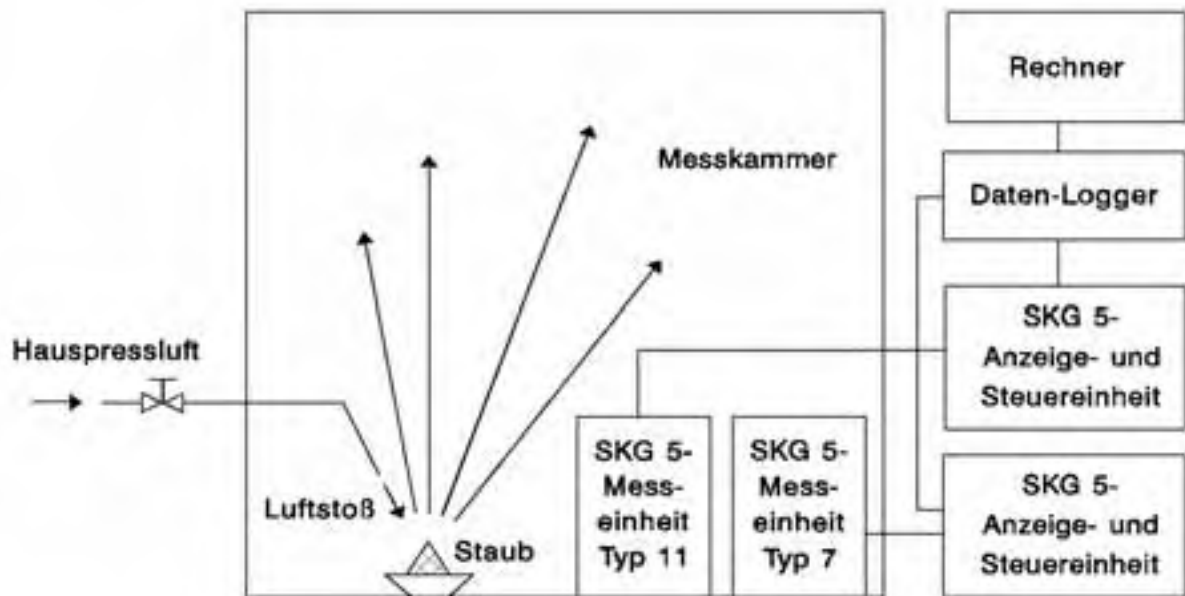


Abbildung 4.19: Blockbild des experimentellen Aufbaus der Versuchsreihe 4 zur Prüfung der SKG 5-Messeinheit Typ 11.

Messkammer wurde für kurze Zeit durch Aufwirbeln des Staubes aus der Schale mit Hilfe von Druckluft eine dichte Staubwolke produziert. Nachdem der Staub wieder sedimentiert war, wurde der Vorgang wiederholt, wobei die Optiken der beiden SKG 5-Messeinheiten nicht gereinigt wurden. Diese Prozedur wurde in der Regel vier bis fünf Mal durchlaufen und der komplette Versuchsablauf insgesamt fünf mal wiederholt. Die gesamte Versuchsdauer über wurden die Messdaten mit Hilfe eines Daten-Loggers aufgenommen, anschließend in einen Rechner übertragen und ausgewertet.

4.4.3.4.3 Versuchsergebnisse

Die mit Typ 7 gewonnenen Messergebnisse wurden auf den Messabstand des Typs 11 umgerechnet. Anschließend wurden die Daten reduziert und geglättet. Die Messergebnisse der verschiedenen Versuche unterschieden sich kaum, so dass es ausreichend war, zwei ausgewählte Messdatensätze in einem Diagramm (Abb. 4.20) aufzutragen.

4.4.3.4.4 Versuchsauswertung und Diskussion

Aus der Grafik in Abbildung 4.20 entnimmt man, dass die beiden Messeinheiten rund 1,5 Stunden einer mehr oder weniger starken Staubkonzentration ausgesetzt waren. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Verschmutzung der Linsen bei Typ 11 stets nur etwa 30 % der Verschmutzung der Linsen des Typs 7 beträgt. Die Schutzvorrichtung am Typ 11 stellt also in der Tat eine vergleichsweise gut wirkende Abschirmung der Linsen gegen Staubablagerungen dar. Die Messergebnisse werden durch die Gegenwart der Schutzvorrichtung nicht verfälscht, wie eindeutig in dieser

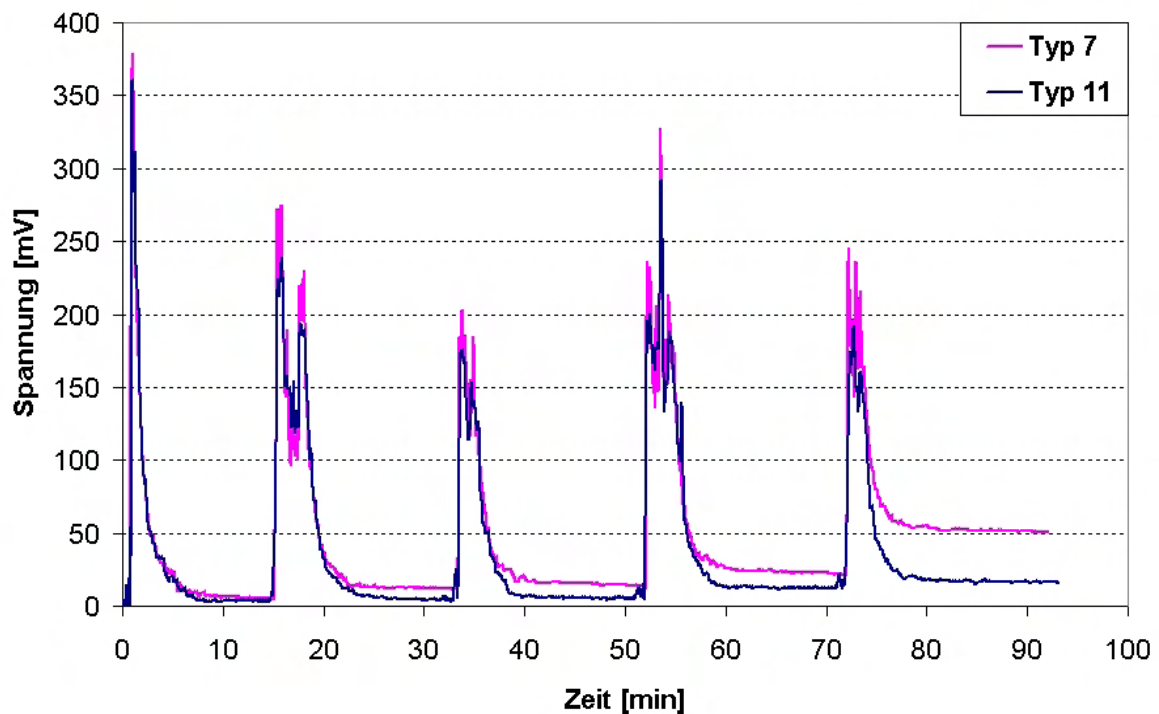


Abbildung 4.20: Ergebnisse der Versuchsreihe 4 zum Vergleich der Messeinheiten Typ 11 und Typ 7.

und den zuvor durchgeführten Messreihen 1-3 nachgewiesen werden konnte. Die SKG 5-Messeinheit Typ 11 wäre dann als optimal anzusehen, wenn es im Rahmen weiterer Entwicklungsschritte gelänge, eine Reinigungsvorrichtung zu integrieren, welche die vorhandene, relativ geringe Verschmutzung beseitigen könnte.

4.4.4 Ein systematischer Messfehler oder die Definition der wahren Messweite

Weil die Linsen der SKG 5-Messeinheit bzw. die Räume davor innerhalb der Distanzhülsen nicht staubfrei sind, tritt bei Staubkonzentrationsmessungen ein systematischer Messfehler auf.

4.4.4.1 Fehlerbeschreibung und Definition der Eindringtiefe K

Das Messprinzip des SKG 5 basiert auf dem bekannten Absorptionsgesetz von Lambert-Beer, d. h. gemäß (2.1) wird zur Beschreibung der Absorption der Extinktionskoeffizient ϵ des durchleuchteten Staubes, dessen Konzentration c und die Länge der durchleuchteten Strecke l benötigt. Bei der in Kapitel 3 beschriebenen Kalibrierkurvenerstellung werden c und l vorgegeben und ϵ bestimmt. Die Erstellung einer Kalibrierkurve ist abgeschlossen, wenn das bei der Kalibrierung verwendete l auf die Messweite l_1 an der SKG 5-Messeinheit umgerechnet wurde. Diese Messweite l_1 wird per Definition festgelegt und ist die Strecke zwischen den Außenkanten der Distanzhülsen von Sender und

Empfänger der Messeinheit (siehe Abb. 2.2). Bei der Definition der Messweite wird so getan, als ob während einer Staubkonzentrationsmessung das Innere der Distanzhülsen frei von Staub bleiben würde. Dass dem nicht so sein kann, zeigt die Tatsache, dass die im Inneren der Distanzhülsen sitzenden Linsen der SKG 5-Messeinheit während eines Messvorganges verschmutzen. Man hat es also nicht mit einer Messweite l_1 zu tun, sondern mit einer unbekanntenen Messweite

$$l_u = l_1 + K \quad (4.3)$$

Hierbei beschreibt K die Eindringtiefe des Staubes in die Distanzhülsen. Die Eindringtiefe K wird als die Länge definiert, auf die bezogen die Staubmasse innerhalb der Distanzhülsen die gleiche Staubkonzentration ergibt wie außerhalb der Distanzhülsen. Zur Veranschaulichung dieser Definition dient die Abbildung 4.21.

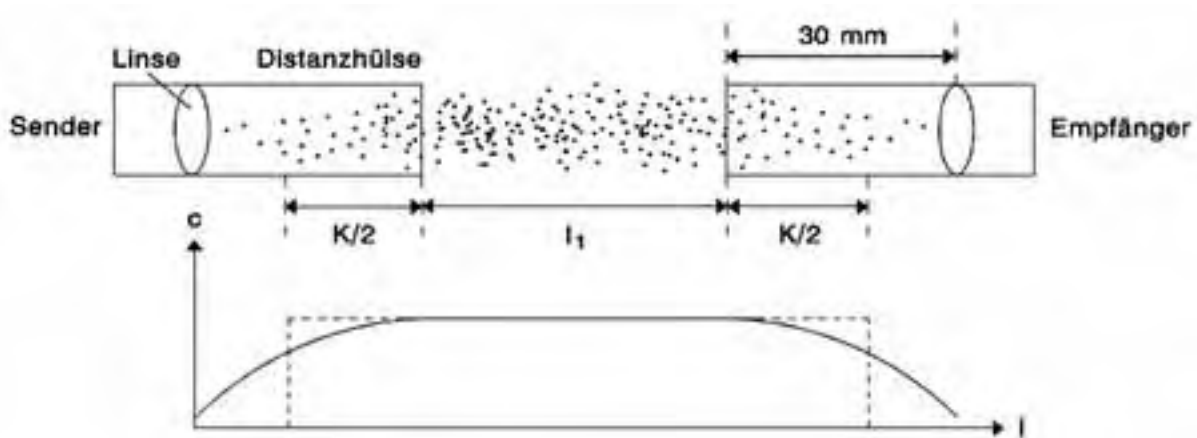


Abbildung 4.21: Skizze zur Definition der Eindringtiefe K .

4.4.4.2 Experimentelle Bestimmung der Eindringtiefe K

Um die Eindringtiefe K zu bestimmen, wurde eine experimentelle Methode zu deren Messung erdacht [9]. Das Messprinzip beruht darauf, dass die gleiche Staubkonzentration parallel mit zwei SKG 5-Messeinheiten mit unterschiedlichen Messweiten gemessen wird.

4.4.4.2.1 Versuchsaufbau

Für diesen Versuch wurde die in Abschnitt 3.3.3 beschriebene Apparatur zur Kalibrierkurvenbestimmung verwendet (ohne Torsionswaage). Zwei SKG 5-Messeinheiten vom Typ 7 mit verschiedenen Messweiten $l_a = 98,5$ mm und $l_b = 63,3$ mm wurden auf dem Boden der Messkammer möglichst nah nebeneinander platziert, um zu gewährleisten, dass an beiden Messorten die gleiche Staubkonzentration in der Luft vorherrscht. Den Versuchsaufbau zeigt Abbildung 4.22.

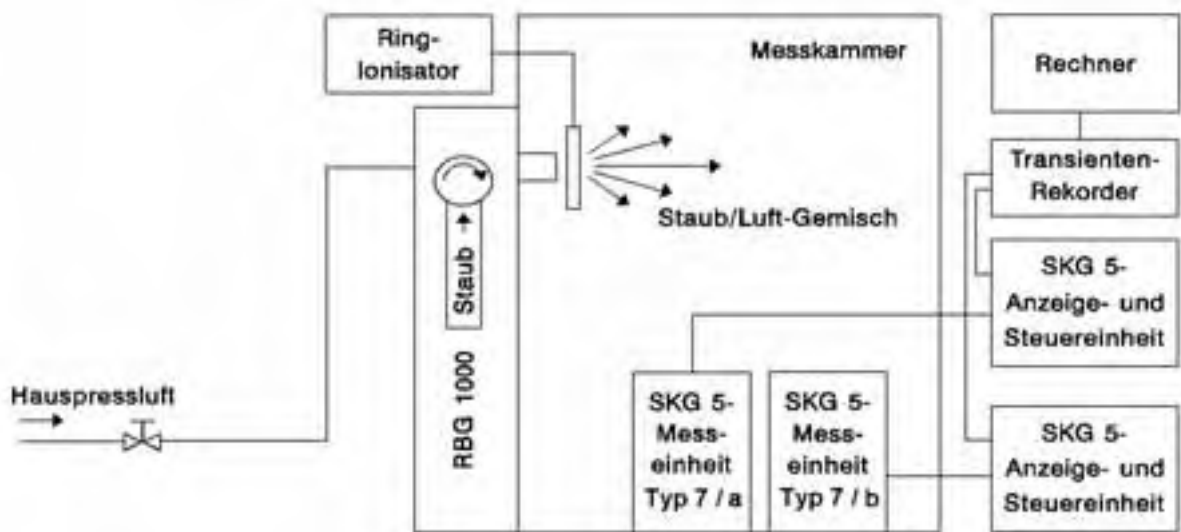


Abbildung 4.22: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Eindringtiefe K des Staubes in die Hülsen.

4.4.4.2.2 Versuchsdurchführung

Der Partikeldosierer RBG 1000 wurde für den Staubeintrag (Maisstärke) in die Messkammer präpariert und der Nullabgleich (siehe Abschnitt 2.3) für beide SKG 5 durchgeführt. Nach durchgeführtem Nullabgleich wurde die Messkammer verschlossen, der Ringionisator eingeschaltet und für die Dauer von 6 min Staub in die Kammer eingeblasen. Anschließend wurde die vollständige Sedimentation des Staubes abgewartet. Die gemessenen Spannungsdaten wurden mit Hilfe eines Transienten-Rekorders aufgezeichnet und in einen Rechner übertragen. Dieser Versuchsablauf wurde viermal wiederholt.

4.4.4.2.3 Versuchsergebnisse

Zunächst wurden die Messdaten von der Nullpunktverschiebung aufgrund der aufgetretenen Lin senverschmutzung rechnerisch befreit (siehe Abschnitt 1.2). Anschließend wurden die annähernd parallel verlaufenden Abschnitte der beiden Messkurven pro Versuch durch lineare Fits ersetzt. Aus der mittleren vertikalen Lage dieser Geraden ergaben sich die gesuchten Messspannungen $U_{SKG,a}$ und $U_{SKG,b}$. Die Messergebnisse sind in der Tabelle 4.2 zusammengestellt. Eine arithmetische Mittelung der Werte in der unteren beiden Reihen der Tabelle 4.2 ergibt $U_{SKG,a} = 9,8$ mV und $U_{SKG,b} = 7,0$ mV.

Versuch	1	2	3	4
$U_{SKG,a}$ [mV]	11,59	8,22	8,87	10,47
$U_{SKG,b}$ [mV]	7,04	7,26	6,52	7,17

Tabelle 4.2: Messergebnisse der Versuchsreihe zur Bestimmung der Eindringtiefe K .

4.4.4.2.4 Versuchsauswertung und Diskussion

Aus den Mittelwerten für $U_{\text{SKG},a}$ und $U_{\text{SKG},b}$ kann die Eindringtiefe K abgeleitet werden. Zunächst werden die Gleichungen

$$\begin{aligned} U_{\text{SKG},a} &= B_1 \cdot e^{\epsilon(l_a+K) \cdot c} + B_3 \\ U_{\text{SKG},b} &= B_1 \cdot e^{\epsilon(l_b+K) \cdot c} + B_3 \end{aligned} \quad (4.4)$$

für die Staubkonzentrations-Spannungskurven für beide SKG 5 aufgestellt, diese nach der Konzentration c aufgelöst und gleichgesetzt:

$$\frac{\ln\left(\frac{U_{\text{SKG},a}-B_3}{B_1}\right)}{\epsilon \cdot (l_a + K)} = \frac{\ln\left(\frac{U_{\text{SKG},b}-B_3}{B_1}\right)}{\epsilon \cdot (l_b + K)} \quad (4.5)$$

Anschließend wird (4.5) nach K aufgelöst. Das liefert

$$K = \frac{l_a \cdot \ln\left(\frac{U_{\text{SKG},b}-B_3}{B_1}\right) - l_b \cdot \ln\left(\frac{U_{\text{SKG},a}-B_3}{B_1}\right)}{\ln\left(\frac{U_{\text{SKG},a}-B_3}{B_1}\right) - \ln\left(\frac{U_{\text{SKG},b}-B_3}{B_1}\right)} = \frac{l_a \cdot Z_b - l_b \cdot Z_a}{Z_a - Z_b} \quad (4.6)$$

Einsetzen der Koeffizienten B_1 und B_3 einer Kalibrierkurve für Maisstärke, der Messweiten l_a und l_b sowie der Mittelwerte für $U_{\text{SKG},a}$ und $U_{\text{SKG},b}$ in Gleichung (4.6) ergibt

$$K = 16,8 \text{ mm} \quad (4.7)$$

Wegen der relativ großen Schwankungen in $U_{\text{SKG},b}$ und vor allem in $U_{\text{SKG},a}$ und wegen der Form von (4.6), ist K mit einem relativ großen Fehler behaftet. Dennoch kann dieser Wert zur groben Korrektur der Messweite l_1 benutzt werden und damit zur Verbesserung der Staubkonzentrationsmessungen mit dem SKG 5 vom Typ 7.

Kapitel 5

Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

5.1 Diskussion der Ergebnisse

5.1.1 Problematik Kalibrierkurvenerstellung

5.1.1.1 Suspensionsverfahren

Ein Ziel dieser Diplomarbeit war es, das so genannte Suspensionsverfahren zur Erstellung von Kalibrierkurven für das Staubkonzentrationsmessgerät SKG 5 auf seine generelle Tauglichkeit hin zu überprüfen. Für jede Staubkonzentrationsmessung mit dem SKG 5 ist die Aufnahme einer solchen Kalibrierkurve (Konzentrations-Messspannungs-Diagramm) notwendig. Dazu wird der zu untersuchende Staub portionsweise in ein definiertes Flüssigkeitsvolumen (Ethanol) eingebracht und unter Rühren eine Suspension mit bekannten Konzentrationen hergestellt, die in den Strahlengang der SKG 5-Messeinheit gebracht wird. Zusammen mit den am SKG 5 angezeigten Spannungswerten ergibt sich so eine Kalibrierkurve.

Die Untersuchung wurde mit vier verschiedenen Stäuben durchgeführt: Maisstärke, Formpuderstärke, Weizenmehl und Puderzucker. Für alle Stäube, mit Ausnahme von Puderzucker, konnten Kalibrierkurven aufgenommen werden. Der Puderzucker löste sich teilweise auf, so dass keine zeitlich stabilen Spannungswerte am SKG 5 abgelesen werden konnten (Abschnitt 3.2). Dies bestätigte den Verdacht, dass durch dieses Verfahren tatsächlich die Eigenschaften mancher Stäube so verändert werden, dass keine verwertbaren Kalibrierkurven aufgenommen werden können.

5.1.1.2 Sedimentationsverfahren

Aufgrund des Beweises, dass die Suspensionsmethode für manche Stoffe nicht verwendet werden kann, wurde eine alternative Kalibriermethode erdacht. Bei dem neuen Kalibrierverfahren wurde der zu untersuchende Staub als Staub/Luft-Gemisch mit Hilfe des Partikeldosierers RBG 1000 in eine Messkammer eingeblasen, um auf einem

Glasplättchen gleichmäßig sedimentieren zu können. Aus der auf das Glas sedimentierten Staubmasse konnte auf eine im Strahlengangzylinder der Messeinheit des SKG 5 verteilte äquivalente Staubkonzentration geschlossen werden (Abschnitt 3.3.1). Es wurden verschieden starke Staubschichten auf dem Glasplättchen realisiert, zu jeder die äquivalente Konzentration errechnet, die am SKG 5 angezeigte zugehörige Spannung abgelesen und daraus Kalibrierkurven für die vier Stäube konstruiert. Durch Verwenden des Staubes in trockener Form konnte ein Lösungsprozess der Staubpartikel unterbunden werden. Mit dieser Methode ließen sich im Rahmen einer bestimmten Schwankungsbreite reproduzierbare Kalibrierkurven erzeugen. Die Fehler bei der Kalibrierkurvenerstellung lagen in erster Linie in Staubanlagerungen an den Seiten des Glasplättchens begründet, die die berechnete Staubkonzentration systematisch zu höheren Werten hin verschoben. Trotz Berücksichtigung dieses Messfehlers stimmten die auf verschiedene Weise gewonnenen Kalibrierkurven für Formpuderstärke und Weizenmehl (Puderrucker sowieso) nicht überein. Zur Erklärung dieses Sachverhaltes wurde zunächst vermutet, dass die Staubpartikel durch die Bürste des Partikeldosierers so beansprucht werden, dass eine Partikelgrößenänderung erfolgt. Untersuchungen dazu konnten diesen Verdacht nicht bestätigen. Elektrostatische Aufladung der Stäube, die einen deutlichen Einfluss auf die Sedimentationseigenschaften mancher Stäube hat, schied als mögliche Ursache für die beobachtete Diskrepanz aus, weil bei der Kalibrierkurvenerstellung nach dem Sedimentationsverfahren ein Ringionisator zur Staubentladung eingesetzt wurde. So blieb als Erklärungsmöglichkeit nur die Veränderung der Staubpartikel im Ethanol, weshalb vergleichende mikroskopische Untersuchungen an den Staubpartikeln in Luft und Ethanol durchgeführt wurden. Es zeigte sich, dass die Transparenz der Staubpartikel in Ethanol größer ist als in Luft, wobei die Größe des Transparenzunterschiedes von der Staubart abhängt. Gleichzeitig quellen die Staubpartikel mancher Stäube in Ethanol mehr oder weniger stark auf. Die Berücksichtigung beider Effekte erklärt die Unterschiede der mit Suspensions- und Sedimentationsverfahren erhaltenen Kalibrierkurven (Abschnitt 3.3.2).

5.1.1.3 Aufbau einer Apparatur zur Kalibrierkurvenerstellung

Nachdem gezeigt werden konnte, dass die Sedimentationsmethode zufrieden stellende Ergebnisse liefert, wurde zur Nutzung dieses Verfahrens eine neue Kalibrierapparatur konstruiert und aufgebaut. Die Apparatur besteht aus einer staubdichten Messkammer, in welche der zu untersuchende Staub mit Hilfe eines Partikeldosierers in Form eines Staub/Luft-Gemisches eingeblasen wird. Der eingeblasene Staub sedimentiert auf einem Glasplättchen, welches auf einer speziellen Halterung aufliegt, die wiederum am Wägearm einer Torsionswaage hängt. So wird praktisch zu jedem Zeitpunkt die Masse des Plättchens angezeigt, ohne das Glasplättchen bewegen zu müssen. Die Messung der Lichtabsorption der Staubschicht auf dem Glasplättchen mit dem SKG 5 wird von außerhalb der Messkammer manuell gesteuert (Abschnitte 3.3.3.1, 3.3.3.2 und 3.3.3.3).

5.1.1.4 Messkammer

Die Messkammer sollte gemäß Konstruktion so beschaffen sein, dass kein Staub in

den Außenraum austritt. Dies war im praktischen Umgang mit der Apparatur nicht der Fall, weshalb nachträglich Dichtungsmaßnahmen ergriffen werden mussten (Abschnitt 3.3.3.4.1).

Zur Messung der Lichtabsorption durch die Staubschicht auf dem Glasplättchen wird die Messeinheit des SKG 5 mit Hilfe eines auf Führungsschienen sitzenden Schlittens an das Glasplättchen herangefahren. Der Schlitten wird von außerhalb der Messkammer über einen im rechten Winkel zur Bewegungsrichtung am Schlitten angebrachten Hebel bewegt. Dadurch kommt es zu Kraftkomponenten senkrecht zur Bewegungsrichtung, weshalb der Schlitten nur mit sehr großem Kraftaufwand bewegt werden kann.

Ein ähnliches Problem zeigte sich bei der Schiebetür der staubdichten Kammer, in der die SKG 5-Messeinheit während der Staubeintrags- und Sedimentationsphasen verwahrt wird. Die Kammertür wird durch eine aus der Messkammer herausgeführte Stange bewegt. Sie läuft oben in einer Schiene auf Rädern und wird unten in einer weiteren Schiene geführt. Durch Anbringen der Stange am äußersten Punkt oben rechts verkannte sich die Tür bei Betätigung. Beim plötzlichen Freiwerden aus dieser Position kam es zu Erschütterungen, wodurch gelegentlich ungewollt Staub auf das Glasplättchen fiel. Dieses Problem konnte durch einige Maßnahmen weitgehend behoben werden.

Eine weitere Konstruktionsschwäche ist darin zu sehen, dass die SKG 5-Messeinheit von der Messkammerrückwand her an das Glasplättchen herangefahren wird. Das Glasplättchen hängt an vier dünnen, durch Profile vor Staubanlagerung geschützten Fäden am Wägearm der Torsionswaage, zwischen die die Messeinheit zur Messwertaufnahme gefahren werden muss. Durch die Bewegung des Wägearms vollführen Glasplättchen und Fäden neben einer vertikalen auch eine seitliche Bewegung, so dass die Gefahr bestand, dass sich Fäden bzw. Profile und Messeinheit bei der Wägung großer Staubmassen berühren. An den Profilen angelagerter Staub kann so auf das Glasplättchen fallen und damit die Messung unbrauchbar machen.

Um eine übermäßige Anhäufung von Staub an den Fäden bzw. an den Schutzprofilen zu verhindern, wurde eine Metallplatte vor der Glasplättchenhalterung positioniert. Zwar konnte mit dieser Maßnahme ungewollte Staubanlagerungen reduziert werden, jedoch wurde auch die Staubsedimentation auf dem Glasplättchen negativ beeinflusst. Der Einsatz dieser Metallplatte wurde deshalb wieder verworfen.

5.1.1.5 Torsionswaage

Die Torsionswaage dient zur unmittelbaren Anzeige der Staubmasse, welche sich auf dem Glasplättchen homogen abgelagert hat. Das Herz der Waage, der einseitig fest eingespannte Torsionsdraht trägt den Wägearm mit einem kleinen Spiegel daran. Die Spannung des Drahtes bzw. dessen Nullpunkteinstellung wird auf der anderen beweglichen Seite der Drahtbefestigung eingestellt und zwar mit Hilfe einer Schraube mit metrischem Gewinde. Sie wird durch ein Strebenprofil geführt und gegen Verdrehen durch jeweils eine Mutter vor und hinter dem Profil gesichert. Um den Nullpunkt einzustellen, muss die Schraube mit dem Draht ganz leicht verdreht werden, was mit dieser Schraube nur sehr schwer durchzuführen ist (Abschnitt 3.3.3.3.6).

Die Gewichtsanzeige der Waage erfolgt mit Hilfe von Laserlicht, das in einer Spiegelanordnung mehrfach umgelenkt wird und auf eine Skala in mg trifft. Die Spiegelanordnung erzeugt einen vergleichsweise langen Lichtstrahl und sorgt so für eine breite

Skalenteilung auf einer nah angebrachten Skala. Die Gewichtsanzeige auf der Skala reagiert sehr sensibel auf Positionsänderungen der Spiegel. Weil die Spiegel einfach auf Winkeln gelagert sind, die wiederum an Profilstreben befestigt sind, ist eine Feinjustage der Spiegel mit sehr viel Mühe verbunden (Abschnitte 3.3.3.3.4 und 3.3.3.3.5).

Am Wägearm ist die Halterung für das Glasplättchen angebracht. Die Fäden der Halterung werden durch kleine Bohrungen in der oberen Messkammerwand in die Messkammer geführt. Neben dem Anlagern des Staubes an den Fäden der Halterung dringt durch die Bohrungen Staub in die Torsionswaage ein. Die Verwendung von Schutzprofilen für die Fäden verringerte das Eindringen des Staubes. Die Profile haben eine zu große Querschnittsfläche, als dass das Eindringen des Staubes in die Waage gänzlich unterbunden werden könnte. Dünnere Profile oder Röhrrchen können mit dem bisherigen Aufbau nicht exakt genug ausgerichtet werden, um das Berühren von Fäden und Profillinienwänden zu vermeiden (Abschnitt 3.3.3.4.4).

5.1.1.6 Messergebnisse

Mit der Apparatur wurden mehrere Kalibrierkurven für Maisstärke, Formpuderstärke, Weizenmehl und Puderzucker aufgenommen. Die Messungen waren alle reproduzierbar. Alle Einzelkurven lagen deutlich innerhalb des durch Fehlerbetrachtungen abgeleiteten Gesamtfehlers von $\pm 18\%$. Die Lage der Kalibrierkurven im Konzentrations-Spannungs-Diagramm entsprach genau den Erwartungen, die sich aus den zuvor durchgeführten Untersuchungen hinsichtlich Suspensions- und Sedimentationsmethode ableiten ließen (Abschnitt 3.3.3.5). Damit war der Nachweis erbracht, dass sowohl die Apparatur als auch das Messprinzip funktionieren.

5.1.2 Problematik Linsenverschmutzung

Ein weiteres Ziel dieser Diplomarbeit war es, die bei allen Staubkonzentrationsmessungen mit dem SKG 5 in der Standardausführung (Typ 7) auftretende Verschmutzung der Linsen der Messeinheit zu unterbinden. Da die SKG 5-Messeinheit vom Typ 7 über keinen wirksamen Staubschutz für die Linsen verfügt, dringen die Staubpartikel leicht bis zu diesen vor und lagern sich dort ab, was die Messwerte zu höheren Werten hin verschiebt und eine erhöhte Staubkonzentration gegenüber der tatsächlichen Konzentration vortäuscht (Abschnitt 4.1).

5.1.2.1 Reinigung durch Luftstrom, Messeinheit Typ 10

Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollte zunächst die bereits vorhandene Messeinheit Typ 10 auf ihre Funktionstüchtigkeit hin untersucht werden. Typ 10 arbeitet mit einem permanenten Luftstrom, der über Fenster strömt, die vor den Linsen staubdicht angebracht sind. Der durch Druckluft gespeiste Luftstrom wird direkt in die umgebende Atmosphäre abgegeben.

Im Experiment wurden die Messeinheiten Typ 7 und Typ 10 verglichen, wobei der reinigend wirkende Luftvolumenstrom am Typ 10 variiert wurde. Es zeigte sich, dass bei hohem Luftvolumenstrom die Fenster vor den Linsen zwar sauber gehalten werden

konnten, jedoch das zu messende Staub/Luft-Gemisch so stark beeinflusst wurde, dass die Staubkonzentrationsmessung falsch war. Umgekehrt war die Staubkonzentrationsmessung bei geringem Luftvolumenstrom weitgehend richtig, jedoch der Reinigungserfolg der Fenster vor den Linsen mangelhaft (Abschnitt 4.3). Die SKG 5-Messeinheit Typ 10 erfüllte also die Erwartungen nicht.

5.1.2.2 Messeinheit Typ 11

Wegen der festgestellten Mängel der SKG 5-Messeinheit Typ 10 wurde eine neue Vorrichtung zum Schutz der Linsen vor Staubanlagerung erdacht und aufgebaut. Bei der Konstruktion dieser Linsenschutzvorrichtung wurde ausgenutzt, dass Messwerte nicht kontinuierlich aufgezeichnet werden müssen, sondern einzelne Messpunkte für ein gutes Messergebnis genügen. Die Vorrichtung besteht aus einer sich im Inneren eines geschlossenen Gehäuses drehenden Scheibe. Gehäuse und Scheibe besitzen beide eine Blendenöffnung, so dass im Augenblick der Deckung beider Blendenöffnungen der Strahlengang der SKG 5-Messeinheit zur Messung nur kurzzeitig freigegeben wird. Vor jeder der beiden Linsen sitzt eine solche Vorrichtung. Die beiden Scheiben werden mit Hilfe eines Motors angetrieben (Abschnitte 4.4.1 und 4.4.2).

Mit Hilfe mehrerer unterschiedlicher Versuchsaufbauten konnte der Nachweis erbracht werden, dass diese Schutzmaßnahme - je nach Einbaulage der Messeinheit und Staubwolkeneigenschaften - mehr oder weniger wirksam ist. So blieben die Linsen teilweise völlig frei von Staub oder erreichten im ungünstigsten Fall etwa 30 % der Verschmutzung des Typs 7 bei gleichen Messbedingungen. Eine Beeinflussung der zu messenden Staubwolke, etwa durch die Rotation der Scheibe, konnte nicht festgestellt werden (Abschnitt 4.4.3). Dieses Schutzkonzept kann damit als Basis für eine Weiterentwicklung dienen.

5.1.2.3 Ein systematischer Messfehler beim SKG 5 Typ 7

Für eine korrekte Staubkonzentrationsmessung mit dem SKG 5 vom Typ 7 ist die genaue Kenntnis der Messweite l_1 an der Messeinheit notwendig. Die Messweite ist die Länge des Messvolumens, in dem sich der zu untersuchende Staub befindet. Diese ist beim Typ 7 per Definition festgelegt. Während einer Messung befindet sich aber auch Staub außerhalb dieses Messvolumens, die Messweite l_1 per Definition ist also falsch, was einen systematischen Messfehler hervorruft.

Mit einem speziellen Versuchsaufbau konnte die wahre Messweite bestimmt werden. Sie ist im Rahmen des Messfehlers 16,8 mm länger als l_1 . Dies entspricht einem systematischen Messfehler von rund 17 %.

5.2 Ausblick

Die beiden primären Ziele der Diplomarbeit, nämlich die Entwicklung einer neuen Kalibriermethode und die Umsetzung als Apparatur sowie die Lösung der Problematik

der Linsenverschmutzung des SKG 5 wurden erreicht. Auf Grund des knappen Bearbeitungszeitraumes konnten nicht alle Schwachstellen beseitigt bzw. alle aufgetretenen Probleme gelöst werden. Im Folgenden werden notwendige Verbesserungen bzw. Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt.

5.2.1 Apparatur zur Kalibrierkurvenerstellung

In Abschnitt 5.1.1.4 wurden mehrere konstruktive Mängel der aufgebauten Apparatur zur Kalibrierkurvenerstellung beschrieben. Diese Mängel sollten durch die unten beschriebenen Verbesserungsvorschläge abgestellt werden können.

- Die Abdichtung der Messkammer gegen Staubaustritt ist noch verbesserungswürdig. Eine deutliche Vergrößerung der Abluftöffnung und die Verwendung von hochwertigerem Dichtungsmaterial sollten hier Abhilfe schaffen.
- Die Schiebetür der Kammer zur Verwahrung der SKG 5-Messeinheit verkantet sich gelegentlich, da die Stange zu deren Bewegung am äußersten oberen Punkt der Tür befestigt ist. Um dies zu verhindern und um bessere Laufeigenschaften der Tür zu gewährleisten, sollte die Stange sich kurz vor der Tür gabeln und an zwei Punkten an der Tür befestigt werden.
- Der Schlitten mit der Halterung für die SKG 5-Messeinheit kann wegen des im rechten Winkel zur Bewegungsrichtung angebrachten Hebels nur mit hohem Kraftaufwand bewegt werden. Abhilfe schaffen würde entweder der Ersatz des Hebels durch eine Stange, die den Schlitten in Bewegungsrichtung zieht oder schiebt, oder die Führung des Schlittens auf Kugellagerschienen.
- Die seitliche Bewegung des Glasplättchens bzw. dessen Halterung sollte unterbunden werden, um die Berührung mit der SKG 5-Messeinheit zu vermeiden. Drei Möglichkeiten dazu bestehen prinzipiell:
Zum einen kann der Wägearm durch eine Rolle ersetzt werden, von der sich der Befestigungsfaden der Glasplättchenhalterung mit zunehmender Staubmasse abwickelt und umgekehrt. Dadurch wäre das Verdrillen des Torsionsdrahtes nicht mehr mit einer Seitwärtsbewegung des Glasplättchens verbunden.
Zum anderen kann die Bewegungsrichtung der SKG 5-Messeinheit verändert werden. Könnte der Schlitten von rechts an das Glasplättchen herangefahren werden, anstatt von der Messkammerrückwand her, wäre die horizontale Bewegung des Glasplättchens parallel zur Ausrichtung der SKG 5-Messeinheit. Nachteil an dieser Anordnung wäre, dass das Glasplättchen bei Veränderung der darauf sedimentierten Staubmasse von der SKG 5-Messeinheit an verschiedenen Stellen durchleuchtet würde.
Die dritte Möglichkeit, dieses Problem zu lösen, besteht darin, eine andere Aufhängung für das Glasplättchen zu konstruieren.
- Das Berühren der Fäden der Glasplättchenhalterung mit den Innenwänden der Röhren bzw. Profile zum Schutz der Fäden vor Staubanlagerung könnte durch Herstellung exakt gerader Schutzröhren mit genau definierten Abstandshaltern

unterbunden werden. Die Profile sollten mit der Möglichkeit einer Feinjustage in x - und y -Richtung ausgestattet werden.

- Durch die vorstehenden Maßnahmen könnten Profile mit kleinen Querschnittsflächen eingesetzt werden, was das Eindringen von Staub in die Torsionswaage verhindern würde.
- Der Fehler bei der Ermittlung der Staubmasse an den Fäden nach einer Versuchsreihe ist unbefriedigend groß und damit auch die Korrekturrechnung gemäß Abschnitt 3.3.3.4.3. Durch bisher noch nicht konkretisierbare konstruktive Maßnahmen oder alternative Bestimmungsmethoden sollte diese Staubmassenbestimmung verbessert werden.
- Im Zusammenhang mit dem vorgenannten Punkt ist anzustreben, die Staubanlagerung an der Glasplättchenhalterung so weit wie möglich zu vermeiden. Mangels Zeit konnte dieses Problem nicht erschöpfend bearbeitet werden.
- Für die Einstellung des Nullpunktes an der Torsionswaage wird eine Schraube mit zu grobem Gewinde benutzt. Diese Schraube sollte durch ein Getriebe ersetzt werden, welches große Drehungen mit der Hand in kleine Drehungen an der Aufhängung des Torsionsfadens übersetzt.
- Die Arretierung der Spiegel in der Torsionswaage ist zur Zeit nur mit großem Aufwand möglich. Die Spiegel sollten auf Mikrometerschrauben gelagert werden, die eine Feineinstellung der Höhe in allen vier Auflagepunkten eines Spiegels ermöglichen.

5.2.2 SKG 5-Messeinheit Typ 11

Auch für die aufgebaute SKG 5-Messeinheit vom Typ 11 bestehen Verbesserungsmöglichkeiten:

- Alle durchgeführten Tests mit dem Typ 11 fanden bei mehr oder weniger geringen Staubkonzentrationen statt. Deshalb sollte die Funktion der Messeinheit Typ 11 zunächst in weiteren Versuchen mit weitaus größeren Staubkonzentrationen sowie im Dauerbetrieb getestet werden.
- Die Abmessungen der Vorrichtung sind recht groß, was zu einer Beeinflussung der zu messenden Staubkonzentration im Messvolumen führen könnte. Eine Weiterentwicklung des Typs 11 kann dahingehend vorangetrieben werden, dessen Größe zu verringern.
- Um die beobachtete Restverschmutzung der Linsen zu beseitigen, kann eine zusätzliche Reinigungsphase in den Betriebszyklus des Typs 11 integriert werden, beispielsweise durch den Einsatz von Druckluft.

- Weiterhin ist es wünschenswert, den Messzeitpunkt genau bestimmen zu können. Das ließe sich mit Hilfe eines Schrittmotors bewerkstelligen, der anstatt der Kreisbewegung der Scheibe diese hin und her bewegt und somit die Blendenöffnungen von Scheibe und Gehäuse zur Deckung bringt oder nicht.

Literaturverzeichnis

- [1] K. LAUER: *Untersuchung des Einflusses der elektrostatischen Aufladung von Stäuben auf die Neigung dieser Stäube zurn Staubwolkenbildung*, Diplomarbeit, Fachhochschule Mannheim und Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin, 2003.
- [2] W. BARTKNECHT: *Staubexplosionen – Aufbau und Schutzmaßnahmen*, Springer-Verlag, 1987.
- [3] H. OTT: *Benutzerhandbuch Staubmessgerät SKG 5*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 1992.
- [4] DUBBEL: *Taschenbuch für den Maschinenbau*, Springer-Verlag, 18. Auflage, 1995.
- [5] C. GERTSEN, H. O. KNESER, H. VOGEL: *Physik*, Springer-Verlag, 14. Auflage, 1982.
- [6] S. KLEINHANS: *Private Mitteilung*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 2005.
- [7] D. LORENZ: *Private Mitteilung*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 2005.
- [8] H. OTT: *Private Mitteilung*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 2005.
- [9] H. SCHIEBLER: *Private Mitteilung*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 2005.
- [10] M. SEITHEL: *Private Mitteilung*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 2005.
- [11] SCHMITT: *Skript Anlagensicherheit*, Fachhochschule Mannheim und Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin, 2004.
- [12] *Benutzerhandbuch Feststoffdosierer Palas RBG 1000*, Palas GmbH, Partikel- und Lasermesstechnik.
- [13] www.haug.de, Hersteller für Ionisatoren

Anhang A

Messergebnisse

A.1 Messdaten zu Abschnitt 3.2

eingewogene Staubmasse	m [mg]	0	6	12	24	48	72	144
Konzentration	c [g/m ³]	0	25	50	100	200	300	600
Maisstärke	U_{SKG} [mV]	0	206	369	603	838	931	994
Formpuderstärke	U_{SKG} [mV]	0	245	390	639	875	958	997
Weizenmehl	U_{SKG} [mV]	0	73	160	283	505	651	884
Puderrucker	U_{SKG} [mV]	0	78	80	210	298	545	845
Puderrucker	U_{SKG} [mV]	0	122	157	262	466	556	812
Puderrucker	U_{SKG} [mV]	0	121	192	310	501	623	872
Puderrucker	U_{SKG} [mV]	0	130	196	315	477	586	853
Maisstärke	U_{SKG}^* [mV]	0,5	233	411	652	877	955	994
Formpuderstärke	U_{SKG}^* [mV]	1,68	286	489	737	927	976	993
Weizenmehl	U_{SKG}^* [mV]	-0,35	99	189	342	568	716	922
Puderrucker	U_{SKG}^* [mV]	0,06	58,8	115	219	401	552	865
Puderrucker	U_{SKG}^* [mV]	0,47	86,1	164	298	499	636	833
Puderrucker	U_{SKG}^* [mV]	0,48	86,8	165	302	508	649	859
Puderrucker	U_{SKG}^* [mV]	0,70	83,9	159	291	491	628	832

Tabelle A.1: Ergebnisse der Kalibrierkurvenerstellung mit dem Suspensionsverfahren für die vier ausgewählten Stäube. U_{SKG}^* sind die auf die Messweite l_1 umgerechneten gemessenen Spannungen U_{SKG} .

A.2 Messdaten zu Abschnitt 3.3

A.2.1 Untersuchung des Einflusses von Dispergierbürste und Ionisator

M_{Staub} [mg]	c [g/m ³]	U_{SKG} [mV]
0	0	0
13,3	68,54	368
18,6	95,85	481
26	133,99	600
31,2	160,79	669
39	200,99	750
46,4	239,12	807
54,4	280,35	851
61,1	314,88	883
68,5	353,01	911

Tabelle A.2: Messdaten des Versuches mit **Maisstärke** ohne Verwendung der Dispergierbürste und ohne Ionisator.

M_{Staub} [mg]	c [g/m ³]	U_{SKG} [mV]
0	0,00	0
5,2	26,80	190
12,9	66,48	429
22	113,38	599
29,4	151,51	710
37	190,68	791
46,2	238,09	858
53,8	277,26	898
61,5	316,94	925
70,4	362,81	946

Tabelle A.3: Messdaten des Versuches mit **Maisstärke** mit Verwendung der Dispergierbürste und ohne Verwendung des Ionisators.

M_{Staub} [mg]	c [g/m ³]	U_{SKG} [mV]
0	0,00	0
7,2	37,11	330
13	67,00	509
18,1	93,28	607
22,6	116,47	697
28	144,30	778

Tabelle A.4: Messdaten des Versuches mit **Maisstärke** ohne Verwendung der Dispergierbürste und mit Verwendung des Ionisators.

M_{Staub} [mg]	c [g/m ³]	U_{SKG} [mV]
0	0,00	0
5,1	26,28	278
10,8	55,66	450
19,4	99,98	637
28,2	145,33	762
38,3	197,38	847
47,1	242,73	898

Tabelle A.5: Messdaten des Versuches mit **Maisstärke** mit Verwendung der Dispergierbürste und mit Verwendung des Ionisators.

M_{Staub} [mg]	c [g/m ³]	U_{SKG} [mV]
0	0,00	0
1,6	8,25	49
8,4	43,29	361
16,5	85,03	593
18,2	93,79	635
18,7	96,37	651

Tabelle A.6: Messdaten des Versuches mit **Formpuderstärke** ohne Verwendung der Dispergierbürste und ohne Verwendung des Ionisators.

M_{Staub} [mg]	c [g/m ³]	U_{SKG} [mV]
0	0,00	0
8,5	43,80	377
20,8	107,19	686
30,9	159,24	829
42,8	220,57	909
57,4	295,81	957

Tabelle A.7: Messdaten des Versuches mit **Formpuderstärke** mit Verwendung der Dispergierbürste und ohne Verwendung des Ionisators.

M_{Staub} [mg]	c [g/m ³]	U_{SKG} [mV]
0	0,00	0
4,6	23,71	262
14,8	76,27	598
18,9	97,40	694
27,9	143,78	822
35,3	181,92	882

Tabelle A.8: Messdaten des Versuches mit **Formpuderstärke** ohne Verwendung der Dispergierbürste und mit Verwendung des Ionisators.

M_{Staub} [mg]	c [g/m ³]	U_{SKG} [mV]
0	0,00	0
5,5	28,34	281
12,9	66,48	521
20,4	105,13	676
27,6	142,24	790
37,2	191,71	875
46,2	238,09	922

Tabelle A.9: Messdaten des Versuches mit **Formpuderstärke** mit Verwendung der Dispergierbürste und mit Verwendung des Ionisators.

A.2.2 Messdaten zur Kalibrierkurvenerstellung mit dem vorläufigen Versuchsaufbau

M_{Staub} [mg]	c [g/m ³]	U_{SKG} [mV]
0	0	0
2,7	8,54	141
8,4	26,57	381
13,7	43,33	527
20,5	64,84	661
26,9	85,08	753
32,7	103,43	816
39,1	123,67	862

Tabelle A.10: Messdaten zur Erstellung einer Kalibrierkurve für **Maisstärke** mit dem Sedimentationsverfahren (vorläufiger Versuchsaufbau).

M_{Staub} [mg]	c [g/m ³]	U_{SKG} [mV]
0	0	0
5,9	30,41	267
10,6	54,63	438
15,3	78,85	562
20,4	105,13	660
26,0	133,99	734
31,2	160,79	792

Tabelle A.11: Messdaten zur Erstellung einer Kalibrierkurve für **Formpuderstärke** mit dem Sedimentationsverfahren (vorläufiger Versuchsaufbau).

M_{Staub} [mg]	c [g/m ³]	U_{SKG} [mV]
0	0	0
4,2	13,28	126
16,1	50,92	384
36,9	116,71	633
44,8	141,70	704
56,8	179,66	782
69,2	218,88	826
76,3	241,33	855
87,9	278,02	889
92,7	293,21	900

Tabelle A.12: Messdaten zur Erstellung einer Kalibrierkurve für **Puderzucker** mit dem Sedimentationsverfahren (vorläufiger Versuchsaufbau).

M_{Staub} [mg]	c [g/m ³]	U_{SKG} [mV]
0	0	0
8	41,23	143
29,5	152,03	370
56,8	292,72	593
76,0	391,67	707
88,5	456,08	782
103,0	530,81	840

Tabelle A.13: Messdaten zur Erstellung einer Kalibrierkurve für **Weizenmehl** mit dem Sedimentationsverfahren (vorläufiger Versuchsaufbau).

A.2.3 Messdaten zu Abschnitt 3.3.3.4.3.3

t_{Staub} [s]	m_G [mg]	t_{Staub} [s]	m_H [mg]
0	0	0	0
121	5	121	2
241	10,5	245	4
361	15	365	5,1
481	20	485	6,5
601	26	622	8
738	30,5	742	10
858	35	862	11,5
995	40	995	13

Tabelle A.14: Zeitlicher Verlauf der Staubanlagerung an Glasplättchen und Halterung des Glasplättchens. Als Staub wurde Maisstärke verwendet.

A.2.4 Messdaten zu Abschnitt 3.3.3.4

t_{Staub} [s]	m_G [mg]	m_H [mg]	M_{Staub} [mg]	c [g/m ³]	U_{SKG} [mV]	U_{SKG}^* [mV]
0	0	0	0	0	0	0,041
120	2,5	0,24	2,26	15,93	204	201,35
240	5	0,48	4,52	31,87	373	360,31
360	8	0,72	7,28	51,32	506	507,56
480	11	0,96	10,04	70,78	603	618,46
600	13	1,2	11,8	83,19	681	676,73
720	15,5	1,44	14,06	99,12	740	735,67
840	18	1,68	16,32	115,06	785	782,21
1000	21	2	19,0	133,95	827	825,32

Tabelle A.15: Aufnahme einer Kalibrierkurve mit der neuen Apparatur und Korrekturrechnung der Staubmasse auf dem Glas für **Maisstärke**; Verwendung der Röhren zum Schutz der Fäden der Glshalterung

t_{Staub} [s]	m_{G} [mg]	m_{H} [mg]	M_{Staub} [mg]	c [g/m ³]	U_{SKG} [mV]	U_{SKG}^* [mV]
0	0	0,00	0,00	0,00	0	-0,07
60	5	0,67	4,33	35,24	336	355,93
120	9	1,33	7,67	62,35	546	541,21
180	13	2,00	11,00	89,46	692	673,49
240	18	2,66	15,34	124,71	788	790,59
300	22	3,33	18,67	151,826	856	851,54
360	27	4,00	23,00	187,06	899	905,50

Tabelle A.16: Aufnahme einer Kalibrierkurve mit der neuen Apparatur und Korrekturrechnung der Staubmasse auf dem Glas für **Formpuderstärke**; Verwendung des Prallblechs und der Röhren zum Schutz der Fäden der Glashalterung

t_{Staub} [s]	m_{G} [mg]	m_{H} [mg]	M_{Staub} [mg]	c [g/m ³]	U_{SKG} [mV]	U_{SKG}^* [mV]
0	0	0,00	0,00	0	0	1,70
120	19	1,20	17,80	125,49	372	368,49
240	45	2,40	42,60	300,33	669	667,38
360	74	3,60	70,40	496,33	830	839,17
480	98	4,80	93,20	657,078	920	912,46

Tabelle A.17: Aufnahme einer Kalibrierkurve mit der neuen Apparatur und Korrekturrechnung der Staubmasse auf dem Glas für **Weizenmehl**; Verwendung der Röhren zum Schutz der Fäden der Glashalterung

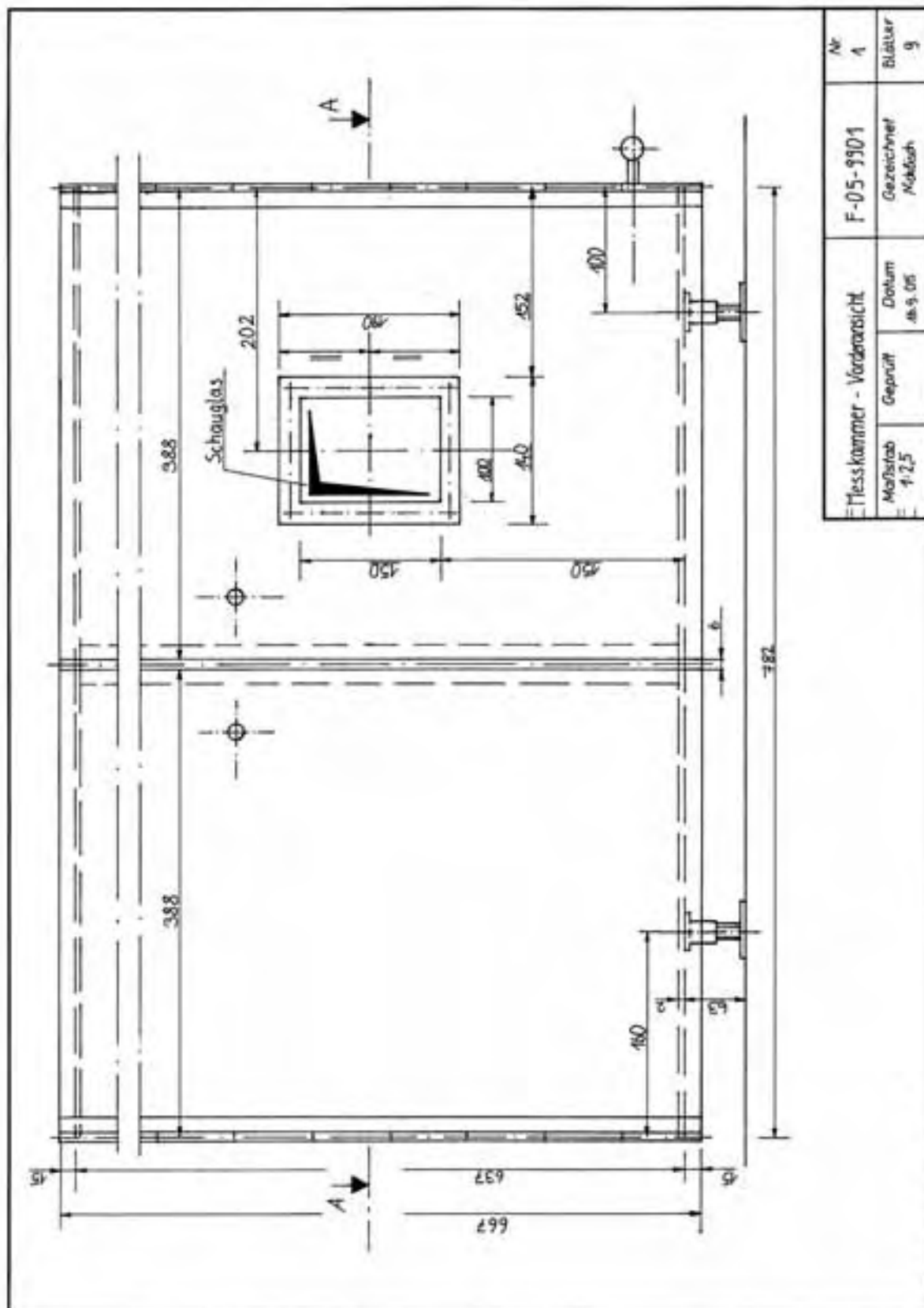
t_{Staub} [s]	m_G [mg]	m_H [mg]	M_{Staub} [mg]	c [g/m ³]	U_{SKG} [mV]	U_{SKG}^* [mV]
0	0	0,00	0,00	0	0	0,54
150	5	0,23	4,77	33,62	193	135,23
300	13	0,46	12,54	88,39	350	311,72
450	23	0,69	22,31	157,27	470	475,24
600	27	0,92	26,08	183,84	512	524,81
750	31	1,15	29,85	210,42	568	568,24
900	37	1,38	35,62	251,095	616	624,55
1050	42	1,62	40,38	284,72	642	663,23
1200	47,5	1,85	45,65	321,87	679	699,09
1350	51,5	2,08	49,42	348,44	711	720,97
1500	54	2,31	51,69	364,44	739	732,81
1650	60	2,54	57,46	405,11	763	759,01
1800	66	2,77	63,23	445,79	781	780,41
1950	72	3,00	69,00	486,46	802	797,90

Tabelle A.18: Aufnahme einer Kalibrierkurve mit der neuen Apparatur und Korrekturrechnung der Staubmasse auf dem Glas für **Pudierzucker**; Verwendung der Röhren zum Schutz der Fäden der Glashalterung

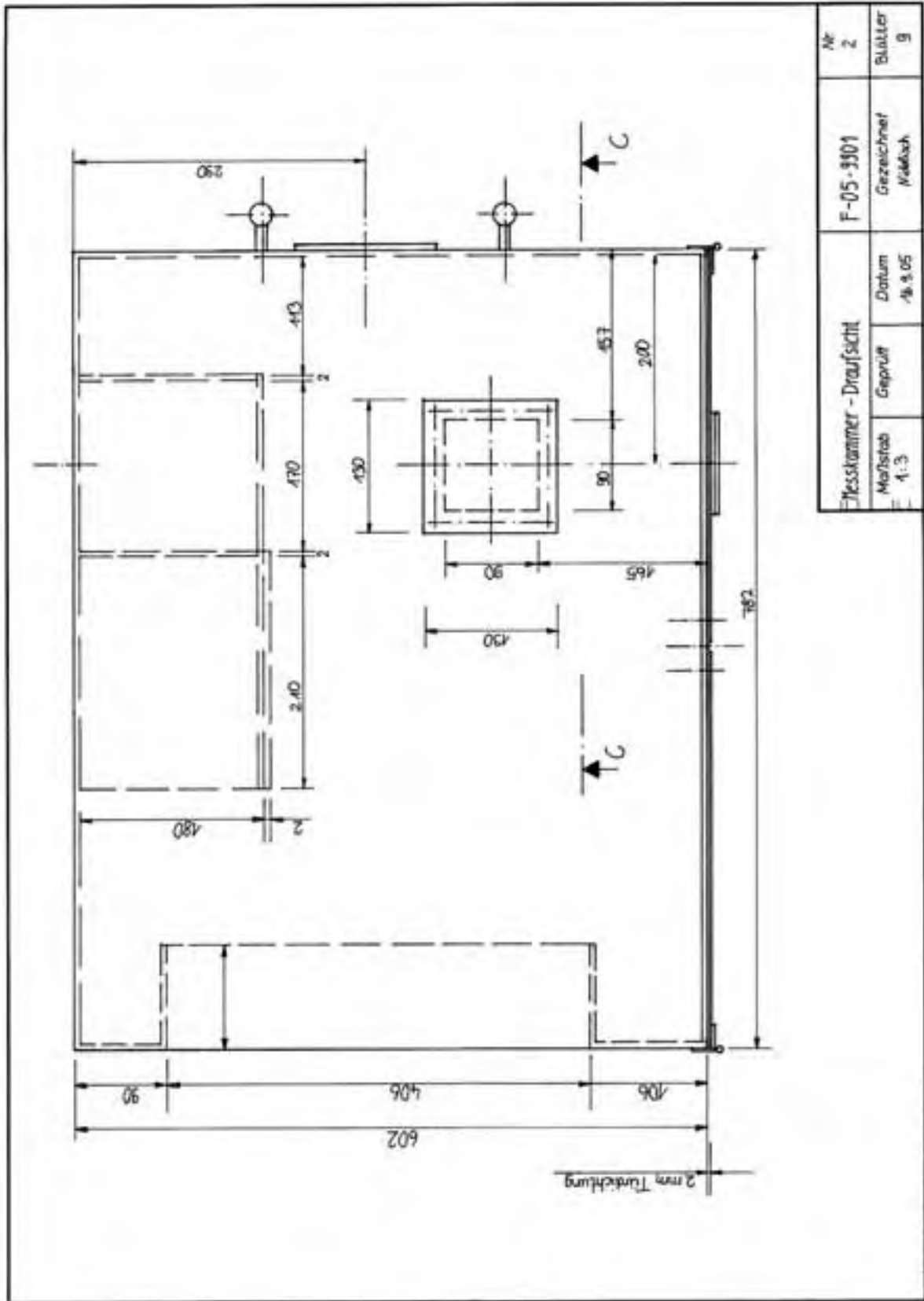
Anhang B

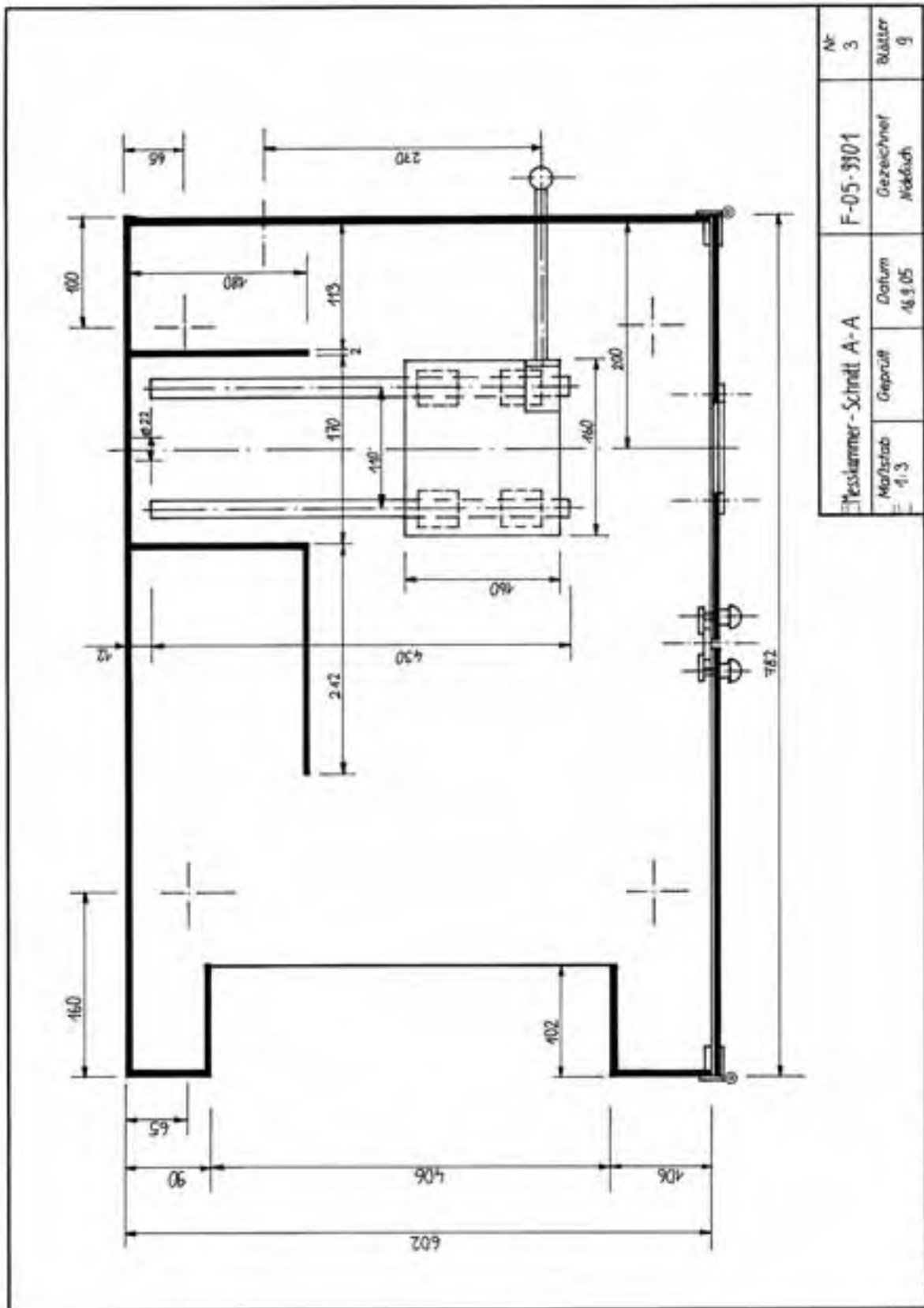
Konstruktionszeichnungen

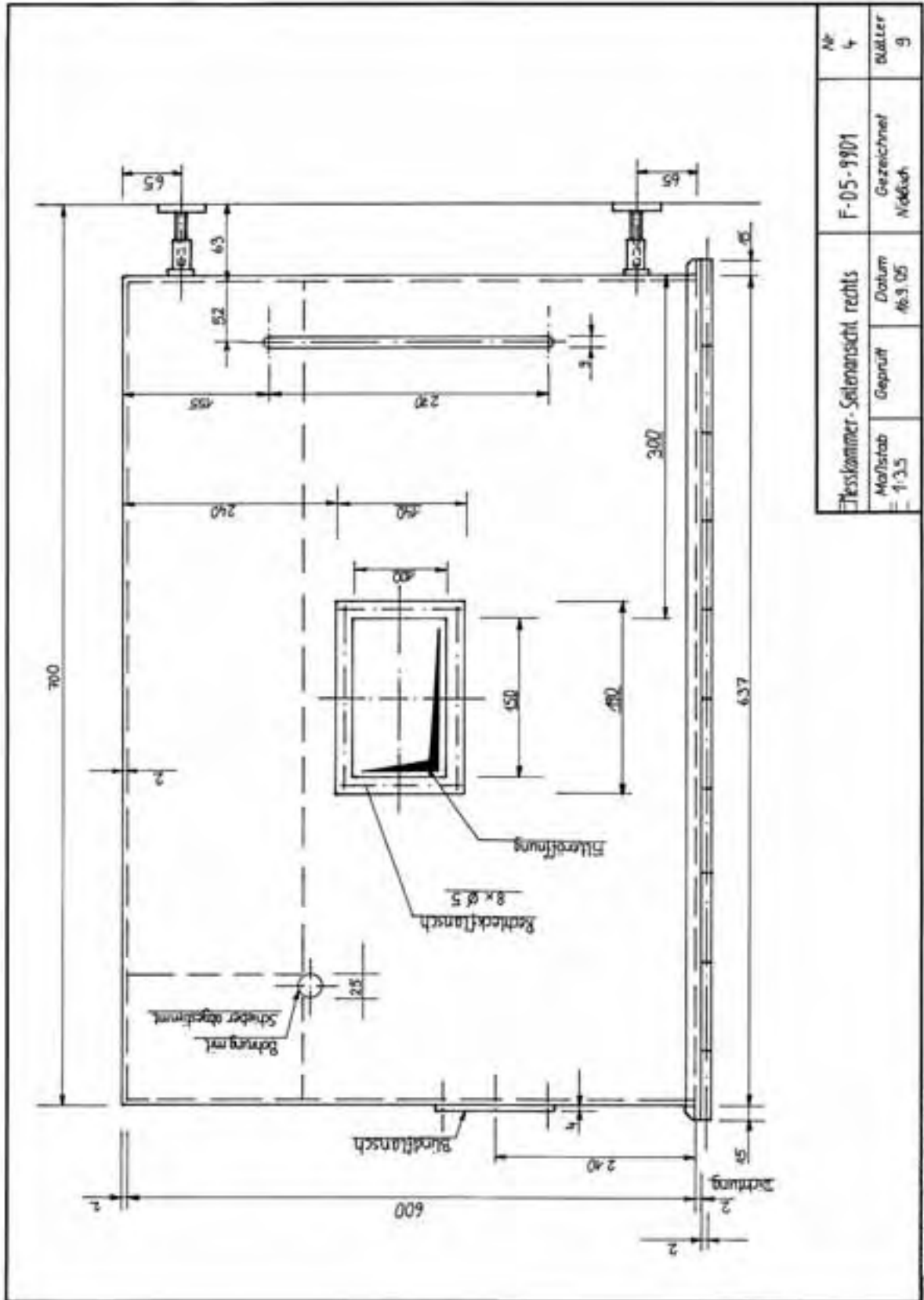
B.1 Messkammer



Druck Nr. 201528 - Messung Raum, 201528

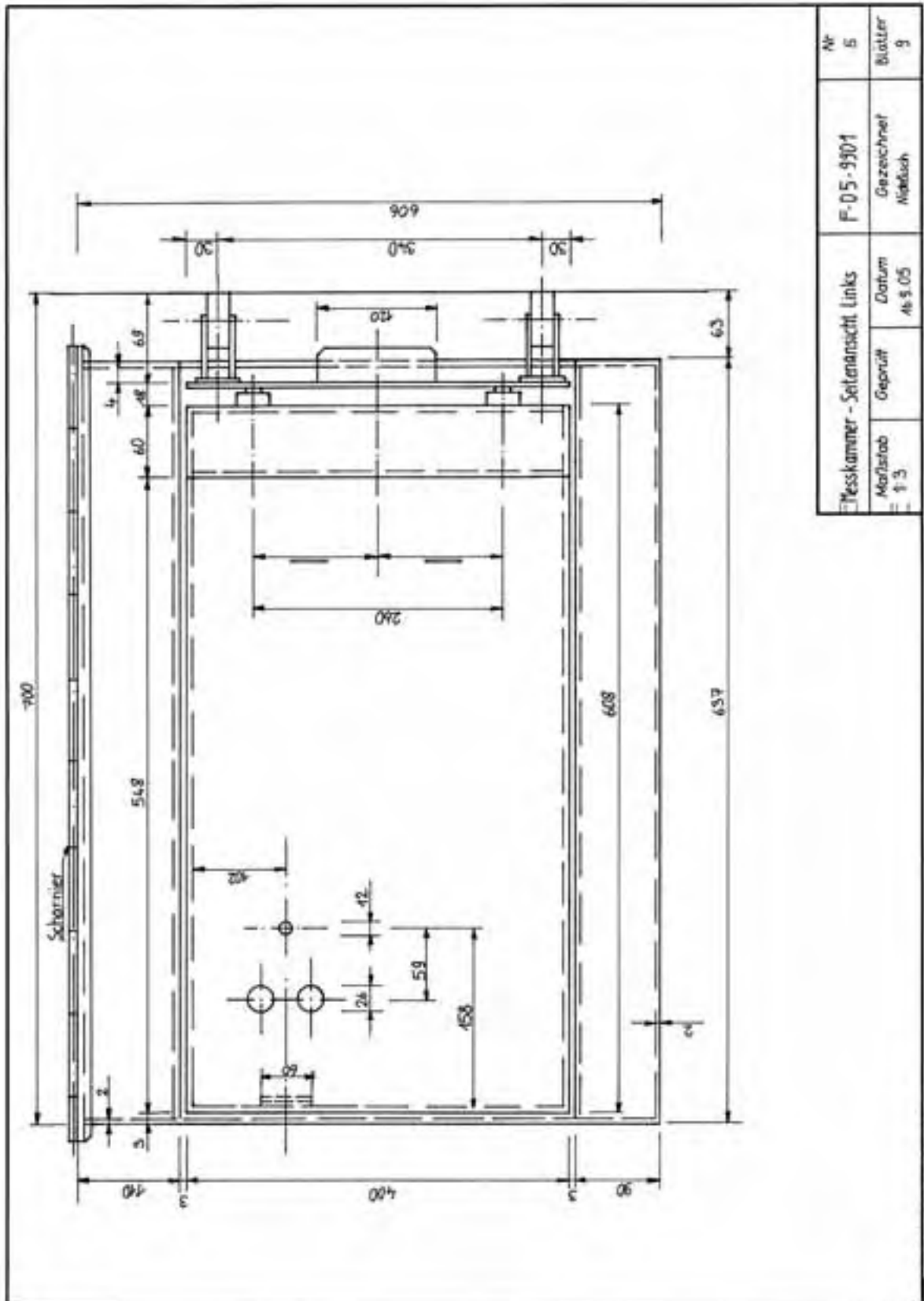




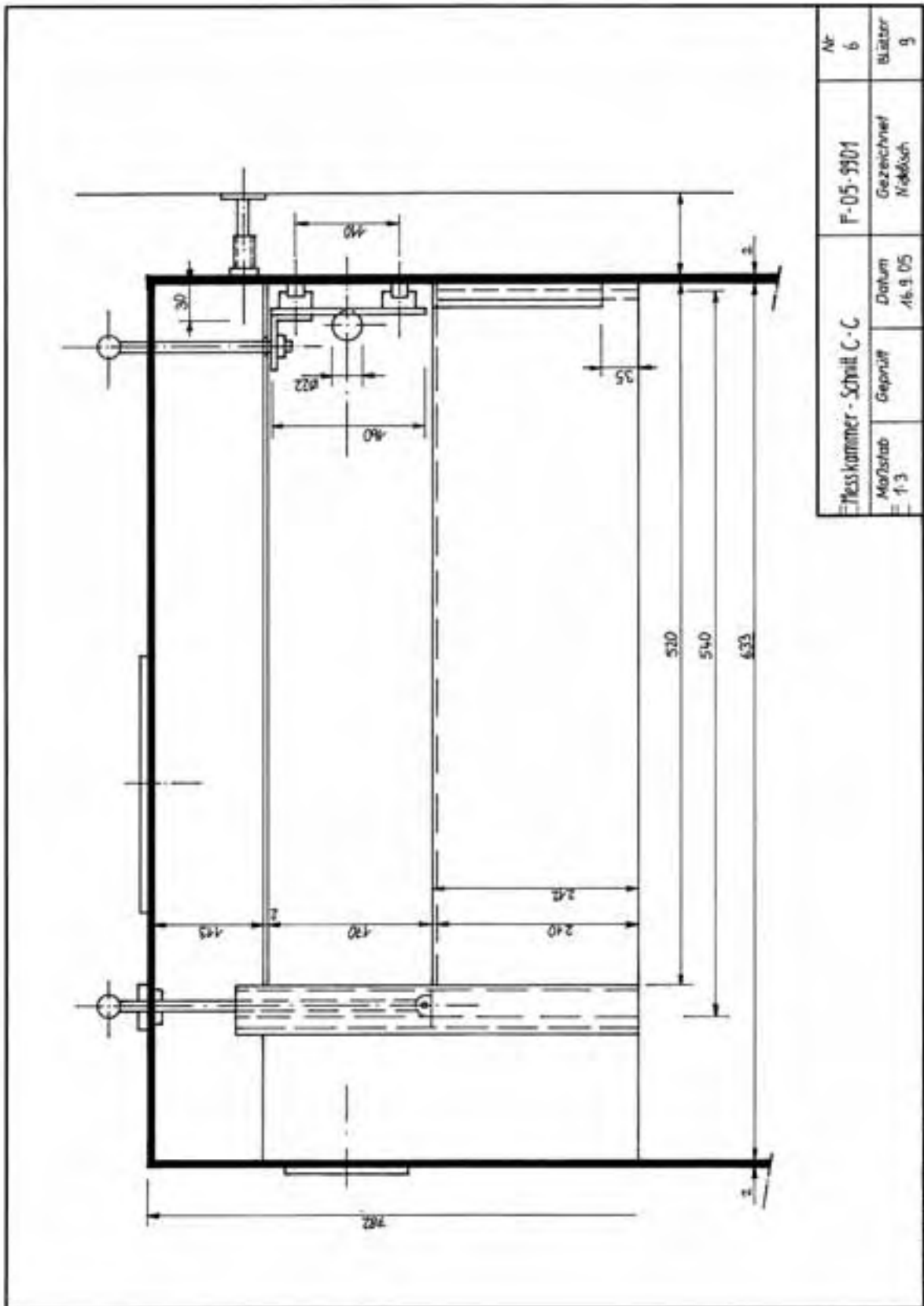


Kesslkammer-Sellenansicht rechts		F-05-99/01	Nr. 4
Maßstab	Geprüft	Datum	Blätter
1:3,5		16.3.05	9
		Gezeichnet	
		Nicklich	

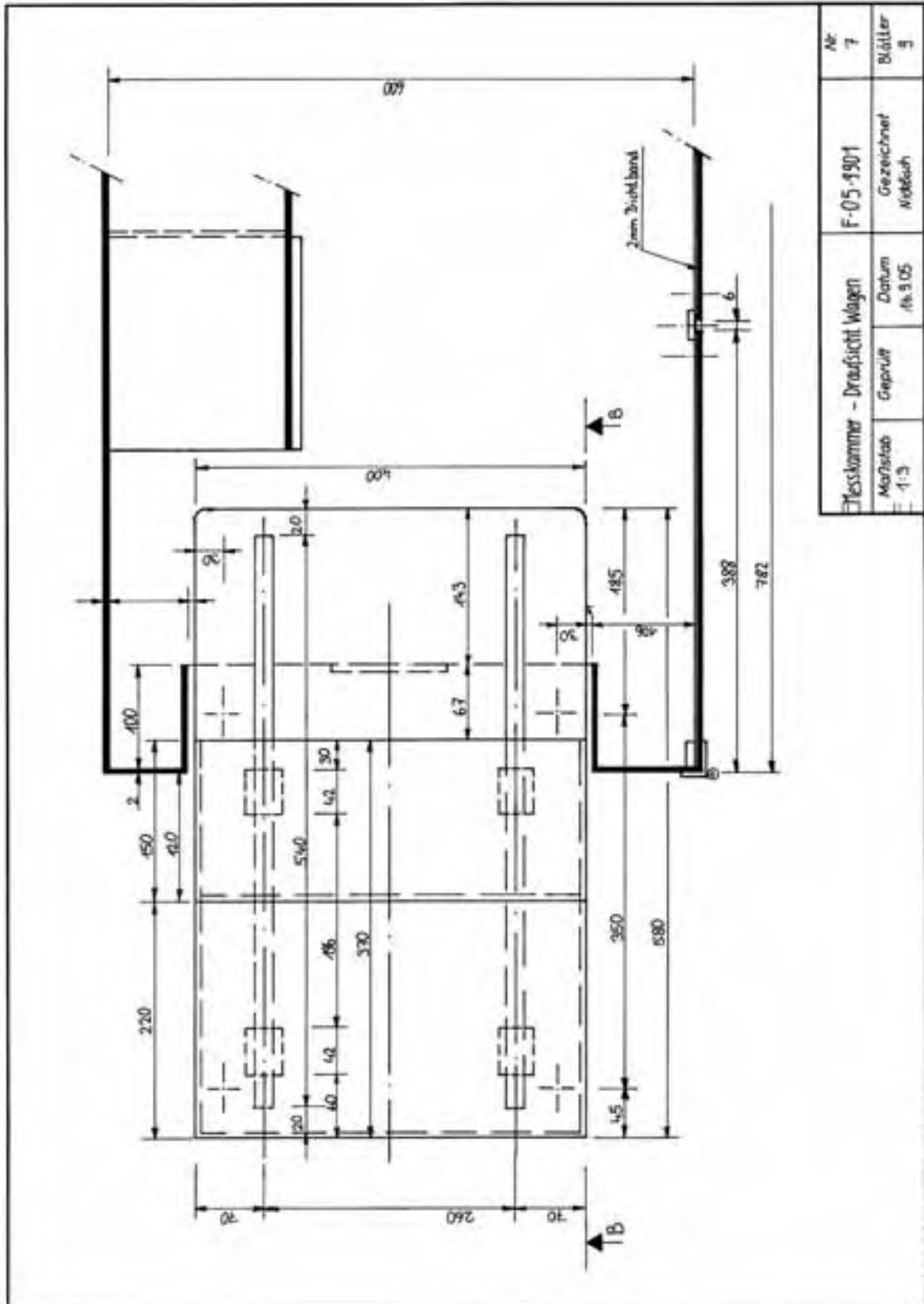
© 2005 by R. Müller, Stuttgart, Germany. All rights reserved.

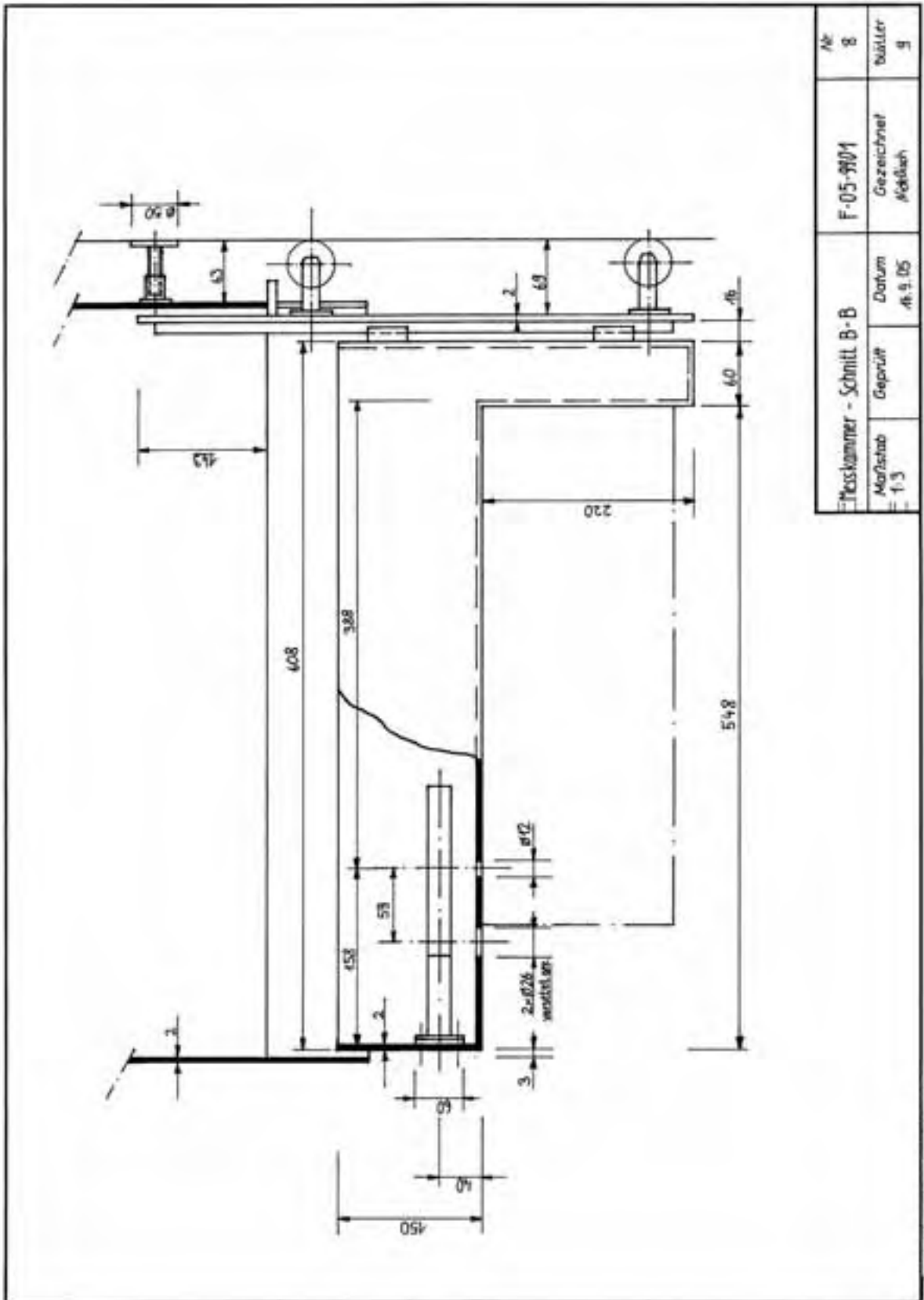


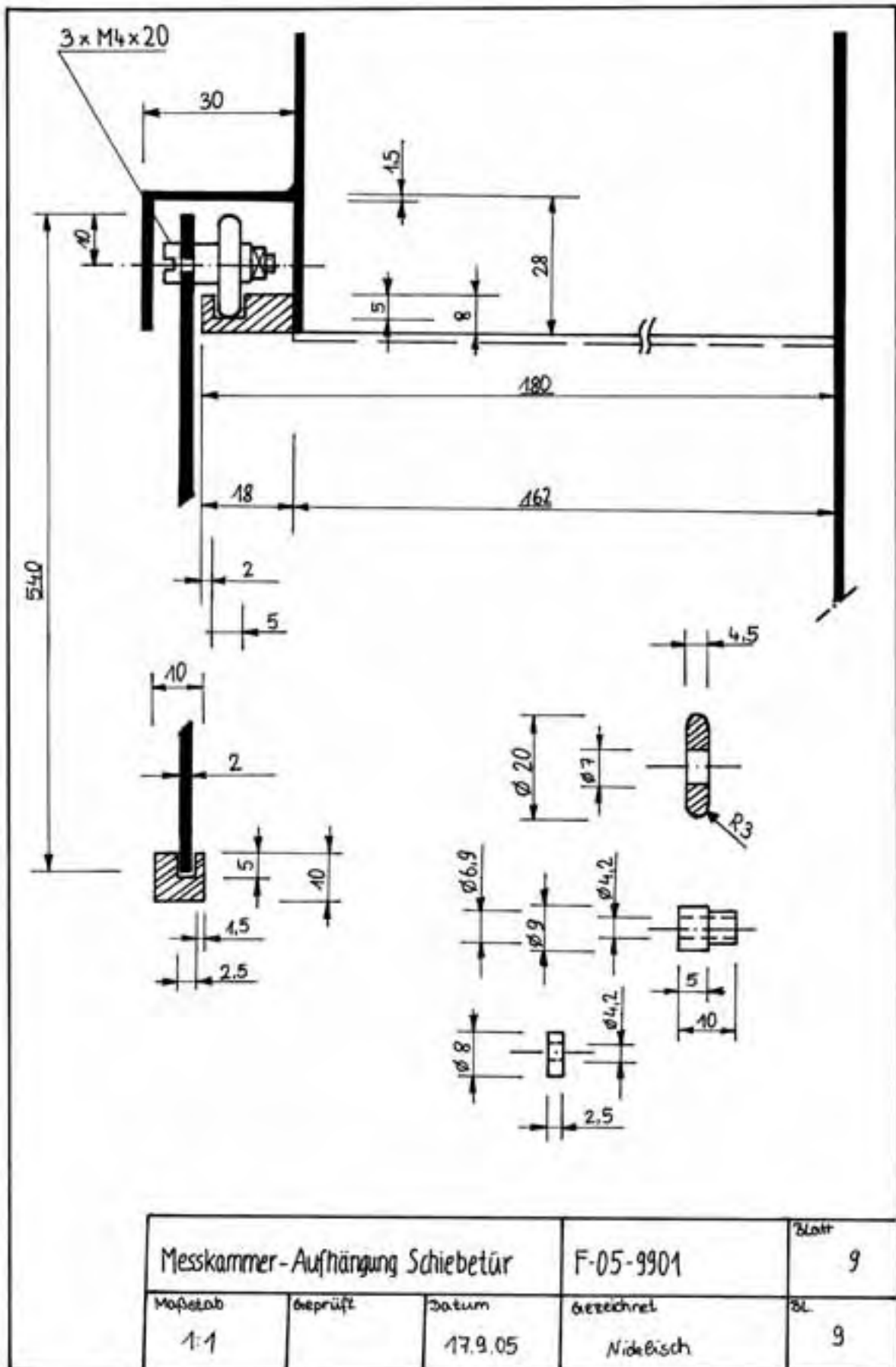
Datei: 05_9901.dwg

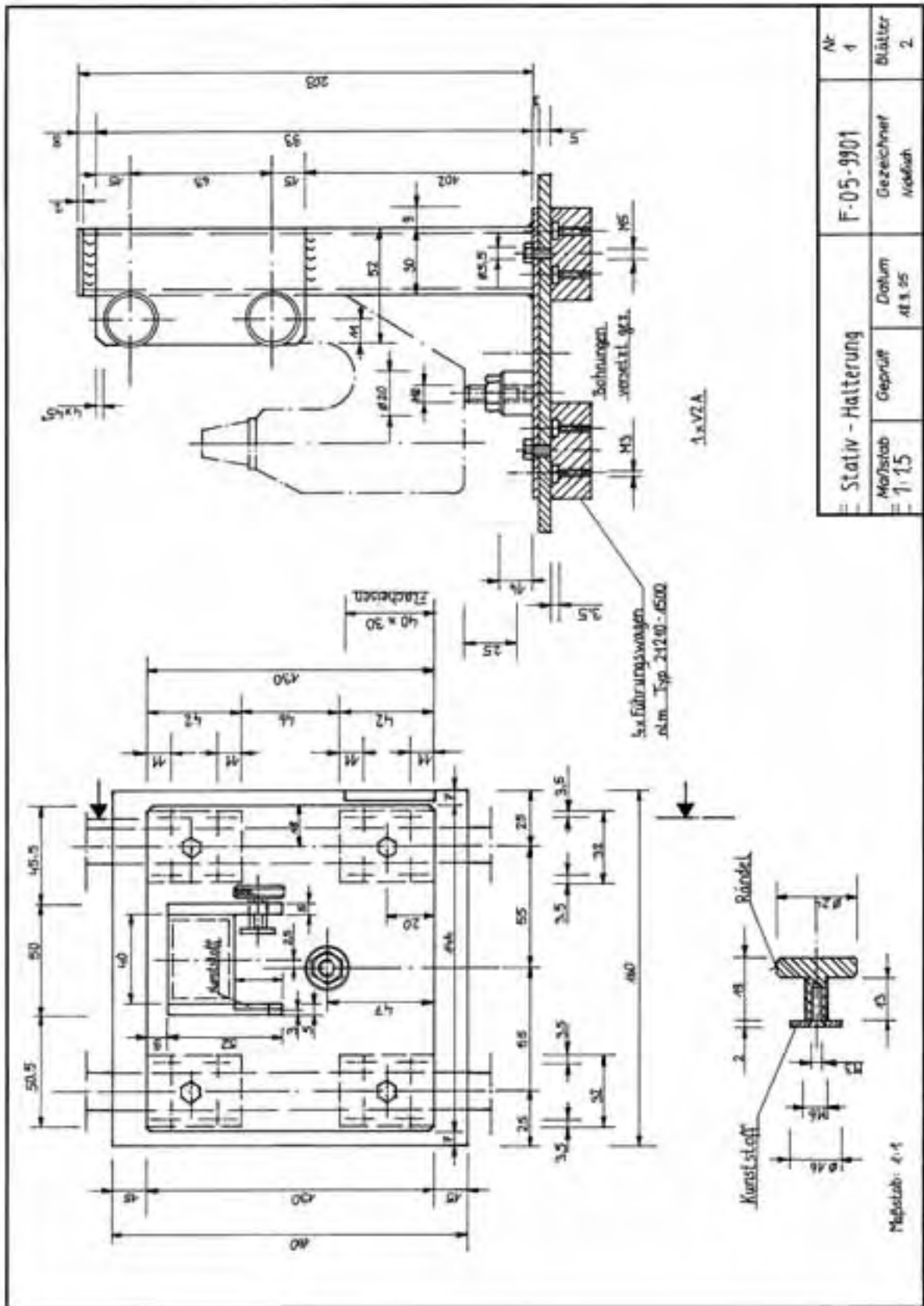


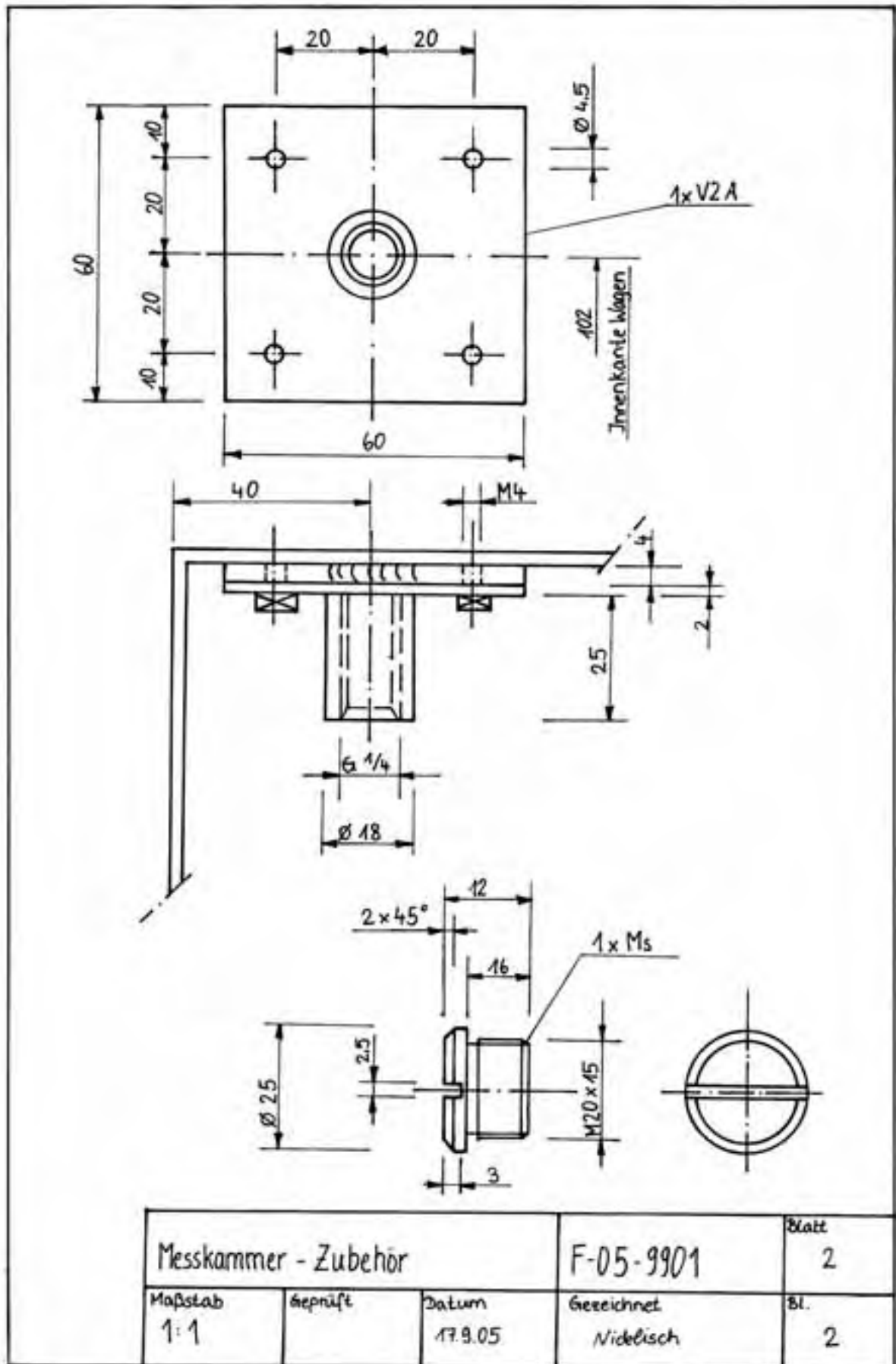
Blatt 05 990101 Messkammer Schnitt C-C 0509 0509



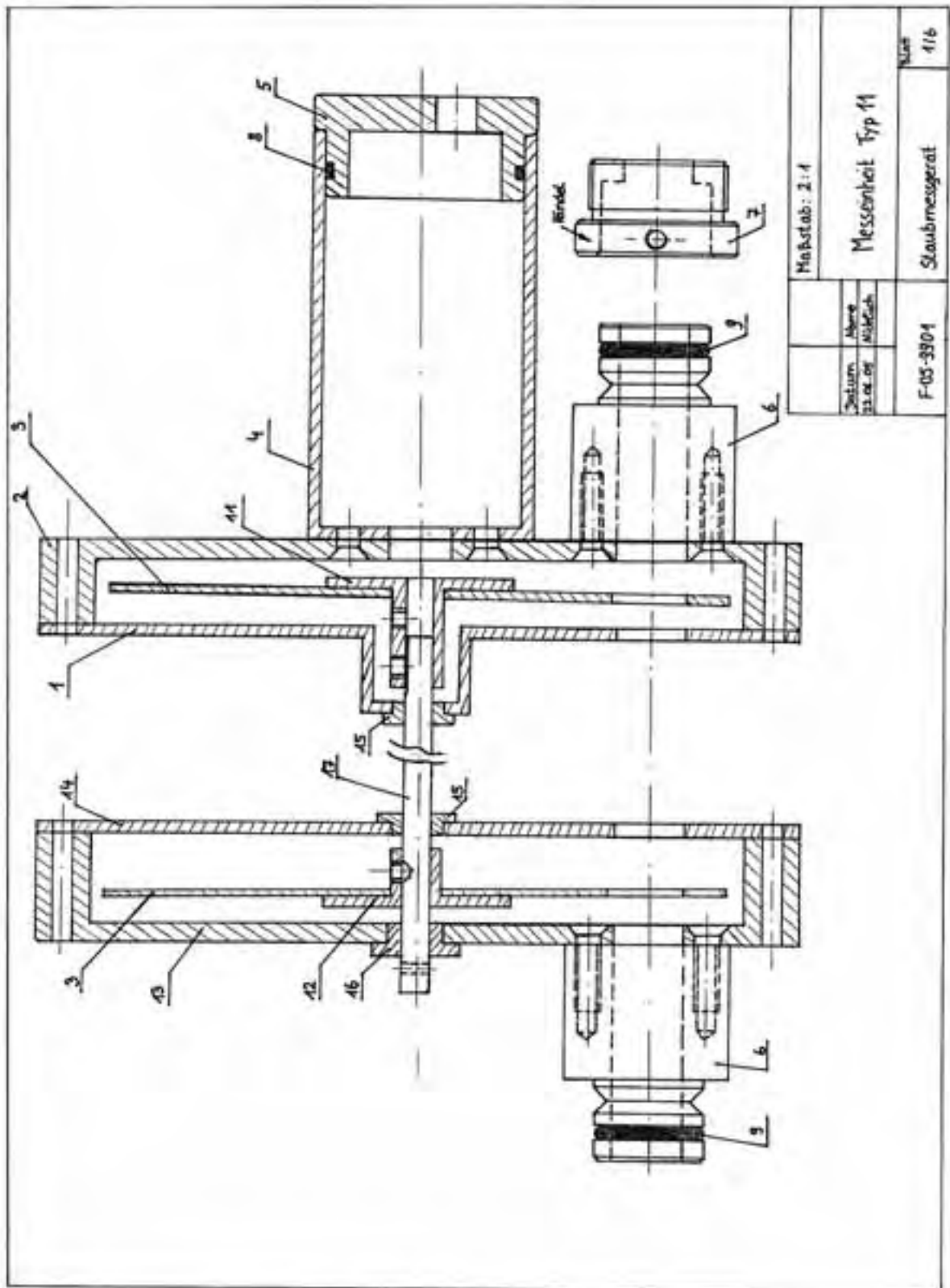




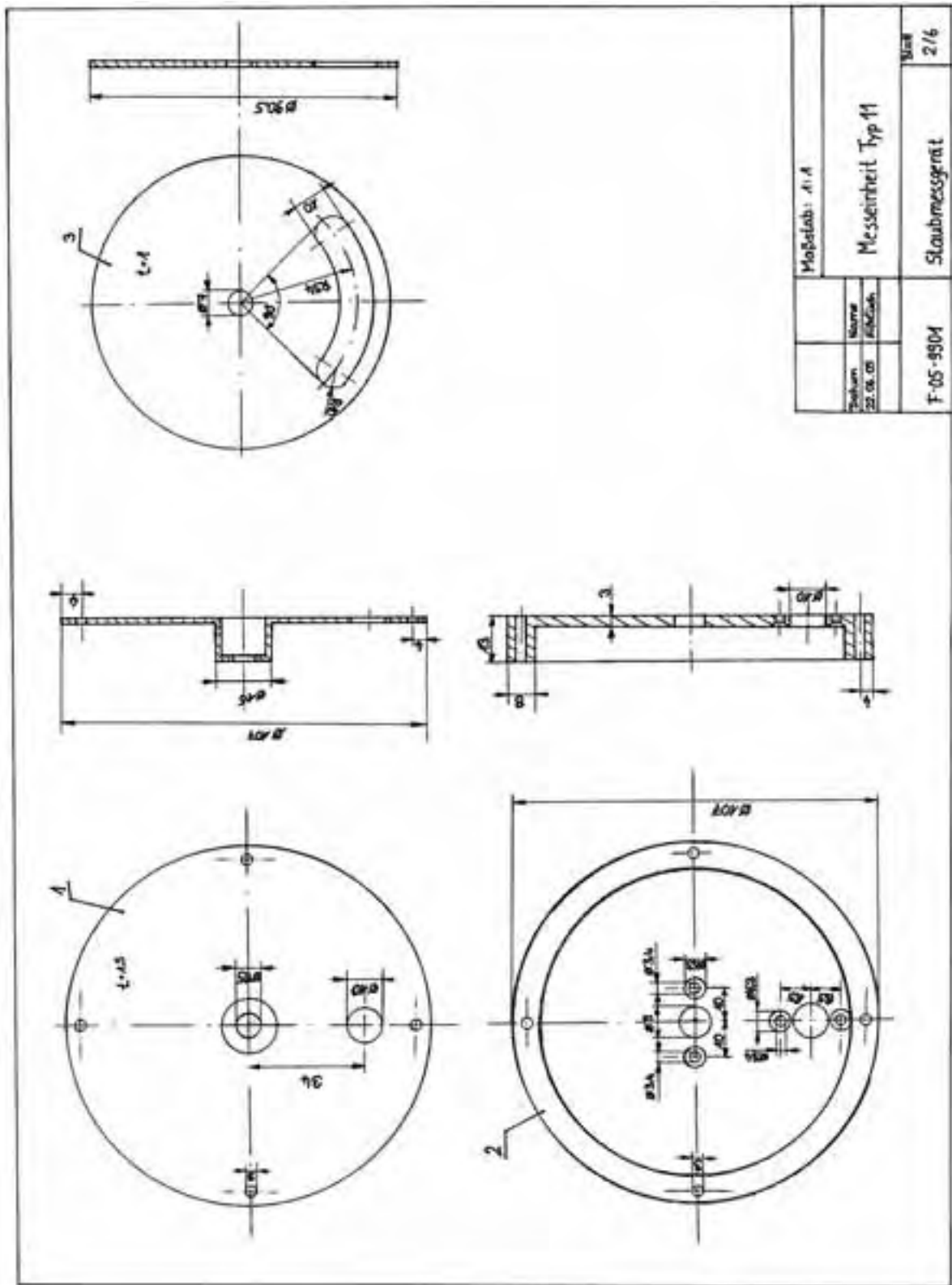




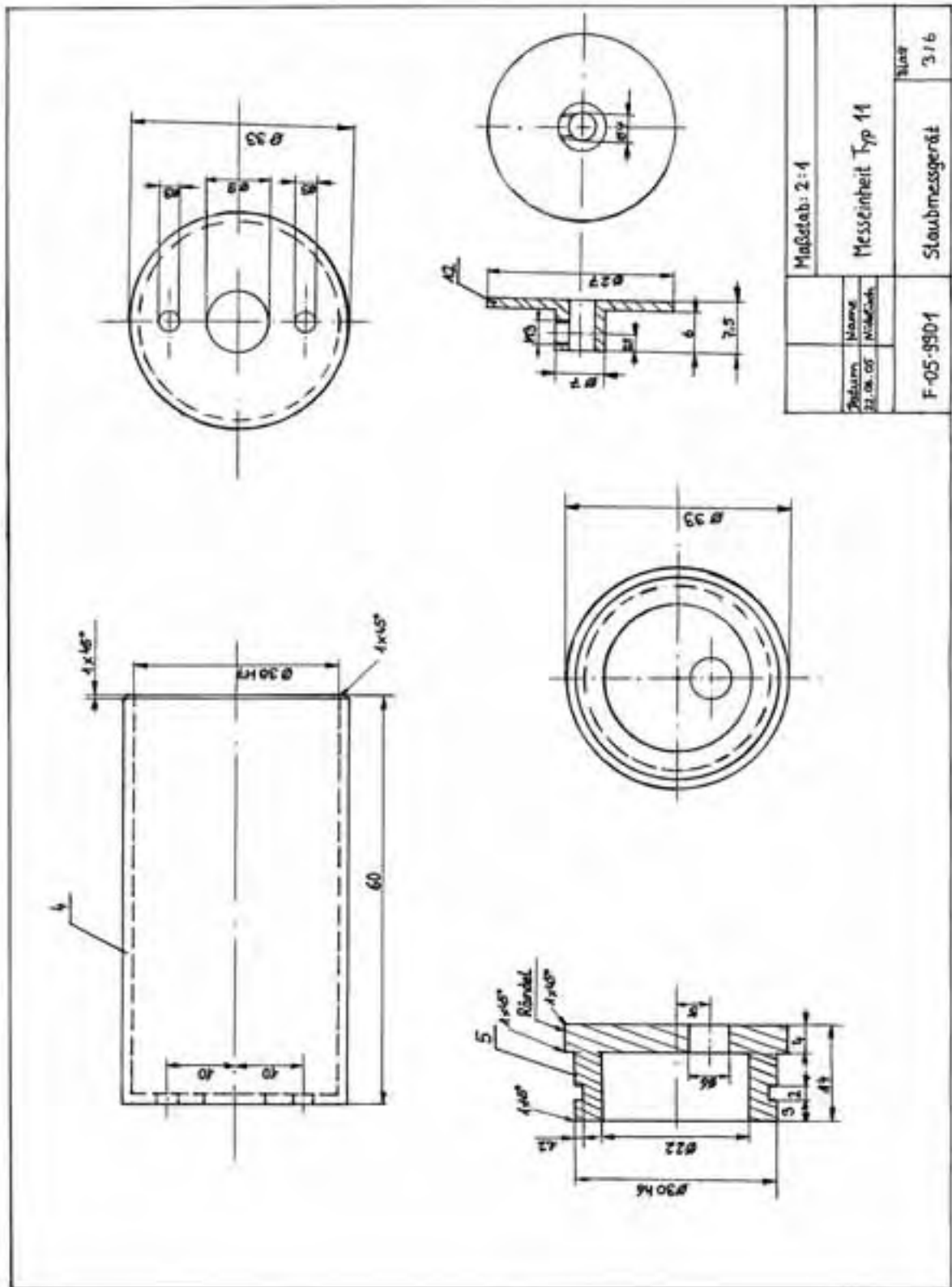
B.2 Messeinheit Typ 11

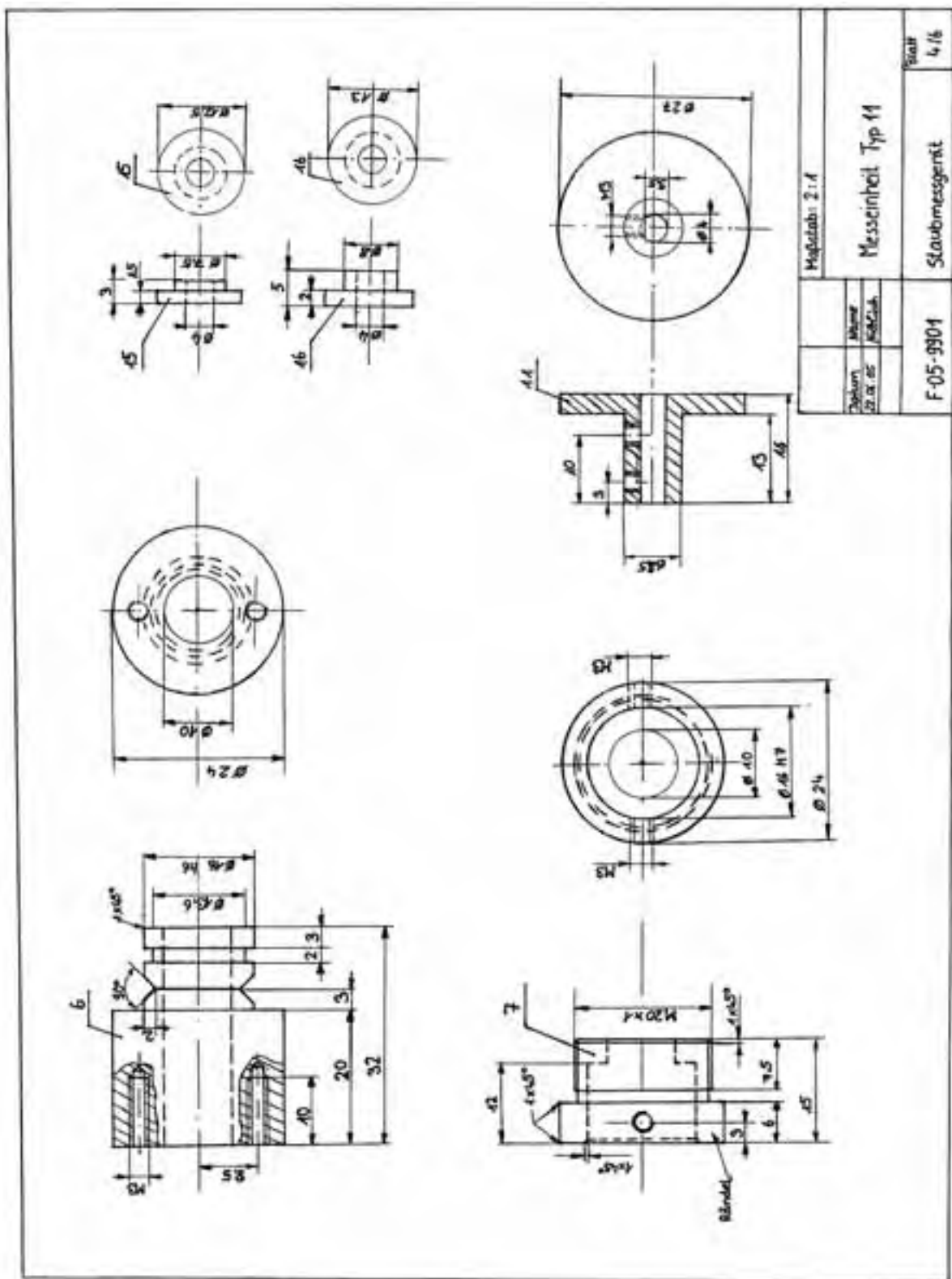


Maßstab: 2:1		Messseinheit Typ 11	Num 416
Zeichn. 31.01.01	Abere 11/16/16		
F-05-3304		Staubmessgerät	



Maßstab: 1:1		Messreihe Typ 41	Blatt 2/6
Norm	Blatt		
Titel	Blatt	F-05-9504	Staubmessgerät





2	Madenschraube (unten eben) M3 x 4 (zu Pos.11)	22	VA
1	Madenschraube mit Spitze M3 x 4 (zu Pos. 12)	21	VA
4	Madenschraube mit Spitze M3 x 8 (für Rändelschraube) DIN EN ISO 27434	20	VA
8	Zylinderschraube M3 x 20 DIN EN ISO 1207 (Befestigung des Deckels)	19	VA
4	Senkkopfschraube M3 x 12 DIN EN ISO 2009	18	VA
1	Welle	17	VA
1	Hülse zur Wellenlagerung (groß)	16	Teflon
2	Hülse zur Wellenlagerung	15	Teflon
1	Deckel2	14	Alu
1	Teller2	13	Alu
1	Buchse für Welle (einfach)	12	VA
1	Buchse zur Verbindung der Wellen	11	VA
2	Senkkopfschraube M3 x 8 DIN EN ISO 2009 (Befestigung vom Motor)	10	VA
2	O-Ring \varnothing 14 x 1,5 DIN 3771	9	Simrit
2	O-Ring \varnothing 28 x 1,5 DIN 3771	8	Simrit
2	Rändelschraube	7	VA
2	Verbindungsstück zum Staubmessgerät	6	VA
1	Stopfen für Motorgehäuse	5	Alu
1	Gehäuse Motor	4	Alu
2	Scheibe	3	Alu
1	Teller (Motorseite)	2	Alu
1	Deckel (Motorseite)	1	Alu
Stück	Benennung	Nr.	Werkstoff
Nicklisch	Messeinheit Typ 11 Staubmessgerät	BGN	
F-05-9901			
22.06.05		Blatt: 6/6	