

Untersuchung des Einflusses der
elektrostatischen Aufladung von
Stäuben auf die Neigung dieser
Stäube zur Staubwolkenbildung

F-05-9901

Untersuchung des Einflusses der
elektrostatischen Aufladung von Stäuben
auf die Neigung dieser Stäube zur
Staubwolkenbildung

Diplomarbeit

von

Kristina Lauer

Fachhochschule Mannheim

und

Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und
Arbeitsmedizin

Mannheim, Oktober 2003

Erklärung

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

Mannheim, 17. Oktober 2003

(Kristina Lauer)

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
1 Einleitung	3
1.1 Allgemeines	3
1.2 Bisherige Erkenntnisse	5
1.3 Zielsetzung	7
2 Physikalische Grundlagen	8
2.1 Staubkonzentrationsmessung mit Hilfe einer Infrarot-Sonde	8
2.2 Elektrostatische Aufladung	9
2.2.1 Messung mit Hilfe eines Influenz-Elektrofeldmeters	10
2.2.2 Neutralisation von elektrostatischen Aufladungen	11
2.3 Boltzmann-Verteilung	11
3 Staubungsneigungsapparatur	12
3.1 Mechanischer Aufbau	12
3.1.1 Probenbehälter	12
3.1.2 Dosiereinrichtung	12
3.1.3 Messkammer	13
3.2 Messtechnik	13
3.2.1 SKG 5	13
3.2.2 Speicheroszilloskop	14
3.2.3 Rechner	14
3.3 Bestimmung der Staubungsneigungskenngröße	14
3.3.1 Kalibrierung des SKG 5	15
3.3.2 Gang der Messung	16
3.3.3 Auswertung	17

4	Prüfstaub	19
4.1	Auswahl des Prüfstaubes	19
4.2	Untersuchung der Staubeigenschaften	19
4.2.1	Produktfeuchte	20
4.2.2	Schüttdichte	21
4.2.3	Partikelgrößenverteilung	22
4.2.4	Partikeloberfläche und -form	23
4.2.5	Spezifischer Widerstand	24
4.2.6	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse	25
4.3	Staubungsneigungsapparatur und Staubeigenschaften	26
4.3.1	Einfluss auf die Produktfeuchte	26
4.3.2	Einfluss auf die Schüttdichte	27
4.3.3	Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung	27
4.3.4	Einfluss auf die Partikeloberfläche und -form	28
4.3.5	Einfluss auf den spezifischen Widerstand	29
4.3.6	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse	30
5	Änderungen an der Messapparatur	31
5.1	Messkammer	31
5.1.1	Änderung des Messkammermaterials	31
5.1.2	Einfluss der Materialänderung	33
5.2	Messtechnik	34
5.2.1	Erweiterung der Messtechnik	34
5.2.2	Einfluss der Messtechnikänderung	36
5.3	Staubentladung	37
5.3.1	Einbau eines Ring-Ionisators	37
5.3.2	Einfluss der Fallhöhenänderung	38
5.4	Strategie bei der Messdatenauswertung	40
5.5	Einfluss der Änderungen im Überblick	41
5.6	Elektrische Eigenschaften des Drahtgitters	42
5.6.1	Widerstand zwischen Drahtgitter und Erdpotential	42
5.6.2	Gang der Messung und Messergebnisse	42
5.6.3	Kapazität des Drahtgitter gegen die Messkammer	44

6	Elektrostatik und Staubungsneigung	45
6.1	Elektrostatische Aufladung des Prüfstaubes	45
6.1.1	Ortsabhängigkeit des Ladungszustandes	45
6.1.1.1	Versuchsbeschreibung	45
6.1.1.2	Versuchsergebnisse	46
6.1.1.3	Versuchsauswertung und -interpretation	47
6.1.2	Zeitabhängigkeit des Ladungszustandes	51
6.1.3	Höhe der Aufladung	52
6.1.3.1	Versuchsbeschreibung	53
6.1.3.2	Versuchsergebnisse	53
6.1.3.3	Versuchsauswertung und -interpretation	53
6.1.4	Mechanismus und Ort der Staubaufladung	55
6.2	Staubentladung mit dem Ring-Ionisor	56
6.2.1	Versuchsbeschreibung	56
6.2.2	Versuchsergebnisse	56
6.2.3	Versuchsauswertung und -interpretation	57
6.3	Ladungszustand und Staubungsneigungskenngröße	58
6.3.1	Versuchsbeschreibung	58
6.3.2	Versuchsergebnisse	58
6.3.3	Versuchsauswertung und -interpretation	60
7	Einfluss weiterer Parameter	64
7.1	Raumklima und spezifischer Widerstand	64
7.1.1	Versuchsbeschreibung	64
7.1.2	Messergebnisse	65
7.1.3	Versuchsauswertung und -interpretation	66
7.2	Einfluss der Raumluftfeuchte	69
7.2.1	Versuchsbeschreibung	69
7.2.2	Messergebnisse	69
7.2.3	Versuchsauswertung und -interpretation	71
7.2.3.1	Luftfeuchtigkeit in der Messkammer	71
7.2.3.2	Spannung am Drahtgitter	71
7.2.3.3	Staubungsneigungskenngröße und Konzentrationsverlauf in der Messkammer	72
7.3	Einfluss der Produktfeuchte	73

7.3.1	Versuchsbeschreibung	73
7.3.2	Messergebnisse	74
7.3.3	Versuchsauswertung und -interpretation	75
8	Diskussion der Ergebnisse und Ausblick	76
8.1	Diskussion der Ergebnisse	76
8.1.1	Prüfstaub Maisstärke	76
8.1.2	Staubungsneigungsapparatur	76
8.1.3	Elektrostatische Phänomene	77
8.1.3.1	Elektrostatik und Staubungsneigungsapparatur	77
8.1.3.2	Ladungszustand und Staubungsneigungskenngröße	78
8.1.4	Luftfeuchte	78
8.1.5	Produktfeuchte	79
8.1.6	Konsequenzen für den Norm-Vorschlag	79
8.2	Ausblick	80
8.2.1	Untersuchung der Auflademechanismen	80
8.2.2	Weitere Untersuchungen	81
8.2.3	Verbesserung der Messtechnik	81
	Literaturverzeichnis	83
A	Messergebnisse	85
A.1	Messungen zum Einfluss des Umbaus der Messkammer	85
A.2	Messungen bei variierten Positionen des Messgitters	87
A.3	Messungen an der Aluminiumschale	88
A.4	Messungen bei variierten Ladezuständen	89
A.5	Messungen bei variiertes Luftfeuchte	90
A.6	Messungen bei unterschiedlichen Produktfeuchten	91
A.7	S_N bei Wiederverwendung des Prüfstaubes	92
B	Konstruktionszeichnungen	93
C	Klimadaten	99

Liste der Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
a	–	Proportionalitätsfaktor
a_i	–	Koeffizienten
A_i	m^2	Querschnittsfläche eines elektrischen Leiters aus dem Material i
c	g/m^3	Staubkonzentration
$c(t)$	g/m^3	zeitabhängige Staubkonzentration
C_A	pF	Kapazität einer Aluminiumschale
C_G	pF	Kapazität eines Drahtgitters
D	min^{-1}	Motordrehzahl
E	V/m	Elektrische Feldstärke
E_{Fall}	J	Fallenergie
exp	–	allgemein: Exponent
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
h	m	allgemein: Höhe
h_{Fall}	m	Fallhöhe des Staubes
h_G	mm	Einbauhöhe eines Drahtgitters in eine Messkammer
h_A	mm	Einbauhöhe einer Aluminiumschale in eine Messkammer
H	mm	Höhe einer Elektrodenfläche
I	W/m^2	Strahlungsintensität
I_0	W/m^2	ungeschwächte Strahlungsintensität
k	J/K	Boltzmann-Konstante
k_a	–	Längenkorrekturfaktor
K_{St}	bar · m/s	staubspezifische Kenngröße zur Charakterisierung des maximalen Druckanstieges bei einer Staubexplosion in einem geschlossenen, kubischen Behälter
l_i	m	Länge eines elektrischen Leiters aus dem Material i
L	mm	Abstand zwischen zwei Elektroden
m	kg, g, mg	allgemein: Masse
m_f	g	Masse vor Trocknung
m_{St}	kg, g, mg	Staubmasse
\bar{m}_{St}	kg	mittlere geförderte Staubmasse
m_{tr}	g	Masse nach Trocknung
n	m^{-3}	Teilchendichte
n_0	m^{-3}	Teilchendichte bei der Höhe $h = 0$

Q_G	C	Ladung eines Drahtgitters
q	C/kg	spezifische Staubladung
R_0	Ω	Leerwiderstand der Messzelle zur Messung des spezifischen Schüttgutwiderstandes
R_i	Ω	Widerstand des Materials i
R_G	Ω	Ableitwiderstand eines Drahtgitters
r. F.	%	allgemein: relative Feuchte
s	mm	Wegstrecke, Abstand
S_N	g/m ³	StaubungsneigungskenngroÙe
\bar{S}_N	g/m ³	mittlere Staubungsneigung
t_F	s	Förderzeit
t_S	s	Sedimentationszeit
T	K	Temperatur
U	V	elektrische Spannung
U_{EMF}	V	Spannungsanzeige am E-Feldmeter
U_G	V	Spannung am Messgitter
U_M	V	Spannung an der Elektrode zur Staubwiderstandsmessung
U_{max}	V	beobachtete maximale Spannung am Messgitter
U_{SKG}	mV	Spannungsanzeige am SKG 5
v_{St}	m/s	Fallgeschwindigkeit des Prüfstaubes
V	dm ³	Volumen
V_{Eth}	dm ³	Volumen von Ethanol
V_{Sch}	dm ³	Schüttvolumen
W	mm	Breite einer Elektrodenfläche
x_{50}	μm	Medianwert einer Partikelgrößenverteilung
z	%	relative Produktfeuchte
Δ	–	allgemein: Differenz
ϵ	m ³ /(g · mm)	Extinktionskoeffizient
ϑ	°C	Temperatur
ϑ_U	°C	Umgebungstemperatur
λ	nm	Wellenlänge
\varnothing	mm, μm	Durchmesser
ϱ_M	Ω	gemessener Widerstand
ϱ_E	$\Omega \cdot \text{m}$	elektrischer spezifischer Widerstand
ϱ_i	$\Omega \cdot \text{m}$	spezifischer Widerstand des Materials i
ρ_{Sch}	g/dm ³	Schüttdichte
ρ_{Sch_i}	g/dm ³	Schüttdichte, ermittelt in der Einzelmessung i
σ	%	Messabweichung
τ_e	1/s	Zeitkonstante einer Kondensatorentladung
τ_1	1/s	Zeitkonstante einer Kondensatoraufladung
φ	%	relative Luftfeuchtigkeit
ψ	–	Sphärizität

Vorwort

Zum Abschluss meines Studiums auf dem Gebiet Verfahrens- und Umwelttechnik erhielt ich bei der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V. (FSA) bzw. im Zentrallabor der Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel und Gaststätten (BGN) ein Angebot für eine Diplomantenstelle. Hinsichtlich meiner beruflichen Interessen in der Futter- und Nahrungsmittelindustrie tätig zu werden, war es für mich erstrebenswert, auf diesem Gebiet auch zu diplomieren. Die Forschungsarbeit auf dem Gebiet der Messtechnik forderte nicht nur die Umsetzung der in den Vorlesungen erworbenen technischen Grundkenntnisse, sondern auch die während des Studiums forcierte Fähigkeit sich neues Wissen anzueignen und zu benutzen.

An dieser Stelle möchte ich allen, die mich während meines Studiums und bei der Diplomarbeit unterstützten, danken. Insbesondere danke ich Prof. Dr. Schmitt, der mir nicht nur diese Diplomarbeit vermittelte, sondern mir auch während des Studiums bei der Wahl meines Praxissemesterplatzes half. Außerdem möchte ich meinem Lebensgefährten Rupert Schröder für seine Geduld und, oft auch fachliche, Unterstützung danken.

Mein besonderer Dank gilt dem Betreuer dieser Diplomarbeit, Dirk Lorenz, für eine vorbildliche Betreuung. Er ermöglichte eine wissenschaftliche Arbeit auf hohem Niveau in Verbindung mit einem sehr guten Arbeitsklima. Weiterhin möchte ich mich bei Michael Seithel, Sigurd Kleinhans, Hermann Schiebler, Helmut Ott, Dr. Christine Dannenbaum, Dorothea Kauffelt, Elke Danhamer und allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der BGN bedanken, die mir immer tatkräftig zu Seite standen wenn ich Hilfe benötigte und mich während meiner Diplomarbeit unterstützten. Ich möchte auch Fa. Sascha Zimmermann Licht- und Tontechnik erwähnen, die mir für die Messungen unter künstlicher Luftfeuchte die Nebelmaschine zur Verfügung stellte, dafür vielen Dank.

Zusammenfassung

Nach einem Normvorschlag der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V. (FSA) soll zu den bisher existierenden explosionstechnischen Kenngrößen eine weitere hinzugefügt werden, die Stäube nach ihrer Neigung zur Staubwolkenbildung einteilt, die so genannte Staubungsneigungskenngröße S_N . Zur Bestimmung von S_N wird eine Apparatur benutzt, die Befüllvorgänge mit staubförmigen Produkt bei industriellen Prozessen simuliert. Der zu untersuchende Staub wird mittels eines Dosiersystems in eine Messkammer gefördert. Innerhalb der Messkammer wird die Staubkonzentration über die festgelegte Messdauer gemessen. Die Kenngröße ist per Definition das Integral der Staubkonzentration über die Messdauer dividiert durch die Messdauer.

Die Einflüsse einige Parameter auf die mit der Apparatur gemessene Größe S_N sind zu Beginn dieser Arbeit unbekannt. Mit dem Ziel, die Messung von S_N bzw. den eingangs erwähnten Norm-Vorschlag der FSA zu optimieren, werden diese Einflüsse analysiert.

Ein Prüfstaub (Maisstärke) wird für die Untersuchungen ausgewählt und detailliert auf seine Eigenschaften hin untersucht. Daraus ergeben sich wichtige Konsequenzen für die Handhabung des Staubes (z. B. Lagerung unter Luftabschluss).

Der Ladungszustand des Prüfstaubes wird innerhalb der Messkammer ortsabhängig gemessen. Aus den daraus resultierenden Messergebnissen wird abgeleitet, dass der Ladungszustand des Staubes innerhalb der Messkammer ortsabhängig ist, weil dort ortsabhängige Ladungstransportmechanismen auftreten. Es wird weiterhin gezeigt, dass die Aufladung des Prüfstaubes in dem Teil der Apparatur geschehen muss, der der Staubzufuhr in die Messkammer dient. Der Ladungszustand des Prüfstaubes ist während eines Messzyklusses von S_N annähernd konstant.

Der Einfluss des Ladungszustandes des Prüfstaubes auf S_N wird untersucht. Es zeigt sich, dass der Zahlenwert von S_N in erster Näherung linear mit sinkender Staubaufladung wächst.

Die Luftfeuchtigkeit im Messraum wird über einen weiten Bereich variiert und die daraus resultierende Veränderung von S_N sowie die der statischen Aufladung des Prüfstaubes untersucht. Ab etwa 60 % relativer Luftfeuchtigkeit beeinflusst dieser Parameter S_N deutlich. Die elektrostatische Aufladung des Prüfstaubes fällt mit zunehmender Luftfeuchtigkeit.

Der Einfluss der Produktfeuchte auf S_N und die statische Aufladung des Prüfstaubes wird beleuchtet. Der Zusammenhang ist nicht linear. Ab einer Produktfeuchte nahe des Sättigungswertes für Maisstärke fällt S_N gravierend ab. Elektrostatische Aufladung des Staubes tritt bei dieser Produktfeuchte kaum noch auf.

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Allgemeines

Staubexplosionen und Silobrüände waren lange Zeit ein unterschätztes Sicherheitsrisiko in der Industrie. Überall wo brennbare Stäube gehandhabt werden, wie z. B. in der Nahrungsmittelindustrie, besteht auch heute noch die Gefahr schwerer Unfälle. Ein seit vielen Jahren angestrebtes Ziel von Industrie, Forschungsinstituten und Berufsgenossenschaften ist es daher, den Risikofaktor Staub möglichst genau zu kennen, um so den Umgang damit sicherer gestalten zu können. Grundvoraussetzung für eine Explosion ist ein zündfähiges Brennstoff/Luftgemisch und eine Zündquelle. Diese drei Faktoren werden im Gefahrendreieck dargestellt:

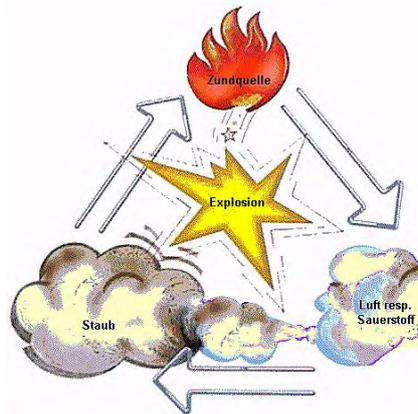


Abbildung 1.1: Bildliche Darstellung des Gefahrendreiecks.

Staub ist nur dann explosionsfähig, wenn er brennbar ist und einen Partikeldurchmesser kleiner 0,5 mm hat. Die Erfüllung dieser beiden Kriterien sagt jedoch noch nichts aus über das Brenn- und Explosionsverhalten eines Staubes. Die Staubeigenschaften werden im Experiment bestimmt und mit Hilfe von explosionstechnischen Kenngrößen charakterisiert. Zu den typischen Kenngrößen zählen unter anderem die Mindestzündenergie, der maximale Explosionsdruck und der K_{St} -Wert; letzterer ist ein Maß für die Explosionsheftigkeit. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die bereits existierenden Kenngrößen nicht ausreichen, um das von einem brennbaren Staub ausgehende

Gefährdungspotential vollständig zu beschreiben. So ist zum Beispiel die Neigung eines Staubes zur Staubwolkenbildung für seine Gefährlichkeit von großer Bedeutung. Einige Stäube lassen sich nur schwer aufwirbeln und stellen somit eine viel geringere Gefahr dar als Stäube, die bereits bei geringen Bewegungen bzw. Luftbewegungen ein zündfähiges Gemisch bilden. Trotz dieses Wissens fehlt bis heute eine charakteristische Kenngröße, die die Neigung eines Staubes zur Staubwolkenbildung beschreibt. Viele aus heutiger Sicht notwendigen und teuren Schutzmaßnahmen gegen Staubexplosionen wären nicht erforderlich, würde man die Staubungsneigung eines brennbaren Staubes mit in Betracht ziehen. Um diesen Missstand zu beheben, soll eine Apparatur mitsamt einer zugehörigen Messvorschrift zur Bestimmung einer explosionstechnischen Kenngröße „Staubungsneigung“ bereit gestellt werden. Ferner wird angestrebt, dass diese neue Kenngröße in die europäische Normenlandschaft für Explosionsschutz aufgenommen wird.



Abbildung 1.2: Staubexplosion in einem Futtermittelwerk ausgelöst durch einen Fremdkörper in einem Elevator.

1.2 Bisherige Erkenntnisse

Im Rahmen eines Projektes der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V. (FSA) wurde eine Apparatur („Staubungsneigungsapparatur“) entwickelt, mit der die Neigung von Stäuben zur Staubwolkenbildung gemessen werden kann. Für diese Apparatur wurde eine Messvorschrift erarbeitet und darüber die Kenngröße „Staubungsneigung“ definiert. Parallel dazu wurde ein Norm-Vorschlag für die neue Kenngröße entworfen, der beim Technical Comitee 305 (kurz TC 305, Gremium für Europa-Normen im Bereich Explosionsschutz) eingebracht werden soll, sobald alle Eigenschaften der Apparatur ausreichend gut untersucht sind.



Abbildung 1.3: Messapparatur zur Klassifizierung der Staubungsneigung, wie sie zu Beginn der Diplomarbeit vorhanden war. Der Innenraum ist mit Teflon ausgekleidet.

Der Prüfstaub wird aus einem Vorratsbehälter über eine Dosierschnecke in eine Messkammer aus Holz gefördert. Die kontinuierliche Staubzufuhr in die Dosierschnecke wird durch ein Rührwerk im Vorratsbehälter sichergestellt. Der zeitliche Verlauf der Staubkonzentration in der Messkammer wird mit Hilfe des Staubkonzentrationsmessgerätes SKG 5 bestimmt. Dabei wird die Lichtschwächung durch die Staubwolke zwischen einem Infrarotsender und -empfänger außerhalb der Fallstrecke des Staubes ausge-

nutzt. Das SKG 5 ist eine Entwicklung der FSA und dient der Staubkonzentrationsmessung bzw. -überwachung in Industrie- und Forschungsanlagen. Die Messaufnehmer (IR-Sender und -Empfänger) wurden für die neue Messaufgabe entsprechend umkonstruiert. Für die Auswertung der Staubkonzentrationsmessungen über eine vorgegebene Messdauer wurde ein Programmcode zur Bestimmung einer über die Messdauer gemittelten Staubkonzentration (Staubungsneigungskenngröße S_N) geschrieben. S_N wurde in sechs Staubungsneigungsklassen eingeteilt und im genannten Norm-Entwurf verankert.

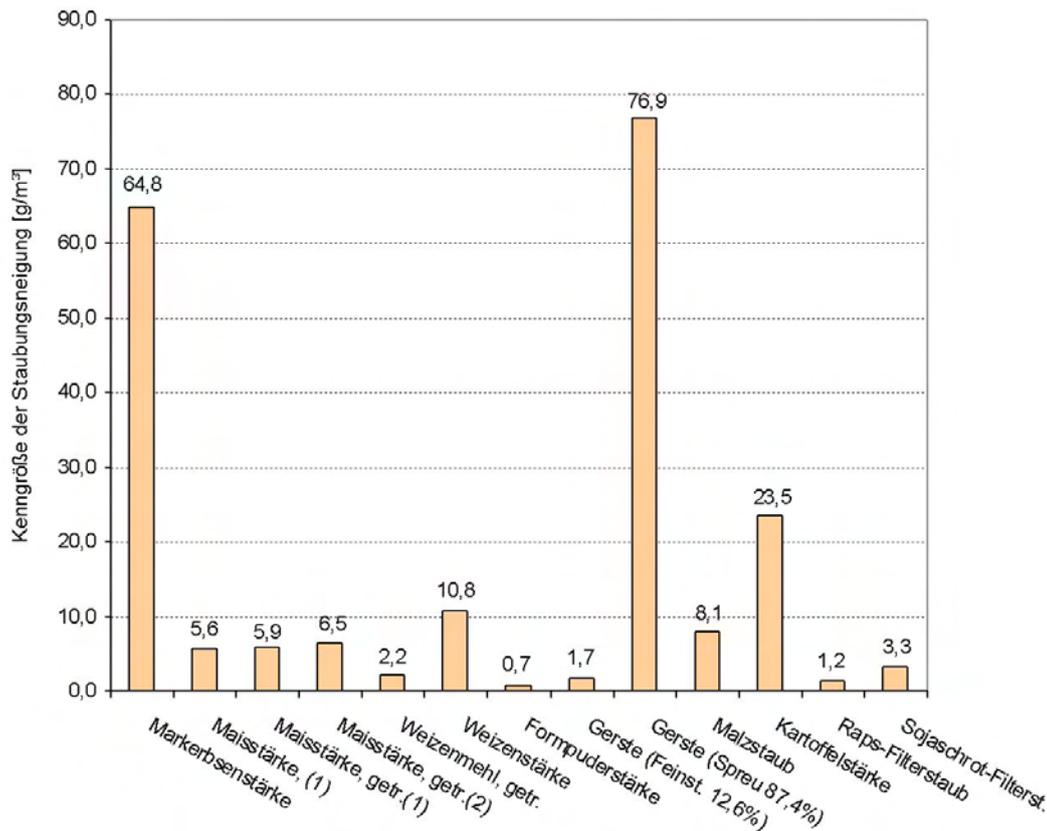


Abbildung 1.4: Mit der Apparatur zur Bestimmung der Staubungsneigung von Schüttgütern gemessene Staubungsneigungskenngrößen. Es zeigen sich zum Teil deutliche Unterschiede im Staubungsverhalten der verschiedenen Stäube.

Mit der Messapparatur wurden verschiedene Lebensmittelstäube auf ihre Staubungsneigung hin untersucht (Abbildung 1.4). Die Messungen ergaben eine gute Reproduzierbarkeit, mit Ausnahme des jeweils ersten Messwertes einer Messreihe. Die Ursache hierfür war nicht bekannt. Während der Messungen wurde das Raumklima kontinuierlich überwacht und aufgezeichnet, um eventuelle Einflüsse der Luftfeuchte auf die Ergebnisse der Versuche untersuchen zu können. Weiterhin sollten die Einflüsse elektrostatischer Effekte auf die Staubungsneigung untersucht werden. Hierfür wurde ein Drahtgitter in die Messkammer eingebaut, welches die Ladung des Staubes aufnehmen sollte. Zur Spannungsmessung an diesem Gitter wurde ein Influenz-E-Feldmeter (EMF 58) angeschlossen, das für Spannungsmessung im Bereich Elektrostatik geeignet ist. Zur Isolierung nach außen wurde die Messkammer mit Teflon ausgekleidet.

Anfängliche Messungen ließen einen Zusammenhang zwischen der Staubkonzentration in der Messkammer und der elektrostatischen Aufladung des Staubes vermuten. Diese Arbeit basiert auf dem in diesem Abschnitt beschriebenen Kenntnisstand.

1.3 Zielsetzung

Generelles Ziel dieser Diplomarbeit war es, die Kenntnis der (physikalischen) Eigenschaften über die vorhandene Apparatur zur Bestimmung der Staubungsneigung von Schüttgütern zu vervollständigen. Dieses Wissen ist unabdingbar für die Schaffung eines sinnvollen und vollständigen Norm-Vorschlages für die Apparatur bzw. die Staubungsneigungskenngröße.

Fehlende Kenntnisse hinsichtlich der physikalischen Eigenschaften der Apparatur betrafen in erster Linie den Einfluss der elektrostatischen Aufladung eines Prüfstaubes¹ auf die gemessene Staubungsneigung desselben. Ferner existierte unzureichendes Wissen über die Abhängigkeit der Aufladbarkeit und der Staubungsneigung des Prüfstaubes von Stoffeigenschaften (z. B. Produktfeuchte) und Klimaparametern (z. B. Luftfeuchtigkeit). Um diese (vermuteten) Zusammenhänge zu beleuchten, mussten folgende Fragestellungen in genannter Reihenfolge beantwortet werden:

1. Lädt sich der Prüfstaub tatsächlich elektrostatisch auf?
2. Wo in der Apparatur lädt sich der Prüfstaub auf?
3. Ist der Ladungszustand des Prüfstaubes abhängig vom Ort innerhalb der Messkammer?
4. Ist der Ladungszustand des Prüfstaubes abhängig von der Messdauer?
5. Durch welchen Mechanismus lädt sich der Prüfstaub auf?
6. Wie verändert sich die Staubungsneigung eines Staubes, wenn sein Ladungszustand verändert wird?
7. Wie hängen Staubungsneigung und elektrostatische Aufladbarkeit des Prüfstaubes von Umgebungs- und Stoffeigenschaften (Luftfeuchte, Temperatur, Produktfeuchte etc.) ab?

Zur Beantwortung der genannten Fragen waren mechanische und messtechnische Veränderungen an der Apparatur zwingend erforderlich. Die Einflüsse dieser Veränderungen auf die mit der Apparatur gewonnenen Messergebnisse zu untersuchen und anschließend die Apparatur zu optimieren, war ein weiteres Ziel dieser Arbeit.

¹Im Rahmen dieser Arbeit wurde durchweg Maisstärke als Prüfstaub verwendet.

Kapitel 2

Physikalische Grundlagen

2.1 Staubkonzentrationsmessung mit Hilfe einer Infrarot-Sonde

Um die Staubkonzentration in der Luft innerhalb der Messkammer zu erfassen, wird eine Infrarot-Leuchtdiode als Lichtquelle und eine Infrarot-Photodiode als Empfänger eingesetzt ($\lambda \approx 950 \text{ nm}$). Das Messsystem arbeitet nach folgendem Prinzip:

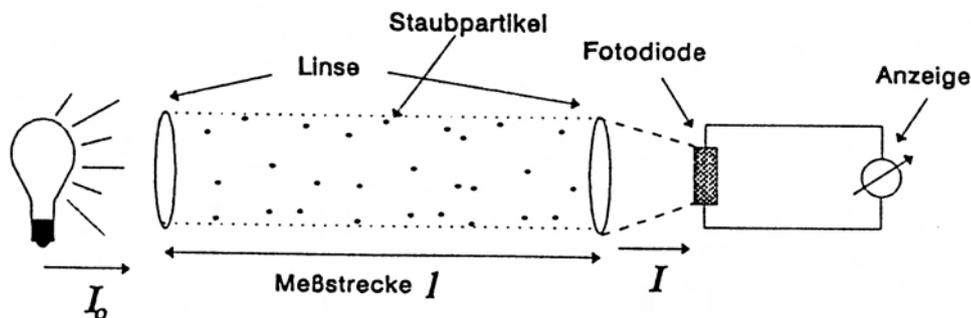


Abbildung 2.1: Schematisch dargestelltes Messprinzip der Staubkonzentrationsmessung. Die Photodiode misst die Lichtintensität, die über die Messstrecke von den Staubpartikeln nicht gestreut oder absorbiert wurde.

Der Infrarot-Sender (Leuchtdiode und Linse) sendet einen Lichtstrahl der Intensität I_0 über die Messstrecke zu einem Infrarot-Empfänger (Photodiode und Linse). Die Staubpartikel auf der Strecke zwischen Sender und Empfänger absorbieren bzw. streuen das Licht; dieser Vorgang wird als Extinktion bezeichnet. Die geschwächte Lichtintensität I wird von der Photodiode im Empfänger detektiert. I ist von der Staubkonzentration c , der Distanz l zwischen Sender und Empfänger und einer stoffspezifischen Größe ϵ , dem Extinktionskoeffizienten, abhängig. Dieser Zusammenhang wird durch das Lambert-Beer'sches Gesetz beschrieben:

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

Wird der Extinktionskoeffizient ϵ (2.1) für einen Staub in Gleichung in einer Kalibrierung bestimmt, kann eine unbekannte Konzentration c dieses Staubes über die Messung von I mit Hilfe von (2.1) berechnet werden. Dies deshalb, weil sowohl I_0 als auch l bekannte Konstanten der Infrarot-Sonde sind.

2.2 Elektrostatische Aufladung

Werden zwei Körper mit einander in Kontakt gebracht, so kommt es an deren Oberflächen zu einem Elektronenübertritt von einem Körper auf den anderen. Grund hierfür ist die unterschiedliche Elektronenaustrittsenergie verschiedener Stoffe. Diese ist die notwendige Energie, um ein Elektron von der Oberfläche eines Materials ins Vakuum zu transferieren. Bei der Trennung der Körper bleibt die Ladungsverschiebung teilweise erhalten, woraus die elektrostatische Aufladung der Körper resultiert (Abbildung 2.2). Die Höhe der Aufladung ist abhängig von der Trenngeschwindigkeit und der Leitfähigkeit der beteiligten Materialien. Bei hoher Leitfähigkeit bzw. geringer Trenngeschwindigkeit kommt es zu einem Ladungsausgleich während der Trennung - die Aufladung ist niedrig bzw. nicht vorhanden.

Die Aufladung bei Schüttungen durch Kontakt der Partikel untereinander ist trotz gleichen Materials möglich. Aus elektrostatischer Sicht gibt es keine identischen Stoffe [16].

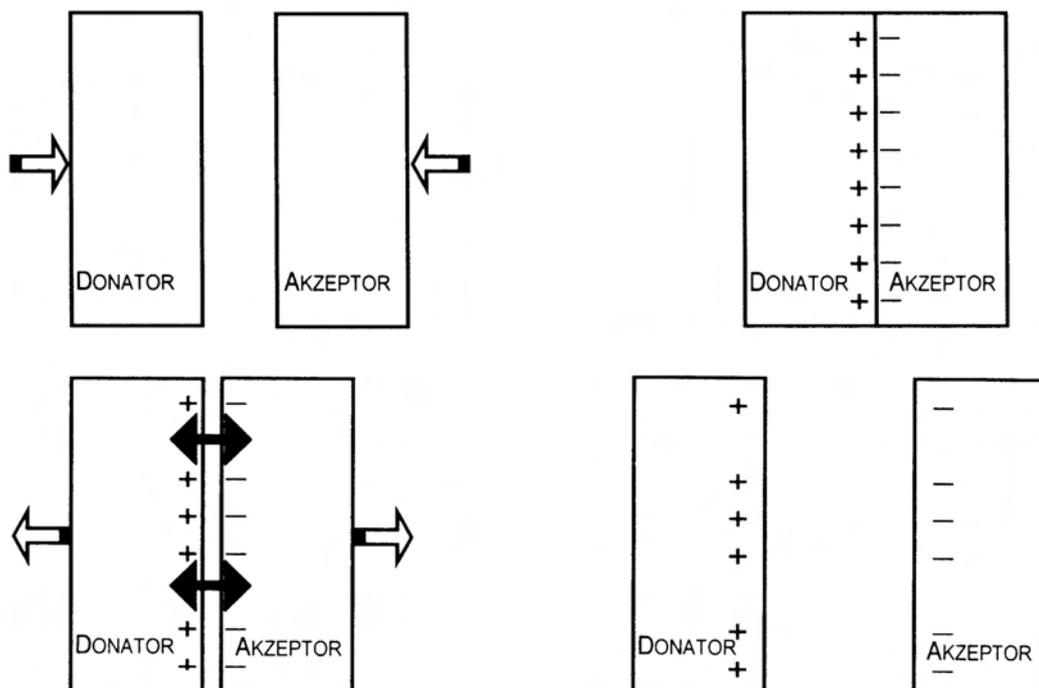


Abbildung 2.2: Durch Annäherung zweier Körper kommt es zum Elektronenübertritt von Donator zu Akzeptor. Bei der Trennung der beiden Körper bleibt eine Restladung zurück.

2.2.1 Spannungs- und E -Feldmessung mit Hilfe eines Influenz-Elektrofeldmeters

Elektrische Ladungen erzeugen ein elektrisches Feld, dessen Stärke durch die elektrische Feldstärke E definiert ist. Wird zwischen zwei sich parallel im Abstand s gegenüberstehenden leitfähigen Platten eine Spannung U angelegt, so entsteht zwischen den beiden Platten ein homogenes elektrisches Feld, dessen Stärke proportional zur Höhe der angelegten Spannung ist:

$$E = \frac{U}{s} \quad (2.2)$$

Die Feldstärke kann mit einem Influenz-Elektrofeldmeter gemessen werden. Dabei wird die Ladungsverschiebung durch Influenz¹ in einer Influenz-Elektrode ausgenutzt, wobei sich die Influenz-Elektrode im zu messenden elektrischen Feld befindet. Die fest stehende Influenz-Elektrode wird periodisch von einer geerdeten, rotierenden Flügelrad-Elektrode vom elektrischen Feld abgeschirmt. So kommt es auf der Influenz-Elektrode zu periodischen, dem zu messenden Feld proportionalen, Ladungsverschiebungen (Wechselstrom), die nach Verstärkung gemessen werden (Abbildung 2.3).

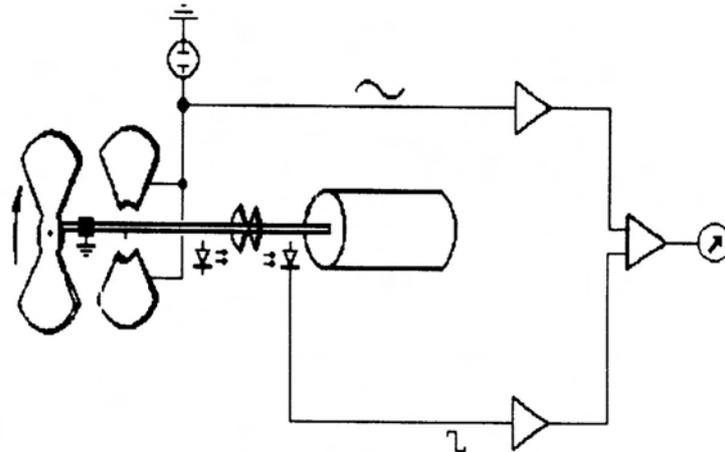


Abbildung 2.3: Schema eines Influenz-Elektrofeldmeters. Durch eine rotierende Flügelrad-Elektrode vor der Influenz-Elektrode entsteht ein messbarer Wechselstrom, der der zu messenden elektrischen Feldstärke proportional ist.

Mit diesem Messsystem sind auch Spannungsmessungen möglich, wobei es sich wegen seines extrem hohen Innenwiderstandes besonders gut für Hochspannungsmessungen in hochohmigen Schaltungen eignet. Die zu messende Spannung wird auf einen, der Influenz-Elektrode vorgeschalteten Kondensator geleitet. Die Stärke E des Feldes am Kondensator wird mit dem Flügelrad-/Influenz-Elektrodensystem gemessen und über den Abstand s der Kondensatorplatten mit Hilfe von (2.2) auf die gesuchte Spannungshöhe umgerechnet.

¹Auf Ladungen, die sich innerhalb eines elektrischen Feldes befinden, wird eine Kraft ausgeübt, die zur Verschiebung der Ladungen führt. Dieses Phänomen nennt man Influenz.

2.2.2 Neutralisation von elektrostatischen Aufladungen mittels Ionisatoren

Ionisatoren sind Geräte, die bei der Neutralisation von elektrostatischen Aufladungen Verwendung finden. Wie der Name schon vermuten lässt, werden mit Ionisatoren freie Ionen und Elektronen erzeugt, die die elektrostatische Aufladung auf Festkörpern durch Rekombination² neutralisieren. Es wird zwischen passiven und aktiven Ionisatoren unterschieden. Beide Arten werden im großen Maßstab in der Industrie eingesetzt, um elektrische Ladungen auf Kunststoffplatten oder -schichten zu neutralisieren.

Passive Ionisatoren sind geerdete spitze Elektroden, z. B. feine Nadeln. Sie neutralisieren elektrische Ladungen auf der Oberfläche eines aufgeladenen Gegenstandes so lange die Feldstärke an den Spitzen des Ionisators geringer ist, als das durch die Aufladung erzeugte Feld.

An einen aktiven Ionisator wird dagegen eine hohe Spannung an die Spitzen angelegt, was die Ausbildung eines starken elektrischen Feldes an den Spitzen nach sich zieht. Dadurch wird die Luft in der näheren Umgebung der Spitzen ionisiert und es kommt in diesem Bereich zur gewünschten Ladungsneutralisation [7].

Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Ionisator arbeitet mit einer Wechselhochspannung (7 kV, 50 Hz), die an eine Ring-Elektrode angelegt wird. Bei der Ring-Elektrode sind einige Spitzen äquidistant so auf einem Ring angeordnet, dass sie mit ihren Spitzen in das Zentrum des Rings zeigen. So werden alle aufgeladenen Gegenstände entladen, die durch die Ring-Elektrode fallen. Bei abgeschalteter Hochspannung kann das Gerät als passiver Ionisator betrieben werden, wobei dann die Neutralisation von elektrostatischen Aufladungen allerdings nicht vollständig ist.

2.3 Boltzmann-Verteilung

Die Teilchendichte n in Abhängigkeit von der Höhe h über dem Boden ist durch die Boltzmann-Verteilung

$$n = n_0 \cdot e^{-\frac{m \cdot g \cdot h}{k \cdot T}} \quad (2.3)$$

gegeben. In (2.3) ist n_0 die Teilchendichte in der Höhe $h = 0$, m die Teilchenmasse, g die Erdbeschleunigung, k die Boltzmann-Konstante und T die Temperatur. Die Dichte der Staubpartikel nimmt auf Grund der mit der Höhe h wachsenden potentiellen Energie $m \cdot g \cdot h$ gemäß einer Exponentialfunktion ab. Der potentiellen Energie wirkt die Teilchenenergie $k \cdot T$ entgegen, die mit der Temperatur T wächst.

²Die Vereinigung zweier geladener Elementarteilchen zu einem neutralen Teilchen nennt man Rekombination.

Kapitel 3

Apparatur zur Bestimmung der Staubungsneigung von Schüttgütern

Der Aufbau der Apparatur ist in einem 1. Norm-Vorschlag mit dem Titel „Bestimmung einer Kenngröße hinsichtlich der Fähigkeit zur Staubwolkenbildung“ beschrieben. Dieser Norm-Vorschlag wurde von der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin erarbeitet [13]. Im folgenden wird die Apparatur detailliert beschrieben, wobei der Norm-Vorschlag als Grundlage diente.

3.1 Mechanischer Aufbau

Der mechanische Teil der Apparatur zur Messung der Staubungsneigung besteht aus dem Dosier- und Beschickungssystem mit dem Probenbehälter und der Messkammer. An die Messkammer ist die Messtechnik angeschlossen, die im Abschnitt 3.2 ausführlich beschrieben wird. Die gesamte Apparatur ist auf einen fahrbaren Unterbau platziert.

3.1.1 Probenbehälter

Der Probenbehälter aus Edelstahl dient als Vorratsbehälter, aus welchem während der Messung das Produkt in die Messkammer dosiert wird. Er besitzt ein Volumen von 10 l und beinhaltet ein Horizontalrührwerk zur Vermeidung von Brückenbildung während des Staubaustrages und ist mit einem Plexiglasdeckel abgedeckt.

3.1.2 Dosiereinrichtung

Von der Bodenöffnung im Probenbehälter wird das Produkt über zwei regelbare Doppelkonkav-Schnecken mit vertikalen Austragstutzen zur Erstellung eines kontinuierlichen und konstanten Fallstroms in die Messkammer gefördert. Die Förderleistung beträgt bei einer Motordrehzahl von 500 min^{-1} rund $1 \text{ dm}^3/\text{min} \pm 0,1 \text{ dm}^3/\text{min}$.

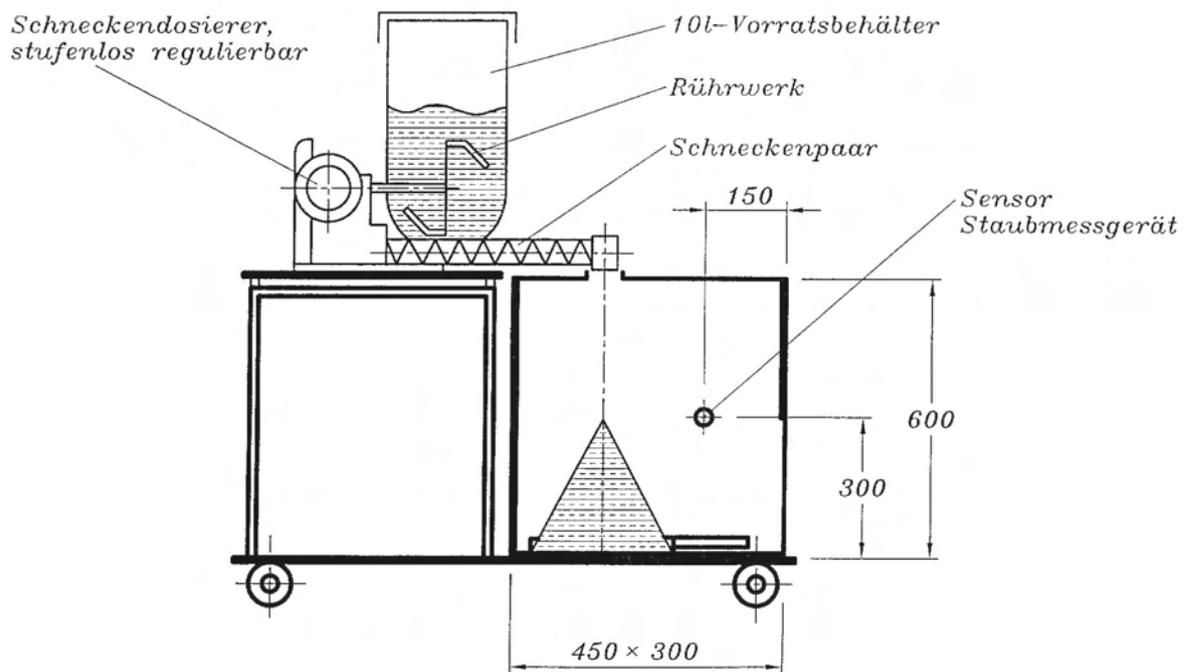


Abbildung 3.1: Zeichnung des mechanischen Aufbaus der Apparatur zur Bestimmung der Staubungsneigung von Schüttgütern.

3.1.3 Messkammer

Die eigentliche Messkammer besteht aus einem quaderförmigen Behälter (600 mm × 450 mm × 300 mm), der so montiert ist, dass der Austragstutzen der Dosiereinrichtung diesen 150 mm mittig überragt. Die maximale Fallhöhe des Schüttgutes beträgt 590 mm. Die Behälteroberseite ist mit einer geteilten Plexiglasscheibe abgedeckt. Zum Produkteintrag ist eine runde Öffnung ($\varnothing = 80$ mm) unterhalb des Austragstutzens vorhanden. An der Behältervorderseite ist zum besseren Produktaustrag eine Plexiglasscheibe mit Scharnier montiert. Eine im Behälterinneren positionierte Stahlschaufel (300 mm × 300 mm) dient der Rückwaage des Schüttgutes (Abbildung 3.1).

Zur Aufnahme der Messsensoren des SKG 5 ist je ein 1"-Außennippel an den beiden Seitenwänden des Behälters in 300 mm Höhe angebracht. Dort sind beide Sensoren 150 mm außerhalb der Schüttung so positioniert, dass sie auf einer Achse ins Behälterinnere ragen und eine Messstrecke von 200 mm bilden (siehe Abschnitt 3.2).

3.2 Messtechnik

3.2.1 SKG 5

Das erste Glied in der Messkette der Staubungsneigungsapparatur ist das Staubkonzentrationsmessgerät SKG 5 der FSA, dessen physikalisches Funktionsprinzip bereits in Abschnitt 2.1 detailliert beschrieben wurde.

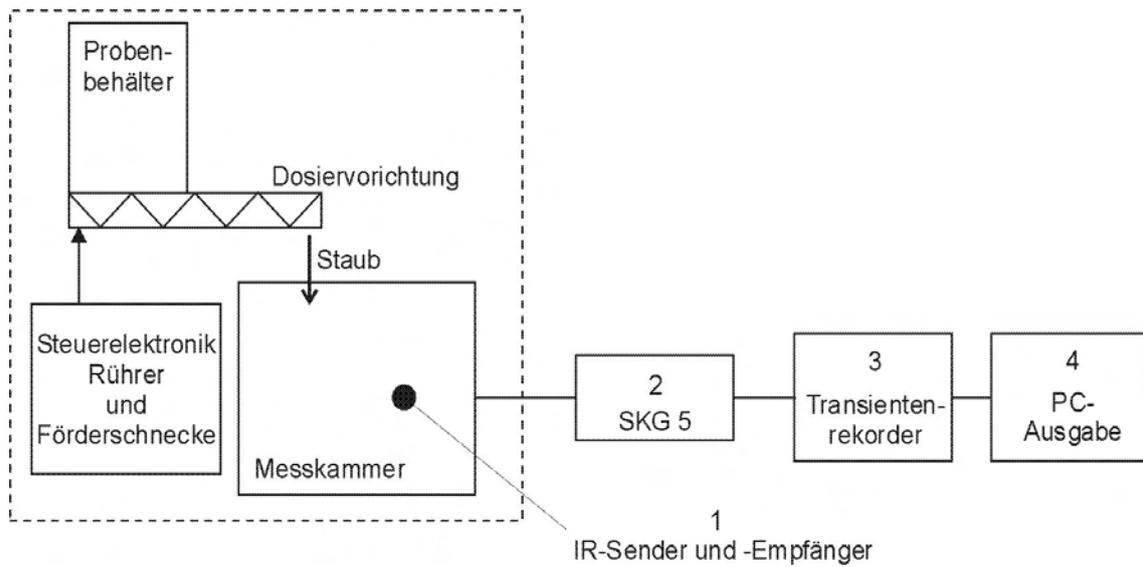


Abbildung 3.2: Messkette der Apparatur zur Bestimmung der Staubungsneigung von Schüttgütern.

Im Messkopf des SKG 5 befindet sich eine Infrarot-Leuchtdiode, von der aus ein Infrarot-Strahl ($\lambda \approx 950 \text{ nm}$) durch die Messkammer zu einem gegenüber im Messkopf positionierten Empfänger gesendet wird. Die Staubkonzentration ergibt sich aus der Lichtabsorption gemäß dem Lambert-Beer-Gesetz (Gleichung (2.1)) und wird in Volt erfasst (Abbildung 3.2).

3.2.2 Speicheroszilloskop

Dem SKG 5 ist ein digitales Speicheroszilloskop (Volkraft PCS64i) nachgeschaltet, welches als Transientenrekorder fungiert. Dieses Oszilloskop besitzt 2 Messkanäle sowie eine Schnittstelle für die Datenübertragung zu einem Rechner.

3.2.3 Rechner

Die endgültige Datenerfassung und -auswertung geschieht schließlich mit einem Rechner. Über eine zum Speicheroszilloskop gehörige Software erfolgt die Steuerung des Oszilloskops und der Datentransfer. Die Analyse der Messdaten und die Berechnung der Staubungsneigung geschieht abschließend mittels einer weiteren, speziellen Software (eine Eigenentwicklung der FSA).

3.3 Bestimmung der Staubungsneigungskenngröße

Die Messung der Staubungsneigungskenngröße S_N geschieht in drei Schritten. In einem ersten Schritt muss das Staubkonzentrationsmessgerät SKG 5 für den zu untersuchenden Staub kalibriert werden. Das bedeutet, dass eine Funktion erstellt wird, die den

Zusammenhang zwischen der am SKG 5 angezeigten Lichtschwächung (in mV) und der Staubkonzentration liefert. Im zweiten Schritt erfolgt die Aufnahme der Messdaten, deren Auswertung im abschließenden dritten Schritt schließlich die gesuchte Staubungsneigungskenngröße ergibt.

3.3.1 Kalibrierung des SKG 5

Die Messköpfe des SKG 5 werden in eine spezielle Vorrichtung für die Kalibrierung eingespannt und in die optische Achse justiert. Das infrarotdurchlässige Kalibriergefäß wird zwischen diese Messköpfe auf einem Magnetprüfer unter dem Abzug positioniert und mit 240 ml Ethanol gefüllt (Abbildung 3.3).



Abbildung 3.3: Vorrichtung zur Erfassung der Kalibrierkurve des SKG 5 (links) und das SKG 5 (rechts).

m_{St} [mg]	0	6	12	24	48	72	144
c [g/m ³]	0	25	50	100	200	300	600
U_{SKG} [mV]	0	260	456	699	904	966	996

Tabelle 3.1: Konzentrationen von Maisstärke in der Ethanol-Maisstärke-Suspension und zugehörige Spannungsanzeige am SKG 5 zur Erstellung einer Kalibrierkurve.

Die Anzeige des SKG 5 wird auf Null abgeglichen. Bei eingeschaltetem Magnetprüfer werden in das Kalibriergefäß sukzessiv 6 mg, 6 mg, 12 mg, 24 mg, 24 mg und 72 mg des Probestaubes gegeben und die am SKG 5 angezeigten Spannungen abgelesen. In Tabelle 3.1 sind die Ergebnisse einer solchen Kalibriermessung für Maisstärke angegeben. Die Messwerte werden notiert und anschließend für die Suche einer Funktion benutzt, die den Zusammenhang zwischen der Staubkonzentration und der am SKG 5 angezeigten Spannung herstellt. Das Aufstellen dieser Funktion ist nichts anderes als das Auffinden der Koeffizienten B_1 , B_2 und B_3 in

$$U_{\text{SKG}} = B_1 \cdot e^{B_2 \cdot c} + B_3 \quad (3.1)$$

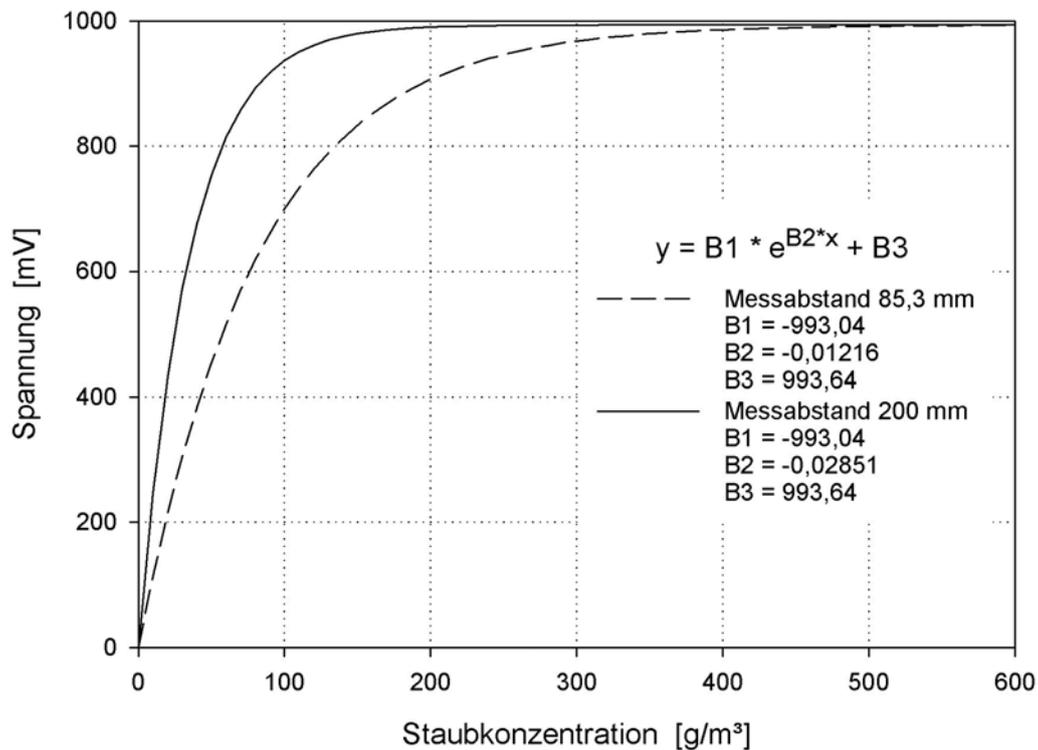


Abbildung 3.4: Kalibrierkurve des SKG 5 für Maisstärke. Zu sehen sind die Koeffizienten B_1 , B_2 und B_3 und die dazugehörigen Kalibrierkurven für die Messabstände 85,3 mm und 200 mm.

wobei diese Gleichung zum Lambert-Beer'schen Gesetz (2.1) äquivalent ist. Weil der Abstand zwischen Infrarot-Sender und -Empfänger des SKG 5 bei der Kalibriermessung geringer ist (85,3 mm) als bei der Staubungsneigungsapparatur (200 mm), muss der Koeffizient B_2 in (3.1) abschließend auf den Abstand 200 mm umgerechnet werden (Abbildung 3.4). Für die Koeffizientensuche wird ein spezielles Programm benutzt.

3.3.2 Gang der Messung

Das Probenmaterial wird ohne Staubverluste, wenn nötig mit Hilfe eines Löffels oder einer Schaufel, in einer solchen Menge in den Probenbehälter gefüllt, dass auch nach Durchlauf einer Einzelmessung der Probenbehälter hinreichend gefüllt ist. In der Regel sind das etwa 5 kg des Produkts.

Die Motordrehzahl der Dosierschnecke wird auf 500 U/min eingestellt, was einem Volumenförderstrom von rund $1 \text{ dm}^3/\text{min}$ entspricht.

Die Produktfeuchte, die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur im Raum werden gemessen.

Die Messköpfe des SKG 5 werden mittels Lehre auf ihrer optischen Achse justiert und 200 mm Messabstand eingestellt.

Vor Beginn der Messung werden das Staubkonzentrationsmessgerät SKG 5, der Transientenrekorder und Rechner eingeschaltet. Nach 100 s Vorlaufzeit beginnt die Messung mit dem Starten der Stoppuhr und der Dosiereinrichtung. Nach fünf Minuten

Förderzeit wird die Dosiereinrichtung abgeschaltet und das Sedimentationsverhalten des aufgewirbelten Staubes noch weitere 350 Sekunden lang mit der Messkette erfasst. Danach werden die Messdaten aus dem Transientenrekorder in den Rechner übertragen und dauerhaft abgespeichert.

Die während der Messung in die Messkammer geförderte Staubmasse wird entnommen, gewogen und die Messwerte notiert. Anschließend erfolgt die Reinigung der Messkammer.

Die beschriebene Messung wird zwei weitere Male wiederholt.

3.3.3 Auswertung

Die über die gesamte Förderzeit t_F und die anschließende Sedimentationszeit t_S (insgesamt 650 s) aufgezeichnete Staubkonzentration $c(t)$ wird mit einem speziell für die Auswertung der Messdaten geschriebenen Programm weiter verarbeitet (Abbildung 3.5). Zunächst sucht das Programm den Nullpunkt der Messkurve. Nach Eingabe der Koeffizienten der Kalibrierkurve (Abschnitt 3.3.1) wird die Staubungsneigungskenngröße S_N als der Quotient aus dem Integral der Staubkonzentration über die Summe aus Förder- und Sedimentationszeit und dieser Zeitsumme errechnet.

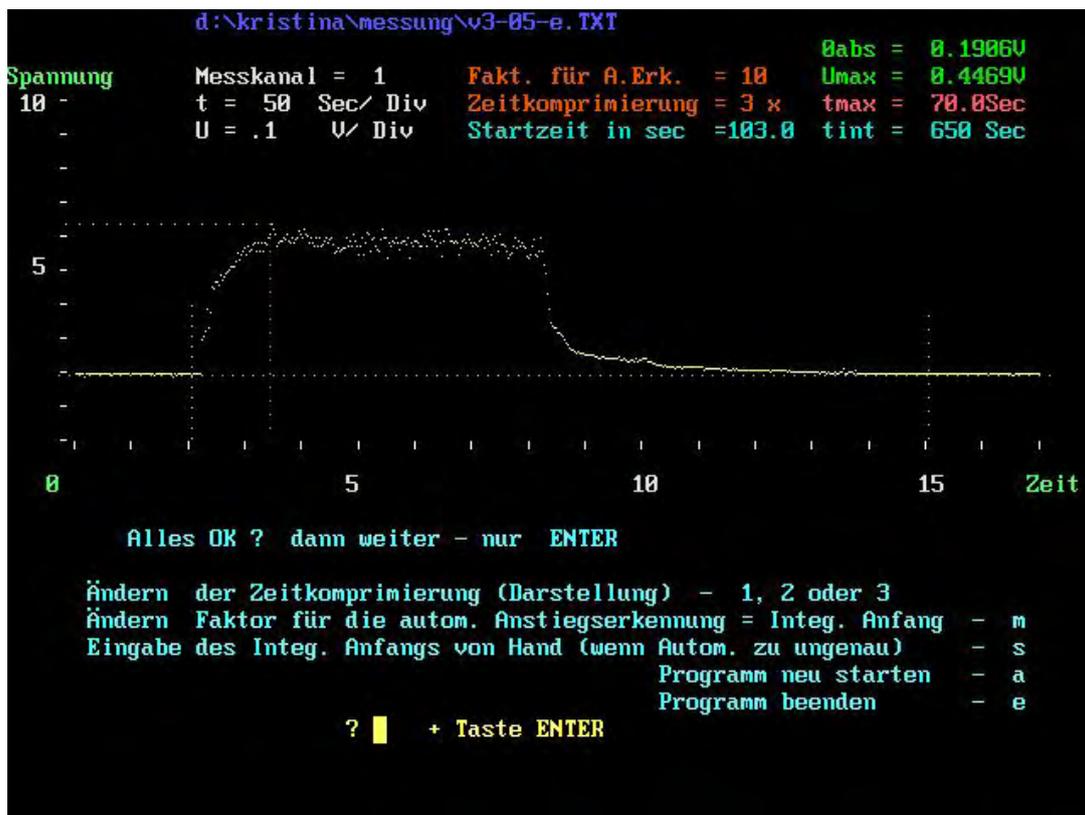


Abbildung 3.5: Ein Fenster des Programms zur Auswertung der Messdaten einer Messung zur Bestimmung der Staubungsneigung des Prüfstaubes. Zu sehen sind diverse Programm- und Messparameter sowie die grafische Darstellung der mit dem SKG 5 gemessenen Spannung als Funktion der Zeit.

Die Staubungsneigungskenngröße S_N ergibt sich also zu

$$S_N = \frac{1}{t_F + t_S} \cdot \int_0^{t_F + t_S} c(t) dt \quad (3.2)$$

Die Kenngröße S_N ist somit die mittlere Staubkonzentration während der Förder- und Sedimentationszeit. In Abbildung 3.6 ist dies bildlich dargestellt.

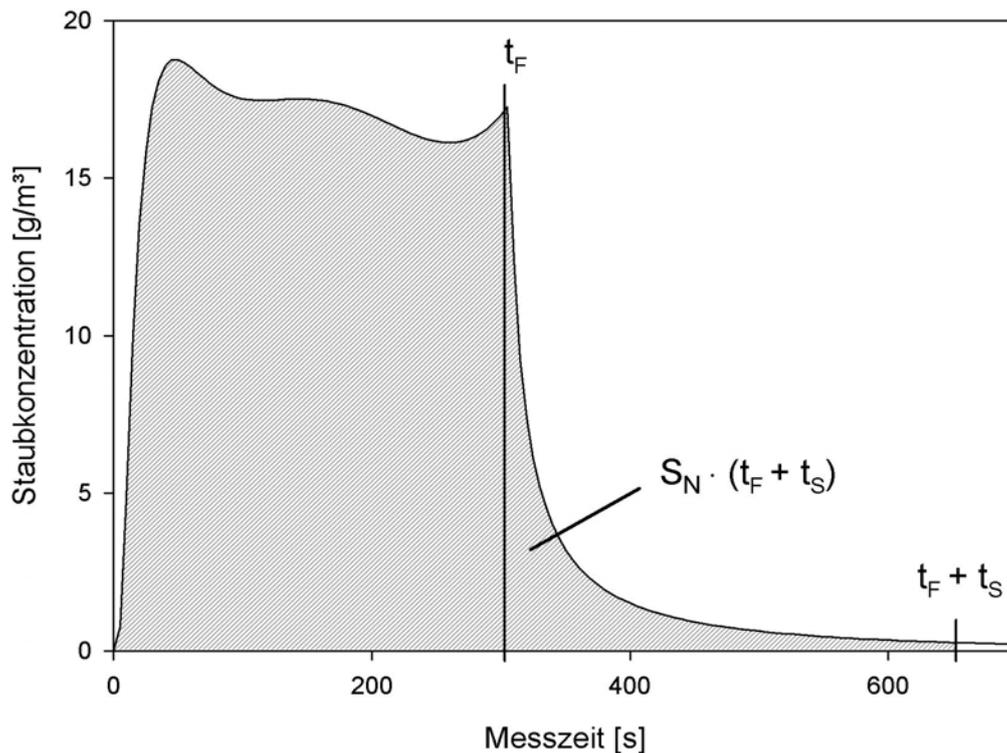


Abbildung 3.6: Zur Bestimmung der Staubungsneigungskenngröße S_N wird die Staubkonzentration über die Messdauer integriert, d. h. die Fläche unter der Konzentrationskurve ermittelt und durch die Messdauer dividiert.

Abschließend wird dem zu untersuchenden Staub eine Staubungsklasse zugeordnet. Im eingangs erwähnten Norm-Vorschlag sind diese Klassen definiert (Tabelle 3.2). Die Einteilung in Staubungsklassen bringt zum einen den Vorteil, dass die Stäube einfach und übersichtlich hinsichtlich Staubungsneigung charakterisiert werden können. Zum anderen kommen so die natürlichen Schwankungen bei der Messung der Staubungsneigungskenngröße, die durchaus 10 % betragen können, nicht mehr zum tragen.

S_N [g/m ³]	0 - 0,9	1 - 3,9	4 - 6,9	7 - 9,9	10 - 49,9	≥ 50
Staubungsklasse	1	2	3	4	5	6

Tabelle 3.2: Einteilung der Staubungsneigungskenngrößen in Staubungsklassen.

Kapitel 4

Prüfstaub

4.1 Auswahl des Prüfstaubes

Alle Untersuchungen im Zusammenhang mit dieser Arbeit sollten mit einem einzigen Staub (Produkt) durchgeführt werden, um die Anzahl der Einflussparameter auf die Versuchsergebnisse in einem überschaubaren Rahmen zu halten. Weiterhin sollten die Eigenschaften dieses Staubes gut bekannt und die Beschaffung unproblematisch sein. Darüber hinaus war eine einfache Handhabung und Lagerung des Produktes gefordert¹. All diese Bedingungen erfüllt getrocknete Maisstärke, wie die im nachfolgenden Abschnitt 4.2 beschriebenen Untersuchungen zeigen. Dieser Staub ist ein Massenprodukt der Lebensmittelindustrie und wurde schon für frühere Untersuchungen mit der Staubungsneigungsapparatur² verwendet.

Maisstärke gehört als Polysaccharid zu den makromolekularen Kohlehydraten und ist der Hauptanteil der Stärke im Lebensmittelbereich. Die Stärkekörner sind in Wasser unlöslich und können durch wiederholtes Auswaschen, Dekantieren und durch Schleudervorgänge aus zerkleinertem Pflanzenmaterial von Begleitstoffen abgetrennt werden. Es sind mikroskopisch kleine Teilchen von großer Härte ($\varnothing < 30 \mu\text{m}$). Im ungetrockneten Zustand schwankt der Wassergehalt zwischen 10 % und 20 %.

Die für die Untersuchungen benutzte getrocknete Maisstärke „Drygel 03411“ der Firma Cerestar wird in der Versuchsanlage der FSA in Kappelrodeck benutzt und wurde von dort geliefert.

4.2 Untersuchung der Staubeigenschaften

Vor Beginn der eigentlichen Untersuchung der Apparatur zur Messung der Staubungsneigung von Schüttgütern musste nicht nur der für die Messungen verwendete Prüfstaub in seinen Eigenschaften sehr genau bekannt sein, sondern auch ob die ausgewählte Maisstärke den in Abschnitt 4.1 gestellten Auswahlkriterien gerecht wird.

¹Dies ist gleichbedeutend mit der Forderung nach Ungiftigkeit des Staubes bzw. damit, dass der Staub bei längerer Lagerung nicht verklumpt oder sich in seinen Eigenschaften verändert.

²Die Kurzbezeichnung für die Apparatur zur Bestimmung der Staubungsneigung von Schüttgütern.

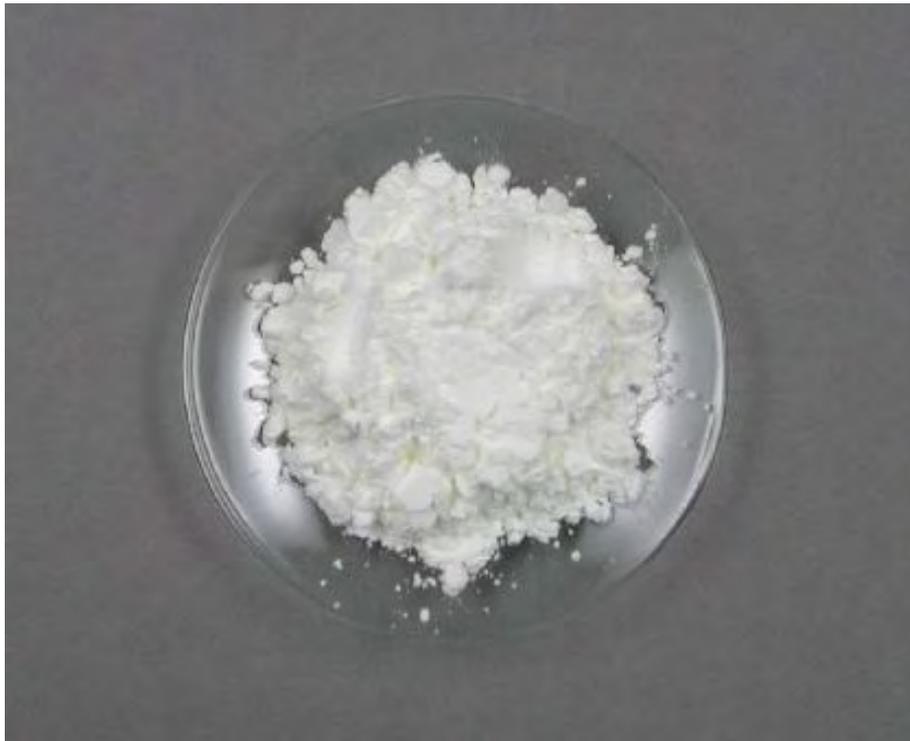


Abbildung 4.1: Getrocknete Maisstärke „Drygel 03411“ der Firma Cerestar.

4.2.1 Produktfeuchte

Die Feuchte des Prüfstaubes wurde gemäß den BGN-internen „Prüfanweisungen zur Bestimmung der sicherheitstechnischen Explosionskenngrößen im Zentrallabor“ für die Bestimmung des Wassergehaltes im Trockenschrank bestimmt: Circa 5 g Maisstärke werden in ein Metallschälchen eingewogen und in einem Glasbehälter gemeinsam mit eingeschliffenem Deckel 1 Stunde lang bei 105 °C im Trockenschrank getrocknet. Nach der Trockenzeit wird der Glasbehälter zum Abkühlen sofort abgedeckt. Die Probe wird nach dem Abkühlen erneut gewogen; aus der Differenz der beiden Wäageergebnisse ergibt sich die relative Produktfeuchte z in Massenprozent:

$$z = \frac{m_f - m_{tr}}{m_f} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Die Produktfeuchte wurde zunächst nach Anlieferung der Maisstärke gemessen. Es ergab sich ein Wert von $z = 2,1\%$ für die relative Produktfeuchte. Anschließend wurde ein Teil der Maisstärke in luftdichte Kunststoffbehälter verpackt, der Rest wurde in dem (offenen) Sack gelagert, in dem die Maisstärke angeliefert wurde. Von Zeit zu Zeit wurde die Feuchte der beiden unterschiedlich gelagerten Maisstärkedeponien gemessen. Bei Lagerung in geschlossenen Behältern ändert sich die Feuchte des Produktes über die Zeit nur unwesentlich. Bei offener Lagerung (offener Papiersack) ändert sich die Produktfeuchte ($2\% < z < 5\%$) in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit. Die Ergebnisse der Produktfeuchtemessungen sind in Tabelle 4.1 zusammenfassend dargestellt.

Datum [2003]	verschlossen gelagert z [% r. F.]	im Sack gelagert z [% r. F.]
13. 03.	2,1	2,1
18. 03.		2,8
25. 03.	2,1	
09. 04.	2,1	
16. 04.	1,9	3,8
23. 04.		3,6
30. 04.		3,5
07. 05.		3,5
23. 06.		3,0
09. 07.		3,5
02. 09.	2,3	5,0

Tabelle 4.1: Ergebnisse der Feuchtemessung am Prüfstaub. Der 13. 03. 2003 war der Anlieferstag des Produktes. Im August herrschte eine extrem schwül-heiße Wetterlage, was den hohen Produktfeuchte-Messwert bei Sacklagerung am 02. 09. 2003 erklärt.

4.2.2 Schüttdichte

Die Schüttdichte wurde in Anlehnung an die DIN 53466 mit dem Messgerät SMG 53466 BGN bestimmt. Das Messgerät besteht aus einem Messbecher mit einem Volumen von $V_{\text{Sch}} = 0,1 \text{ dm}^3$ und einem Trichter mit einer Verschlussplatte. Durch einen speziellen mechanischen Aufbau werden Messbecher und Trichter zentrisch übereinander positioniert. Die Probe wird in den Trichter gefüllt. Durch Öffnen der Verschlussplatte fällt das Pulver in den zuvor gewogenen Messbecher. Überschüssiges Produkt wird mit einem Lineal abgestreift. Die Probenmasse wird durch erneute Wägung des Messbechers mittels Differenzbildung bestimmt. Für das Messergebnis wird der Mittelwert aus zwei Versuchen herangezogen und die Messabweichung σ errechnet.

$$\rho_{\text{Sch}} = \frac{m_{\text{St}}}{V_{\text{Sch}}} \quad \sigma = \frac{\rho_{\text{Sch}_1} - 0,5 \cdot (\rho_{\text{Sch}_1} + \rho_{\text{Sch}_2})}{0,5 \cdot (\rho_{\text{Sch}_1} + \rho_{\text{Sch}_2})} \cdot 100 \quad (4.2)$$

Schüttdichtemessungen wurden am Tag der Anlieferung der Maisstärke durchgeführt. Rund 1 Monat später wurde die Schüttdichte für das geschlossen gelagerte bzw. das im offenen Sack gelagerte Produkt erneut bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Es zeigte sich, dass die Schüttdichte beim geschlossen gelagerten Produkt im Rahmen des Messfehlers unverändert geblieben ist. Für das offen gelagerte Produkt konnte eine leichte Verringerung der Schüttdichte festgestellt werden.

Datum [2003]	V_{Sch} [g/cm ³]			
	verschlossen gelagert	σ [%]	offen gelagert	σ [%]
13. 03.	0,622	1,0	0,622	1,0
16. 04.	0,620	1,2	0,610	0,6

Tabelle 4.2: Gemessene Schüttdichte von geschlossen bzw. offen gelagerter Maisstärke. Am 13. 03. 2003 wurde die Maisstärke angeliefert.



Abbildung 4.2: Vorrichtung zur Schüttdichtemessung in Anlehnung an die DIN 53466

4.2.3 Partikelgrößenverteilung

Die FSA verfügt über einen Partikelgrößenanalysator vom Typ HELOS der Firma Sympatec. Das Funktionsprinzip dieses Gerätes basiert darauf, dass Licht einer bestimmten Wellenlänge durch kleine Partikel in einer, von der Partikelgrößenverteilung abhängigen charakteristischen Weise vorwärts gebeugt wird³. Durch winkelabhängige Messung der Beugungslichtintensität an einer in der Apparatur dispergierten Staubprobe lässt sich auf die gesuchte (relative) Partikelgrößenverteilung zurückrechnen.

³Dieses Phänomen ist unter dem Begriff Fraunhofer'sche Beugung bekannt.

Bei dieser Untersuchung war zunächst ganz allgemein die Partikelgrößenverteilung der Maisstärke „Drygel 03411“ von Interesse (Abbildung 4.3). Der Medianwert⁴ der Maisstärke wurde zu rund $13 \mu\text{m}$ bestimmt. Darauf aufbauend wurde die Partikelgrößenverteilung nach längerer Lagerzeit erneut untersucht. Analysiert wurde sowohl eine Probe aus der geschlossenen Lagerung als auch eine Probe aus der offenen Sacklagerung. Die Messung nach längerer Lagerzeit ergab keine signifikante Änderung an diesem Wert.

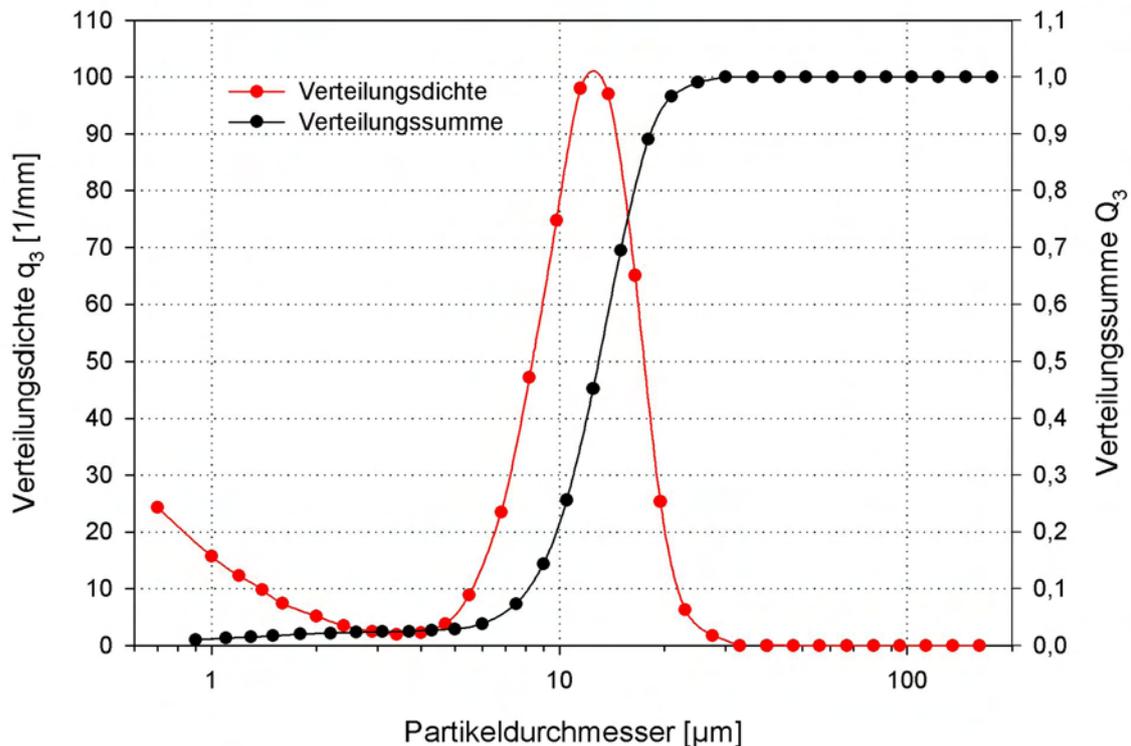


Abbildung 4.3: Partikelgrößenverteilung der Maisstärke „Drygel 03411“ gemessen kurz nach dem Tag der Anlieferung.

4.2.4 Partikeloberfläche und -form

Für eine Begutachtung der Partikeloberfläche und -form standen sowohl ein Raster-Elektronen-Mikroskop also auch ein Licht-Mikroskop zur Verfügung.

Für die Elektronen-Mikroskopie wird eine dünne Schicht des Probestaubes auf einen Probenträger aufgebracht. Die Teilchen werden ionisiert und eine atomare Schicht aus Gold aufgedampft. Das ist erforderlich, weil für die Objektabbildung mit Hilfe einer Elektronen-Optik die Objektflächen leitfähig sein müssen.

Im Vergleich zur Raster-Elektronen-Mikroskopie sind die Vergrößerungsmöglichkeiten bei der Licht-Mikroskopie etwas geringer, aber dennoch ausreichend, um Aussagen

⁴Medianwert: 50 % der betrachteten Staubmasse hat einen Teilchendurchmesser kleiner oder gleich dem Medianwert.

über die Partikelbeschaffenheit treffen zu können. Im Vergleich zum Raster-Elektronen-Mikroskop erreicht ein Licht-Mikroskop geringere Tiefenschärfen. Dafür ist die Probenvorbereitung mit erheblich weniger Aufwand verbunden; die Partikel werden einfach mit einer Mikroskopierflüssigkeit⁵ präpariert.

Maisstärke-Partikel wurden sowohl unter dem Raster-Elektronen-Mikroskop als auch unter dem Licht-Mikroskop auf ihre Oberflächenbeschaffenheit und Partikelform hin untersucht. Dabei wurde frische bzw. länger gelagerte (geschlossen und offen) Maisstärke bei unterschiedlicher Vergrößerung betrachtet. Die Oberfläche der Maisstärkekörner ist charakteristisch glatt und die Sphärizität ψ (das Verhältnis der Oberfläche einer volumengleichen Kugel zu der tatsächlichen Oberfläche) eines Einzelkorns kann als nahezu 1 angenommen werden (Abbildungen 4.5 und 4.6). Die Maisstärke-Partikel zeigten keinerlei Veränderung durch die Lagerung.

4.2.5 Spezifischer Widerstand

Die Bestimmung des spezifischen Widerstandes der Maisstärke erfolgte in Anlehnung an DIN EN 61241-2-2 für die Bedingung, dass der Leerwiderstand R_0 der Messzelle größer ist als $10 \cdot R_S$ (gemessener Widerstand des Staubes). Zur Widerstandsmessung wurde eine von der FSA entwickelte Apparatur verwendet, deren Messzelle (100 cm² Messfläche) in Vibration versetzt werden kann. Der Vorteil dieser Messzelle besteht darin, dass durch die definierte Probenaufbereitung mittels Vibration von Messung zu Messung annähernd die gleiche Staubverdichtung erreicht wird. Über zwei Messelektroden im Abstand von $L = 1$ cm wird der Widerstand R_S in M Ω bei verschiedenen Spannungen gemessen. Die Messdauer wird auf 3 min festgelegt, da sich gemäß der Erfahrung aus vergangenen Versuchen der Widerstand nach dieser Zeit nicht mehr maßgeblich verändert [2]. Der spezifische Widerstand des Staubes ergibt sich dann aus

$$\rho_E = R_S \cdot \frac{H \cdot W}{L} \quad (4.3)$$

mit L als Abstand zwischen den Elektroden und H bzw. W als Höhe bzw. Breite der Elektrodenfläche.

Messungen im hochohmigen Bereich ($> 10^{11} \Omega$) sind sehr stöempfindlich und daher mit großen Schwankungen verbunden. Abweichungen innerhalb 10% sind daher nicht als eindeutige Änderung anzusehen. Vor der eigentlichen Messung muss der Widerstand der leeren Messzelle für alle Messspannungen geprüft werden. Ein verlässliches Ergebnis des Staubwiderstandes kann nur dann erzielt werden, wenn der Widerstand der leeren Zelle außerhalb des Messbereichs von $2 \cdot 10^9$ M Ω oder knapp darunter liegt. Aus diesem Grund muss die Elektrode vor jedem neuen Versuch äußerst sorgfältig gereinigt werden. Die in der Norm beschriebenen Umgebungsbedingungen sind einzuhalten.

Gemessen wurde der Staubwiderstand von Maisstärke im Anlieferzustand sowie nach längerer Lagerung unter Luftabschluss bzw. mit Luftkontakt. Bei der Messung wurden die Messspannungen 110 V, 220 V, 300 V, 500 V, 1 kV und 1,5 kV angelegt und

⁵In Wasser gelöstes Jod.



Abbildung 4.4: Apparatur mit Vibrations-Messzelle zur Messung des spezifischen Staubwiderstandes in Anlehnung an die DIN EN 61241-2-2.

für jede Spannung der Widerstandswert abgelesen. Für alle Messungen ergab sich ein spezifischer Widerstand von rund $\rho_E = 2 \cdot 10^{13} \Omega \cdot \text{m}$. Im Rahmen der Messgenauigkeit konnten keine Veränderungen durch Lagerung nachgewiesen werden.

4.2.6 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

Die Eigenschaften der Maisstärke „Drygel 03411“ stellen sich nach den in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Untersuchungen wie folgt dar:

Es handelt sich um einen Staub, dessen Produktfeuchte im Anlieferzustand $z = 2,1\%$ beträgt. Bei Lagerung unter Luftabschluss bleibt dieser Feuchtwert erhalten; bei Lagerung mit Luftkontakt verändert (steigt) sich die Produktfeuchte mit der Feuchtigkeit der Lagerluft.

Ähnliches gilt für die Schüttdichte dieses Staubes. Sie beträgt bei frischem Produkt rund $0,62 \text{ g/cm}^3$. Bei offener Lagerung nimmt der Schüttdichtewert leicht ab.

Die Partikelgrößenverteilung ist unabhängig von Dauer und Art der Lagerung. Der Durchmesser aller Maisstärke-Partikel liegt unter $30 \mu\text{m}$, wobei der Medianwert rund $13 \mu\text{m}$ beträgt.

Partikelform und -oberfläche sind ebenfalls veränderungsresistent gegenüber Lagerzeiten in der hier diskutierten Größenordnung. Die Partikel zeigen vergleichsweise glatte Oberflächen und kommen der Kugelform in den allermeisten Fällen recht nahe.

Auch der spezifische Widerstand des Staubes ist nahezu unabhängig von Art und Dauer der Lagerung. Er beträgt etwa $2 \cdot 10^{13} \Omega \cdot \text{m}$.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die ausgewählte Maisstärke die gestellten Anforderungen an den Prüfstaub gut erfüllt, wenn konsequent auf Lagerung in luftdichten Behältnissen geachtet wird.

4.3 Untersuchung des Einflusses der Staubungsneigungsapparatur auf die Staubeigenschaften

Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollten einige Parameter untersucht werden, die einen Umbau der Staubungsneigungsapparatur erforderlich machten. In diesem Zusammenhang musste untersucht werden, wie sich diese Variation auf die mit der Apparatur zu messende Staubungsneigungskenngröße auswirkt. Eine Veränderung in der Staubungsneigungskenngröße ist gleichbedeutend mit der Veränderung zumindest einer der Staubeigenschaften oder aber sie beruht auf dem Umbau der Staubungsneigungsapparatur. Es mussten also Daten hinsichtlich der Wechselwirkung zwischen Staubungsneigungsapparatur und Staubeigenschaften gesammelt werden, auf deren Basis klar unterschieden werden konnte, welche eventuell auftretenden Effekte tatsächlich durch die Veränderung der Apparatur hervorgerufen werden und welche Effekte auf einer möglichen Veränderung des Prüfstaubes durch die Apparatur beruhen.

Die Untersuchungen, die der Schaffung der oben erwähnten Datenbasis dienten, lieferten nebenbei die Kenntnis darüber, wie oft eine Probe des Prüfstaubes für Messungen an der Staubungsneigungsapparatur benutzt werden kann, ohne in ihren Staubeigenschaften wesentlich verändert zu sein.

4.3.1 Einfluss auf die Produktfeuchte

Die Produktfeuchte wurde vor und direkt nach jeder Staubungsneigungsmessung bestimmt und verglichen. Es zeigte sich, dass nach ca. 10 Staubungsneigungsmessungen mit ein und derselben Produktprobe merkliche Unterschiede in der Produktfeuchte im Vergleich zum Urmuster auftreten (Tabelle 4.3). Die Produktfeuchte nahm zu von 2,0 % auf 5,4 %.

Datum [2003]	25. 03.	16. 04.	23. 04.	30. 04.	07. 05.	05. 06.	13. 06.
Messdurchläufe	1	4	6	6	6	31	37
z [% r. F.]	2,0	2,1	2,3	2,4	2,2	4,6	5,4

Tabelle 4.3: Ergebnisse der Feuchtemessung an ein und derselben Prüfstaub-Probe. Nach der 37. Messung am 13. 06. 2003 hatte die Probe den Prozess der Staubungsneigungsbestimmung 91 mal durchlaufen.

Während einer Staubungsneigungsmessung ist ein nicht unerheblicher Teil der Staubprobe in der Luft der Messkammer dispergiert und wirkt dort auf Grund der Bildung einer großen Oberfläche hygroskopisch. So wird der Luft innerhalb der Messkammer vergleichsweise schnell ein großer Teil der Luftfeuchtigkeit entzogen und geht auf das Produkt über.

4.3.2 Einfluss auf die Schüttdichte

Wie zuvor bei der Untersuchung der Produktfeuchte, wurde die Schüttdichte vor und nach jeder Staubungsneigungsmessung bestimmt und anschließend die ermittelten Werte miteinander verglichen. Das Ergebnis ist ähnlich dem Ergebnis für die Produktfeuchte. Erst nach häufigen Messdurchläufen zur Bestimmung der Staubungsneigung stellt sich eine signifikante Änderung in der Schüttdichte bei der verwendeten Staubprobe ein, d. h. die Schüttdichte verringerte sich leicht von $0,62 \text{ g/cm}^3$ auf $0,58 \text{ g/cm}^3$. Auffällig war außerdem die verringerte Rieselfähigkeit der Maisstärke bei den letzten Schüttdichteversuchen, was sich auch bei den Messungen der Staubungsneigung in der Handhabung des Staubes widerspiegelte. Das Produkt neigte im Vorlagetrichter zur Brückenbildung. Häufig verwendetes (feuchtes) Produkt neigt stärker zur Agglomeration und bildet beim Fallen Hohlräume. Bei gleicher Dauer der Produktförderung in die Messkammer der Staubungsneigungsapparatur wurde die Produktmasse mit der Zahl der Messdurchläufe geringer.

	$\rho_{\text{Sch}} [\text{g/cm}^3]$	$z [\% \text{ r. F.}]$
frisches Produkt	$0,622 (\pm 1,0 \%)$	2,1 %
mehrmals benutztes Produkt	$0,639 (\pm 1,6 \%)$	2,1 %
häufig benutztes Produkt	$0,580 (\pm 0,5 \%)$	5,8 %

Tabelle 4.4: Schüttdichte von Maisstärke in Abhängigkeit von der Anzahl der Messungen mit der Staubungsneigungsapparatur.

4.3.3 Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung

Zur Überprüfung der Änderung der Partikelgrößenverteilung infolge der Versuche zur Bestimmung der Staubungsneigung wurde unbenutzte, mehrmals (ca. 5 Messdurchgänge) benutzte und häufig benutzte (mehr als 10 Messdurchgänge) Maisstärke mit dem HELOS (Abschnitt 4.2.3) untersucht. Im Rahmen der Messgenauigkeit konnte keine Veränderung in der Partikelgrößenverteilung festgestellt werden, wie aus Tabelle 4.5 ersichtlich ist, in der stellvertretend für alle Partikelgrößenfraktionen die Medianwerte zusammengefasst sind. Durch den Vorgang der Staubungsneigungsbestimmung verliert das Produkt keinen messbaren Feinanteil. Die scheinbar leichte Verringerung des Medianwertes ist ein Messeffekt (die Sammellinse des HELOS wurde während der Messreihe gewechselt).

Anzahl der Staubungsneigungsmessungen	0	≈ 5	≥ 10
Medianwert x_{50} [μm]	13,1	12,9	12,8

Tabelle 4.5: Gemessener Medianwert von Maisstärke nach verschiedener Anzahl von Messdurchläufen durch die Staubungsneigungsapparatur. Das geringfügige Sinken des Medianwertes beruht auf dem Wechsel der Sammellinse des Analysegerätes HELOS.

4.3.4 Einfluss auf die Partikeloberfläche und -form

Auch die mögliche Änderung der Oberfläche und Form der Maisstärke-Partikel auf Grund von Messungen mit der Staubungsneigungsapparatur wurde untersucht. Wie in Abschnitt 4.2.4 beschrieben wurde dazu sowohl das Raster-Elektronen-Mikroskop als auch ein Licht-Mikroskop benutzt. Begutachtet wurden Partikel einer Staubprobe im Anlieferungszustand und Teilchen einer Probe, die mehr als 10 Messungen mit der Staubungsneigungsapparatur durchlaufen hatte. Weder die Bilder des Raster-Elektronen-Mikroskops (Abbildung 4.5) noch die Bilder mit dem Licht-Mikroskop (Abbildung 4.6) lassen den Schluss zu, dass es durch die Messungen mit der Staubungsneigungsapparatur zu Veränderungen an Oberfläche oder -form der Probenpartikel kommt.

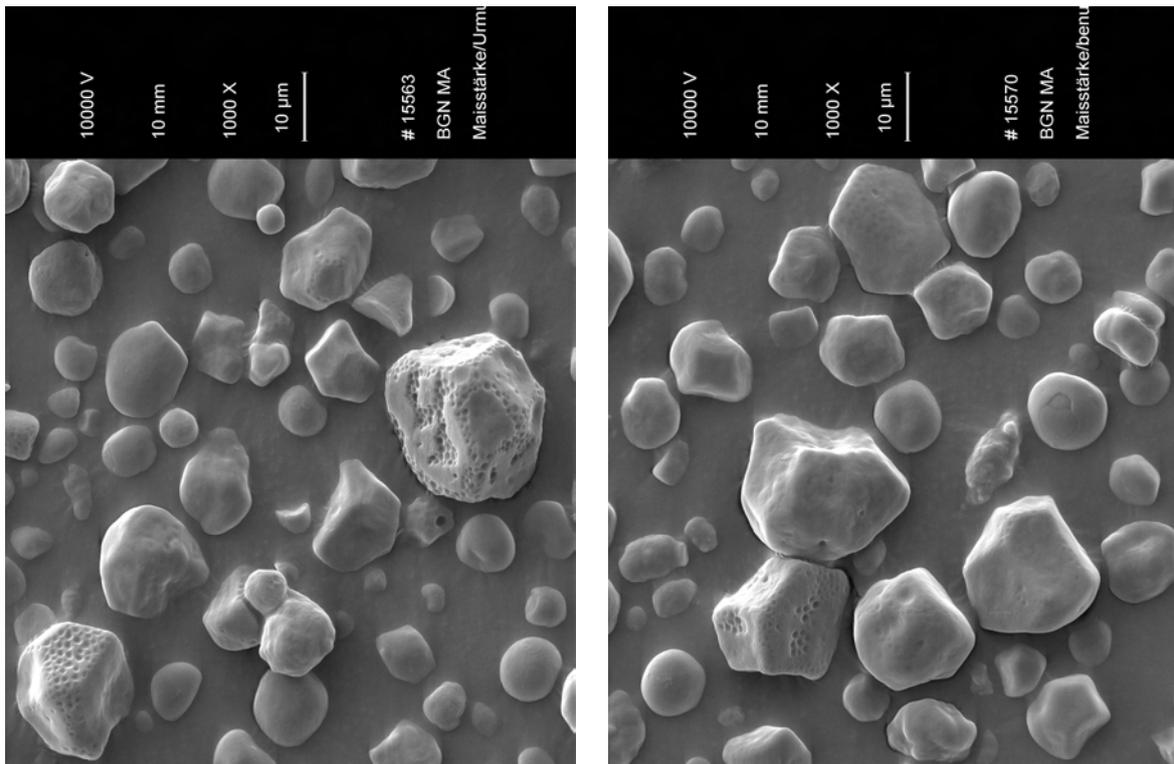


Abbildung 4.5: Maisstärke-Partikel im Anlieferungszustand (links) und nach häufigen Messungen mit der Staubungsneigungsapparatur (rechts) aufgenommen mit dem Raster-Elektronen-Mikroskop. Anhand dieser Aufnahmen kann keine Veränderung an der Form oder Oberflächenbeschaffenheit der Teilchen festgestellt werden. Vergrößerung: 1000fach.

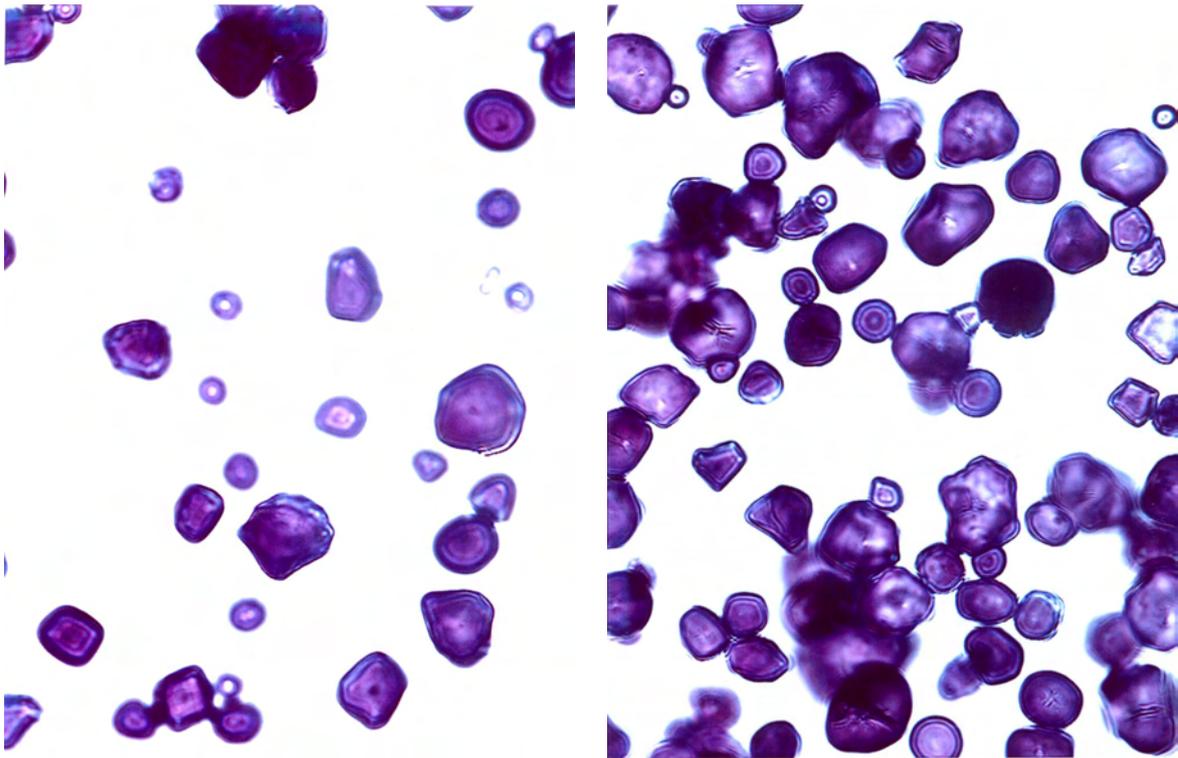


Abbildung 4.6: Licht-mikroskopische Aufnahmen von Maisstärkepartikeln im Anlieferungszustand (links) und nach häufigen Messungen mit der Staubungsneigungsapparatur (rechts). Auch mit Hilfe dieser Bilder kann keine Veränderung an der Form oder Oberflächenbeschaffenheit der Teilchen festgestellt werden. Vergrößerung: 600fach.

4.3.5 Einfluss auf den spezifischen Widerstand

Gemessen wurde der elektrische Widerstand der Prüfstaub-Probe im Anlieferungszustand und nach mehrmaligen Messungen mit der Staubungsneigungsapparatur. Dabei kam erneut die unter Abschnitt 4.2.5 beschriebene Messvorrichtung zum Einsatz. Die Werte aller anderen Einflussgrößen (Luftfeuchte, -temperatur, Produktfeuchte etc.) waren bei beiden Messungen nahezu gleich.

Messzelle leer			Messzelle gefüllt		
U_M [V]	ϱ_M [M Ω]	ϱ_E [$\Omega \cdot m$]	U_M [V]	ϱ_M [M Ω]	ϱ_E [$\Omega \cdot m$]
110	$> 2 \cdot 10^9$	$> 2 \cdot 10^{15}$	110	$2,3 \cdot 10^7$	$2,3 \cdot 10^{13}$
220	$> 2 \cdot 10^9$	$> 2 \cdot 10^{15}$	220	$2,1 \cdot 10^7$	$2,1 \cdot 10^{13}$
300	$> 2 \cdot 10^9$	$> 2 \cdot 10^{15}$	300	$2,4 \cdot 10^7$	$2,4 \cdot 10^{13}$
500	$> 2 \cdot 10^9$	$> 2 \cdot 10^{15}$	500	$2,5 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^{13}$
1000	$1,2 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^{15}$	1000	$2,6 \cdot 10^7$	$2,6 \cdot 10^{13}$
1500	$0,9 \cdot 10^9$	$0,9 \cdot 10^{15}$	1500	$2,7 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^{13}$

Tabelle 4.6: Messung des spezifischen Widerstands von Maisstärke im Anlieferungszustand in der Vibrations-Messkammer ($\vartheta_U \approx 22$ °C, $\varphi \approx 24$ %).

Messzelle leer			Messzelle gefüllt		
U_M [V]	ϱ_M [M Ω]	ϱ_E [$\Omega \cdot m$]	U_M [V]	ϱ_M [M Ω]	ϱ_E [$\Omega \cdot m$]
110	$3,8 \cdot 10^8$	$3,8 \cdot 10^{14}$	110	$4,1 \cdot 10^7$	$4,1 \cdot 10^{13}$
220	$5,6 \cdot 10^8$	$5,6 \cdot 10^{14}$	220	$2,7 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^{13}$
300	$0,75 \cdot 10^9$	$0,75 \cdot 10^{15}$	300	$3,1 \cdot 10^7$	$3,1 \cdot 10^{13}$
500	$0,95 \cdot 10^9$	$0,95 \cdot 10^{15}$	500	$2,85 \cdot 10^7$	$2,85 \cdot 10^{13}$
1000	$1,1 \cdot 10^9$	$1,1 \cdot 10^{15}$	1000	$2,7 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^{13}$
1500	$1,4 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^{15}$	1500	$3,2 \cdot 10^7$	$3,2 \cdot 10^{13}$

Tabelle 4.7: Messung des spezifischen Widerstands von Maisstärke nach mehrmaligen Gebrauch in der Staubungsneigungsapparatur in der Vibrations-Messkammer ($\vartheta_U \approx 22$ °C, $\varphi \approx 24$ %).

Wie man den Tabellen 4.6 und 4.7 entnehmen kann, stimmen die Widerstandswerte von Maisstärke vor und nach häufiger Messung der Staubungsneigung der Größenordnung nach überein. Schwankungen im Messwert sind auf die Messelektrode (Reinigung, Leerwiderstand) zurückzuführen. Auch bei verschiedenen hohen Spannungen an den Elektroden der Vibrations-Messkammer bleibt die Größenordnung des Messwertes konstant, was die Reproduzierbarkeit der Versuche bestätigt.

4.3.6 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

Durch mehrmaliges Messen der Staubungsneigung an ein und derselben Staubprobe verändert sich dieser Staub in seinen Produkteigenschaften. Das gilt insbesondere für die Produktfeuchte, die sich nach häufigen Messdurchläufen von 2,0 % auf 5,4 % mehr als verdoppelte.

Ähnliches gilt für die Schüttdichte der Probe, die durch den wiederholten Staubungsneigungsmessvorgang nachgewiesen sinkt (von 0,622 g/cm³ auf 0,580 g/cm³). Das Produkt neigt verstärkt zur Agglomeratbildung.

Veränderungen der Partikelgrößenverteilung, der Partikeloberflächen und -formen und des spezifischen Widerstandes der Probe, hervorgerufen durch die Staubungsneigungsapparatur, konnten nicht beobachtet werden.

Es bleibt folglich festzuhalten, dass Einflüsse durch Variation der Prüfstaubeigenschaften auf alle nachfolgend erhaltenen Versuchsergebnisse weitgehend unterbunden werden, wenn für jedes Experiment an der Staubungsneigungsapparatur eine frische Probe aus luftdichter Lagerung verwendet wird.

Kapitel 5

Änderungen an der Messapparatur

Zu Beginn dieser Diplomarbeit war die Messkammer der Staubungsneigungsapparatur aus furnierten Spanplatten gefertigt, wobei als Kammerabdeckung eine zweigeteilte Plexiglasplatte verwendet wurde (Kapitel 3, Abbildung 1.3). Der Bau der Messkammer aus diesen Materialien basierte auf der Überlegung, Wechselwirkungen zwischen elektrostatisch geladenen Staubpartikeln und den Wänden der Messkammer zu vermeiden. Das Phänomen der elektrostatischen Aufladung von Stäuben war im Zusammenhang mit der Staubungsneigungsapparatur seit längerer Zeit bekannt; der Einfluss dieser Aufladung auf die Messwerte der Staubungsneigungskenngröße deshalb von großem Interesse (Abschnitt 1.3). Bereits vor Durchführung dieser Arbeit wurde damit begonnen, die Wechselwirkungen elektrostatischer Natur zwischen Staub und Staubungsneigungsapparatur zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde die Kammer mit 2 mm starken Teflonplatten ausgekleidet, um die Messkammer zu isolieren bzw. Ströme durch die Kammerwände zu unterbinden. In die Kammer war horizontal ein Drahtgitter mit 10 mm Maschenweite in einem Stahlrahmen eingepasst. Mit einem Influenz-Elektrofeldmeter (Abschnitt 2.2.1) wurde die Spannung am Drahtgitter gemessen, die beim Durchtritt des geladenen Staubes durch das Gitter durch Ladungsübertragung vom Staub auf das Gitter entsteht.

5.1 Messkammer

5.1.1 Änderung des Messkammermaterials

Die eingangs beschriebenen Spannungsmessungen am Drahtgitter innerhalb der Messkammer waren kaum reproduzierbar, wie erste Probe-Messungen im Rahmen dieser Diplomarbeit zeigten. Grund dafür war die mangelnde Abschirmung des Messkammerinneren vor elektrischen Feldern. Letztgenannte sind vor allem in Labors stets vorhanden. Das Influenz-Elektrofeldmeter reagiert sehr sensibel auf diese äußeren Felder [16]. Zum Beispiel veränderte sich die am Drahtgitter gemessene Spannung innerhalb einer Stunde kontinuierlich um etwa 30 V, wobei kein Staub durch das Gitter fiel. Bewegungen von Personen im Labor – vor allem im Umkreis von 1 m um die Apparatur – führten zu Spannungsschwankungen von bis zu 40 V.

Eine wirksame Abschirmung gegen elektrische Felder ist nur durch einen Faraday'schen Käfig möglich, d. h. der Messort muss von Wänden aus elektrisch leitfähigem Material umgeben sein. Es war also naheliegend, die gesamte Messkammer mit den ursprünglichen Innenmaßen neu aus Stahl aufzubauen (Abbildung 5.1, Bauzeichnungen siehe Anhang B). Damit werden die elektrischen Felder aus dem Inneren der Kammer ferngehalten und die Wände der Messkammer liegen bei Erdung der Kammerwände stets auf dem konstanten und bekannten elektrischen Nullpotential, was für die Reproduzierbarkeit von elektrostatischen Messungen zwingend erforderlich ist [17].

Auch in diese neue Messkammer wurde ein Drahtgitter mit 10 mm Maschenweite eingesetzt. Das Gitter wurde in einen Teflon-Rahmen von 10 mm Stärke eingepasst, zur Isolierung gegen die Messkammerwände. Die Spannungsmessungen, die mit der ursprünglichen Staubungsneigungsapparatur durchgeführt wurden, wurden wiederholt. Ohne Staubbeförderung durch das Drahtgitter war die daran gemessene Spannung absolut stabil. Selbst beim Einschalten des Staubkonzentrationsmessgerätes oder Berührung der Messkammer konnten nur sehr geringe Spannungsänderungen (< 1 V) festgestellt werden. Äußere elektrische Felder haben durch diese Umbaumaßnahme keinen Einfluss mehr auf das Messkammerinnere.



Abbildung 5.1: Staubungsneigungsapparatur mit Messkammer aus Stahl.

5.1.2 Einfluss der Materialänderung auf die Staubungsneigungskenngröße

Um zu sehen, wie sich die Messwerte der Staubungsneigung durch die Benutzung der neuen Messkammer verändern, wurden Vergleichsmessungen bei sonst gleichen Parametern durchgeführt. Die Messungen geben einen ersten Eindruck, in welcher Größenordnung Variationen der Staubungsneigungskenngröße auf Grund elektrostatischer Wechselwirkungen zwischen Staub und Messkammerwänden liegen. Außerdem lässt sich sehen, ob die mit der ursprünglichen Apparatur ermittelten Staubungsneigungskenngrößen für diverse Stäube weiterhin benutzt werden können oder vollständig neu aufgenommen werden müssen.

Es wurden 3 Messungen der Staubungsneigungskenngröße für die im vorherigen Kapitel 4 beschriebene Maisstärke unter Verwendung der Holz/Teflon-Messkammer durchgeführt. Anschließend folgten weitere Messungen der gleichen Art, wobei die ursprüngliche Messkammer durch die neue aus VA-Stahl ersetzt wurde. Die Ergebnisse beider Messreihen wurden mit den Staubungsneigungsdaten verglichen (gleicher Prüfstaub), die vor Beginn dieser Arbeit mit der ursprünglichen Holz-Messkammer ermittelt wurden. In Abbildung 5.2 sind die Ergebnisse dieser Messungen dargestellt, wobei ein in Abschnitt 5.4 beschriebenes Verfahren zur Mittelung bzw. Glättung der Messdaten benutzt wurde.

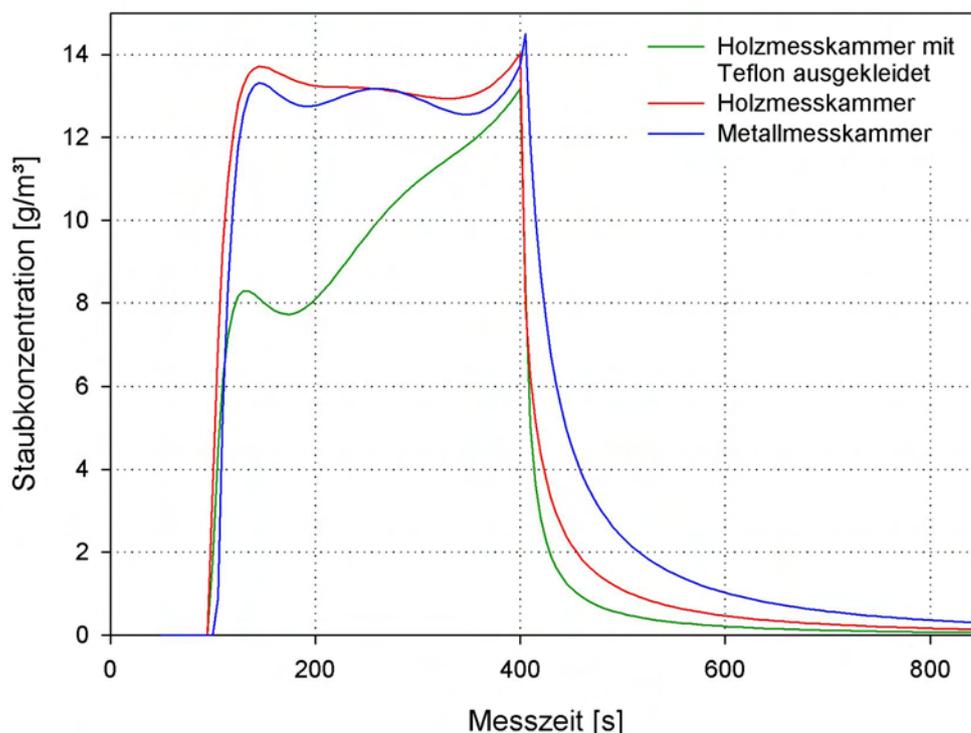


Abbildung 5.2: Konzentration (Regressionskurve) von Maisstärke in der Holz- bzw. Stahl-Messkammer während der Messzeit von 850 s. Die Kurven sind das Mittel aus diversen Einzelmessungen.

Es konnten keine signifikanten Unterschiede in der Staubungsneigungskenngröße festgestellt werden beim Vergleich der Messergebnisse, die mit der ursprünglichen Holz-Messkammer bzw. der Stahl-Messkammer erzielt wurden (Tabelle 5.1). Die Staubungsneigungskenngrößen, die unter Benutzung der mit Teflon ausgekleideten Holz-Messkammer ermittelt wurden, liegen demgegenüber im Schnitt etwa 23% unter den Werten, die unter gleichen Bedingungen mit der geerdeten Stahl-Messkammer bzw. der Holz-Messkammer ohne Teflon-Auskleidung gemessen wurden. Die Ergebnisse der Einzelmessungen sind in Tabelle A.1 aufgelistet.

Messkammer	\bar{S}_N [g/m ³]
Holz-Messkammer	6,5 ± 0,16
Holz/Teflon-Messkammer	4,7 ± 0,52
Stahl-Messkammer	6,2 ± 0,1

Tabelle 5.1: Mittlere Werte für die Staubungsneigungskenngröße von Maisstärke bestimmt in Messkammern aus verschiedenen Materialien.

Auch der zeitliche Verlauf der Staubkonzentration hängt offensichtlich stark vom verwendeten Material der Messkammer ab bzw. von dessen elektrischen Eigenschaften. Während die Staubkonzentrationskurven in der Holz-Messkammer und der Stahl-Messkammer recht ähnlich in ihrer Form sind, weicht die Kurve der Holz/Teflon-Kammer deutlich von dieser Form ab. Das deutet darauf hin, dass die Teflon-Wandauskleidung die (elektrisch geladenen) Staubpartikel in der Messkammer stark beeinflusst. Teflon ist als extremer elektrischer Isolator hoch und sehr leicht aufladbar und erzeugt damit starke E -Felder¹. Diese elektrischen Felder wirken naturgemäß auf im Raum befindliche elektrische Ladungen. Die elektrostatischen Eigenschaften der ursprünglichen Holz-Messkammer und der Stahl-Messkammer sind dagegen offensichtlich relativ ähnlich.

5.2 Messtechnik

5.2.1 Erweiterung der Messtechnik

Zur Messung der Spannung an dem in der Einleitung dieses Kapitels und in Abschnitt 5.1 beschriebenen Drahtgitters wurde das Influenz-Elektrofeldmeter EMF 58 mit Hochspannungsmesskopf (max. ±40 kV) der Firma Eltex benutzt. Die Funktionsweise eines Influenz-Elektrofeldmeters findet sich in Abschnitt 2.2.1. Die Verbindung zwischen dem Gitter innerhalb und dem Messgerät außerhalb der Messkammer wurde durch eine Stahlbuchse in der Seitenwand der Kammer, die mit einem Teflon-Ring von 2 cm Wandstärke gegen die Stahlbuchse isoliert ist, realisiert (Anhang B). Innerhalb der Messkammer wurde die Verbindung zwischen Gitter und Stahlbuchse durch ein kurzes Kabel hergestellt. Das Elektrofeldmeter mit dem Hochspannungsmesskopf wurde von

¹Zusätzlich zu den Feldern, die im Raum schon vorhanden sind.

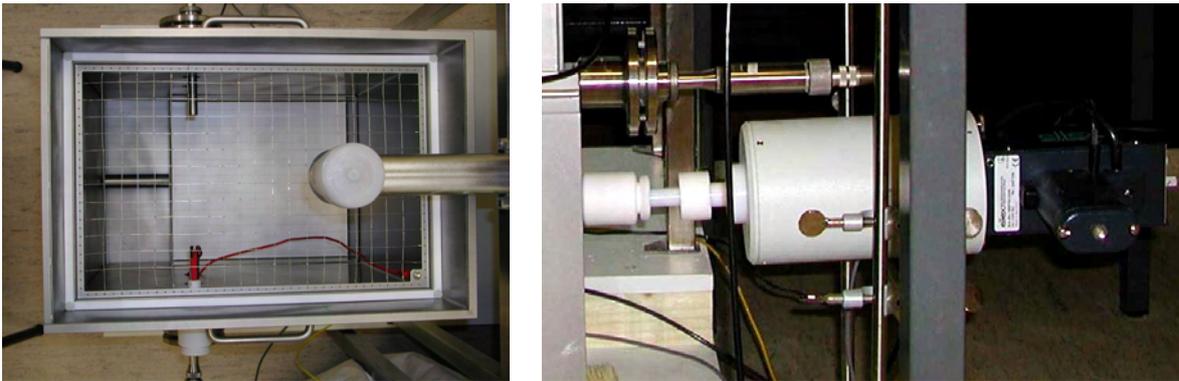


Abbildung 5.3: Drahtgitter, eingebaut in die Stahl-Messkammer (links, Draufblick) und angeschlossenes EMF 58 zur Spannungsmessung am Gitter (rechts, Blick von vorne).

außen direkt an die isolierte Stahlbuchse angeschlossen, so wie es in Abbildung 5.3 gezeigt ist. Durch diese Verbindung ohne lange Kabel und die Teflonisolierung konnten Einflüsse durch äußere Störfelder im Messlabor wirksam verhindert werden.

Die Messung des elektrostatischen Ladungszustands des Staubes erfolgt mit diesem Aufbau so: Fällt der Staub während der Messung seiner Staubungsneigungskenngröße durch das Gitter, streift er Ladungen an den Metalldrähten des Gitters ab. Diese können als anliegende Spannung am Gitter mit dem Elektrofelfeldmeter – betrieben als Spannungsmessgerät – erfasst werden. Die Höhe der gemessenen Spannung wächst mit der Höhe der elektrostatischen Aufladung des Staubes.

Die in Abschnitt 3.2 beschriebene Messkette musste für die Spannungsmessungen am Drahtgitter erweitert werden. Die Messdaten des Influenz-Elektrofelfeldmeters werden mit Hilfe des zweiten Messkanals des vorhandenen Transientenrekorders (Volkraft PCS64i, Abschnitt 3.2.2) erfasst. Die erweiterte Messkette ist in Abbildung 5.4 skizziert dargestellt. Erläuterungen zu Abbildung 5.4:

1. Messgrößenaufnahme
 - (a) Sender: Infrarot-Leuchtdiode (Infrarot-Strahl $\lambda \approx 950$ nm), Empfänger: Photodiode mit gleicher Wellenlängenempfindlichkeit
 - (b) nach außen isoliertes Drahtgitter mit angeschlossenem Hochspannungsmesskopf des EMF 58
2. Messsignalverarbeitung
 - (a) Staubkonzentrationsmessgerät SKG 5 (Eigenkonstruktion der FSA)
 - (b) Influenz-Elektrofelfeldmeter EMF 58 der Firma Eltex
3. Messsignalverarbeitung: Volkraft PCS64i, Digitales Speicheroszilloskop, eingesetzt als Transientenrekorder
4. Messsignalausgabe: PC-Auswertung mit WinDSO Transientenrekorder unter Windows 3.11

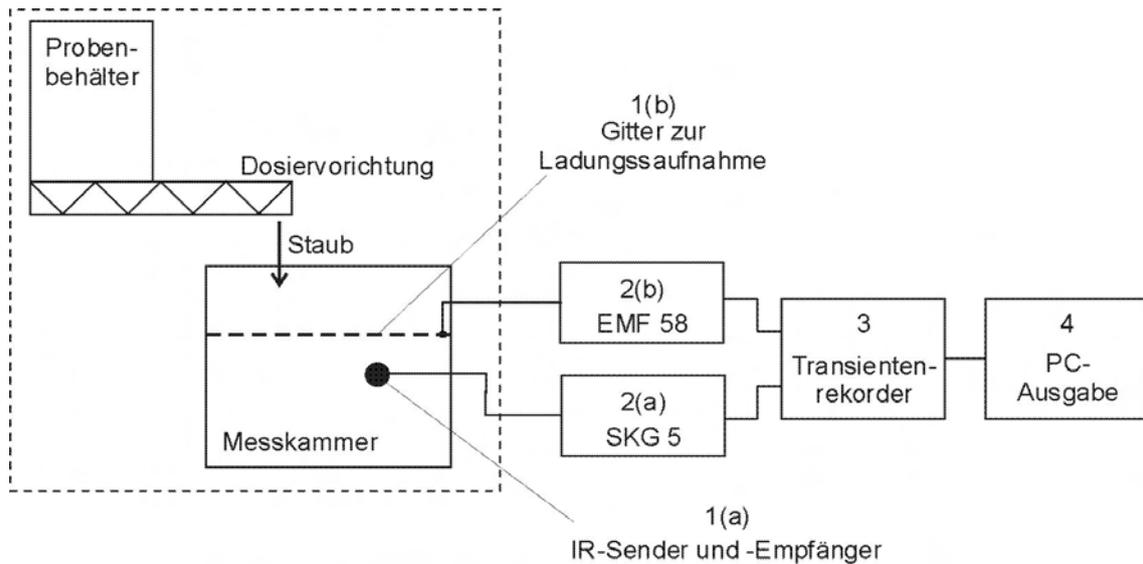


Abbildung 5.4: Messkette zur Erfassung der Staubkonzentration und Spannung am Gitter bzw. Aufladung des Staubes.

5.2.2 Einfluss der Messtechnikerweiterung auf die Staubungsneigungskenngröße

Wo Maisstärke-Agglomerate beim Fall in der Messkammer auf das Drahtgeflecht treffen werden diese zerschlagen. Daher wurden Untersuchungen angestellt, die klären sollten, welchen Einfluss das Drahtgitter auf die Staubungsneigungskenngröße des Prüfstaubes hat. Da für spätere Untersuchungen auch die Höhe des Drahtgitters in der Messkammer variiert werden soll, wurde ebenfalls überprüft, welche Auswirkungen die Position des Gitters auf die Staubungsneigungskenngröße hat. Hierfür wurde das Gitter in 460 mm und 350 mm Höhe (vom Messkammerboden aus gemessen) eingesetzt und für jede dieser Einstellungen, bei sonst nahezu gleichen Parametern, diverse Messdurchläufe mit der Staubungsneigungsapparatur durchgeführt.

Wider Erwarten spielt das Gitter bzw. dessen Position in der Messkammer für die Staubungsneigungskenngröße keine ausschlaggebende Rolle. Unterschiede in den Messergebnissen für die drei verschiedenen Versuchseinstellungen bewegten sich sowohl bei den Staubungsneigungskenngrößen S_N als auch bei den Staubkonzentrations-Messkurven innerhalb der Messgenauigkeit (Abbildung 5.5, Tabellen 5.1 und A.2). Auch bei Betrieb der kompletten Messkette für die Spannungsmessungen am Drahtgitter konnte keine Veränderung der Staubungsneigungskenngröße festgestellt werden.

Gitterposition	\bar{S}_N [g/m ³]	\bar{m}_{St} [kg]
kein Gitter	$7,4 \pm 0,25$	$2,62 \pm 0,008$
Gitterhöhe 460 mm	$7,7 \pm 0,51$	$2,61 \pm 0,01$
Gitterhöhe 350 mm	$7,5 \pm 0,66$	$2,60 \pm 0,008$

Tabelle 5.2: Mittelwerte der Staubungsneigungskenngröße in Abhängigkeit von der Gitterposition innerhalb der Stahl-Messkammer. Fallhöhe der Maisstärke: 670 mm.

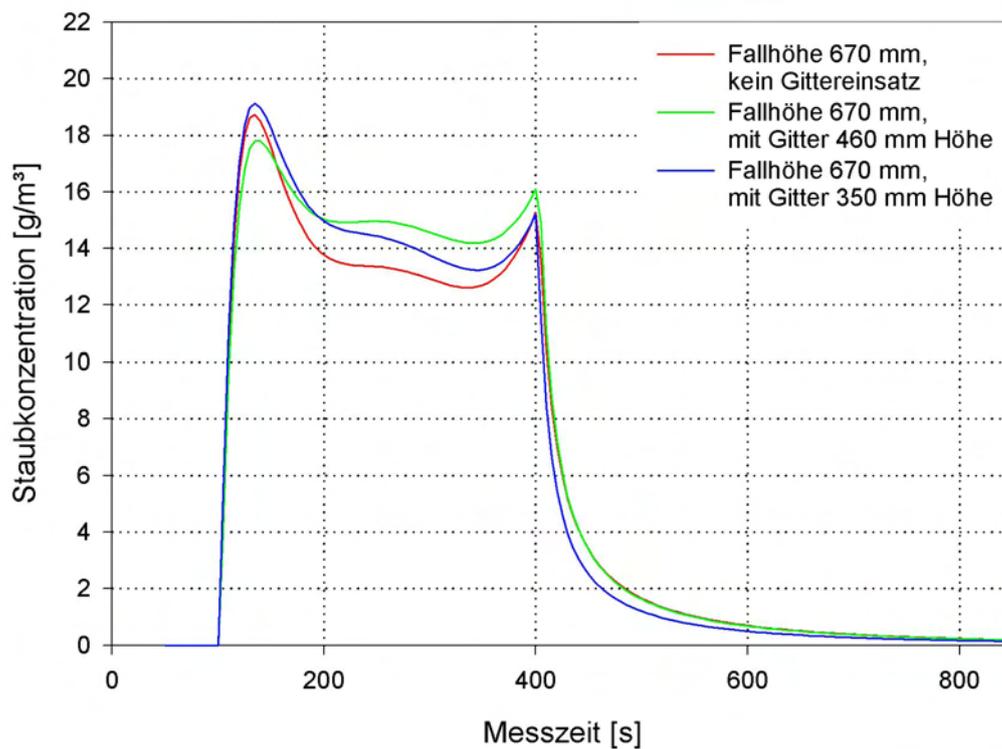


Abbildung 5.5: Konzentration (Regressionskurve) von Maisstärke bei Variation der Einbauhöhe des Drahtgitters in die Stahl-Messkammer während der Messzeit von 850 s. Die Kurven sind das Mittel aus diversen Einzelmessungen.

5.3 Staubentladung

5.3.1 Einbau eines Ring-Ionisators

Eine Teilaufgabe dieser Arbeit ist, die Änderung der Staubungsneigungskenngröße bei Entladung des elektrischer Staubes zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde ein Ionisator (Abschnitt 2.2.2) mit Ringelektrode (Innendurchmesser: 100 mm) gewählt. Die Ringelektrode wird mit einem Hochspannungsnetzteil betrieben; beide Geräteteile wurden von der Firma Haug geliefert.

Für eine einwandfreie Funktion empfiehlt der Hersteller einen Abstand der Ionisationsspitzen von mindestens 30 mm zu allen leitenden Teilen einzuhalten, da es sonst zu Wechselwirkungen zwischen dem an der Ringelektrode erzeugten elektrischen Feld und den die Elektrode umgebenden leitenden Teilen kommt. Weil der Messkammerinnenraum der Staubungsneigungsapparatur möglichst frei von Gegenständen und störenden elektrischen Feldern zu sein hat, musste die Ring-Elektrode oberhalb der Messkammer, d. h. zwischen Messkammerdeckel und Austragstützen der Dosiereinrichtung, angebracht werden (Abbildung 5.6). Folglich war die Erhöhung des Dosier- und Beschickungssystems um 80 mm erforderlich². Die Erhöhung wurde in der Art

²Je 30 mm Abstand zwischen Messkammerdeckel bzw. Austragsstützen und der Ring-Elektrode plus der Höhe der Elektrode selbst.

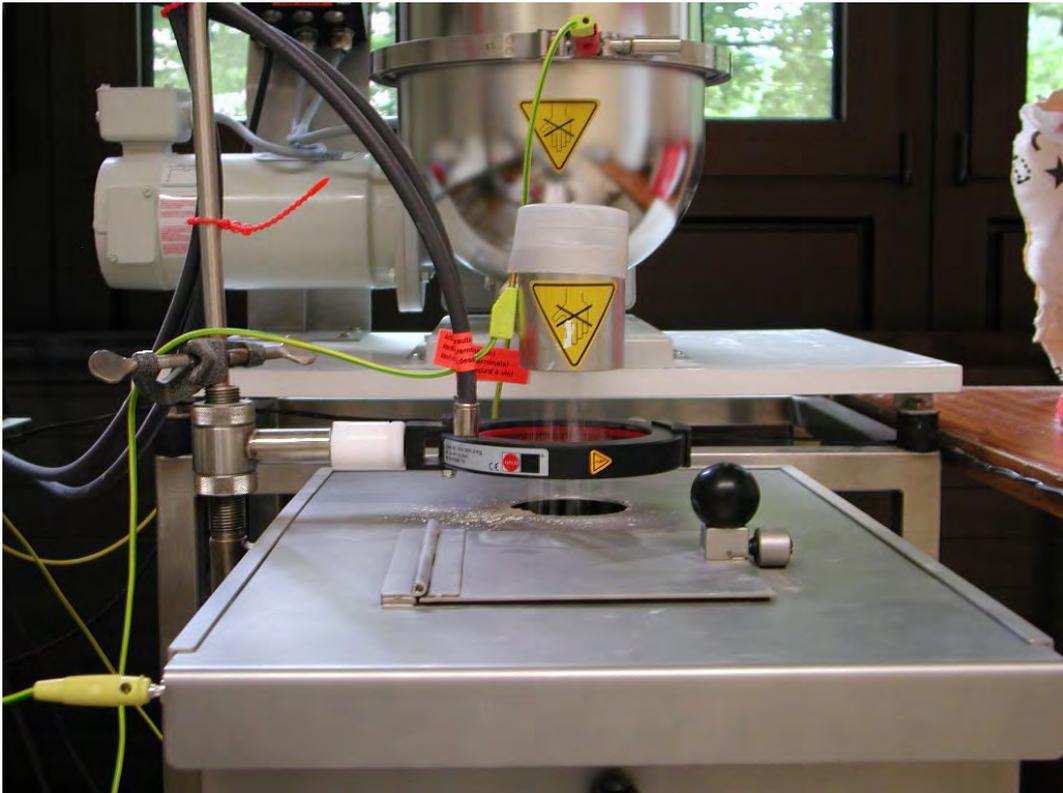


Abbildung 5.6: Messaufbau mit Ring-Ionisator. Die Fallhöhe des Staubes ist im Vergleich zum ursprünglichen Aufbau um 80 mm erhöht. Zur Entladung des Staubes wird der Schwenkarm mit dem Ionisator vor Beginn der Staubförderung unter den Austragstützen bewegt.

bewerkstelligt, als dass der gesamte Aufbau für die Staubförderung auf einen 80 mm starken Holzsockel gesetzt und neu justiert wurde.

Zur Befestigung der Ring-Elektrode wurde ein Schwenkarm an die Außenwand der Messkammer angeschweißt, an den die Elektrode mit Hilfe eines Teflon-Zwischenstück angeschraubt und justiert werden kann (Anhang B).

5.3.2 Einfluss der Fallhöhenänderung auf die Staubungsneigungskenngröße

Durch Änderung der Fallhöhe des Staubes erhöht sich die Aufprallgeschwindigkeit der Partikel auf dem Messkammerboden bzw. dem entstehenden Staubkegel. Auf Grund der dadurch erhöhten kinetischen Energie pro Masseneinheit des Staubes sollte die Luft innerhalb der Messkammer stärker mit dispergiertem Staub angereichert sein.

Die Differenz in der Bewegungsenergie der bei einer Messung geförderten Staubmasse von $m_{St} = 2,62 \text{ kg}$ auf Grund des Fallhöhenunterschieds kann wie folgt errechnet werden:

Kinetische Energie bei 590 mm Fallhöhe:

$$E_{Fall} = \frac{1}{2} \cdot m_{St} \cdot v_{St}^2 = m_{St} \cdot g \cdot h_{Fall} = 2,62 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,59 \text{ m} = 15,2 \text{ J} \quad (5.1)$$



Abbildung 5.7: Am Ausstrag bilden sich Agglomerate (links), die beim Fall undefiniert zerfallen. Beim Auftreffen auf den Produktkegel in der Schaufel wird Staub aufgewirbelt (rechts).

Kinetische Energie bei 670 mm Fallhöhe:

$$E_{\text{Fall}} = 2,62 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,67 \text{ m} = 17,3 \text{ J} \quad (5.2)$$

Damit ergibt sich als Energiedifferenz $\Delta E_{\text{Fall}} = 2,1 \text{ J}$. Bei Vernachlässigung des Luftwiderstandes lässt sich aus (5.1) in erster Näherung auch die Fallgeschwindigkeit des Staubes beim Aufprall auf den Boden der Messkammer errechnen:

$$v_{\text{St}} = \sqrt{2 \cdot E_{\text{Fall}} / m_{\text{St}}} \quad (5.3)$$

Damit folgt für die Aufprallgeschwindigkeit bei 0,57 m Fallhöhe $v_{\text{St}} = 3,41 \text{ m/s}$ bzw. $3,63 \text{ m/s}$ bei $v_{\text{St}} = 0,67 \text{ m}$ Fallhöhe. Die Geschwindigkeitsdifferenz beträgt also $\Delta v_{\text{St}} = 0,22 \text{ m/s}$.

Die Energieaufnahme des Prüfstaubes erhöht sich bei der um 80 mm größeren Fallhöhe um 14%. Aus Tabelle 5.3 ist eine Erhöhung der Staubungsneigung um $1,2 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ zu entnehmen. Das entspricht, bezogen auf die geringere Fallhöhe, einer Erhöhung von 19%. Unter Berücksichtigung der Messabweichungen liegen diese Ergebnisse in der gleichen Größenordnung und liefern eine plausible Erklärung der Erhöhung der Staubung. Alle nachfolgenden Experimente wurden mit $h_{\text{Fall}} = 670 \text{ mm}$ durchgeführt.

Fallhöhe [mm]	\bar{S}_N [g/m ³]	\bar{m}_{St} [kg]
590 mm	$6,2 \pm 0,11$	$2,62 \pm 0,03$
670 mm	$7,4 \pm 0,29$	$2,62 \pm 0,008$

Tabelle 5.3: Mittelwerte der Staubungsneigungskenngröße für Maisstärke als Funktion der Fallhöhe des Staubes.

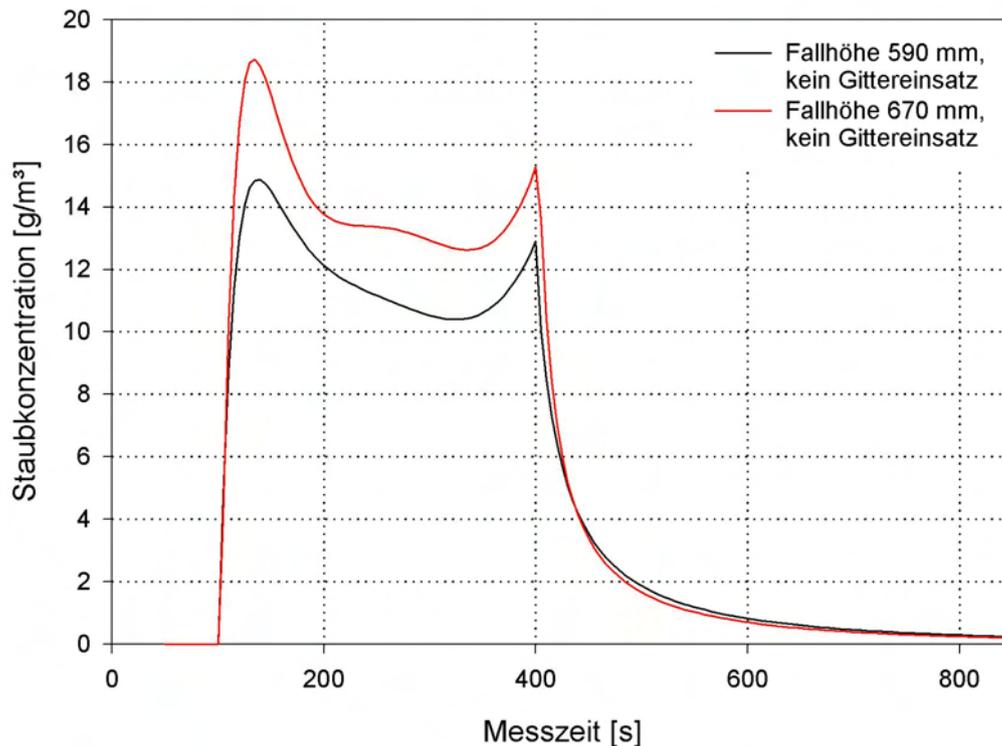


Abbildung 5.8: Zeitlicher Verlauf der Maisstärkekonzentration (Regressionskurve) in der Messkammer der Staubungsneigungsapparatur in Abhängigkeit der Fallhöhe.

5.4 Strategie bei der Messdatenauswertung

Da die einzelnen Messpunkte der Staubkonzentrationsmessungen starken Streuungen unterliegen, wurden aus den Messreihen mit gleichen Randbedingungen Mittelwerte errechnet. Aus diesen Mittelwerten ergaben sich Kurven, die mit relativ einfachen mathematischen Funktionen abschnittsweise beschrieben werden können. Die Kurven wurden hierfür in zwei Bereiche eingeteilt:

1. Förderbereich = der Prüfstaub wird kontinuierlich in die Messkammer gefördert.
2. Sedimentationsbereich = der Prüfstaub sedimentiert in der Messkammer bei abgeschalteter Förderung.

Die Funktionen zur Beschreibung der Staubkonzentrationskurve entstammen der Funktionenbibliothek einer Software, die speziell für die Suche von mathematischen Gleichungen zur Beschreibung von Messdaten entwickelt wurde. Während für die Kurve im Förderbereich kein physikalisch begründeter Zusammenhang greifbar war, wurde für den Sedimentationsbereich eine Exponentialfunktion postuliert (Sedimentation nach Stokes bzw. Newton). Die Regressionsrechnungen ergaben jedoch für den Sedimentationsbereich eine bessere Übereinstimmung mit einer gebrochen-rationalen Funktion 3. Ordnung. Der Förderbereich konnte für alle Mittelwertkurven mit ausreichender Genauigkeit mit einer logarithmisch-gebrochen-rationalen Funktion beschrieben werden.

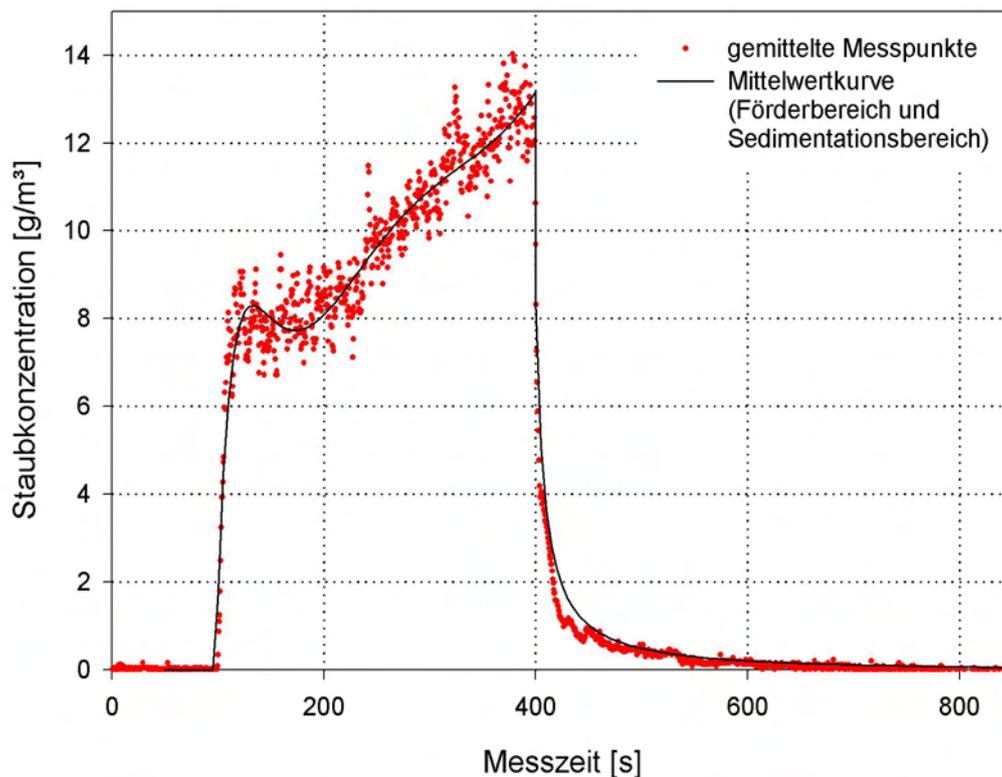


Abbildung 5.9: Die Staubkonzentrationswerte unterliegen großen Schwankungen. Zur Glättung dieser Schwankungen wurden zunächst die Einzelmessungen einer Messbedingung gemittelt. Anschließend suchte ein Rechner die Koeffizienten für eine Funktion, mit der die gemittelten Messpunkte gut beschrieben werden können. Die so entstandenen Kurven konnten später auf einfache Art und Weise miteinander verglichen werden.

Funktion für den Förderbereich:

$$c(t) = a_1 + a_2 \cdot t + a_3 \cdot \sqrt{t} \cdot \ln(t) + \frac{a_4}{\ln(t)} + a_5 \cdot \sqrt{\frac{1}{t}} \quad (5.4)$$

Funktion für den Sedimentationsbereich:

$$c(t) = \frac{1}{a_6 + a_7 \cdot t^3} \quad (5.5)$$

In (5.4) und (5.5) ist $c(t)$ die zeitabhängige Staubkonzentration, t ist die Messzeit, $a_1 \dots a_7$ sind für die Kurven veränderlichen Koeffizienten.

5.5 Einfluss der Änderungen im Überblick

Für jede der in den Abschnitten 5.1 bis 5.3 beschriebenen Umbaumaßnahmen an der Staubungsneigungsapparatur wurden Vergleichsmessungen hinsichtlich des Einflusses

auf Staubungsneigung durchgeführt. Die Ergebnisse wurden grafisch als Mittelwertkurven und tabellarisch für jede der beschriebenen Änderungen der Staubungsneigungsapparatur dargestellt. Die geförderte Staubmasse blieb über alle Versuche weitgehend konstant und lag zwischen 2,59 kg und 2,65 kg. Die mittlere Staubungsneigungskenngröße und die mittlere Fördermenge wurde für die einzelnen Versuchsreihen als arithmetisches Mittel der Messergebnisse berechnet. Die Fehlerabweichung wurde experimentell ermittelt und ist mathematisch die höchste Abweichung der Messwerte vom Mittelwert. Die Einzelmesswerte sind dem Anhang A.1 zu entnehmen.

Als einzige der drei Umbaumaßnahmen hat die Änderung der Staubfallhöhe einen signifikanten Einfluss auf die Staubungsneigungskenngröße des Prüfstaubes. Die Kenngröße erhöht sich dadurch um rund 19 %.

Keinen eindeutig nachweisbaren Effekt auf die Staubungsneigungskenngröße hat der Einbau eines Drahtgitters zur Spannungsmessung in die Messkammer. Gleiches gilt für die Änderung des Materials der Messkammer. Der Wechsel von furnierter Spanplatte nach VA-Stahl hatte lediglich eine leichte Veränderung im zeitlichen Verlauf der Staubkonzentrationskurven zur Folge, der Wert der Staubungsneigungskenngröße variierte dadurch nicht.

5.6 Elektrische Eigenschaften des Drahtgitters

5.6.1 Widerstand zwischen Drahtgitter und Erdpotential

Die Höhe und die zeitliche Entwicklung der Spannung am Drahtgitter in der Messkammer hängen ab vom Ladungstransport auf das Gitter, von der Kapazität des Gitters und vom Widerstand zwischen Gitter und Erdpotential (Ableitwiderstand). Um die genannten Größen – wenigstens annäherungsweise – abschätzen zu können, wurde der Ableitwiderstand gemessen. Dieser Widerstand setzt sich aus den Einzelwiderständen der Luft R_L , der Teflonisolierung R_T sowie aus einer Maisstärkestaubschicht R_S und sonstigen Verunreinigungen R_V auf der Teflonisolierung zwischen Gitter und Kammerwänden zusammen. Die vier genannten Widerstände können als parallel geschaltet betrachtet werden, d. h. ihre gemeinsame Leitfähigkeit sollte größer als die der Einzelwiderstände sein (Abbildung 5.10). Ziel der Widerstandsmessung war es, aus den später durchgeführten Spannungsmessungen die Kapazität des Drahtgitters und die Ladung auf dem Drahtgitter rechnerisch zu bestimmen.

5.6.2 Gang der Messung und Messergebnisse

Für die Messung des Widerstandes wurde an das Gitter in der Messkammer eine definierte Spannung angelegt und der Widerstand zur Masse mit einem Tera-Ohmmeter gemessen. Um eventuelle Abhängigkeiten des Widerstandes vom Betrieb des Influenz-Elektroföldmeters zu erkennen, wurde dieses versuchsweise angeschlossen bzw. vom Gitter getrennt. Der Innenwiderstand des Influenz-Elektroföldmeters EMF 58 ist in den Geräteunterlagen mit $10^{15} \Omega$ angegeben. Ergänzend wurde die Widerstandsmessung

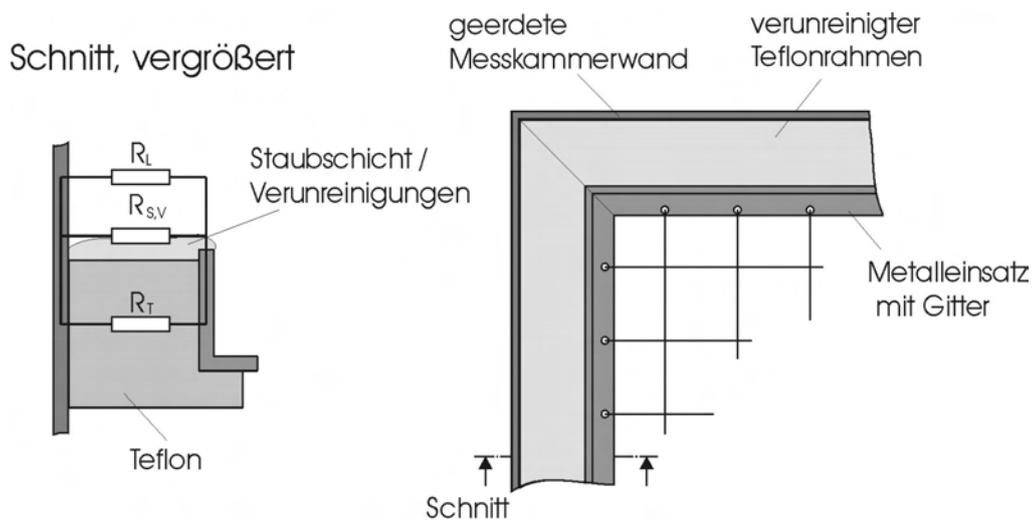


Abbildung 5.10: Schematisierte Widerstände zwischen dem Drahtgitter in der Messkammer der Staubungsneigungsapparatur und dem Erdpotential.

ohne Influenz-Elektrofeldmeter bei staubigem Gitter durchgeführt, um eine Aussage des Einflusses der Verschmutzung auf den Widerstand machen zu können.

Wie schon in Abschnitt 4.2.5 festgestellt wurde, sind Widerstandsmessungen im hochohmigen Bereich sehr störanfällig und werden von zahlreichen Parametern (z. B. Luftfeuchte) beeinflusst; Schwankungen innerhalb einer Potenz sind üblich. Die Messergebnisse (Tabelle 5.4) müssen dementsprechend beurteilt werden.

Auch bei variierten Messbedingungen ist für den Widerstand keine eindeutige Änderung festzustellen. Alle Messungen liegen im Bereich zwischen $10^{12} \Omega$ und $10^{13} \Omega$. Die Messergebnisse sind demnach reproduzierbar.

Gemäß [2] und [7] gilt ein Material als isolierend wenn R größer ist als $10^9 \Omega$ ($\varphi = 50\%$, $\vartheta = 23^\circ\text{C}$) bzw. $10^{11} \Omega$ ($\varphi = 30\%$, $\vartheta = 23^\circ\text{C}$). Der gemessene Widerstand zwischen Drahtgitter und Messkammerwand (Erdpotential) liegt um mehr als eine Größenordnung über den angegebenen Werten, d. h. das Gitter ist ausreichend gegenüber der Messkammer isoliert.

Messbedingungen	Messspannung [V]	Ableitwiderstand [Ω]	
		Messung 1	Messung 2
gereinigt, ohne EMF 58	1000	$4,1 \cdot 10^{13}$	$5,7 \cdot 10^{13}$
gereinigt, ohne EMF 58	1500	$6,4 \cdot 10^{13}$	$8,4 \cdot 10^{13}$
gereinigt, mit EMF 58	1000	$4,0 \cdot 10^{13}$	$4,6 \cdot 10^{13}$
gereinigt, mit EMF 58	1500	$5,9 \cdot 10^{13}$	$7,0 \cdot 10^{13}$
verschmutzt, ohne EMF 58	1000	$3,4 \cdot 10^{13}$	$3,4 \cdot 10^{13}$
verschmutzt, ohne EMF 58	1500	$5,1 \cdot 10^{13}$	$5,0 \cdot 10^{13}$

Tabelle 5.4: Widerstand zwischen Drahtgitter und Erdpotential bei verschiedenen Messbedingungen. Die Widerstandswerte bei höheren Messspannungen liegen üblicherweise etwas höher, da im Hochohmbereich keine Linearität mehr vorliegt.

Die Größen der Einzelwiderstände R_i lassen sich rechnerisch abschätzen mit Hilfe der zugehörigen spezifischen Widerstände, die aus der Literatur [3] und Messungen der FSA stammen:

$$\frac{1}{R_G} = \frac{A_T}{\varrho_T \cdot l_T} + \frac{A_L}{\varrho_L \cdot l_L} + \frac{A_S}{\varrho_S \cdot l_S} + \frac{A_V}{\varrho_V \cdot l_V} \quad (5.6)$$

Dabei stehen $\varrho_T = 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$, $\varrho_L = 10^{17} \dots 10^{18} \Omega \cdot \text{m}$, $\varrho_S = 10^{11} \dots 10^{13} \Omega \cdot \text{m}$ und ϱ_V für die spezifischen Widerstände der Materialien Teflon, Luft, Staub (Maisstärke) und „sonstige Verschmutzung“. Die l und A in (5.6) stehen für die Länge und den Querschnitt des jeweiligen Leiters bzw. Widerstandes. Der Innenumfang der Messkammer misst 1,5 m. Die Höhe des Teflon-Rahmens beträgt 0,015 m, die Höhe der Maisstärke-schicht kann mit $100 \mu\text{m}$ angenommen werden. Mit der Breite des Teflon-Rahmens von 0,01 m und der Höhe der Messkammer von 0,55 m folgt:

$$\begin{aligned} R_T &= \frac{\varrho_T \cdot l_T}{A_T} \approx \frac{10^{16} \cdot 0,01}{1,5 \cdot 0,015} = 4,4 \cdot 10^{15} \Omega \\ R_S &= \frac{\varrho_S \cdot l_M}{A_S} \approx \frac{10^{12} \cdot 0,01}{1,5 \cdot 0,0001} = 6,7 \cdot 10^{13} \Omega \\ R_L &= \frac{\varrho_L \cdot l_L}{A_L} \approx \frac{10^{17} \cdot 0,01}{1,5 \cdot 0,825} = 1,2 \cdot 10^{15} \Omega \\ R_V &\approx 10^{14} \Omega \end{aligned} \quad (5.7)$$

Addiert man die Reziproken der vier Widerstandswerte auf (Gleichung (5.6)) und bildet erneut den Kehrwert, so erhält man den Gesamtwiderstand $R_G = 3,8 \cdot 10^{13} \Omega$, was sich in etwa mit Messergebnissen deckt. Trotz der großen Unsicherheiten, die dieser Abschätzung zu Grunde liegen, erkennt man doch, dass die Verschmutzung durch Maisstärke der dominante Einzelwiderstand zwischen Drahtgitter und Erdpotential ist. Sehr vage sind die Abschätzungen für Luft und die sonstigen Verschmutzungen. Der Widerstand von Luft ist abhängig von äußeren elektrischen Feldern, also auch von der Spannung, die am Drahtgitter anliegt. Bei den sonstigen Verunreinigungen kennt man weder die Art des Schmutzes³ noch dessen Schichtdicke bzw. Homogenität auf dem Teflon-Rahmen.

5.6.3 Kapazität des Drahtgitter gegen die Messkammer

Mit einem Multimeter wurde die Kapazität des Drahtgitters gegen die Messkammer bestimmt. Dazu wurde das Messgerät mit dem Drahtgitter bzw. der Messkammerwand elektrisch verbunden und die Kapazität bei sonstigen vollem Aufbau an der Staubungs-neigungsapparatur mehrfach (für verschiedene Gitterpositionen) gemessen. Es ergab sich ein Wert von $C_G \approx 100 \text{ pF}$.

³Damit ist auch der spezifische Widerstand unbekannt.

Kapitel 6

Einfluss elektrostatischer Phänomene auf die Staubungsneigungskenngröße

In Abschnitt 1.3 sind die Ziele dieser Arbeit in Form eines Fragenkataloges formuliert. Zum einen geht es dabei um die Fragestellung, welche elektrostatischen Phänomene an der Staubungsneigungsapparatur auftreten. Zum anderen ist von Interesse, wie die mit der Apparatur gemessene Staubungsneigungskenngröße von den elektrostatischen Erscheinungen abhängen. Diesen beiden Fragenkomplexen wird in den nachfolgenden Abschnitten mit experimentellen und theoretischen Mitteln nachgegangen.

6.1 Elektrostatische Aufladung des Prüfstaubes

6.1.1 Ortsabhängigkeit des Ladungszustandes

Zunächst sollte festgestellt werden, an welcher Stelle in der Staubungsneigungsapparatur der Prüfstaub welchen Ladungszustand besitzt bzw. ob er in der Messkammer aus Metall überhaupt elektrisch geladen ist.

6.1.1.1 Versuchsbeschreibung

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde ein Drahtgitter horizontal in die Messkammer eingebracht und von Versuch zu Versuch in seiner Höhe über dem Messkammerboden (460 mm, 350 mm und 250 mm) versetzt. Mit dem Influenz-Elektrofeldmeter EMF 58 wurde die am Gitter über die Versuchsdauer anliegende Spannung in den verschiedenen Positionen gemessen. Die Spannung am Gitter ist die Folge eines Ladungstransfers vom durch das Gitter fallenden Prüfstaub auf das Gitter (siehe hierzu auch Abschnitt 5.2). Kann während der Messung der Staubungsneigungskenngröße eine Spannung am Gitter nachgewiesen werden, so ist der Staub elektrisch geladen. Zeigt sich weiterhin bei den verschiedenen Gitterhöhen h_G kein signifikanter Unterschied zwischen den ge-

messenen zeitlichen Spannungsverläufen, ist der Ladungszustand des Staubes innerhalb der Messkammer ortsunabhängig.

6.1.1.2 Versuchsergebnisse

Für jede Gitterposition h_G wurden drei vollständige Messzyklen an der Staubungsneigungsapparatur abgearbeitet. Aus den jeweils höchsten Spannungswerten der je drei Versuchen pro Gitterhöhe wurde das arithmetische Mittel gebildet und die maximale Abweichung errechnet. Diese Werte sind in Tabelle 6.1 aufgelistet. Die Ergebnisse der Einzelmessungen finden sich in Anhang A.2.

Ebenso wie bei den Maximalwerten der Spannung wurde für die zeitliche Entwicklung der Spannung am Drahtgitter verfahren. Die gemittelten Spannungskurven sind in Abbildung 6.1 grafisch dargestellt.

h_G [mm]	\bar{U}_{\max} [kV]	maximale Abweichung [kV]
210	-1,03	$\pm 0,067$
350	-1,08	$\pm 0,076$
460	-1,64	$\pm 0,093$

Tabelle 6.1: Mittelwerte der maximalen Spannungen, die am Drahtgitter gemessen wurden. Die Einbauhöhe des Messgitters h_G wurde variiert.

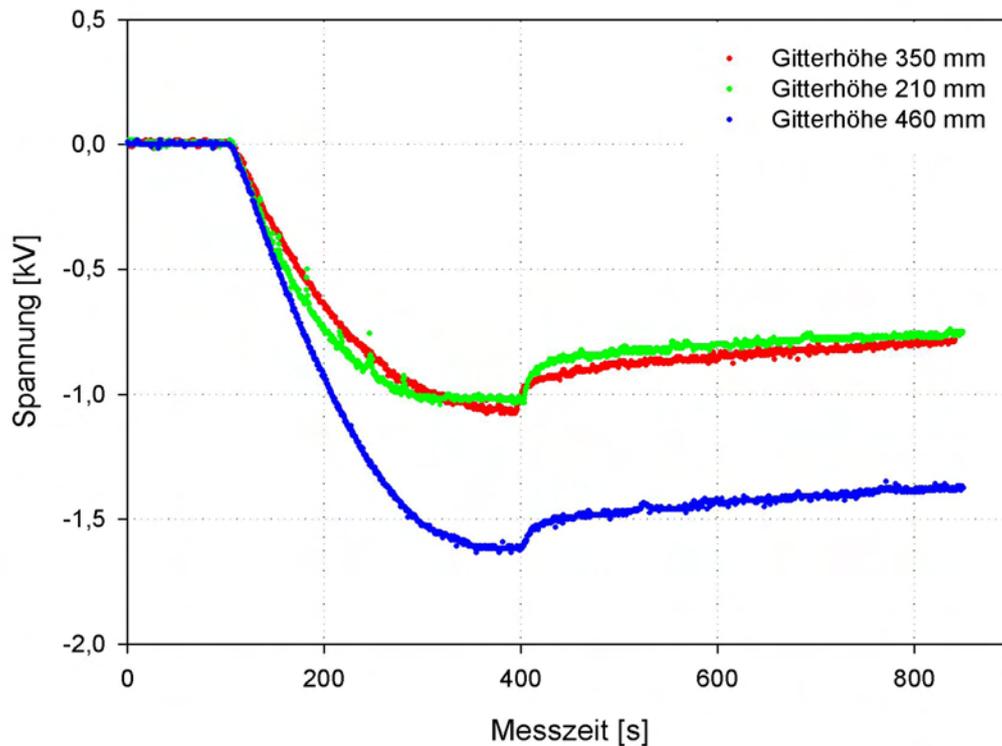


Abbildung 6.1: Mittelwertkurven der am Gitter anliegenden Spannung über die Versuchsdauer. Die Einbauhöhe des Messgitters h_G wurde variiert.

6.1.1.3 Versuchsauswertung und -interpretation

Ein Blick auf die Daten der Tabelle 6.1 bzw. die Kurven der Abbildung 6.1 stellt zunächst klar, dass der Prüfstaub beim Fall durch die Messkammer der Staubneigungsapparatur stark negativ elektrisch aufgeladen ist. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Höhe der am Gitter gemessenen Spannung abhängig ist vom Ort des Gitters innerhalb der Messkammer. Auffällig ist, dass sich die Höhe der am Gitter gemessenen Spannung bei den beiden tieferen Gitterpositionen kaum voneinander unterscheidet. Im Gegensatz dazu wurde eine deutlich höhere Spannung am Drahtgitter bei der Gitterposition $h_G = 460$ mm beobachtet.

Auf seinem Weg zum Boden der Messkammer verliert der Staub folglich elektrische Ladungen. Es muss also einen wirksamen Mechanismus für den Transport von elektrischen Ladungen in der Kammer geben. Die Luft als starker Isolator kann dafür nicht in Frage kommen. Die einzig möglichen beweglichen Ladungsträger innerhalb der Messkammer sind die in der Kammerluft dispergierten Staubpartikel. Weil die Staubkonzentration in der Messkammer mit zunehmendem Abstand vom Kammerboden abnimmt, wird umso weniger Ladung durch dispergierten Staub vom Drahtgitter abtransportiert, je höher sich das Gitter über dem Boden der Messkammer befindet. In erster Näherung sollte die Staubkonzentration als Funktion der Höhe über dem Boden der Messkammer der Boltzmann-Verteilung folgen. Wenn die Staubpartikel für den Ladungstransport verantwortlich sind, dann sollten sich auch die am Drahtgitter gemessenen Spannungs-

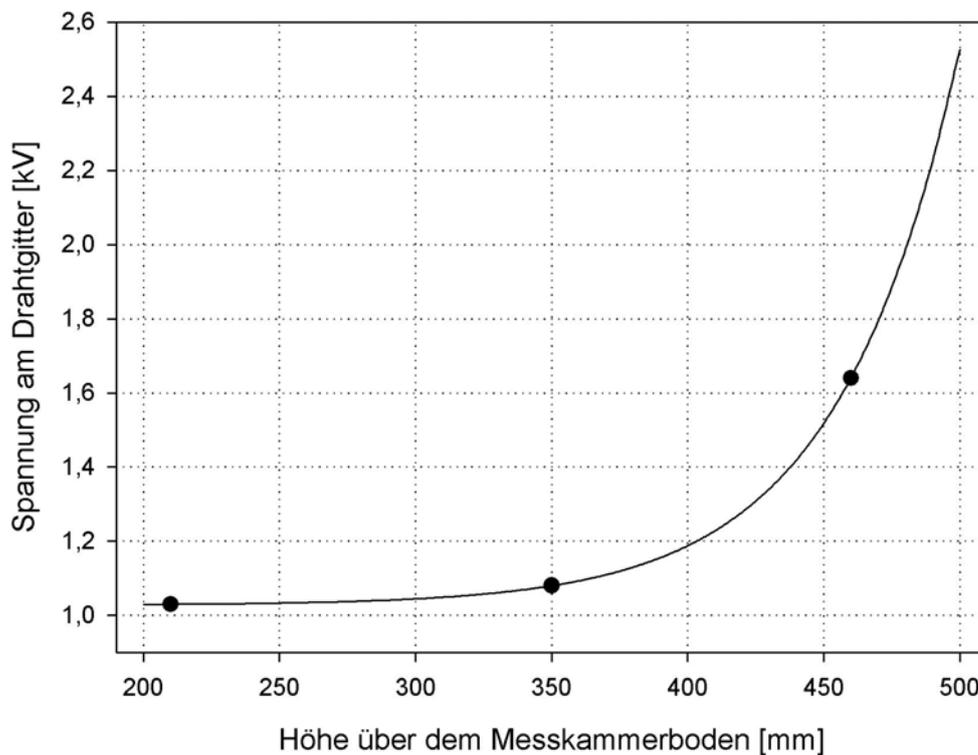


Abbildung 6.2: Werte aus Tabelle 6.1 gefittet mit einer Funktion, die in ihrem Aufbau der Boltzmann-Verteilung entspricht.

werte mit einer Funktion beschreiben lassen, die ebenso wie die Boltzmann-Verteilung aufgebaut ist. Wie man Abbildung 6.2 entnimmt, lassen sich die Messwerte aus Tabelle 6.1 hervorragend mit einer solchen Funktion beschreiben.

Ein weiteres starkes Argument für die Annahme, dass die dispergierten Staubpartikel für den Ladungstransport innerhalb der Messkammer verantwortlich sind, ergibt sich, wenn man die am Drahtgitter gemessenen Entladungskurven mit der Sedimentationskurve der Staubkonzentration in Verbindung bringt. In Abbildung 6.3 ist das auf grafische Art und Weise geschehen. In der Abbildung ist klar zu erkennen, dass die Gitterentladung während der Phase starker Staubsedimentation in der Messkammer ungewöhnlich schnell vonstatten geht. Die Steilheit der Entladekurven in diesem Bereich hängt außerdem von der vertikalen Einbauposition des Drahtgitters in der Messkammer ab, d. h. sie fällt mit wachsender Einbauhöhe des Gitters. Diese Ergebnisse korrespondieren mit der Annahme, dass die Staubkonzentration in der Messkammer höhenabhängig ist und damit auch die Entladung des Gitters durch den dispergierten Staub. Trägt man die Steigung der Entladekurven im Bereich der Sedimentation gegen die Einbauhöhe des Gitters auf, so erhält man wieder einen Zusammenhang, der in seinem mathematischen Aufbau dem der Boltzmann-Verteilung entspricht (vergleiche Abbildung 6.2).

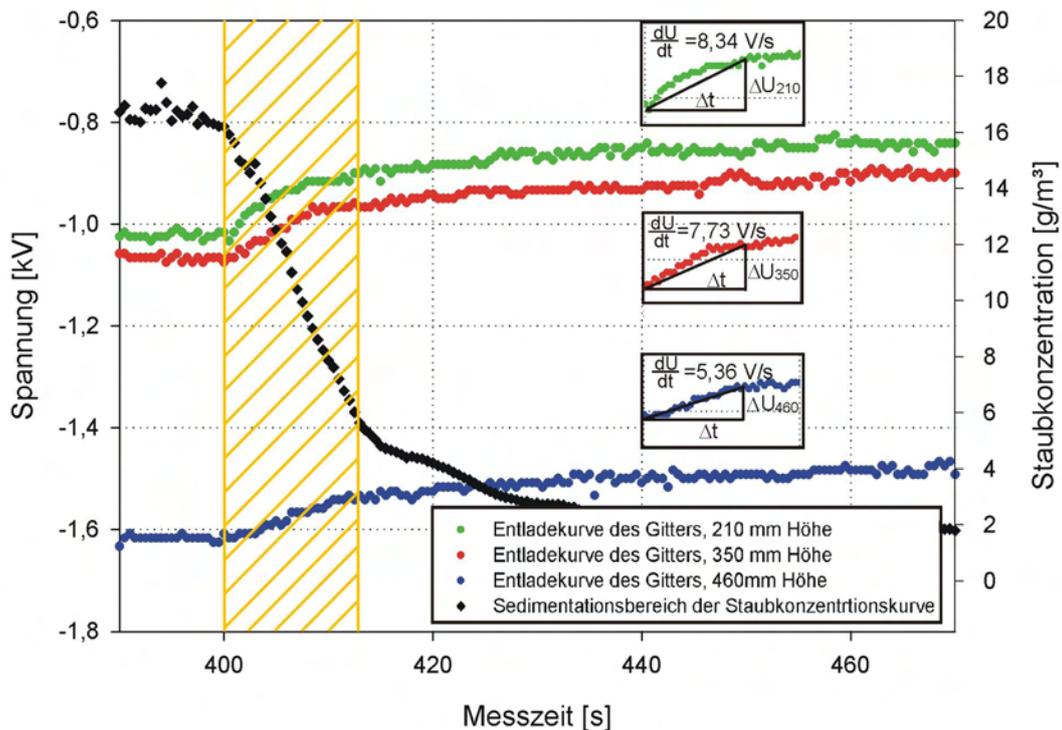


Abbildung 6.3: Teile der Spannungskurven aus Abbildung 6.1, die die Entladung des Drahtgitters zeigen. Zusätzlich dargestellt ist die Kurve der Staubkonzentration für diesen Zeitbereich. Betrachtet man den gelb schraffierten Bereich, so erkennt man, dass während der Sedimentationsdauer die Spannung am Gitter deutlich stärker sinkt als zeitlich danach. Dabei hängt die Höhe des Spannungsabfalls von der Einbauhöhe h_G des Gitters innerhalb der Kammer ab (siehe kleine Bilder).

Anhand dieser Überlegungen ist es möglich, die gemessenen Entladekurven theoretisch abzuleiten. In erster Näherung sollte sich das Gitter wie ein gewöhnlicher Kondensator mit der Kapazität C_G über den Ableitwiderstand R_G entladen (Abschnitt 5.6). Dies geschieht gemäß dem Zusammenhang

$$U(t) = U_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_e}} \quad (6.1)$$

wobei $\tau_e = C_G \cdot R_G$ gilt. Diese Funktion beschreibt allerdings nicht das starke Abfallen der Spannung am Gitter während der Staubsedimentationsphase. Wenn man zu (6.1) einen Term addiert, der das Abfallen der Staubkonzentration $c(t)$ beschreibt und diesen Term mit einem Proportionalitätsfaktor a multipliziert, so sollten sich in guter Näherung die beobachteten Entladekurven ergeben. Im Faktor a steckt die Verbindung zwischen Staubkonzentration und Ladungstransport durch den dispergierten Staub. Die erwartete Funktion für die Spannung ist dann

$$U(t) = U_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_e}} + \underbrace{a \cdot 16,32 \cdot \exp(-0,145 \cdot t^{(2/3)})}_{c(t)} \quad (6.2)$$

Tatsächlich lassen sich die Entladekurven mit (6.2) ableiten, wie man leicht Abbildung 6.4 entnimmt. Bei der Regressionsrechnung wurden U_{\max} , a und τ_e als freie Parameter

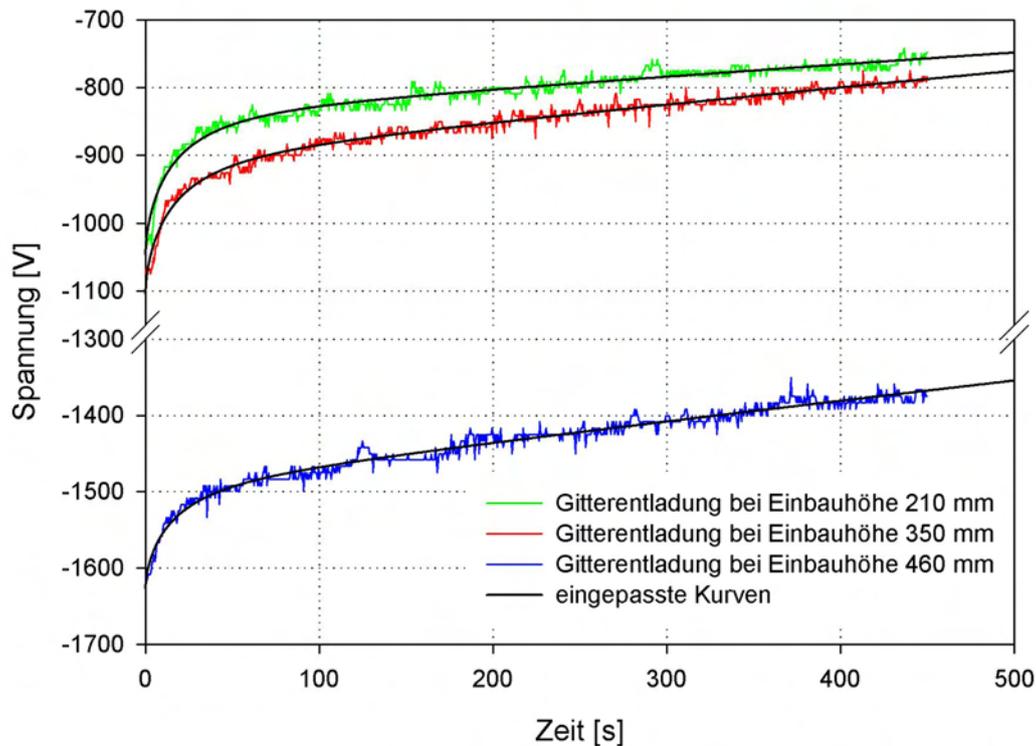


Abbildung 6.4: Am Drahtgitter gemessenen Entladekurven für die drei Einbauhöhen des Gitters (gemittelt). Die schwarzen Kurven wurden mit Hilfe von (6.1) und (6.2) durch geeignete Wahl der Parameter τ_e und a angepasst.

zugelassen. Dabei ist vor allem τ_e von Interesse, lassen sich doch daraus rechnerisch die Kapazität des Drahtgitters sowie der Ableitwiderstand bestimmen. Die Werte für U_{\max} , a und τ_e , die sich aus den Regressionsrechnungen für die drei Gittereinbauhöhen ergaben, sind in Tabelle 6.2 zu finden.

h_G [mm]	U_{\max} [kV]	a	τ_e [1/s]
210	-0,84	12,3	4486
350	-0,90	11,8	3297
460	-1,49	8,0	5237

Tabelle 6.2: Zahlenwerte für die Parameter U_{\max} , a und τ_e der in Abbildung 6.4 dargestellten Regressionskurven. Mittelwerte: $\bar{a} = 10,7$, $\bar{\tau}_e = 4340 \text{ s}^{-1}$.

Beim Blick auf die Tabelle fallen zunächst die vergleichsweise großen Unterschiede in den Parametern a und τ_e auf. Der Parameter a wird mit zunehmender Gittereinbauhöhe kleiner, was einen mit der Einbauhöhe geringer werdenden Einfluss des Ladungstransportes durch Staubpartikel widerspiegelt. Das ist plausibel, nimmt doch die Partikeldichte mit zunehmender Höhe ab. Die Veränderung von τ_e mit der Gittereinbauhöhe ist gleichbedeutend mit der Veränderung des Ableitwiderstandes R_G ($C_G \approx \text{konstant}$). Die Ursache hierfür liegt in der von der Gittereinbauhöhe abhängigen Gitterverschmutzung durch Maisstärke, die während der Versuche beobachtet wurde. Augenscheinlich war die Verschmutzung bei der Gittereinbauhöhe $h_G = 460$ mm deutlich geringer als bei den beiden niedrigeren Gitterpositionen, die sich in dieser Hinsicht nicht erkennbar unterschieden. Wie in Abschnitt 5.6 ausgeführt wurde, schrumpft R_G mit zunehmender Verschmutzung des Gitters, weshalb τ_e für die Gitterposition 460 mm größer ist, als für die beiden anderen Gittereinbauhöhen.

Benutzt man die Mittelwerte $\bar{a} = 10,7$ und $\bar{\tau}_e = 4340 \text{ s}^{-1}$ zum Einpassen der Kurven, so bekommt man noch immer sehr gute Resultate, die sich augenscheinlich nur wenig von den Kurven in Abbildung 6.4 unterscheiden. Mit $\bar{\tau}_e = 4340 \text{ s}^{-1}$ folgt

$$C_G = \frac{\bar{\tau}_e}{R_G} \approx \frac{4340}{3,8 \cdot 10^{13}} = 114 \text{ pF} \quad (R_G \text{ aus Abschnitt 5.6.2})$$

$$R_G = \frac{\bar{\tau}_e}{C_G} \approx \frac{4340}{1 \cdot 10^{-10}} = 4,3 \cdot 10^{13} \Omega \quad (C_G \text{ aus Abschnitt 5.6.3}) \quad (6.3)$$

Ein Vergleich diese Werte mit den gemessenen bzw. rechnerisch abgeschätzten Werten aus Abschnitt 5.6 zeigt, dass im Rahmen der Fehlergrenzen eine gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Messung gegeben ist.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Ladungszustand des Staubes von seinem Aufenthaltsort innerhalb der Messkammer abhängig ist. Das Bild, dass ein staubkonzentrationsabhängiger Ladungstransport innerhalb der Messkammer durch dispergierten Staub stattfindet und für die Ortsabhängigkeit seines Ladungszustandes verantwortlich ist, ist im Hinblick auf die hier erzielten Versuchsergebnisse in sich schlüssig. Alle hier angeführten Indizien weisen auf die Richtigkeit dieser Annahme hin.

6.1.2 Zeitabhängigkeit des Ladungszustandes

Wie die Ortsabhängigkeit des Staubladungszustandes innerhalb der Messkammer, so ist auch dessen zeitliche Entwicklung von großem Interesse. Ist der Ladungszustand zeitlichen Schwankungen unterworfen, so könnte das z. B. ein Indiz dafür sein, dass es während der Messung der Staubbungsneigungskenngröße zu Sättigungseffekten innerhalb der Apparatur kommt.

Der Zugang zur zeitlichen Entwicklung des Ladungszustandes erfolgt über die Form der gemessenen Spannungsverläufe am Drahtgitter. Zusammen mit der Messkammer aus Stahl stellt das Drahtgitter eine Kapazität C_G dar, an die durch den geladenen Staub eine Spannung angelegt wird. Die Dauer der Staubbeförderungen kann als „virtueller“ Widerstand R_{Vi} interpretiert werden, d. h. die Aufladung müsste in erster Näherung einer gewöhnlichen Kondensator-Ladekurve

$$U(t) = U_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right) \quad (6.4)$$

entsprechen mit $\tau_1 = C_G \cdot R_{Vi}$. Der Aufladung wirkt eine Entladung entgegen, wie sie im vorigen Abschnitt 6.1.1.3 dargestellt wurde. Die Entladung setzt sich aus einem Ladungsabfluss über dispergierte Staubpartikel und über den Ableitwiderstand zusammen. Folglich sollten sich die gemessenen Ladekurven in erster Näherung mit (6.4) und einer Gleichung beschreiben lassen, die das Ansteigen und Halten der Staubkonzentration $c(t)$ in der Messkammer während des Staubbefördervorganges beschreibt. Diese wird dann - wie im vorigen Abschnitt - mit einem Proportionalitätsfaktor a multipliziert und zu (6.4) addiert. Der Ableitwiderstand R_G wird dadurch berücksichtigt, dass (6.4) mit dem Exponentialfaktor aus (6.1) multipliziert wird. Es ergibt sich also

$$U(t) = U_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_e}} + a \cdot \underbrace{\left(-0,5 + 17,75 \cdot \left(1 + e^{-\frac{t-10,186}{2,896}}\right)^{-1}\right)}_{c(t)} \quad (6.5)$$

Die Ergebnisse der Regressionsrechnungen für die Ladekurven bei den drei verschiedenen Einbauhöhen des Drahtgitters zeigt Abbildung 6.5. Es ist eine sehr gute bis gute Übereinstimmung zwischen Messwerten und Regressionskurven festzustellen. Für die Gittereinbauhöhe $h_G = 350$ mm passt die Regressionskurve am besten zu den Messwerten; am schlechtesten lassen sich die Messwerte für $h_G = 460$ mm wiedergeben. Mit hoher Wahrscheinlichkeit liegt dies darin begründet, dass die Staubkonzentrationskurven, die Grundlage für $c(t)$ in (6.5) sind, in einer Höhe von 300 mm über dem Messkammerboden aufgenommen wurden. Vermutlich weicht der Verlauf der Staubkonzentrationskurve umso stärker vom Term für $c(t)$ in (6.5) ab, je größer die Distanz zwischen h_G und der Position der Messsonde ist.

Weil sich die Messwerte mit der Gleichung (6.5) in so guter Näherung beschreiben lassen, kann davon ausgegangen werden, dass sich während der Dauer der Staubbeförderung in die Messkammer der Ladungszustand des geförderten Staubes nicht oder nur wenig ändert. Wäre der Ladungszustand zeitabhängig, würden die gemessenen Kurven in Abbildung 6.5 einen anderen Verlauf zeigen.

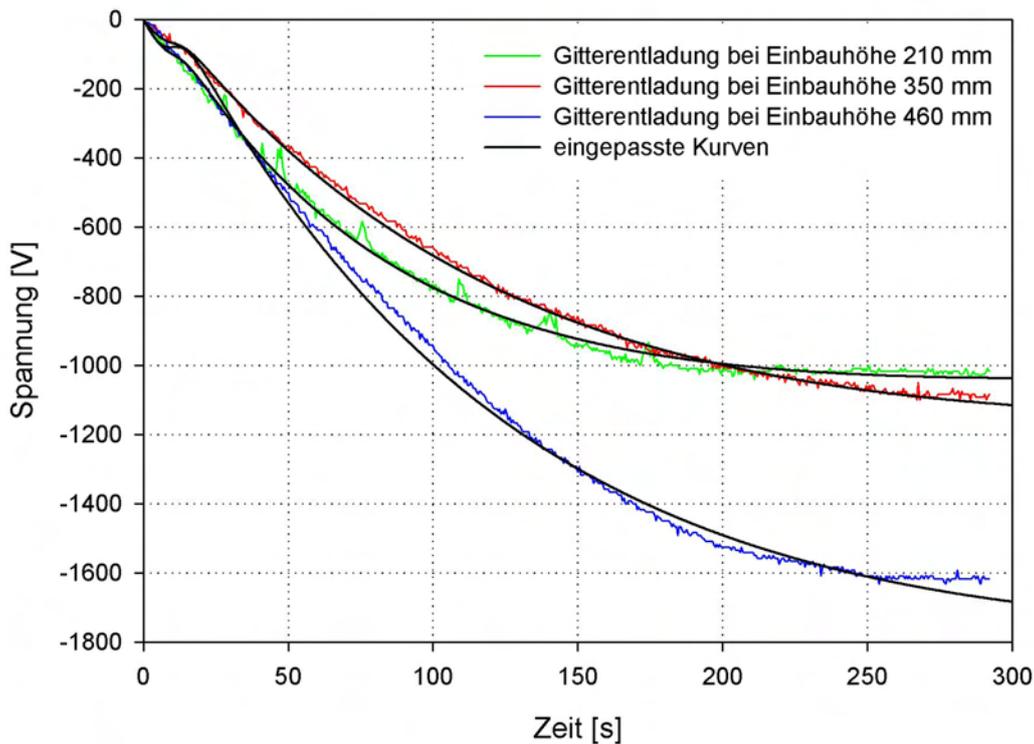


Abbildung 6.5: Am Drahtgitter gemessenen Ladekurven für die drei Einbauhöhen des Gitters (gemittelt). Die schwarzen Kurven wurden mit Hilfe von (6.4) und (6.5) durch geeignete Wahl der Parameter U_{\max} , τ_1 und a angepasst.

h_G [mm]	U_{\max} [kV]	a	τ_1 [1/s]
210	-1,25	5,89	78,7
350	-1,46	5,18	126,2
460	-2,17	10,98	122,9

Tabelle 6.3: Zahlenwerte für die Parameter U_{\max} , a und τ_1 der in Abbildung 6.5 dargestellten Regressionskurven. Mittelwerte: $\bar{a} = 7,3$, $\bar{\tau}_1 = 109,3 \text{ s}^{-1}$.

6.1.3 Höhe der Aufladung

Mit den Spannungsmessungen an einem unterschiedlich in der Messkammer der Staubungsneigungsapparatur positionierten Drahtgitter war es möglich, die Orts- und Zeitabhängigkeit des Ladezustandes des Staubes zu untersuchen (Abschnitte 6.1.1 und 6.1.2). Die Spannung am Gitter lieferte jedoch keine Erkenntnisse über die absolute Höhe der Staubaufladung. Diese Information ist für nachfolgende Untersuchungen von Interesse, bei denen es um die gezielte Entladung des Staubes und um die damit verbundene Änderung der Staubungsneigungskenngröße geht. Über die Kapazität des Gitters und die maximal anliegende Spannung U_{\max} ist es möglich, die Ladung zu berechnen, die der Staub bis zum Erreichen von U_{\max} auf das Drahtgitter überträgt. Da

der Staub sich jedoch am Gitter nicht vollständig entlädt¹ blieb die Frage nach der Ladung, die der Staub mit sich trägt, offen. Zur Beantwortung dieser Frage wurden die folgenden Versuche durchgeführt.

6.1.3.1 Versuchsbeschreibung

Die Aufgabe bestand darin, die vom Staub in einem bestimmten Zeitintervall transportierte Ladung vollständig zu erfassen. Dies wurde mit einer Aluminiumschale erreicht, die in ihren Ausmaßen denen des Drahtgitters entspricht. Die Schale wurde auf das Messgitter in den Teflonrahmen gesetzt, und an das Influenz-Elektrofeldmeter zur Spannungsmessung angeschlossen. Ziel war es, den Staub in der Schale aufzufangen und so die Ladung des Staubes auf das Aluminium zu übertragen. Die Förderdauer des Prüfstaubes wurde auf 60 s begrenzt (Staubgewicht, Schüttkegelbildung).

6.1.3.2 Versuchsergebnisse

Es wurden jeweils zwei Spannungsmessungen pro eingestellter vertikaler Höhe der Aluminiumschale ($h_A = 350$ mm, 460 mm) durchgeführt. Die aufgenommenen Spannungsverläufe für jede Höhe wurden gemittelt und grafisch in Abbildung 6.6 dargestellt. Ebenso wie in Abschnitt 6.1.1.2 sind die Maxima der Spannungsmessungen U_{\max} als Mittelwerte in Tabelle 6.3 aufgeführt. Die Ergebnisse der Einzelmessungen sind dem Anhang zu entnehmen.

h_A [mm]	\bar{U}_{\max} [kV]	maximale Abweichung [kV]
350	-1,71	$\pm 0,073$
460	-2,00	$\pm 0,000$

Tabelle 6.4: Mittelwerte der maximalen Spannungen, die an der Aluminiumschale gemessen wurden. Die Einbauhöhe h_A der Aluminiumschale wurde variiert.

6.1.3.3 Versuchsauswertung und -interpretation

Die zeitliche Entwicklung der Spannung an der Aluminiumschale verhält sich ähnlich wie die am Drahtgitter beobachteten Spannungsverläufe (vergleiche Abbildungen 6.1 und 6.6). Wie erwartet, ist die Steigung der Spannungskurven gegenüber denen am Drahtgitter deutlich höher. Auf Grund der vergleichsweise geringen Staubwolkenentwicklung bei Verwendung der Aluminiumschale spielen Entladungseffekte hier eher eine untergeordnete Rolle. Die gemessene Spannung über der Zeit kann deshalb sehr gut mit Gleichung (6.4) wiedergegeben werden. Dennoch ist der Ladungstransport über dispergierte Maisstärkepartikel vorhanden, was sich in den unterschiedlichen U_{\max} der

¹Zum einen ist die Kontaktfläche zwischen Gitter und Staub sehr klein, zum anderen ist der Ladungsübertrag vom Staub zum Gitter abhängig von der Potentialdifferenz zwischen beiden. Diese wird mit zunehmender Förderdauer geringer.

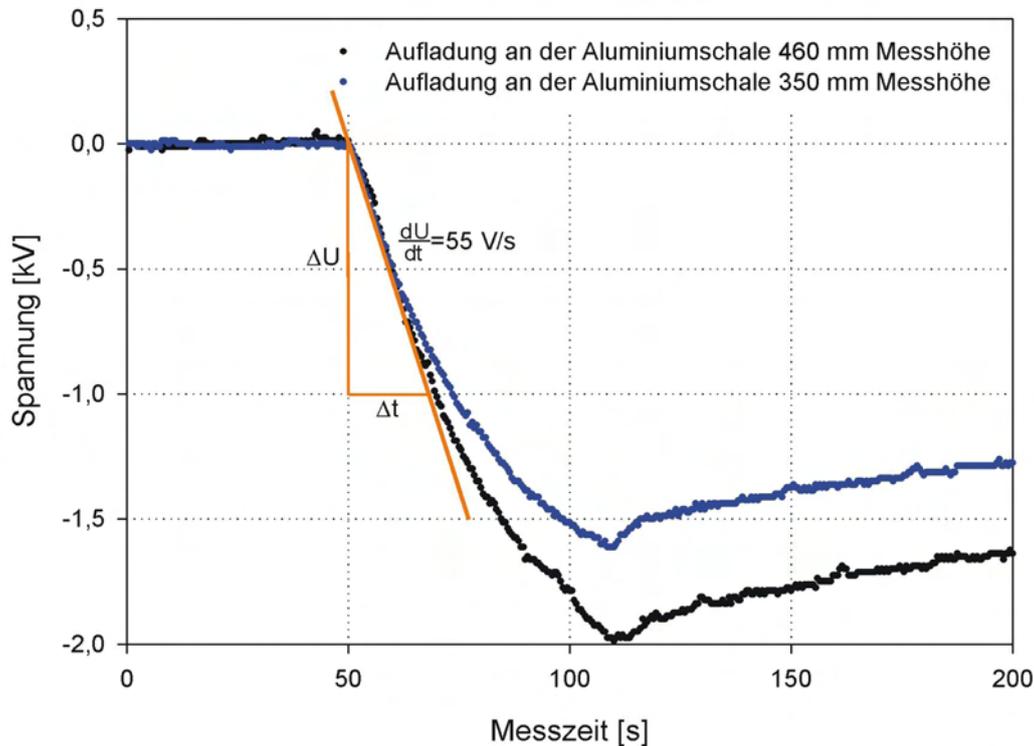


Abbildung 6.6: Mittelwertkurven der an der Schale anliegenden Spannung über die Versuchsdauer. Die Einbauhöhe der Aluminiumschale wurde variiert.

Spannungskurven für die beiden Einbaupositionen der Aluminiumschale und in den dafür typischen Entladungskurven manifestiert.

Zunächst soll die Frage beantwortet werden, wie sich die Aluminiumschale und das Drahtgitter in ihrer Effektivität unterscheiden, elektrische Ladung vom Staub zu übernehmen. Dazu wurde die am Gitter gemessene Spannungskurve durch die an der Aluminiumschale gemessene Spannungskurve dividiert ($h_G = 350$ mm). Das Ergebnis dieser Rechnung veranschaulicht Abbildung 6.7. Es zeigt sich, dass anfänglich sowohl auf das Gitter als auch auf die Aluminiumschale gleich viel Ladung vom Staub übertragen wird. In diesem Bereich findet eine komplette Entladung des Staubes statt. Nach diesen ersten Sekundenbruchteilen kommen die unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften von Gitter und Schale (Kapazität, Ladungsabtransport) zum Tragen, die zu dem gezeigten Kurvenverlauf führen. Die Effektivität des Drahtgitters, Ladung vom Staub aufzunehmen, beträgt etwa 20 % bis 30 % von derjenigen der Aluminiumschale. Ein ähnliches Ergebnis (leicht erhöht) ergibt sich für die Einbauhöhe $h_G = h_A = 460$ mm.

Die Frage nach der vom Staub transportierten Ladung beantwortet sich wie folgt: Es wurde gezeigt, dass sich der Staub zu Beginn der Förderung vollständig an der Aluminiumschale entlädt. Dies spiegelt sich auch in der Tatsache wider, dass die an der Schale gemessene Spannung innerhalb der ersten 10 Sekunden der Förderung nahezu linear steigt (Abbildung 6.6). Legt man eine Tangente an den Punkt $(0, U(0))$ an eine der Spannungskurven aus Abbildung 6.6, so ergibt deren Steigung $\frac{dU}{dt}$ über die Gleichung

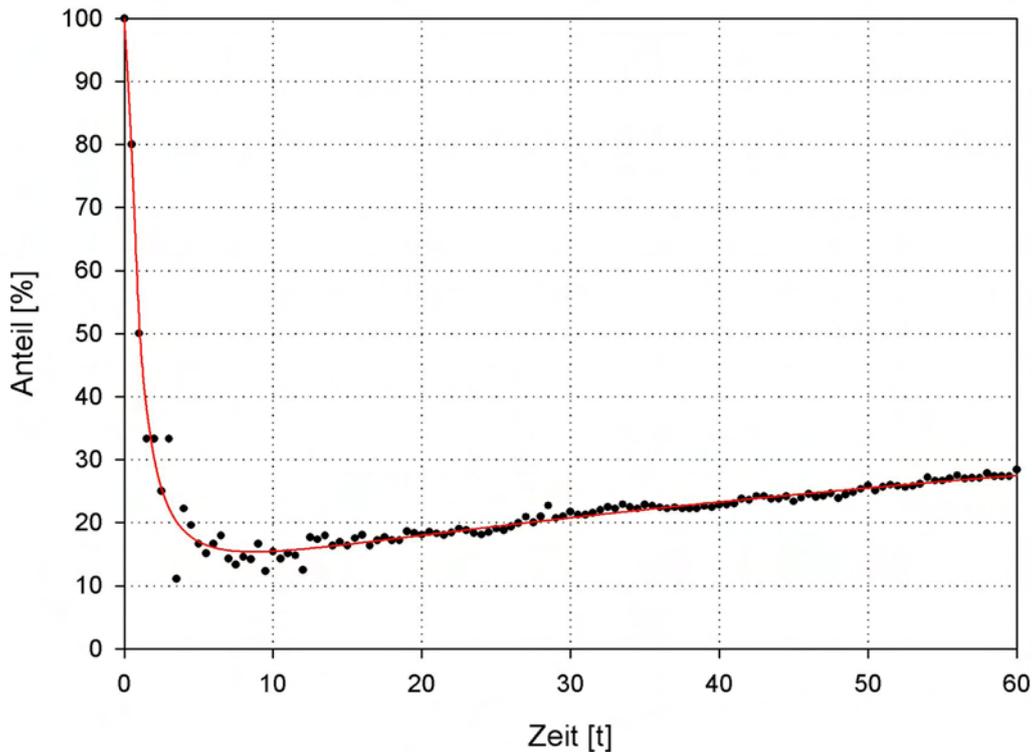


Abbildung 6.7: Mittelwertkurven der an Schale anliegenden Spannung über die Versuchsdauer. Die Einbauhöhe der Aluminiumschale wurde variiert.

$$I = \frac{dQ}{dt} = C_A \cdot \frac{dU}{dt} = 1,1 \cdot 10^{-10} \cdot 55 = 6,05 \text{ nA} \quad (6.6)$$

den elektrischen Strom I vom Staub auf die Aluminiumschale zu Beginn der Förderung. C_A ist Kapazität der Aluminiumschale, die zu 110 pF bestimmt wurde. In den 60 s Förderzeit wurden 0,55 kg Staub in die Messkammer gefördert, d. h. $dm_{\text{St}}/dt = 0,00917 \text{ kg/s}$. Mit diesem Wert ergibt sich die pro Staubmasseneinheit geförderte Ladung q aus

$$q = I \cdot \left(\frac{dm_{\text{St}}}{dt} \right)^{-1} = 6,05 \cdot 10^{-9} \cdot 0,00917^{-1} = 6,6 \cdot 10^{-7} \text{ C/kg} \quad (6.7)$$

Bei einem Messdurchgang zur Bestimmung der Staubungsneigungskenngröße werden rund 2,7 kg Maisstärke gefördert. Mit dieser Staubmasse werden folglich $1,78 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ in die Messkammer transportiert. Dieser Wert unterliegt allerdings relativ großen Schwankungen, da die bei den Messungen beobachteten maximalen Spannungswerte U_{max} von Versuch zu Versuch variierten (siehe Abschnitt 6.1.4).

6.1.4 Mechanismus und Ort der Staubaufladung

In Abschnitt 6.1.1 wurde die elektrostatische Aufladung des Prüfstaubes in Abhängigkeit vom Ort innerhalb der Messkammer untersucht. Es zeigte sich, dass der Staub beim

Eintritt in die Messkammer negativ geladen ist und während des Fallweges einen Teil seiner Ladung verliert. Ein Anstieg der Staubladung konnte bei den Messungen nicht festgestellt werden. Die Staubaufladung muss also außerhalb der Messkammer in der Dosiereinrichtung und im Probenbehälter (siehe Abschnitt 3.1.1 und 3.1.2) stattfinden. Elektrostatische Aufladung ist Folge der Trennung zweier Stoffe mit unterschiedlicher Affinität zu Elektronen (Abschnitt 2.2). Der Prüfstaub kann also nur dort aufgeladen werden, wo er im Probenbehälter und im Dosiersystem mit einem anderen Material in Kontakt gerät. Dies ist an den Behälterwänden, dem Rührwerk und in der Förderschnecke der Fall. Ein weiteres Kriterium der Aufladung ist die Geschwindigkeit der Trennung. Hohe Ladungsunterschiede können nur bei hohen Trenngeschwindigkeiten auftreten. Daher ist die Aufladung an den Behälterwänden eher unwahrscheinlich, da der Staub nur langsam aus dem Behälter gefördert wird. Die Aufladung geschieht daher vermutlich durch die Bewegung des metallenen Rührwerks im Prüfstaub. Ein Indiz für die Richtigkeit dieser Vermutung ist die Beobachtung, dass sich die Höhe der Aufladung bei direkt aufeinander folgenden Versuchen vergrößerte (Abschnitt 6.3.2). Die Verweildauer des Prüfstaubes in der Förderschnecke ist zu kurz, um ein solches Phänomen zu erklären. Es ist naheliegend, dass sich die Ladung während einer Versuchsreihe im Probenbehälter durch das fortwährende Rühren akkumuliert. Dem Staub wird dann mit hoher Wahrscheinlichkeit auf seinem Weg durch die Förderschnecke weitere Ladung mitgegeben.

6.2 Staubentladung mit dem Ring-Ionisator

Zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Ladung des Prüfstaubes und seiner Neigung zur Staubwolkenbildung war es erforderlich, verschiedene Ladungszustände des Staubes zu erzeugen. Im Idealfall sollte eine vollständige Entladung des Staubes vor seinem Eintritt in die Messkammer erreicht werden. Zu diesem Zweck wurde ein Ring-Ionisator (Abschnitt 2.2.2) für die Entladung des Staubs eingebaut (Abschnitt 5.3.1). Die Funktion dieses Bauteiles wurde anhand des in Abschnitt 6.1.3 beschriebenen Messaufbaus überprüft.

6.2.1 Versuchsbeschreibung

Auch für diese Messung wurde eine Aluminiumschale in der Größe des Messgitters auf das Gitter in den Teflonrahmen gesetzt. Die Schale wurde in den zwei Höhen $h_A = 350$ mm und $h_A = 460$ mm horizontal in der Kammer positioniert. Für jede Messhöhe wurden 2 Versuche mit 60 s Förderdauer durchgeführt. Der Ringionisator wurde zwischen dem Austragstutzen der Förderschnecke und der Eintrittsöffnung der Messkammer justiert und in Betrieb genommen (Abbildung 5.6). Der Ring-Ionisator war während der gesamten Versuchsdauer inklusive der Sedimentationszeit in Betrieb.

6.2.2 Versuchsergebnisse

Die Messergebnisse der Einzelmessungen sind im Anhang A.3 aufgeführt. Für die Aus-

wertung wurden die Versuchsergebnisse arithmetisch gemittelt und in Form der Tabelle 6.3 bzw. der Abbildung 6.4 aufgearbeitet.

h_A [mm]	\bar{U}_{\max} [kV]	maximale Abweichung [kV]
350	< 0,05	$\pm 0,000$
460	0,19	$\pm 0,053$

Tabelle 6.5: Mittelwerte der maximalen Spannungen \bar{U}_{\max} , die an der Aluminiumschale bei vorgeschaltetem Ring-Ionisor gemessen wurden. Die Einbauhöhe der Aluminiumschale h_A wurde variiert. Die Staubbeförderung wurde nach 50 s Betriebsdauer des Ring-Ionisators eingeschaltet.

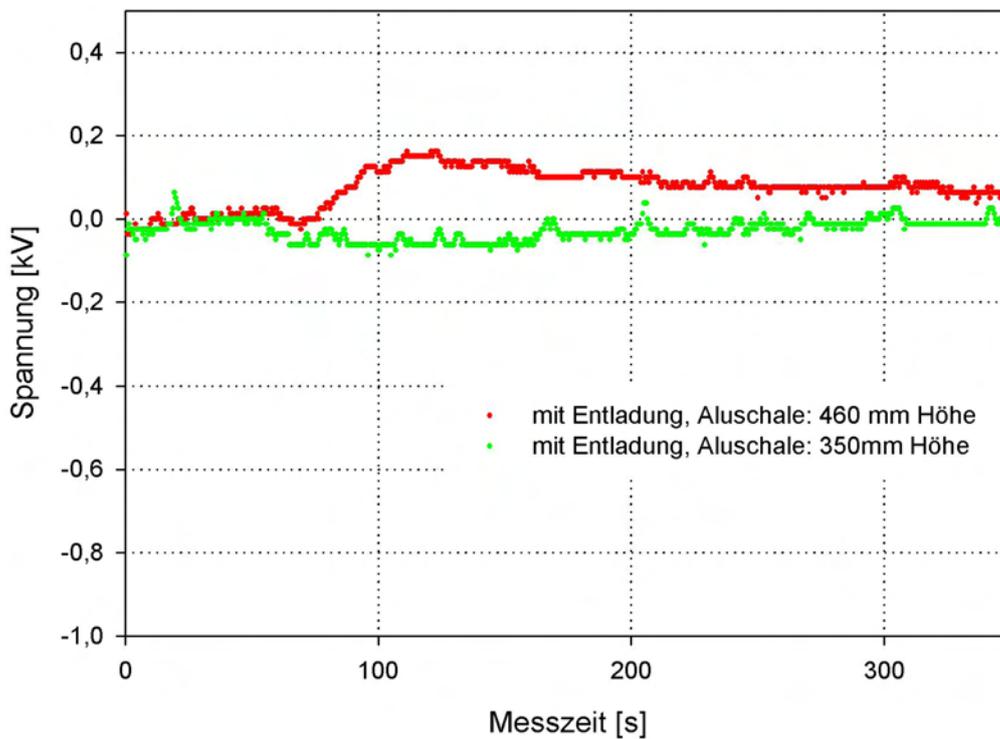


Abbildung 6.8: Mittelwertkurven der an der Aluminiumschale anliegenden Spannung über die Versuchsdauer bei vorgeschalteter Ring-Elektrode. Die Einbauhöhe der Aluminiumschale wurde variiert.

6.2.3 Versuchsauswertung und -interpretation

Sowohl die Ergebnisdarstellung in Form von Tabelle 6.5 als auch in Abbildung 6.8 zeigt ganz klar, dass die Einbauhöhe der Aluminiumschale einen erheblichen Einfluss hat auf den an der Schale gemessenen Spannungsverlauf. Wurde bei einer Einbauhöhe von $h_A = 350$ mm so gut wie keine Spannung an der Schale während der Messung registriert, so maß das Influenz-Elektrofeldmeter bei der Einbauhöhe $h_A = 460$ mm

eine positive Spannung an der Schale, die in ihrem Maximum fast 200 V erreichte. Auffällig war dabei, dass das Ansteigen der Spannung an der Schale mit der Förderdauer des Staubes gekoppelt zu sein scheint. Bei permanent eingeschalteter Ionisations-Elektrode zeigte sich eine steigende Spannung während der Staubbeförderung. Nach dem Abschalten der Förderung nach insgesamt 110 s fiel die Spannung gemäß den in Abschnitt 6.1 beschriebenen Zusammenhängen (Abbildung 6.7), obwohl die Ionisation nach wie vor eingeschaltet war. Bei einer Einbauhöhe von 460 mm ist die Ionisations-Elektrode lediglich ca. 120 mm von der Aluminiumschale (bzw. dem Drahtgitter) entfernt. Offensichtlich ist diese Distanz zu kurz, um eine Beeinflussung der Aluminiumschale durch die Ionisations-Elektrode - zumindest bei eingeschalteter Staubbeförderung - zu unterbinden. Aus diesem Grund wurde das Drahtgitter für die Folgemessungen in größerem Abstand zur Ring-Elektrode in der Messkammer der Staubungsneigungsapparatur bei $h_G = 350$ mm positioniert.

6.3 Einfluss des Ladungszustandes auf die Staubungsneigungskenngröße

Eine der wichtigsten Fragestellungen dieser Arbeit war, inwieweit der elektrostatische Ladungszustand des Prüfstaubes den Zahlenwert der Staubungsneigungskenngröße beeinflusst. Um diese Frage zu beantworten, wurde - aufbauend auf den Messergebnissen der vorherigen Abschnitte - die nachfolgend beschriebene Versuchsreihe durchgeführt.

6.3.1 Versuchsbeschreibung

In die Messkammer der Staubungsneigungsapparatur wurde das schon zuvor verwendete Drahtgitter (siehe Abschnitt 6.1) in einer vertikalen Höhe von $h_G = 350$ mm waagrecht über dem Kammerboden positioniert. Anschließend wurde zweimal hintereinander die Staubungsneigungskenngröße gemessen, wobei der Staub einmal unverändert in seinem Ladungszustand blieb und einmal mit Hilfe der Ionisations-Elektrode gezielt entladen wurde. Dieser Versuchsablauf wurde 7 mal wiederholt, um statistisch ausreichend gesicherte Aussagen treffen zu können. Die Messungen mit, bzw. ohne vorgeschalteter Ionisations-Elektrode, wurden paarweise verglichen und ausgewertet. So wurde sichergestellt, dass die Änderung der Umgebungsparameter minimal waren und so keinen Einfluss auf die Messungen hatten. Zusätzlich wurde die Staubmasse und die Schüttkegelhöhe des Staubes in der Schaufel am Messkammerboden nach jeder Bestimmung der Staubungsneigungskenngröße vermessen und protokolliert, um eventuell auftretende Änderungen in den Produkteigenschaften zu erfassen.

6.3.2 Versuchsergebnisse

Die während der einzelnen Versuche gemessenen Spannungsverläufe am Drahtgitter sind in Abbildung 6.9 gemeinsam dargestellt. Dabei wurde jeweils die gleiche Farbe

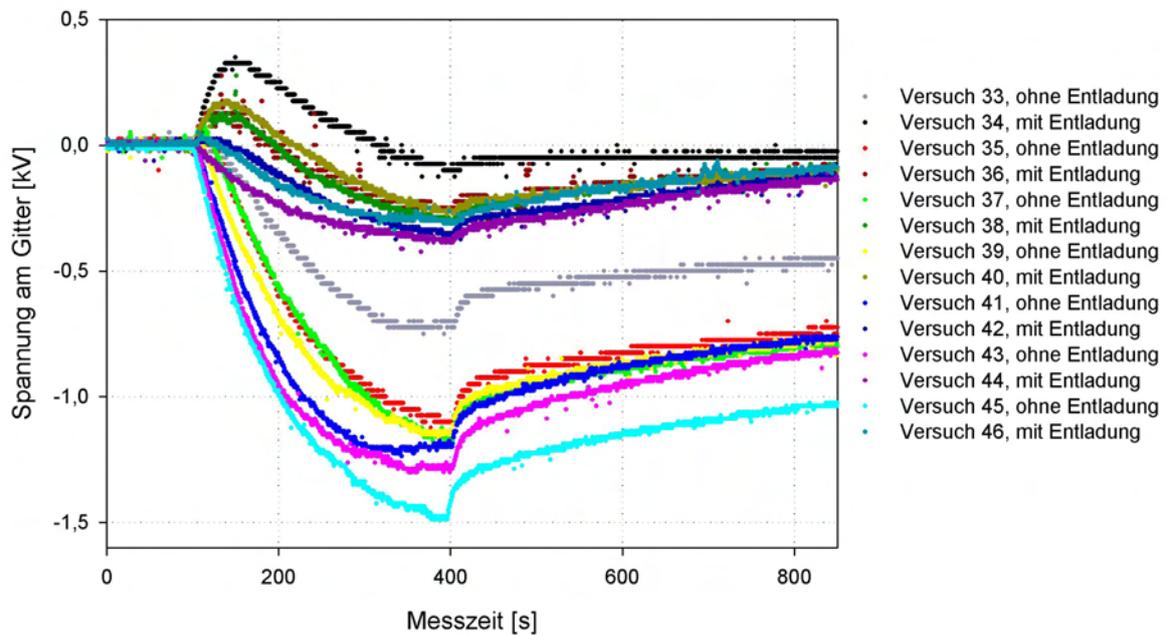


Abbildung 6.9: Am Drahtgitter gemessene Spannungsverläufe während der insgesamt 14 Messungen der Staubungsneigungskenngröße. Je 7 Versuche wurden mit, je 7 ohne Staubentladung durchgeführt.

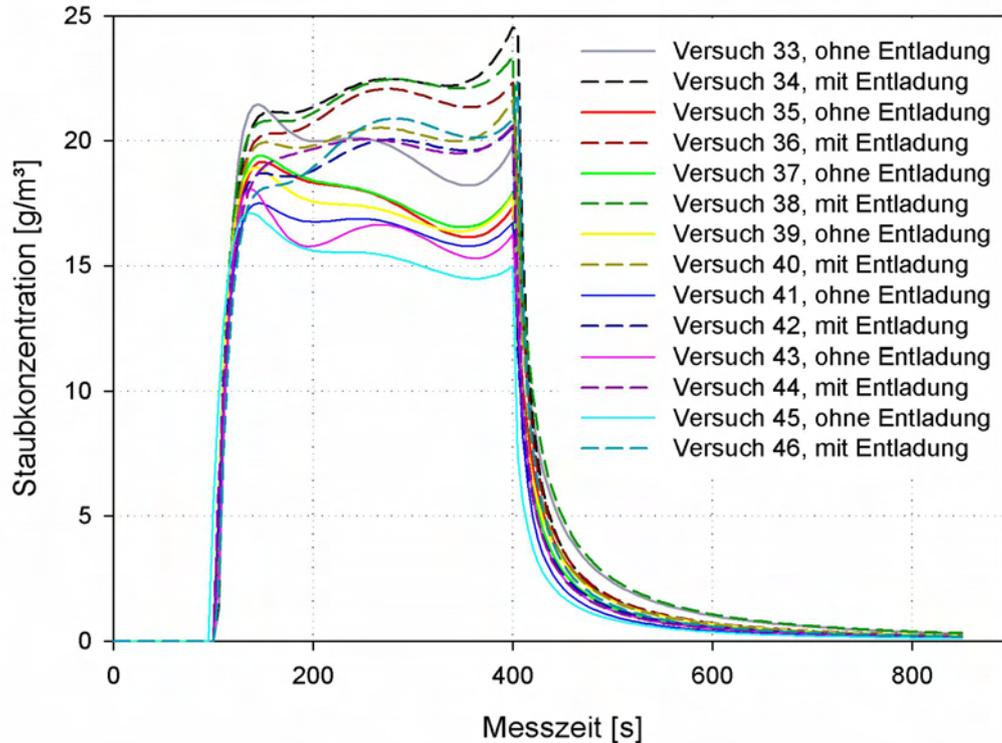


Abbildung 6.10: Staubkonzentration in Abhängigkeit der Messzeit während der 14 S_N -Bestimmungen. Je 7 Versuche wurden mit, je 7 ohne Staubentladung durchgeführt. Die Messergebnisse der Staubkonzentration wurden gemäß 5.4 aufgearbeitet.

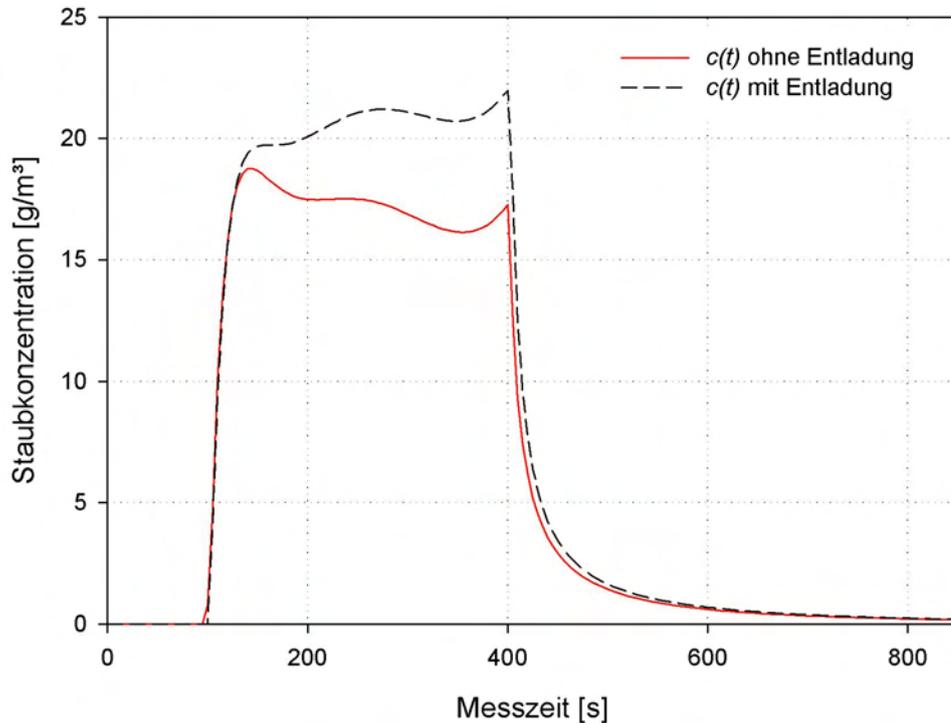


Abbildung 6.11: Zeitlicher Verlauf der Staubkonzentration in der Messkammer der Staubungsneigungsapparatur mit (schwarz) und ohne (rot) Staubentladung. Jede der beiden Kurven ist das Mittel aus den 7 entsprechenden Kurven aus Abbildung 6.10.

für ein Versuchspaar (mit und ohne Entladung) benutzt. Für die Staubkonzentrationskurven wurde ähnlich verfahren unter Anwendung der in Abschnitt 5.4 beschriebenen Funktionen zur Kurvenglättung.

In Abbildung 6.11 ist einmal die zeitliche Entwicklung der Staubkonzentration in der Messkammer ohne Entladung grafisch dargestellt, wobei über die Versuchsergebnisse der 7 Messungen ohne Staubentladung gemittelt wurde. Zum anderen zeigt diese Abbildung den mittleren Verlauf der Staubkonzentration, der unter Verwendung der Ionisations-Elektrode registriert wurde.

Die einzelnen Messergebnisse sind in Anhang A.4 aufgelistet.

6.3.3 Versuchsauswertung und -interpretation

Beim Betrachten der Abbildungen 6.9 bis 6.11 fällt zunächst auf, dass ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Spannung am Drahtgitter und der Staubungsneigungskenngröße besteht. Zwar konnte auch während der Versuche mit vorgeschaltetem Ring-Ionisor offenbar keine vollständige Entladung des Staubes erzielt werden (obere Kurven in Abbildung 6.9), jedoch war die Spannungsdifferenz am Gitter für geladenen und entladenen Prüfstaub ausreichend groß, um eindeutige Versuchsergebnisse zu erhalten. Bei höheren, am Gitter gemessenen Spannungen, wird eine geringere Staubkonzentration gemessen, was zu einer geringeren Staubungsneigungskenngröße führt (Abbildungen 6.9 und 6.10). Dieses Ergebnis wird besonders durch die Darstellung in Abbildung 6.11 unterstrichen, in der die gemittelte Staubkonzentrationskurve für den

aufgeladenen Staub signifikant niedriger ist, als für denselben Staub in näherungsweise ungeladenem Zustand. Da die Spannung am Gitter durch die Ladung des Prüfstaubes erzeugt wird, liegt die Schlussfolgerung nahe, dass eine elektrostatische Aufladung eines Staubes eine Abnahme seiner Neigung zur Staubwolkenbildung zur Folge hat.

Unterzieht man die am Gitter gemessenen Spannungskurven einer genaueren Analyse, so zeigt sich zunächst, dass die bei den Messungen mit dem nicht entladenen Staub erhaltenen Spannungskurven in ihrem Verlauf denen entsprechen, die in Abschnitt 6.1 gemessen und diskutiert wurden (vergleiche Abbildungen 6.1 und 6.9). Auffällig ist jedoch, dass die Höhe der Spannung mit der Anzahl der Versuche zunimmt, wie man der Staffelung der Kurven in Abbildung 6.9 entnimmt. Diese Staffelung der Spannungskurven ist auch bei den Versuchen mit entladenen Staub beobachtet worden, wobei hier anfänglich eine positive Aufladung gemessen wurde, die mit fortschreitender Versuchszahl zu einer negativen Spannung wurde. Damit gilt ganz allgemein, dass sich der, während einer Messung registrierte Spannungsverlauf, am Drahtgitter mit der Anzahl der Messdurchläufe zu negativeren Werten hin verschiebt. Bringt man diese Ergebnisse in Zusammenhang mit den zugehörigen Staubkonzentrationskurven bzw. Staubungsneigungskenngrößen S_N für den nicht entladenen Staub, so ist ein Schrumpfen von S_N um ca. 20 % zu verzeichnen. Ein Abfall von S_N um rund 12 % wurde auch bei den Versuchen mit dem entladenen Staub festgestellt. Diese Beobachtung manifestiert sich in Abbildung 6.12, in der die maximale Spannung am Gitter

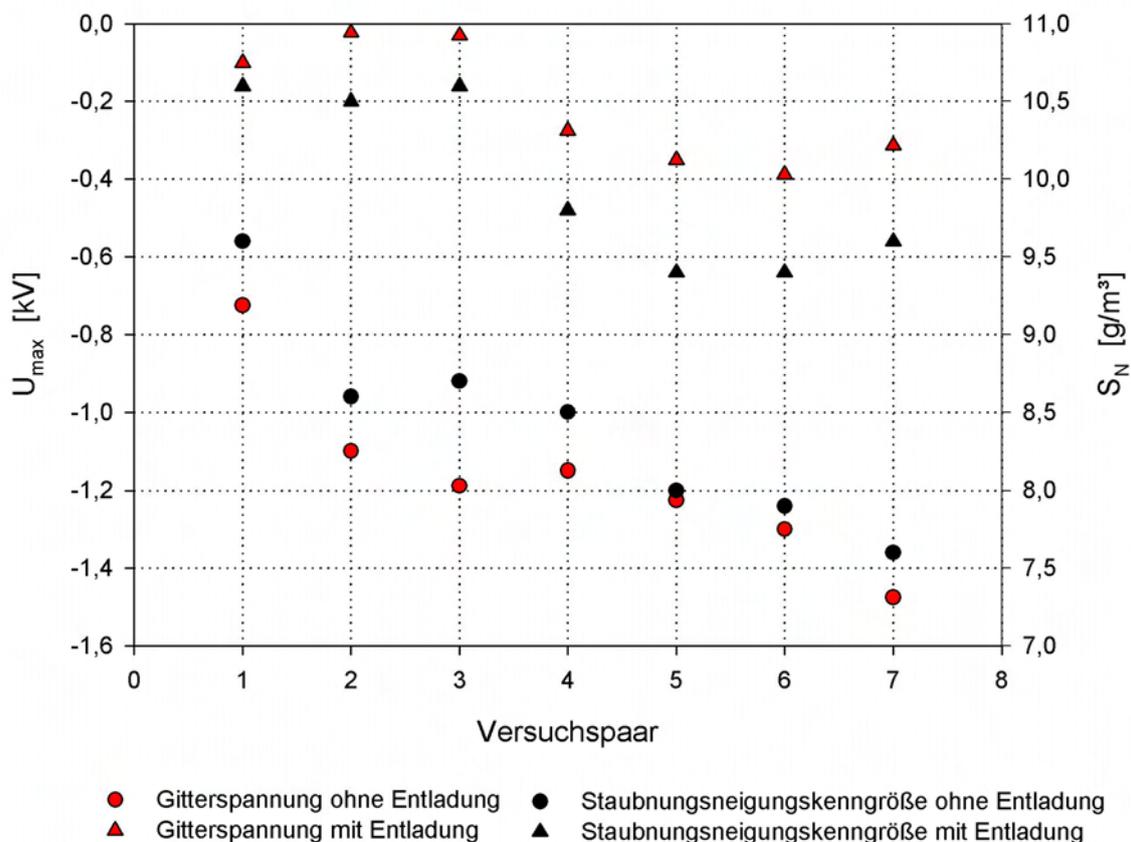


Abbildung 6.12: Abhängigkeit der maximalen Gitterspannung U_{\max} und der Staubungsneigungskenngröße S_N von der Anzahl der Messdurchläufe.

U_{\max} sowie die Staubungsneigungskenngröße S_N gegen die Anzahl der Messdurchläufe aufgetragen ist.

Auch die Entwicklung der geförderten Staubmasse zeigt einen eindeutigen Trend mit zunehmender Zahl an Messdurchläufen, nämlich eine Zunahme um 4%. Der Staub scheint sich also von Versuch zu Versuch zu verdichten. Die Schüttkegelhöhe bleibt hingegen über die gesamte Versuchsreihe nahezu konstant.

Aus Abbildung 6.12 wird erneut ersichtlich, dass die am Drahtgitter gemessene Spannung und die Höhe der mit der Apparatur bestimmten Staubungsneigungskenngröße zusammenhängen. Je höher die Aufladung des Staubes, desto niedriger wird die gemessene Staubungsneigungskenngröße.

Welche Ursache die mit der Versuchszahl ansteigende Aufladung des Prüfstaubes hat, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht endgültig geklärt werden. Vermutlich ist es aber so, dass das Rührwerk im Probenbehälter der Staubungsneigungsapparatur den Staub über längere Zeiträume hinweg durch seine Rührbewegung auflädt, was sich auf die Folgeversuche auswirkt. Eine Füllung des Probenbehälters reicht für etwa 3 Messdurchläufe aus, weshalb die im Probenbehälter befindliche Staubmasse von der ersten bis zur dritten Messung dem Rührwerk zunehmend lange ausgesetzt ist. Wahrscheinlich liegt darin auch die beobachtete Zunahme der Staubdichte begründet.

Abschließend wird versucht, mit Hilfe einer Extrapolation die Staubungsneigungskenngröße der hier verwendeten Maisstärke näherungsweise zu bestimmen, die bei einer vollständigen Staubentladung gemessen werden müsste. Dazu wurde die Staubungsneigungskenngröße S_N über die maximal am Gitter gemessene Spannung U_{\max} in Form

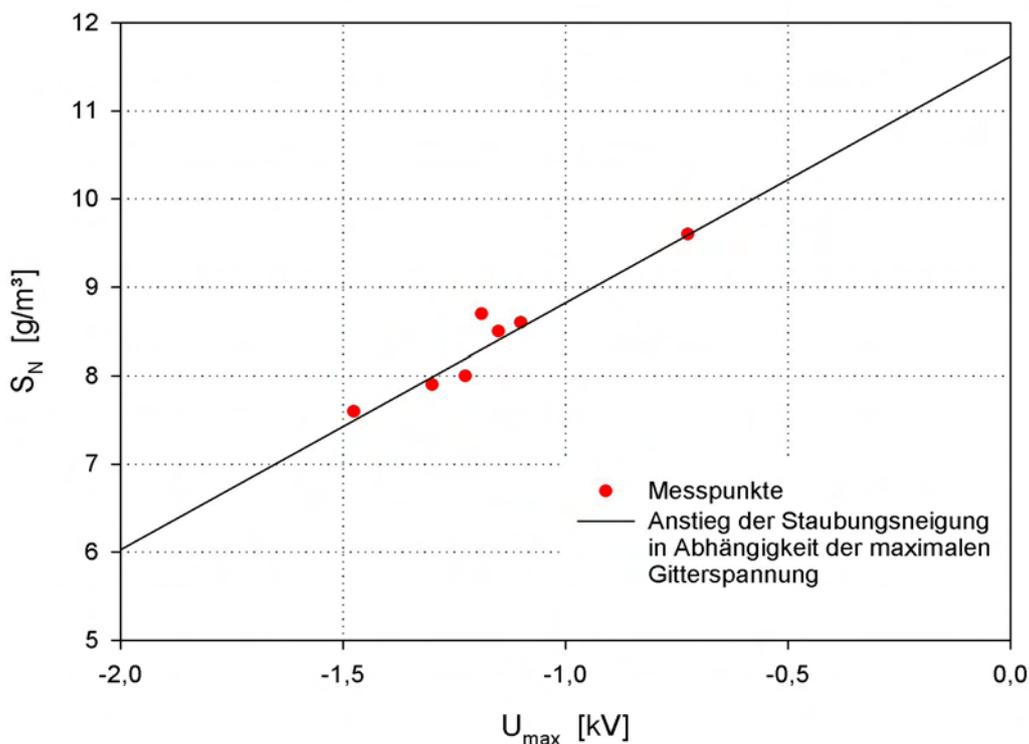


Abbildung 6.13: Änderung der Staubungsneigungskenngröße der Maisstärke mit fallender Gitterspannung. Eine lineare Funktion beschreibt die Messpunkte gut.

von Abbildung 6.13 aufgetragen, wobei ausschließlich die Messergebnisse benutzt wurden, die durch die Versuche ohne Staubentladung geliefert wurden. Es ergab sich näherungsweise ein linearer Zusammenhang der beiden Größen. Die Extrapolation durch die Gerade liefert eine Staubungsneigungskenngröße von etwa $11,6 \text{ g/m}^3$ für die völlig entladene Maisstärke. Die maximal gemessene Staubungsneigungskenngröße dieser Versuchsreihe mit Entladung lag bei $10,9 \text{ g/m}^3$, wobei immer noch $0,1 \text{ kV}$ am Gitter gemessen wurden. Damit erscheint der extrapolierte Wert durchaus plausibel.

Weil die vom Staub auf das Gitter (bei fester Gittereinbauhöhe) übertragene Ladung Q proportional zur spezifischen Ladung q des Staubes sein sollte und Q über die Gitterkapazität C_G linear mit der maximalen Spannung am Gitter U_{\max} verknüpft ist, sollte zwischen U_{\max} und dem Ladungszustand des Staubes ein - zumindest näherungsweise - linearer Zusammenhang bestehen. Mit den Ergebnissen aus Abbildung 6.13 folgt daraus, dass auch S_N näherungsweise linear vom Ladungszustand des Staubes abhängt.

Kapitel 7

Einfluss weiterer Parameter

In Kapitel 6 wurde gezeigt, dass der Zahlenwert der mit der Staubungsneigungsapparatur gemessenen Kenngröße S_N erheblich durch den elektrischen Ladungszustand des Prüfstaubes beeinflusst wird. Die Aufladbarkeit eines Staubes wird in erster Linie durch dessen Leitfähigkeit bzw. spezifischen Widerstand bestimmt (Abschnitt 2.2). Der spezifische Widerstand vieler Lebensmittelstäube wiederum ist primär abhängig von ihrer Produktfeuchte und der Raumlufffeuchte. Diese drei genannten, von einander abhängigen Parameter, kommen nach den bisherigen Erkenntnissen hauptsächlich dafür in Frage, den Messwert der Staubungsneigungskenngröße merklich zu beeinflussen. Ob und inwieweit das der Fall ist und wie diese Größen voneinander abhängen, wird in den folgenden Abschnitten untersucht.

7.1 Einfluss des Raumklimas auf den spezifischen Widerstand

7.1.1 Versuchsbeschreibung

Die Messungen erfolgten wie im Abschnitt 4.2.5 in Anlehnung an DIN EN 61241-2-2, wobei die Apparatur für die Widerstandsmessung komplett in der Klimakammer der FSA untergebracht wurde (Abbildung 7.1). Abweichend von Abschnitt 4.2.5 wurde nicht die Vibrationsmesszelle, sondern die Messzelle nach Norm benutzt, da für die Messung innerhalb der Klimakammer nicht die für die Vibrationsmesszelle notwendigen technischen Möglichkeiten zur Verfügung stehen. Die Messzelle besteht aus zwei quaderförmigen Stahl-Elektroden, die an die Spannungsquelle der Messapparatur angeschlossen werden. Diese werden auf einer Teflonplatte justiert, welche zur Isolierung gegen den Untergrund auf einer Glasplatte liegt. Der Abstand der Elektroden beträgt $L = 1$ cm, die Elektrodenfläche (Messfläche) beträgt 10 cm^2 ($H = 1$ cm, $W = 10$ cm). Auch hier gilt die Bedingung, dass der Leerwiderstand R_0 der Messzelle größer ist als $10 \cdot R_S$. Die Berechnung des spezifischen Widerstandes wird in Abschnitt 4.2.5 ausführlich gezeigt. Da die Klimakammer mit Metall ausgekleidet ist, besteht kein Einfluss äußerer elektromagnetischer Felder auf die Messung.

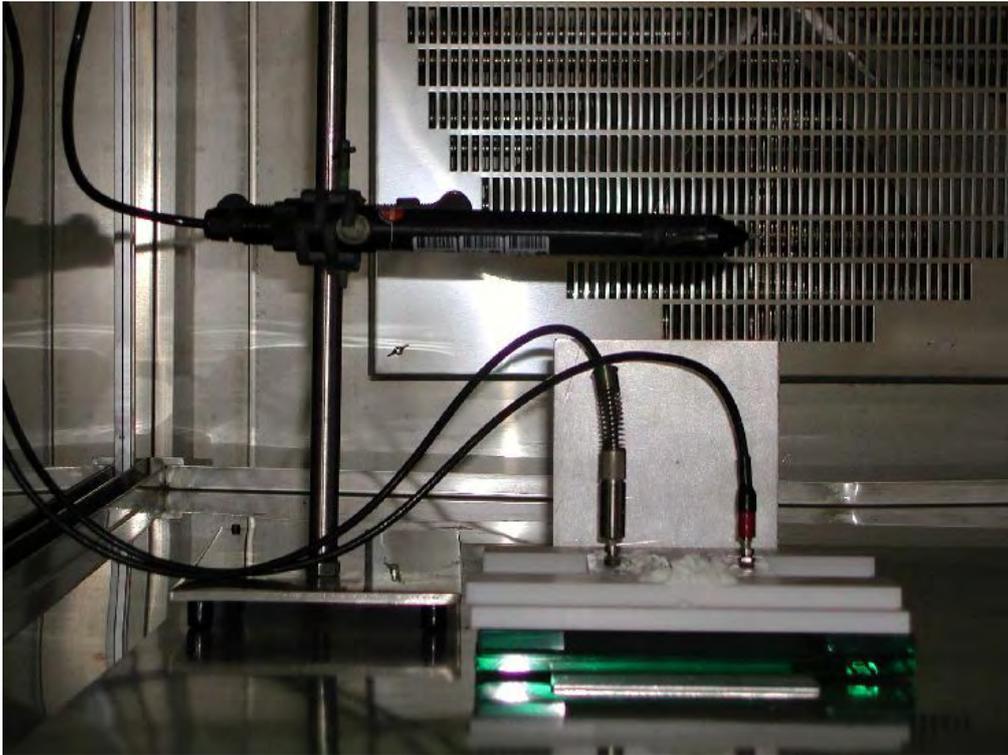


Abbildung 7.1: Die Messzelle nach Norm zur Bestimmung des spezifischen Widerstandes des Prüfstaubes in Anlehnung an DIN EN 61241-2-2 wurde im Klimaschrank aufgebaut und vorbereitet. Oberhalb der Messzelle ist ein Sensor zur Überwachung von Temperatur und Luftfeuchte zu erkennen.

Die Untersuchung wurde bei 8 verschiedenen Klimata durchgeführt. Welche Klimata für die einzelnen Messungen eingestellt und welche Größen gemessen wurden, ist in Tabelle 7.1.1 zusammenfassend dargestellt.

Die Produktfeuchte wurde einmalig vor Beginn der Messreihe an einer Probe aus der zur Verfügung stehenden gesamten Staubmasse bestimmt. Die Apparatur zur Widerstandsbestimmung wurde in der Klimakammer für die Messungen vorbereitet. Die Spannung an den Elektroden betrug 1,5 kV. Während der Versuchsreihe wurde nach jeder Widerstandsmessung in der Klimakammer erneut die Produktfeuchte an der Probe aus der Kammer bestimmt. Eine Messung begann, wenn die gewünschten Klimaparameter in der Klimakammer erreicht waren. Die Probe verblieb dann 24 h lang in der Klimakammer. Während dieser Dauer wurde über die Zeit die Änderung des Widerstandes gemessen, wobei der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten verlängert wurde (10 s, 1 min, 5 min, 30 min, mehrere Stunden).

7.1.2 Messergebnisse

Die Messdaten aus dem oben geschilderten Versuchsablauf wurden nach zwei verschiedenen Kriterien aufgearbeitet. Zum einen wurde der spezifische Widerstand als Funktion der Produktfeuchte aufgetragen, zum anderen der spezifische Widerstand als Funktion der Luftfeuchte. Weiterhin konnte eine Adsorptionsisotherme abgeleitet werden.

Versuch	φ [% r.F.]	gemessene Größen
Messreihe 1, $\vartheta = 20^\circ\text{C}$		
1	50	R_0, R_S
2	60	R_S
3	70	R_S
Messreihe 2, $\vartheta = 30^\circ\text{C}$		
4	30	R_0, R_S, z
5	40	R_S, z
6	50	R_0, R_S, z
7	60	R_S, z

Tabelle 7.1: Randbedingungen für die Messungen des spezifischen Widerstandes des Prüfstaubes in Abhängigkeit von der Luftfeuchte z .

Anhand der Messdaten aus den Versuchen mit $\vartheta = 30^\circ\text{C}$ konnte für Maisstärke die Adsorptionsisotherme¹ erstellt werden. Das Diagramm 7.4 verdeutlicht, wieviel Wasser Maisstärke maximal in Abhängigkeit von der Luftfeuchte bei $\vartheta = 30^\circ\text{C}$ aufnehmen kann.

Für die bei diesen Messungen benutzte Maisstärkemasse (ca. 6 g) kann gemäß [5] davon ausgegangen werden, dass nach 24 h die Sättigung erreicht ist. Bei der zweiten Versuchsreihe wurde am Ende jeder Messung die Produktfeuchte gemessen. In Verbindung mit den nach 24 h ermittelten Widerstandswerten konnte die Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes von der Produktfeuchte dargestellt werden (Abbildung 7.2).

Der Widerstandswert der Maisstärke nach einer Minute Messdauer wird hauptsächlich durch die Luftfeuchte bestimmt, da das Produkt noch weit von der Sättigung entfernt ist und nur die Feuchtigkeit an der Oberfläche der Probe eine Rolle für deren Leitfähigkeit spielt. Je höher die Luftfeuchtigkeit, desto schneller dringt das Wasser auf Grund der höheren Konzentrationsdifferenz in die Produktoberfläche ein. Die Widerstandsmessung eine Minute nach Versuchsbeginn liefert also den Zusammenhang zwischen Widerstandswert und Luftfeuchte (Abbildung 7.3).

7.1.3 Versuchsauswertung und -interpretation

Mit steigender Produktfeuchte sinkt der spezifische Widerstand bis er sich bei etwa 9 % r.F. einem konstanten Wert zwischen $10^9 \Omega\cdot\text{m}$ und $10^{10} \Omega\cdot\text{m}$ annähert (Abbildung 7.2). Vermutlich wird in diesem Bereich die Leitfähigkeit vorwiegend durch die Feuchtigkeit bestimmt. Zwischen einer Produktfeuchte von etwa 6 % r.F. und 10 % r.F.

¹Adsorption ist die Eigenschaft eines Feststoffes, Feuchtigkeit aus der Luft aufzunehmen. Ein Stoff nimmt so lange Feuchtigkeit aus der Luft auf, bis die Stoff- und Luftfeuchte in einem Gleichgewicht stehen. Dieser Vorgang ist abhängig von der Luftfeuchte und -temperatur. Trägt man die Stofffeuchte im gesättigten Zustand gegen die Luftfeuchte bei konstanter Temperatur auf, erhält man die so genannte Adsorptionsisotherme des Stoffes.

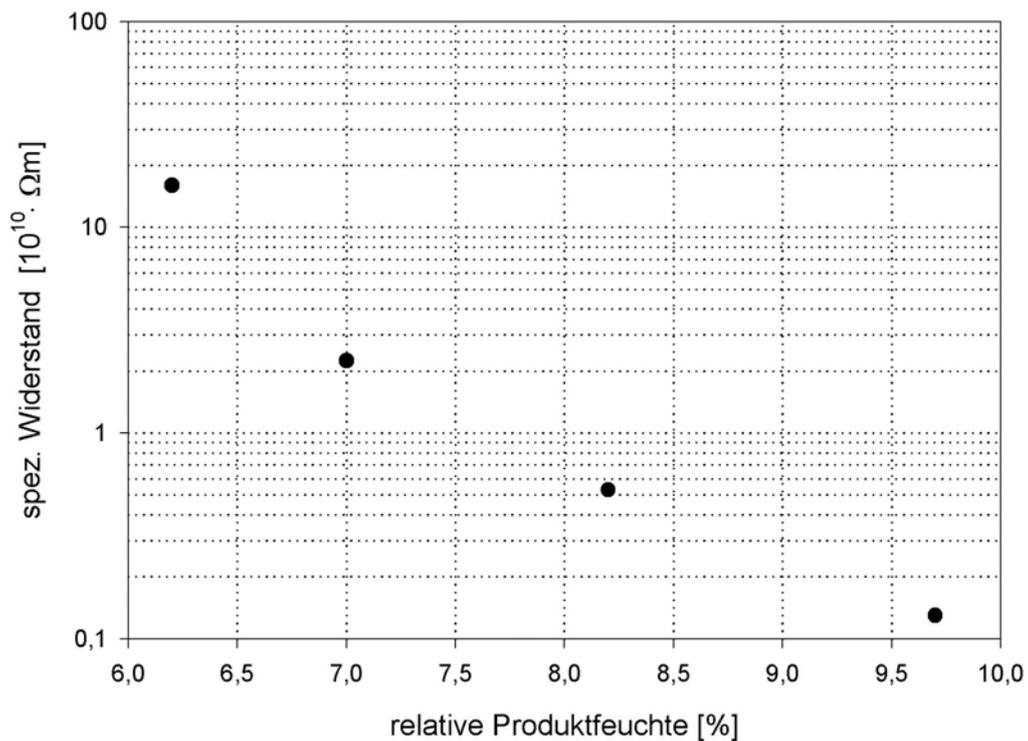


Abbildung 7.2: Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes von Maisstärke von der Produktfeuchte bei 30°C

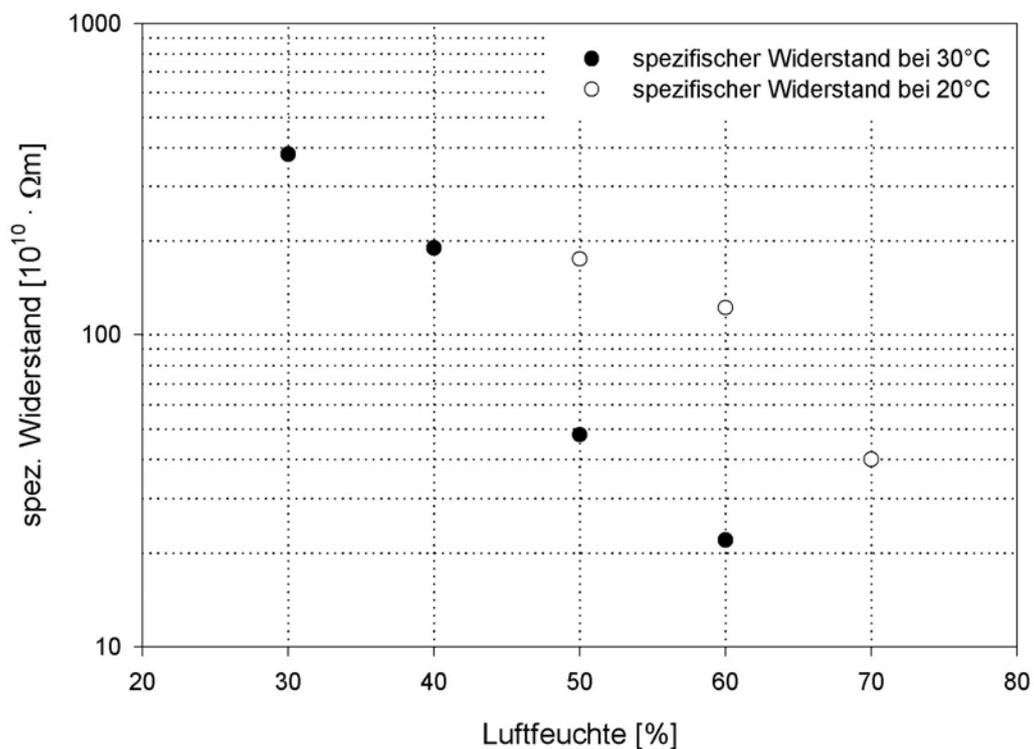


Abbildung 7.3: Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes von Maisstärke von der Luftfeuchte bei 30°C bzw. 20°C.

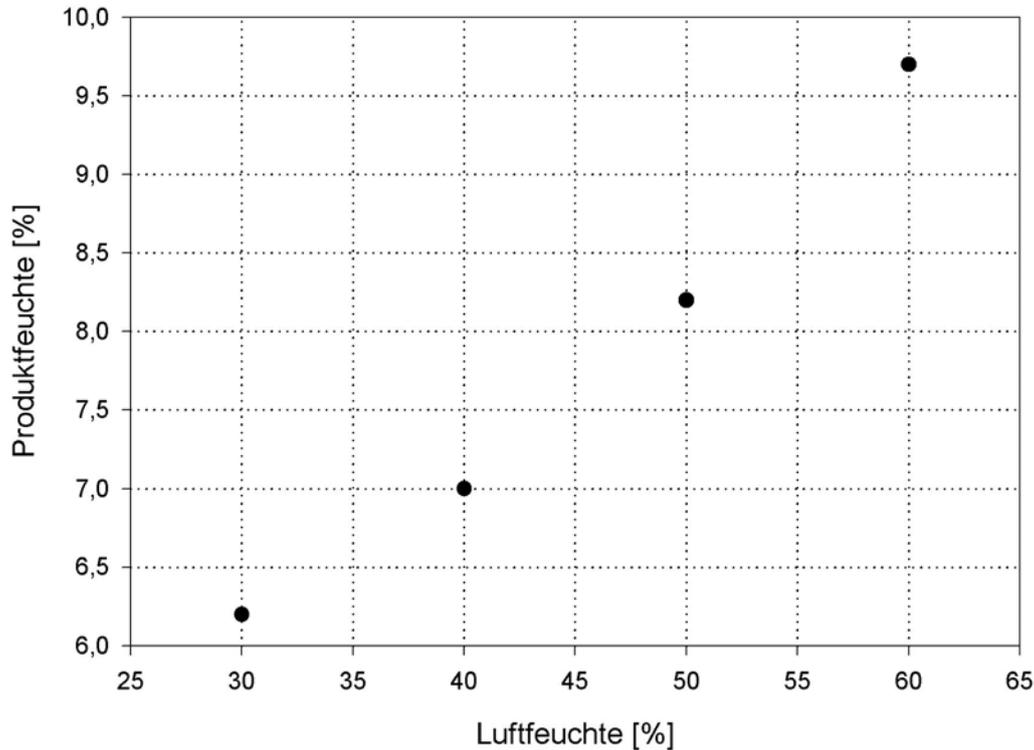


Abbildung 7.4: Adsorptionsisotherme von getrockneter Maisstärke bei 30°C

sinkt der spezifische Widerstand des Staubes um zwei Zehnerpotenzen. Die Temperatur scheint zumindest für den hier untersuchten Temperaturbereich nur eine untergeordnete Rolle zu spielen, da sich die Messergebnisse für $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ und $\vartheta = 30^\circ\text{C}$ kaum unterscheiden.

Bei der Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes von der Luftfeuchtigkeit lässt sich dagegen klar ein Einfluss der Temperatur feststellen. Bei $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ wurde bei gleicher Luftfeuchtigkeit ein höherer spezifischer Widerstand an der getrockneten Maisstärke gemessen als bei $T = 30^\circ\text{C}$. Wie man Abbildung 7.3 darüber hinaus entnimmt, fällt der spezifische Widerstand der getrockneten Maisstärke um gut eine Zehnerpotenz (von $4 \cdot 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$ auf $2 \cdot 10^{11} \Omega \cdot \text{m}$) durch eine Steigerung der Luftfeuchte von 30 % r.F. auf 60 % r.F.

Unter Betrachtung der Adsorptionisothermen des Prüfstaubes Maisstärke (Abbildung 7.4) kann davon ausgegangen werden, dass getrocknete Maisstärke mit einer Produktfeuchte von rund 2% an der Luft Feuchtigkeit aufnimmt. In diesen Breiten herrscht praktisch immer eine Luftfeuchtigkeit von mindestens 25% vor, d. h. die Produktfeuchte beträgt bei Sättigung mindestens 6%. Die Ergebnisse aus Abschnitt 4.2.1 bezüglich der offenen Lagerung des Prüfstaubes werden damit begründet und bestätigt. Diese Resultate ermöglichen allerdings keine Aussage darüber, wie schnell große Produktmengen durchfeuchtet werden.

7.2 Einfluss der Raumluftheuchte

Dass die Raumluftheuchte den Messwert der Staubungsneigungskenngröße direkt und indirekt beeinflusst, geht aus bisherigen Kapiteln und Abschnitten hervor. Der Raum, in dem die Messung der Staubungsneigungskenngröße durchgeführt wird, ist nicht klimatisiert. Folglich wird die Messung der Staubungsneigungskenngröße von der aktuellen Wetterlage beeinflusst und es stellt sich die Frage, wie? Zur Beschaffung dieser Information wurden Messungen in verschiedenen Luftfeuchtebereichen durchgeführt.

7.2.1 Versuchsbeschreibung

Insgesamt wurden drei Messreihen in drei unterschiedlichen Luftfeuchtebereichen durchgeführt. Zwei Messreihen fanden bei natürlichem Klima² zwischen 31 % r.F. und 36 % r.F. bzw. zwischen 42 % r.F. und 53 % r.F. statt. Für die dritte Messreihe wurde der Wassergehalt der Raumlufte künstlich auf eine Luftfeuchtigkeit zwischen 75 % r.F. und 82 % r.F. erhöht. Zur Heraufsetzung der Luftfeuchte wurden drei Methoden parallel angewandt:

1. Verdampfen von Wasser durch Erhitzung über den Siedepunkt.
2. Verdunsten von destilliertem Wasser auf einer große Oberfläche.
3. Dispergieren von feinen Wassertröpfchen im Raum mit Hilfe einer Nebelmaschine.

Unter den genannten verschiedenen Klimabedingungen wurde die Staubungsneigungskenngröße gemäß dem bekannten Prozedere gemessen, wobei zusätzlich die Luftfeuchte in der Messkammer erfasst wurde. Bei allen Versuchen wurde auch die Spannung am Messgitter aufgezeichnet, um eine Aussage über die Aufladbarkeit des Staubes bei höheren Luftfeuchten treffen zu können. Gelegentlich kam auch die Ionisations-Elektrode zum Einsatz, wobei hier von Interesse war, wie sich entladener Staub bei höheren Luftfeuchten hinsichtlich seiner Staubungsneigungskenngröße verhält bzw. ob die Güte der Staubentladung von der Luftfeuchte abhängt.

7.2.2 Messergebnisse

Die Ergebnisse der Einzelmessungen sind im Anhang A.4 und A.5 aufgeführt. Zur einfacheren Auswertung wurden die Messwerte jeder Messreihe arithmetisch gemittelt und grafisch dargestellt. Abbildung 7.5 zeigt die gemessene Abhängigkeit des zeitlichen Spannungsverlaufs am Drahtgitter von der Luftfeuchte und vom Ladungszustand des Staubes. Die Abhängigkeit der Staubkonzentrationsentwicklung in der Messkammer von den gleichen Parametern zeigt Abbildung 7.6. Bei allen Versuchen konnte, unabhängig von der Luftfeuchtigkeit zu Beginn der Messung, ein Abfall der Luftfeuchte bis auf unter 20 % r.F. in der Messkammer während der Messdauer verzeichnet werden.

²Das natürlichen Klima wird nur durch die örtliche Wetterlage bestimmt. Die Messungen fanden bei den entsprechenden Wetterbedingungen statt.

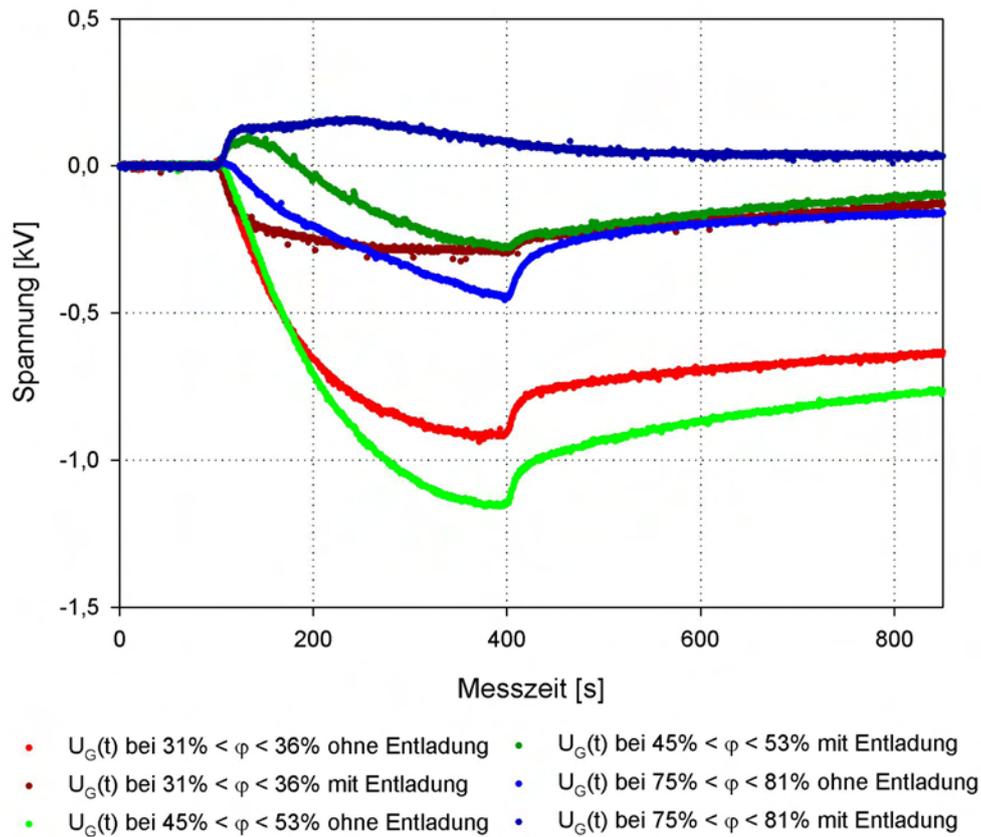


Abbildung 7.5: Zeitlicher Verlauf der Spannung am Drahtgitter in der Messkammer in Abhängigkeit von der Luftfeuchte und dem Ladungszustand des Staubes.

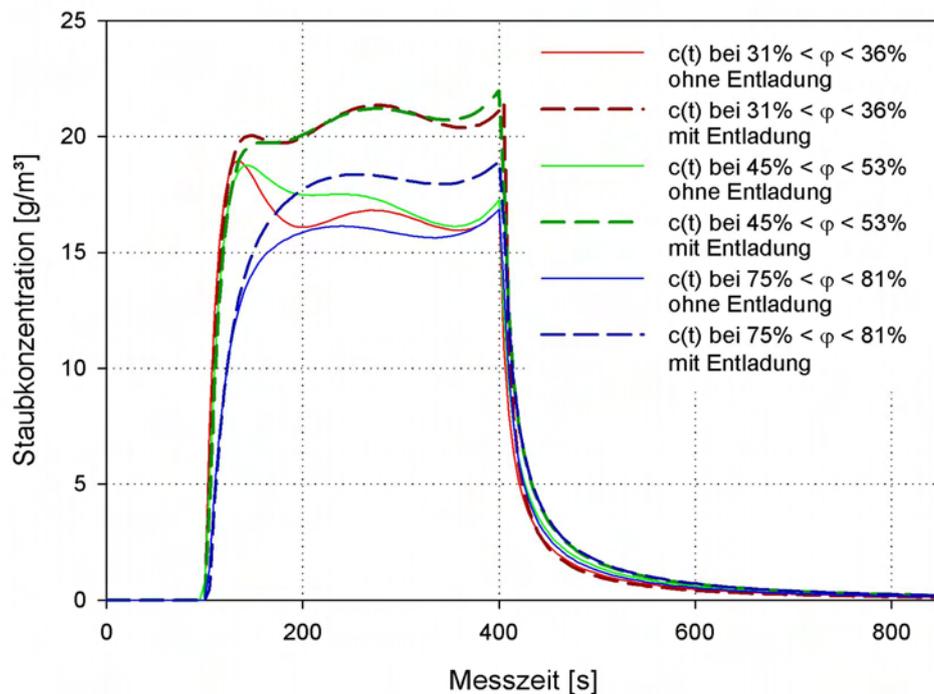


Abbildung 7.6: Abhängigkeit der Staubkonzentrationsentwicklung in der Messkammer von der Luftfeuchte und vom Ladungszustand des Staubes (Regressionskurven).

7.2.3 Versuchsauswertung und -interpretation

7.2.3.1 Luftfeuchtigkeit in der Messkammer

Ein Resultat der Messungen war, dass die Luftfeuchtigkeit innerhalb der Messkammer während der Staubbeförderung sinkt und zwar bis auf einen Wert um ca. 20 % r.F.. Wie schnell ein bestimmter Feuchtwert dabei erreicht wird, hängt von der Höhe der anfänglichen Luftfeuchtigkeit ab. Ursache für diese Absenkung der Luftfeuchtigkeit in der Messkammer ist der darin befindliche dispergierte Staub, der mit seiner großen Oberfläche der Luft die Feuchtigkeit entzieht. Dabei führt die Aufnahme der Luftfeuchtigkeit durch den Staub zu einer vergleichsweise geringen Änderung der Produktfeuchte, wie Kontrollmessungen belegten.

7.2.3.2 Spannung am Drahtgitter

Abbildung 7.5 ist ganz klar zu entnehmen, dass die Luftfeuchtigkeit einen erheblichen Einfluss auf die Höhe der Spannung am Drahtgitter bzw. auf die Staubaufladung hat. Zunächst sollen die Kurven betrachtet werden, denen die Messungen ohne Staubaufladung zu Grunde liegen. Auffällig ist, dass sich die maximale Spannung am Gitter U_{\max} für den niedrigen (31 % r.F. $< \varphi < 36$ % r.F.) und mittleren (45 % r.F. $< \varphi < 53$ % r.F.) Feuchtebereich nur wenig voneinander unterscheiden. Entgegen der Erwartung war die Spannung während der Messreihe bei mittlerer Luftfeuchte sogar höher als bei derjenigen im niedrigen Feuchtebereich. Ab relativen Luftfeuchten oberhalb 70 % r.F. findet eine elektrostatische Aufladung des Staubes kaum mehr statt, wie auch in [7] geschildert wird. Diese praktisch nicht mehr vorhandene Staubaufladung ist vermutlich dafür verantwortlich, dass der Staub bei der Bestimmung der Staubungsneigungskenngröße nicht mehr an den Wänden der Messkammer haftet, wie das bei geringeren Luftfeuchtigkeiten stets beobachtet wurde.

Betrachtet man die Ergebnisse der Versuche, die mit einer Entladung des Staubes erzielt wurden, so erkennt man, dass sowohl bei geringer als auch bei mittlerer Luftfeuchtigkeit keine vollständige Neutralisation der negativen Staubleitung erreicht wurde. Im mittleren Feuchtebereich war zu Beginn der Staubbeförderung eine vorübergehende positive Aufladung am Gitter feststellbar. Bei einer Luftfeuchtigkeit oberhalb 75 % r.F. war nur eine positive Spannung am Drahtgitter messbar. Die positive Spannung wird möglicherweise dadurch hervorgerufen, dass der Staub zu Beginn der Messung oberhalb eines gewissen Luftfeuchtwertes (zumindest vorübergehend) mehr oder weniger vollständig durch die Ionisations-Elektrode entladen wird und anschließend beim Fall durch das Gitter diesen Elektronen entzieht. Stimmt diese Vermutung, so würde die Ionisations-Elektrode oberhalb eines bestimmten Luftfeuchtwertes ihre Aufgabe optimal erfüllen. Die Richtigkeit dieser Annahme zu überprüfen, muss allerdings die Aufgabe weiterführender Untersuchungen sein.

Bei allen 3 Messreihen ist ein Anstieg der negativen Spannung von Einzelmessung zu Einzelmessung zu verzeichnen, wie er schon in Abschnitt 6.3 diskutiert wurde (Abbildung 6.9). Die im genannten Abschnitt gemachten Beobachtungen werden also auch durch die hier durchgeführten Messungen bestätigt.

7.2.3.3 Staubungsneigungskenngröße und Konzentrationsverlauf in der Messkammer

Die Staubkonzentration in der Messkammer und damit die Staubungsneigungskenngröße wird durch Variation der Luftfeuchte weniger stark beeinflusst als beispielsweise die Spannung am Drahtgitter bzw. der Ladungszustand des Staubes. Dennoch ist ganz klar eine Abhängigkeit gegeben, wie aus dem Verlauf der Kurven in Abbildung 7.6 ersichtlich wird.

Die Messergebnisse der Versuche mit nicht entladene Staub ergeben folgendes Bild: Die Staubkonzentration bzw. die Staubungsneigungskenngröße verändert sich praktisch nicht wenn die Luftfeuchtigkeit zwischen 31 % r.F. und 53 % r.F. schwankt. Bei hohen Luftfeuchtigkeiten zeigt sich ein geringfügiges Absinken der Staubungsneigungskenngröße bzw. des mittleren Niveaus der Staubkonzentration in der Messkammer.

Der Anstieg der Staubkonzentration nach Förderungsbeginn ist bei mittlerer Luftfeuchte geringfügig langsamer als bei niedriger Luftfeuchtigkeit. Demgegenüber ist dieser Anstieg deutlich gebremst bei hohen Luftfeuchtigkeiten. Die Ursache dafür ist darin zu sehen, dass die Aufnahme von Luftfeuchtigkeit durch den dispergierten Staub in der Messkammer umso mehr Zeit in Anspruch nimmt und umso intensiver vonstatten geht, je höher die Raumluftfeuchte zu Beginn der Staubbeförderung ist. Zusammen mit der Tatsache, dass Staub mit relativ hoher Produktfeuchte weniger stark zur Staubwolkenbildung neigt als Staub mit niedriger Produktfeuchte (siehe z. B. Abschnitt 7.3), erklärt sich das langsamere Ansteigen der Staubkonzentrationskurven und damit auch das leichte Sinken der Staubungsneigungskenngröße mit wachsender Luftfeuchtigkeit. Ein ganz ähnliches Verhalten wurde während der Versuche mit entladene Staub beobachtet. Abgesehen vom durchweg höheren Niveau der Staubkonzentration bzw. der Staubungsneigungskenngröße im Vergleich zu den entsprechenden Versuchen ohne Staubbeförderung, ist lediglich ein stärkeres Abfallen von S_N bei hoher Luftfeuchtigkeit festzustellen.

Aus diesen Ergebnissen kann folgende Schlussfolgerung gezogen werden: Bei durchschnittlichen Luftfeuchten, wie sie in der Regel klimabedingt zu erwarten sind, ist der direkte Einfluss auf die Staubungsneigung vernachlässigbar. Diese Aussage gilt zumindest dann, wenn die Bestimmung der Staubungsneigungskenngröße an einem hygroskopischen Staub durchgeführt wird. Ein solcher Staub senkt die Luftfeuchtigkeit innerhalb der Messkammer der Staubungsneigungsapparatur nach Beginn der Staubbeförderung vergleichsweise schnell ab. Bei überdurchschnittlich hoher Luftfeuchtigkeit (größer 60 % r.F.) ist ein Einfluss auf den Zahlenwert von S_N in der Form zu erwarten, dass die Staubungsneigungskenngröße mit wachsender Luftfeuchtigkeit kleiner wird.

Der Einsatz der Ionisations-Elektrode zur Ladungsneutralisation eines aufladbaren Prüfstaubes empfiehlt sich zum einen auf Grund der damit erzielten Kenngrößenmaximierung. Zum anderen sollte die Ring-Elektrode auch deshalb verwendet werden, weil dadurch ein Parameter wenigstens näherungsweise neutralisiert werden kann, der die Staubungsneigungskenngröße stark beeinflusst. Die Staubkonzentrationskurven, die für den entladene Staub bei unterschiedlichen Luftfeuchten gemessen wurden, scheinen außerdem weniger schwankungsanfällig und besser reproduzierbar als diejenigen zu sein, die für die geladene Maisstärke ermittelt wurden.

7.3 Einfluss der Produktfeuchte

Aus den im vorherigen Abschnitt gezogenen Schlussfolgerungen geht hervor, dass die Produktfeuchte einen gewichtigen Einfluss auf den Zahlenwert der Staubungsneigungskenngröße hat. Zieht man zudem in Betracht, dass der Prüfstaub³ bei längerer, offener Lagerung und bei der Benutzung in der Staubungsneigungsapparatur zunehmend feuchter wird, so ist der Parameter der Produktfeuchte für die Staubungsneigungskenngröße von besonderer Bedeutung und wird daher im folgenden eingehend untersucht.

7.3.1 Versuchsbeschreibung

Der Prüfstaub wurde in der Klimakammer in einem geeigneten Behältnis auf zwei verschiedene Feuchten konditioniert (Abbildung 7.7). Dazu wurde der Staub bei 95 % r.F. und $T = 25\text{ °C}$ für die Dauer von 48 h bzw. 120 h in der Klimakammer gelagert. Auf diese Weise konnte für die erste Versuchsreihe eine Produktfeuchte zwischen 7,2 % r.F. und 7,8 % r.F. und für die zweite eine Produktfeuchte zwischen 10,2 % r.F. und 10,7 % r.F. erreicht werden. Die Bestimmung der Staubungsneigungskenngröße an dem so konditionierten Prüfstaub wurde nur ohne vorgeschaltete Entladung, jedoch mit Spannungsmessung am Gitter durchgeführt. Jede Versuchsreihe bestand aus drei Einzelversuchen (Luftfeuchte: 37,0 % r.F. $< \varphi < 48\text{ % r.F.}$).



Abbildung 7.7: Zur Einstellung hoher Produktfeuchten wurde der Prüfstaub mehrere Tage bei 95 % r.F. und $T = 25\text{ °C}$ in der Klimakammer gelagert.

³Beziehungweise ganz allgemein hygroskopische Stäube.

7.3.2 Messergebnisse

Alle Ergebnisse der Einzelversuche sind in Anhang A.6 aufgeführt. Die drei für jeweils eine eingestellte Produktfeuchte erhaltenen Staubkonzentrationskurven wurden gemittelt und gemäß dem in Abschnitt 5.4 beschriebenen Verfahren geglättet. Das Resultat dieser Rechnungen sind zwei Staubkonzentrationskurven für die beiden Produktfeuchten von rund 7% r.F. und 10% r.F., die in Abbildung 7.8 dargestellt sind.

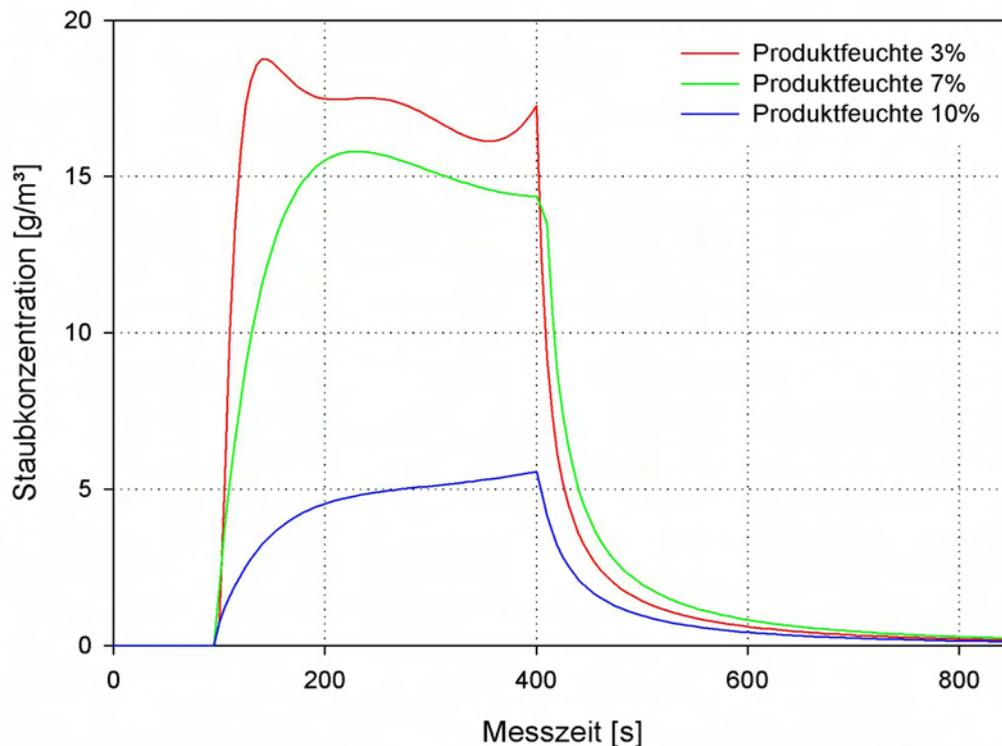


Abbildung 7.8: Zeitliche Entwicklung der Staubkonzentration in der Messkammer bei unterschiedlichen Produktfeuchten (Regressionskurven). Die Staubkonzentrationskurve bei einer Produktfeuchte von $z = 3\%$ r.F. ist das Ergebnis einer früher durchgeführten Messreihe.

In der Handhabung verhielt sich der Prüfstaub bei den höheren Feuchten ganz ähnlich dem Produkt, welches häufig in der Staubungsneigungsapparatur benutzt wurde. Er zeichnete sich durch geringere Rieselfähigkeit und höherer Neigung zur Agglomeratbildung aus (Abschnitt 4.3.2). Als Folge daraus wuchs die Schüttkegelhöhe in der Schaufel mit der Produktfeuchte an. Die Masse des geförderten Prüfstaubes je Versuchsdurchlauf sank mit steigender Produktfeuchte, was auf eine abnehmende Schüttdichte des Staubes schließen lässt.

Ähnlich wie bei den Versuchen bei hoher Luftfeuchte haftete der Staub nur in geringem Maß an den Messkammerwänden, was mit den beobachteten niedrigen Spannungen am Drahtgitter ($-0,3 \text{ kV} < U_{\text{max}} < -0,5 \text{ kV}$) und der damit verbundenen niedrigen elektrischen Aufladung des Prüfstaubes auf Grund der hohen Produktfeuchte zusammen hängt.

7.3.3 Versuchsauswertung und -interpretation

Für den Prüfstaub mit rund 7% r.F. ergab sich eine mittlere Staubungsneigungskenngröße von $S_N = 7,5 \text{ g/m}^3$. Damit liegt die Kenngröße relativ wenig unterhalb derer, die für die gleiche Maisstärke mit geringerer Produktfeuchte ($3\% < \varphi < 5\%$) ermittelt wurden. Dieser Unterschied im Zahlenwert von S_N geht zum Teil auf die Höhendifferenz zwischen den Staubkonzentrationskurven zurück, vielmehr aber auf die Unterschiede in deren zeitlichen Verlauf. Vergleicht man die Kurven für 3% r.F. und 7% r.F. in Abbildung 7.8 miteinander, so wird das eben gesagte verdeutlicht. Wie auch bei den Versuchen mit hoher Luftfeuchtigkeit, hat eine hohe Produktfeuchte ein deutlich verlangsamtes Ansteigen der Staubkonzentration in der Messkammer der Staubungsneigungsapparatur zur Folge (vergleiche Abschnitt 7.2).

Die Messung der Staubungsneigungskenngröße für die Maisstärke mit sehr hoher Produktfeuchte (10,5% r.F.) ergab, dass sich der Trend zum flacheren Anstieg der Staubkonzentrationskurve sowie zum Absinken des mittleren Konzentrationsniveaus in verstärktem Maße fortsetzt. Die Staubungsneigungskenngröße erreicht hier lediglich den Wert von $S_N = 2,4 \text{ g/m}^3$. Das mittlere Staubkonzentrationsniveau liegt nur noch bei rund 5 g/m^3 im Gegensatz zu 15 g/m^3 oder höher bei geringeren Produktfeuchten.

Aus diesen Ergebnissen wird geschlossen, dass die Produktfeuchte einen erheblichen Einfluss auf die Messgröße S_N hat. Dabei scheint der Grad der Beeinflussung nicht linear mit der Produktfeuchte anzuwachsen, sondern eher einem Potenzgesetz zu folgen. Je höher die Produktfeuchte ist, desto geringer wird die Staubungsneigungskenngröße. Dieses Resultat unterstreicht die in Kapitel 4 herausgearbeitete Notwendigkeit, Prüfstäube unter Luftabschluss zu lagern.

Die kaum noch vorhandene Spannung am Drahtgitter bzw. elektrische Aufladung des Prüfstaubes bei hoher Produktfeuchte erklärt sich durch den niedrigen spezifischen Widerstand des feuchten Staubes (Abbildung 7.2).

Kapitel 8

Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

8.1 Diskussion der Ergebnisse

8.1.1 Prüfstaub Maisstärke

Für die Untersuchungen der Staubwolkenbildung von Stäuben in der Staubungsneigungsapparatur musste ein geeigneter Prüfstaub ausfindig gemacht werden. Die Wahl fiel auf getrocknete Maisstärke (Drygel 03411, Firma Cerestar), da die Eigenschaften dieses Staubes bereits gut untersucht sind und Maisstärke als Lebensmittel ungiftig und somit problemlos zu handhaben ist. Die Forderung nach der Lagerstabilität des Prüfstaubes wird von Maisstärke ebenfalls erfüllt, sofern diese in geschlossenen Behältern gelagert wird. Bei den Messungen zeigte sich, dass die wiederholte Nutzung der Maisstärke in der Staubungsneigungsapparatur einen Einfluss auf deren Eigenschaften hat. Die Staubungsneigungskenngröße nimmt mit der Zahl der Versuche ab. Mit der Zahl der Messdurchläufe sinkt ebenfalls die Schüttdichte der Maisstärke und durch die Aufnahme von Luftfeuchtigkeit während der Messzyklen steigt die Produktfeuchte des Prüfstaubes.

Für die Untersuchungen des Ladungszustandes des Prüfstaubes erwies sich die Maisstärke als gut geeignet. Die gemessenen Aufladungen waren ausreichend hoch, um Aussagen über die Zusammenhänge zwischen Ladungszustand des Staubes und der Staubungsneigungskenngröße treffen zu können.

8.1.2 Staubungsneigungsapparatur

Die Apparatur zur Bestimmung der Staubungsneigung von Schüttgütern war bereits zu Beginn der Arbeit vorhanden. Es war jedoch zu diesem Zeitpunkt noch nicht bekannt, ob sie sich in dieser Form für die geplanten Untersuchungen des Einflusses elektrostatischer Aufladung des Prüfstaubes auf dessen Staubungsneigungskenngröße eignen würde. Die Messkammer der Apparatur bestand aus Holz und Plexiglas. Zuverlässige und reproduzierbare elektrostatische Messungen sind nur möglich, wenn keine Be-

einflussung durch elektrische Störfelder, die in jedem Labor vorhanden sind, stattfindet. Diese Voraussetzung war in einer Holz-Messkammer nicht gegeben. Eine neu aufgebaute Stahl-Messkammer erfüllte den Zweck eines Faraday'schen Käfigs und schirmte ihren Innenraum vor elektrischen Störfeldern nahezu vollständig ab. Die Änderung des Wandmaterials der Messkammer von Holz auf Stahl hatte keinen Einfluss auf die Staubungsneigung.

Neben der Änderung des Messkammermaterials waren für die Messungen weitere Modifikationen an der Apparatur notwendig, die zum Teil Auswirkungen auf die Staubungsneigungskenngröße des Prüfstaubes hatten.

Für die Messung des Ladungszustandes des Prüfstaubes an verschiedenen Stellen in der Messkammer wurde ein Drahtgitter waagrecht in die Kammer eingepasst (Abschnitt 5.2.1) und die Höhenposition variiert. Der Vergleich zwischen Messung mit eingebautem Gitter und ohne diese Erweiterung ergab keine Änderung der Staubungsneigungskenngröße.

Um den Einfluss des Ladungszustandes des Prüfstaubes auf die Staubungsneigungskenngröße zu überprüfen, wurde der Staub mit einem Ionisator entladen (Abschnitt 2.2.2). Dieser wurde zwischen dem Austrag der Dosiereinrichtung und der Messkammer der Staubungsneigungsapparatur angebracht, wofür eine Erhöhung der Dosiereinrichtung und des Vorratsbehälters notwendig war (Abschnitt 5.3.1). Die resultierende Verlängerung der Staubfallstrecke um 14 % erhöhte durch die größere Energieaufnahme durch den Staub die Staubungsneigungskenngröße um ca. 19 %.

8.1.3 Elektrostatische Phänomene in der Staubungsneigungsapparatur und deren Einfluss auf die Staubungsneigungskenngröße

In Kapitel 6 wurde sowohl die elektrostatische Aufladung des Prüfstaubes in der Staubungsneigungsapparatur an sich, als auch deren Auswirkung auf die Staubungsneigungskenngröße untersucht.

8.1.3.1 Elektrostatische Phänomene in der Staubungsneigungsapparatur

Infolge verschiedener, noch nicht vollständig untersuchter Prozesse in Vorratsbehälter und Dosiersystem, lädt sich der Prüfstaub negativ auf. Beim Fall durch das in der Messkammer positionierten Drahtgitter fließen Ladungen vom Staub auf das Gitter, so dass eine Spannung von bis zu 2 kV am Gitter messbar war. Wie hoch die dabei erreichte Maximalspannung am Gitter ist, wird zum einen durch die Höhe der Staubaufladung und zum anderen durch Entladungsvorgänge am Gitter bestimmt.

Für die Entladung des Gitters sind zwei verschiedene Mechanismen verantwortlich. Ein Mechanismus ist die simple Entladung des Gitters über einen ohm'schen Widerstand auf die geerdete Messkammer. Der Widerstand besteht aus dem 1 cm dicken Teflonrahmen, der das Gitter gegen die Messkammerwand isoliert, sowie aus den Widerständen der Luft und Verschmutzungen. Die Verschmutzung durch Maisstärke dominiert diesen Widerstand bzw. die Leitfähigkeit. Der zweite Mechanismus ist der Ladungstransport mittels in der Messkammer dispergierter Staubpartikel. Durch diese

Teilchen wird Ladung vom Gitter aufgenommen und direkt oder indirekt zu den Messkammerwänden transportiert. Weil die Staubkonzentration mit fallender Höhe über dem Boden der Messkammer zunimmt, wird die Entladung über Staubpartikel mit fallender Höhe über dem Messkammerboden stärker. Auf Grund dieses Vorganges ist auch der Ladungszustand des in die Kammer geförderten Staubstromes innerhalb der Messkammer höhenabhängig. Beide Effekte - Entladung des Staubes über dispergierte Staubteilchen und Entladung des Gitters über einen ohm'schen Widerstand - ließen sich in Abschnitt 6.1 über die Spannungskurven nachweisen.

Der zeitliche Spannungsverlauf am Gitter während seiner Aufladungsphase lässt sich mit Hilfe einer Kombination aus dem physikalischen Gesetz der Kondensatoraufladung und den oben genannten Entladungsprozessen beschreiben. Weil dies möglich ist, muss der Ladungszustand des Staubes während des Messvorgangs der Staubungsneigungskenngröße zumindest näherungsweise unabhängig von der Messzeit sein.

8.1.3.2 Einfluss des Ladungszustandes des Prüfstaubes auf die Staubungsneigungskenngröße

Für die Untersuchung der Änderung der Staubungsneigungskenngröße in Folge einer Ladungsänderung des Staubes wurde der Staub vor Eintritt in die Messkammer mit einem Ring-Ionisor entladen (Abschnitt 6.3). Die Entladung des Staubes durch den Ring-Ionisor reichte aus, um die Abhängigkeit der Staubungsneigungskenngröße von der elektrostatischen Aufladung des Staubes zu beschreiben. Die Staubungsneigungskenngröße ist stark von der Höhe der Aufladung abhängig. Bei steigender negativer Staubaufladung sinkt die Neigung des Staubes zur Staubwolkenbildung.

Die am Gitter gemessene maximale Spannung bzw. die Aufladung des Staubes stieg aus noch nicht geklärten Gründen innerhalb einer Messreihe von Versuchsdurchlauf zu Versuchsdurchlauf an. Es wird vermutet, dass der Staub sich an dem Metallrührwerk im Vorratsbehälter auflädt. Durch den Aufenthalt des Prüfstaubes im Vorratsbehälter über mehrere Versuche hinweg ist es möglich, dass sich die Ladung des Staubes dort aufsummiert. Über die von Versuch zu Versuch steigende maximale Spannung am Gitter konnte ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen dem Ladungszustand des Staubes und der Staubungsneigungskenngröße festgestellt werden.

8.1.4 Luftfeuchte

Für die Untersuchung des Einflusses der Luftfeuchte auf die Staubungsneigungskenngröße und die Staubaufladung wurde die Luftfeuchte im Labor - teilweise künstlich - auf Werte zwischen 30 % r.F. und 80 % r.F. eingestellt. Wie sich während der Versuche zeigte, nimmt die hygroskopisch wirkende Maisstärke die Luftfeuchtigkeit in der Messkammer der Staubungsneigungsapparatur auf und senkt damit die Luftfeuchtigkeit darin auf Werte um 20 % r.F.. Wie schnell diese Lufttrocknung in der Messkammer vor sich geht, hängt dabei von der anfänglich gegebenen Luftfeuchtigkeit ab. Der Lufttrocknungsprozess hat zur Folge, dass die Staubungsneigungskenngröße bei Luftfeuchten unterhalb von 60 % r.F. kaum von dieser beeinflusst wird. Luftfeuchtwerte über

60% r.F. senken die Staubungsneigungskenngröße jedoch merklich ab. Wie sich Änderungen in der Luftfeuchte auf die Staubungsneigungskenngröße nicht-hygroskopischer Stäube auswirken, muss Gegenstand weiterführender Untersuchungen bleiben.

Die Aufladung des Prüfstaubes sank mit steigender Luftfeuchte, da diese außerhalb der Messkammer stattfindet.

8.1.5 Produktfeuchte

Mit steigender Produktfeuchte wird die Staubungsneigungskenngröße eines Staubes kleiner, wobei diese Abhängigkeit nicht linear ist. Für die hier verwendete Maisstärke wirkt sich die Produktfeuchte erst nahe des Feuchtesättigungswertes für diesen Staub gravierend auf seine Staubungsneigungskenngröße aus. Warum das so ist konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht eindeutig geklärt werden. Vermutlich bilden sich ab einer gewissen Produktfeuchte verstärkt Agglomerate, die auf Grund ihrer größeren Masse weniger stark zur Staubwolkenbildung neigen. Ein Indiz für diese These ist, dass die Maisstärke mit hoher Produktfeuchte während der Versuche ein anderes Schüttverhalten als ihre trockene Variante zeigte. Elektrostatische Effekte kommen als Erklärung für diese Beobachtung nicht in Frage, weil eine hohe Produktfeuchte die Leitfähigkeit der Maisstärke verbessert und damit eine geringere Aufladung des Staubes bewirkt. Geringe Staubleitung hat aber eine höhere Staubungsneigungskenngröße zur Folge, was den Messergebnissen widerspricht.

8.1.6 Konsequenzen für den Norm-Vorschlag

Hintergrund dieser Diplomarbeit war es, die Apparatur zur Bestimmung der Staubungsneigung von Schüttgütern auf Schwachstellen abzuklopfen, Verbesserungspotentiale aufzudecken bzw. mögliche Verbesserungen auszuprobieren. Diese Verbesserungen sollten dann in den Norm-Vorschlag zur Einführung der neuen Kenngröße „Staubungsneigung“ einfließen. Folgende Verbesserungen konnten auf Grund der Erkenntnisse, die diese Diplomarbeit geliefert hat, abgeleitet werden:

1. Staub, der mit der Apparatur zur Bestimmung der Staubungsneigung von Schüttgütern untersucht werden soll, muss während der Zeitspanne zwischen dem Zeitpunkt der Probenahme bis zum Zeitpunkt der Messung möglichst unter Luftabschluss gelagert werden. Diese Zeitspanne ist so kurz wie möglich zu halten. Einflüsse auf die Staubungsneigungskenngröße durch Variation in der Produktfeuchte werden dadurch vermieden.
2. Um die (beobachtete) Streubreite der Staubungsneigungskenngröße zu schmälern, sollten für eine Staubprobe mindestens drei Messungen von S_N durchgeführt werden. Anschließend ist über die Ergebnisse dieser drei Messungen zu mitteln.
3. Für jede Messung ist der Vorratsbehälter der Apparatur neu zu füllen, um eine zunehmende elektrostatische Aufladung des Prüfstaubes von Messung zu Messung zu vermeiden.

4. Die Messung von S_N sollte unter Einsatz der Entladungseinrichtung (Ionisations-Elektrode) durchgeführt werden. Zum einen ergibt sich dadurch eine durchaus gewünschte Kenngrößenmaximierung, zum anderen werden Schwankungen in S_N auf Grund elektrostatischer Effekte durch die Staubentladung weitgehend ausgeschaltet. Darüber hinaus kann mit Hilfe der Entladung eine leichte Glättung der Staubkonzentrationskurven erreicht werden.
5. Eine Klimatisierung des Messraumes ist nur dann erforderlich, wenn Raumluftfeuchten über 60 % r.F. auftreten. Der jetzige Standort der Staubungsneigungsapparatur ist deshalb gut geeignet, weil Langzeit-Klimamessungen darin in keinem Fall eine Luftfeuchtigkeit in dem kritischen Bereich um oder über 60 % r.F. ergaben.

8.2 Ausblick

Die umfangreichen Untersuchungen der Eigenschaften der Apparatur zur Bestimmung der Staubungsneigung von Schüttgütern sowie der Abhängigkeit der Staubungsneigungskenngröße von verschiedenen Parametern warfen einige Fragen auf, die im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden konnten. Bei der Abarbeitung der dieser Arbeit zu Grunde liegenden Versuche fielen weiterhin einige Schwachpunkte auf, die die Messtechnik der Staubungsneigungsapparatur bzw. den Ablauf der Messung von S_N betreffen. Im folgenden werden weiterführende Untersuchungen bzw. Verbesserungen technischer Art für die Staubungsapparatur vorgeschlagen. Dadurch sollte ein Maximum an Zuverlässigkeit bei der Messung der Staubungsneigungskenngröße erreicht werden können.

8.2.1 Untersuchung der Auflademechanismen

Wie in Kapitel 6 dieser Arbeit gezeigt wird, lässt sich nur schwer ein genau definierter Ladungszustand des Prüfstaubes herstellen. Angenähert ist dies möglich, wenn man den Probenbehälter der Apparatur für jede Messung neu füllt und darüber hinaus den Ring-Ionisor zur Staubentladung benutzt. Eine vollständige Staubentladung ist aber auch durch diese Maßnahmen nicht zu erreichen. Optimieren könnte man die Staubentladung, indem zunächst die Quelle der Aufladung genau lokalisiert wird und diese anschließend durch geeignete Gegenmaßnahmen ausgeschaltet bzw. in ihrer Wirkung minimiert wird. Anhand der hier durchgeführten Untersuchungen konnte der Ort der Aufladung des Prüfstaubes auf Probenbehälter und Dosiereinrichtung eingegrenzt werden. Folgende Schritte könnten dazu führen, die Quelle der Aufladung zu bestimmen und auszuschalten:

- Vermutlich führt die Rotation des Rührwerks im Probebehälter zu ständigen Ladungstrennungen zwischen Staub und Rührblattmetall. Dieser Einfluss kann durch den Ausbau des Rührwerks analysiert werden. Eventuell ist es ratsam, die Ermittlung der Staubungsneigungskenngröße ohne Rührwerk durchzuführen oder ein Rührwerk aus einem anderen Werkstoff zu verwenden.

- Sollte sich das Rührwerk nicht als die Quelle der Aufladung herausstellen, kommt dafür nur noch die Förderschnecke der Dosiereinrichtung in Frage. Sollte sich die Förderschnecke als Quelle der Aufladung erweisen, muss über eine alternative Art des Staubeintrages in die Messkammer der Staubungsneigungsapparatur nachgedacht werden.

8.2.2 Weitere Untersuchungen

Thematik dieser Arbeit war es, den Einfluss vieler, zum Teil voneinander abhängiger Parameter auf die mit der Staubungsneigungsapparatur zu messende Kenngröße zu betrachten. Um einen zusätzlichen Parameter - nämlich den unterschiedlicher Stäube - auszuklammern, wurde lediglich Maisstärke als Prüfstaub verwendet. Deshalb sollten weitere Untersuchungen mit anderen Stäuben angestrebt werden, um sicherzustellen, dass die hier gefundenen Abhängigkeiten allgemeine Gültigkeit haben. Angezweifelt werden kann dies z. B. für den Parameter „Luftfeuchtigkeit“: Maisstärke ist hygroskopisch und hat die Eigenschaft, die Luft in der Messkammer der Staubungsneigungsapparatur während eines Messdurchlaufs zu trocknen. Dadurch ist der Zahlenwert der Staubungsneigungskenngröße für die Maisstärke vergleichsweise unempfindlich gegenüber Schwankungen der Luftfeuchtigkeit im Messraum. Ob dies auch für nicht-hygroskopische Stäube gilt, ist ungeklärt geblieben. Es empfiehlt sich also, die in Abschnitt 7.2 beschriebenen Messreihen mit einem nicht-hygroskopischen Stäuben zu wiederholen.

8.2.3 Verbesserung der Messtechnik

Die Genauigkeit der einzelnen Messgeräte hat einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Messergebnisse. Folgende Verbesserungsvorschläge konnten aus den Erfahrungen im Umgang mit der Apparatur abgeleitet werden:

- Bei der Ermittlung der Kalibrierkurve eines Staubes für das Staubkonzentrationsmessgerät SKG 5 führen schon kleine Abweichungen zu nicht zu vernachlässigenden Änderungen im Zahlenwert der Staubungsneigungskenngröße. Eine Quelle dieser Abweichungen sind z. B. personenabhängige unterschiedliche Wägetechniken, die sich direkt auf die tatsächliche Größe der vorgeschriebenen Staubmassen auswirken, die für die Kalibrierung ausgewogen werden müssen. Es ist daher zu überlegen, wie die Wägung standardisiert werden kann. Möglicherweise ist es sinnvoll, die Kalibrierkurve aus mehr als 2 Kalibrierungsmessungen zu erstellen, um so den statistischen Fehler zu minimieren.
- Durch die Integration der Staubkonzentration über die Messzeit zur Berechnung der Staubungsneigungskenngröße, fällt die Förderdauer des Staubes als Fehlerquelle ins Gewicht. Eine Möglichkeit dies zu verhindern wäre, die Förderung zu automatisieren.

- Das für die Messungen verwendete Speicherosziloskop funktioniert bei längerem Betrieb nicht ohne Fehler. Es sollte nach einer zuverlässigeren Möglichkeit der Messwertspeicherung gesucht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] W. BARTKNECHT: *Staubexplosionen – Aufbau und Schutzmaßnahmen*, Springer-Verlag, 1987.
- [2] G. LÜTTGENS U.A.: *Statische Elektrizität – begreifen-beherrschen-anwenden*, expert-Verlag, 4. Auflage, 2002.
- [3] G. HÄBERLE U. A.: *Tabellenbuch Elektrotechnik*, Verlag Europa-Lehrmittel, 18. Auflage, 2001.
- [4] H. OTT: *Benutzerhandbuch Staubmessgerät SKG 5*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 1992.
- [5] B. DRECHSLER: *Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen in Abhängigkeit von Klimaparametern*, Diplomarbeit, Fachhochschule Mannheim und Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 1991.
- [6] DUBBEL: *Taschenbuch für den Maschinenbau*, Springer-Verlag, 18. Auflage, 1995.
- [7] BG-REGELN: *Vermeidung von Zündgefahren in Folge elektrostatischer Aufladung*, Hauptverband der Gewerblichen Berufsgenossenschaften, 2003.
- [8] C. HELSPER, W. MÖLTER: *Determination and Neutraliation of the Charge Produced by the Dispersion of Powders*, J. Aerosol Sci., Vol. 18, No. 6, S. 877ff, 1987.
- [9] K. Y. K. CHUNG, J. BRAMMER, C. P. CHALMERS: *Effects of Relative Humidity and Electrostatic Charge on the Dustiness of Powdery Material*., International Symposium, Internationale Vereinigung für Soziale Sicherheit (IVSS), Toulouse (France), 2001.
- [10] W. FRITZ: *Skriptum zur Vorlesung Mechanische Verfahren 1*, Fachhochschule Mannheim, Wintersemester 2000/2001.
- [11] ELTEX: *Messtechnik in der Elektrostatik*, Eltex Elektrostatik, 2003.
- [12] DIN EN 61241-2-2: *Verfahren zur Bestimmung des elektrischen Widerstandes von Staubschüttungen*, Beuth-Verlag, 1995.
- [13] D. Lorenz: *Bestimmung einer Kenngröße hinsichtlich der Fähigkeit zur Staubwolkenbildung von brennbaren Schüttgütern*, 1. Norm-Vorschlag, 2002.

- [14] C. GERTSEN, H. O. KNESER, H. VOGEL: *Physik*, Springer-Verlag, 14. Auflage, 1982.
- [15] S. KLEINHANS: *Private Mitteilung*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 2003.
- [16] H. DAHLKE: *Private Mitteilung*, Firma Eltex, 2003.
- [17] DR. B. MAURER: *Private Mitteilung*, Berater der BGN in Sachen Elektrostatik, 2003.

Anhang A

Messergebnisse

A.1 Messungen zum Einfluss des Umbaus der Messkammer

Versuchs-Nr.	Maximalwert [g/m ³]	S_N [g/m ³]	m_{St} [kg]
Vergleichsversuche in der Holzmesskammer			
1	14,5	4,4	-
2	14,2	4,6	2,64
3	15,9	5,2	-
Fallhöhe 590 mm, ohne Gittereinsatz			
19	18,0	6,1	2,59
20	15,5	6,1	2,59
21	16,4	6,1	2,61
22	16,4	6,1	2,61
24	16,7	6,3	2,63
25	17,8	6,3	2,63
27	17,5	6,1	2,65
29	19,1	6,3	2,63
30	16,9	5,4	2,63
31	16,4	6,3	2,62
32	16,2	6,1	2,62
33	16,7	6,3	2,62

Tabelle A.1: Messergebnisse zu Abschnitt 5.1.2.

Versuchs-Nr.	Maximalwert [g/m ³]	S_N [g/m ³]	m_{St} [kg]
Fallhöhe 670 mm, ohne Gittereinsatz			
34	24,1	7,4	2,62
35	22,3	7,2	2,62
36	20,2	7,6	2,62
37	23,6	7,7	2,62
38	21,2	7,4	2,62
39	20,2	7,4	2,61
40	19,8	7,2	2,61
Fallhöhe 670 mm, Gitterhöhe 460 mm			
41	19,1	7,2	2,62
42	20,3	7,6	2,61
43	21,1	7,7	2,61
44	19,1	8,1	2,61
45	19,3	7,7	2,61
46	19,8	8,1	2,62
47	18,7	7,6	2,60
Fallhöhe 670 mm, Gitterhöhe 350 mm			
48	21,8	7,4	2,61
49	22,9	7,9	2,60
50	21,2	7,7	2,60
51	19,8	7,4	2,60
52	19,8	7,4	2,60
53	19,8	6,8	2,60
54	20,3	7,6	2,61

Tabelle A.2: Messergebnisse zu Abschnitt 5.2.2.

A.2 Messungen bei variierten Positionen des Messgitters

Gitterhöhe 210 mm						
Versuchs- bezeichnung	φ [%]	c_{\max} [%]	S_N [g/m ³]	Spannungsbereich am Gitter [kV]	m_{St} [kg]	h_S [mm]
76	44,5	24,3	9,0	0 ... -1,000	2,76	115
77	44,0	23,2	8,8	0 ... -1,000	2,74	115
78	43,0	22,4	8,2	0 ... -1,100	2,75	110

Tabelle A.3: Messergebnisse zu Abschnitt 6.1.1.1

Gitterhöhe 350 mm						
Versuchs- bezeichnung	φ [%]	c_{\max} [%]	S_N [g/m ³]	Spannungsbereich am Gitter [kV]	m_{St} [kg]	h_S [mm]
73	47,0	19,6	7,7	0 ... -1,025	2,76	-
74	46,0	21,5	8,7	0 ... -1,050	2,75	-
75	44,0	22,8	8,8	0 ... -1,150	2,75	115

Tabelle A.4: Messergebnisse zu Abschnitt 6.1.1.1

Gitterhöhe 460 mm						
Versuchs- bezeichnung	φ [%]	c_{\max} [%]	S_N [g/m ³]	Spannungsbereich am Gitter [kV]	m_{St} [kg]	h_S [mm]
79	41,5	21,5	8,4	0 ... -1,600	2,76	111
80	40,0	21,5	8,5	0 ... -1,580	2,74	-
81	37,5	19,5	8,3	0 ... -1,730	2,75	115

Tabelle A.5: Messergebnisse zu Abschnitt 6.1.1.1

A.3 Messungen an der Aluminiumschale

Versuchsbezeichnung	t_F [s]	m_{St} [kg]	Schüttkegelhöhe [mm]	$U(t_F)$ [kV]
Gitterhöhe 460 mm				
s1, keine Entladung	30	0,280	63	-1,43
s2, keine Entladung	45	0,414	79	-1,83
s3, keine Entladung	60	0,554	75	-2,00
s4, keine Entladung	60	0,546	93	-2,00
s5, mit Entladung	60	0,544	93	+0,20
s6, mit Entladung	60	0,540	76	+0,18
Gitterhöhe 350 mm				
s7, keine Entladung	60	0,538	75	-1,58
s8, keine Entladung	85	0,800	88	-1,83
s9, mit Entladung	60	0,544	80	0,00
s10, mit Entladung	60	0,544	80	0,00
s11, keine Entladung	60	0,536	77	-1,63

Tabelle A.6: Messergebnisse zu Abschnitt 6.1.1.3 und 6.2

A.4 Messungen bei variierten Ladezuständen

Gitter: 350 mm $45\% < \varphi < 53\%$						
Versuchs- bezeichnung	φ [%]	c_{\max} [%]	S_N [g/m ³]	Spannungsbereich am Gitter [kV]	m_{St} [kg]	h_S [mm]
33, geladen	48,0	23,4	9,6	0 ... -0,725	2,70	115
34, entladen	45,0	27,5	10,9	0,325 ... -0,100	2,70	115
35, geladen	47,0	21,3	8,6	0 ... -1,100	2,72	117
36, entladen	42,5	25,2	10,5	0,275 ... -0,225	2,73	116
37, geladen	50,0	21,5	8,7	0,050 ... -1,188	2,75	-
38, entladen	47,5	26,1	10,6	0,125 ... -0,300	2,74	118
39, geladen	53,0	21,5	8,5	0 ... -1,150	2,75	120
40, entladen	49,5	23,9	9,8	0,175 ... -0,275	2,78	112
41, geladen	46,5	20,1	8,0	0 ... -1,225	2,78	115
42, entladen	46,0	24,1	9,4	0,025 ... -0,350	2,79	112
43, geladen	45,0	19,7	7,9	0 ... -1,300	2,80	115
44, entladen	43,5	23,9	9,4	0,025 ... -0,388	2,80	116
45, geladen	47,5	19,7	7,6	0 ... -1,475	2,80	113
46, entladen	45,5	23,9	9,6	0,021 ... -0,313	2,78	117

Tabelle A.7: Messergebnisse zu Abschnitt 6.3 und 7.2

A.5 Messungen bei variierter Luftfeuchte

Gitter: 350 mm $31\% < \varphi < 36\%$						
Versuchs- bezeichnung	φ [%]	c_{\max} [%]	S_N [g/m ³]	Spannungsbereich am Gitter [kV]	m_{St} [kg]	h_S [mm]
11, geladen	35,5	22,8	8,1	0 ... -0,700	2,81	111
12, geladen	34,0	23,2	8,0	0 ... -0,875	2,82	111
14, geladen	33,0	23,2	8,1	0 ... -1,050	2,81	112
15, geladen	32,5	21,9	8,1	0 ... -1,123	2,81	109
16, entladen	31,5	24,5	9,8	0 ... -0,250	2,83	113
17, entladen	31,5	24,5	10,0	0 ... -0,330	2,84	114

Tabelle A.8: Messergebnisse zu Abschnitt 7.2

Gitter: 350 mm $75\% < \varphi < 81\%$						
Versuchs- bezeichnung	φ [%]	c_{\max} [%]	S_N [g/m ³]	Spannungsbereich am Gitter [kV]	m_{St} [kg]	h_S [mm]
1, geladen	79,5	20,9	8,3	0 ... -0,1375	2,77	120
2, entladen	79,0	23,4	8,9	0,05 ... 0	2,76	118
3, geladen	80,0	21,1	8,4	0 ... -0,2125	2,71	119
4, geladen	77,0	20,5	7,8	0 ... -0,5750	2,73	110
5, entladen	79,5	N.A	8,3	0,3625 ... 0	2,77	113
7, geladen	81,5	18,0	7,1	0,0375 ... -0,500	2,84	114
8, geladen	79,5	17,9	7,0	0 ... -0,4375	2,79	113
9, geladen	81,0	17,3	7,0	0 ... -0,5375	2,78	118
10, entladen	79,5	21,3	8,2	0,1125 ... 0	2,81	115
18, geladen	77,5	19,6	7,6	0 ... -0,785	2,81	112
19, entladen	75,5	21,9	8,5	0,119 ... 0	2,80	112

Tabelle A.9: Messergebnisse zu Abschnitt 7.2

A.6 Messungen bei unterschiedlichen Produktfeuchten

7,2% ≤ z ≤ 7,8%						
Versuchsbezeichnung	φ [%]	c _{max} [%]	S _N [g/m ³]	Spannungsbereich am Gitter [kV]	m _{St} [kg]	h _S [mm]
21	44,0	27,8	7,6	0 ... -1,0625	2,36	151
22	43,0	28,0	7,0	0 ... -1,2625	2,37	149
23	38,5	28,8	8,0	0 ... -1,500	2,39	147

Tabelle A.10: Messergebnisse zu Abschnitt 7.3

10,2% ≤ z ≤ 10,7%						
Versuchsbezeichnung	φ [%]	c _{max} [%]	S _N [g/m ³]	Spannungsbereich am Gitter [kV]	m _{St} [kg]	h _S [mm]
24	40,0	28,4	2,5	0,0875 ... -0,2875	2,14	190
25	37,0	29,5	2,7	0 ... -0,3625	2,16	175
26	37,5	28,9	2,1	0 ... -0,4625	2,14	185

Tabelle A.11: Messergebnisse zu Abschnitt 7.3

A.7 Änderung der Staubungsneigungskenngröße bei Wiederverwendung des Prüfstaubes

Datum [2003]	29.09.				
Versuchs-Nr.	1	2	3	4	5
S_N [g/m ³]	7,2	7,1	7,3	6,7	6,5

Datum [2003]	01.10.												
Versuchs-Nr.	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
S_N [g/m ³]	6,9	6,3	6,7	6,7	6,6	6,3	6,4	6,3	6,4	6,3	6,6	6,3	6,4

Datum [2003]	06.10.											
Versuchs-Nr.	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
S_N [g/m ³]	6,0	5,7	5,8	5,9	6,0	5,9	6,0	5,8	5,8	6,1	6,0	6,0

Tabelle A.12: Entwicklung der Staubungsneigungskenngröße bei Wiederverwendung des selben Prüfstaubes.

Anhang B

Konstruktionszeichnungen

1	Erdungsblech	28	V2A
1	Dichtung 10×3, 500mm lang	27	Schaumstoff
1	Leiste 145×15×2mm	26	V2A
1	Knauf	25	vorhanden
1	Schnappverschluss	24	vorhanden
1	Scharnier, 145 lang	23	V2A
1	Schieberklappe	22	V2A
1	Schieber	21	V2A
2	Magnethalter	20	vorhanden
2	Messnippelhalterung	19	vorhanden
2	Tragegriff	18	V2A
2	Erdungslasche	17	V2A
1	Klappenhalterung	16	vorhanden
1	Klappenarretierung	15	vorhanden
1	Klappengriff	14	V2A
1	Scharnier, 333mm lang	13	V2A
1	Klemmplatte 80×58×8mm	12	V2A
1	Führungsschiene, hinten 324×12×8mm	11	V2A
1	Führungsschiene, vorn 324×12×8mm	10	V2A
2	Führungsschiene, lang 474×12×8mm	9	V2A
2	Querholm 333×15×4mm	8	V2A
2	Seitenholm 360×15×4mm	7	V2A
1	Dichtung 12×5, 2000mm lang	6	Schaumstoff
1	Klappe 333×360×2mm	5	V2A
2	Vierkantrohr 20×20×2, 251mm lang	4	V2A
2	Vierkantrohr 20×20×2, 400mm lang	3	V2A
1	Bodenblech Bl.450×300×2mm	2	V2A
1	Grundkörper Bl.1520×556×2mm	1	V2A
Stck.	Benennung	Nr.	Werkstoff
Messkammer			
Fachbereich: Physik / Technik			
Bearbeitet: M. Seithel		Datum: 25.03.2003	Blatt 3 v. 3 Bl.

Anhang C

Klimadaten

