

Untersuchung der Staubwol-
kenentstehung durch Befüll-
vorgänge mit Holzpellets

F-05-1401

Untersuchung der Staubwolkenentstehung
durch Befüllvorgänge mit Holzpellets

Masterarbeit

von

Benjamin Wolfgang Ludwig Schmidt

Hochschule Mannheim

und

Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und
Arbeitsmedizin

Mannheim, Oktober 2015

Erklärung an Eides statt

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Mannheim, 16. Oktober 2015

(Benjamin Schmidt)

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
Zusammenfassung	2
1 Einleitung	3
1.1 Allgemeines	3
1.2 Das Projekt F-05-1401	5
2 Vorarbeiten	6
2.1 Projektplanung	6
2.2 Recherche zu ähnlichen Arbeiten	7
2.3 Recherche zu allgemeinen Eigenschaften von Holzpellets	8
2.4 Recherche zu Füllmethoden von Holzpelletsilos	9
2.5 Auswahl geeigneter Apparaturen	11
2.5.1 Auswahl des Silos	11
2.5.2 Auswahl des Fördergerätes	11
2.5.3 Auswahl des Staubkonzentrationsmessgerätes	11
2.5.4 Auswahl des Datenaufzeichnungsgerätes	13
2.6 Beschaffung geeigneter Holzpellets	14
3 Realisierung des Versuchsaufbaus	18
3.1 Vorbereitung des Silos	18
3.2 Anbau des Elevators	19
3.3 Prüfung der Messgeräte und Aufbau der Messkette	23
3.4 Kalibrierung der SKG 5 Typ 7	26
3.4.1 Suspensionsmethode	26
3.4.2 Gravimetrische Methode	28
3.5 Aufbau einer Siebmaschine	32

4	Durchführung der Versuche	39
4.1	Versuchsprogramm und Allgemeines	39
4.2	Versuchsbeschreibung	41
4.2.1	Förderung gesiebter Holzpellets ins leere Silo	41
4.2.2	Förderung gesiebter Holzpellets ins teilbefüllte Silo	42
4.2.3	Förderung ungesiebter Holzpellets	44
4.3	Versuchsergebnisse	44
4.4	Versuchsauswertung	51
4.4.1	Zeitlicher Verlauf der Staubkonzentration	51
4.4.2	Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse	52
4.4.3	Abhängigkeit der Staubkonzentration vom Messort	56
4.4.4	Einfluss des Feinanteils auf die Staubkonzentration	58
4.4.5	Einfluss des Füllstandes auf die Staubkonzentration	58
4.4.6	Einfluss der Förderleistung auf die Staubkonzentration	59
4.4.7	Betrachtung des Staubexplosionsrisikos	60
5	Diskussion und Ausblick	62
5.1	Diskussion der Ergebnisse	62
5.1.1	Aufbau des Versuchsstandes	62
5.1.2	Messergebnisse	63
5.1.3	Sicherheitstechnische Kenngrößen	64
5.2	Ausblick	64
5.2.1	Genauere Untersuchung der lokalen Staubkonzentration	64
5.2.2	Elevatorreinigung	64
5.2.3	Versuchsaufbau	64
5.2.4	Verwendete Holzpellets	65
A	Technische Zeichnungen	67
B	Konstruktionszeichnungen	70
C	Sicherheitstechnische Kenngrößen	93
D	Versuchsergebnisse	96

Liste der Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
A_G	m^2	Fläche eines Glasplättchens
c	g/m^3	Staubkonzentration
c_{max}	g/m^3	Maximal erreichte Staubkonzentration
d	m	Kleiner Durchmesser des Konus des AZO-Silos
D	m	Durchmesser allgemein, Durchmesser des AZO-Silos
$f(t)$	mV, V	Linsenverschmutzungsfunktion
F_a	g/m^3	Absolute Luftfeuchtigkeit
F_r	%	Relative Luftfeuchtigkeit
g	m/s^2	Erdbeschleunigung ($9,81 m/s^2$)
h	m	Füllhöhe über der Oberkante des Silokonus
h_f	mm	Ins Silo eingetragene Holzpelletschichthöhe pro Versuch
h_K	m	Höhe des Konus des AZO-Silos
h_o	m	Höhe des oberen Segments des AZO-Silos
h_u	m	Höhe des unteren Segments des AZO-Silos
H	m	Füllstand im Silo
I_0	W/m^2	Leistungsdichte eines gebündelten Lichtstrahls vor dem Eintritt in das Messvolumen
I	W/m^2	Leistungsdichte eines gebündelten Lichtstrahls nach dem Austritt aus dem Messvolumen
l	m	Länge des Messvolumens beim SKG 5 Typ 7
m	g, kg, t	Masse
m_f	kg	Ins Silo eingetragene Holzpelletmasse pro Versuch
m_G	g	Auf einem Glasplättchen sedimentierte Staubmasse
m_K	kg	Holzpelletmasse im gefüllten Silokonus
n	min^{-1}	Drehzahl
n_k	min^{-1}	Kritische Drehzahl
P	kW	Antriebsleistung
\dot{P}	t/h	Förderleistung
r	mm	Radius
r_T	mm	Siebtrommelradius
S_i	-	Staubungszahl der Einzelmessung
S	-	Staubungszahl
t_f	s	Förderdauer
t_P	s	Zeitkoordinate eines Messpunktes

t_s	s	Sedimentationsdauer
T_L	°C	Lufttemperatur
$U, U(t)$	mV, V	Angezeigte Messspannung am SKG 5 Typ 7
$U_0(t)$	mV, V	Linearer Messspannungsuntergrund zum Zeitpunkt t
$U_w(t)$	mV, V	Angezeigte Messspannung am SKG 5 Typ 7 bei sauberen Linsen
U_P	mV, V	Spannungskoordinate eines Messpunktes
U_i, M_i, O_i	-	Kennzeichnung der Messebenen
OEG	g/m ³	Obere Explosionsgrenze
UEG	g/m ³	Untere Explosionsgrenze
v_t	m/s	Tangentialgeschwindigkeit
v_{Rel}	m/s	Relativgeschwindigkeit
V_f	m ³	Ins Silo eingetragenes Holzpelletvolumen pro Versuch
V_h	m ³	Volumen des AZO-Silos bis zur Füllhöhe h
V_K	m ³	Volumen des Konus des AZO-Silos
ε	m ² /g	Extinktionskoeffizient
η	-	Verschmutzungsfaktor der Linsen des SKG 5 Typ 7
ω	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit
ω_k	s ⁻¹	Kritische Winkelgeschwindigkeit
π	-	Die Zahl 3,1415..
ρ	kg/m ³	Schüttdichte von Holzpellets

Vorwort

Diese Masterarbeit, welche zum Erlangen des Abschlusses des Masterstudiengangs Chemieingenieurwesen an der Hochschule Mannheim dient, wurde bei der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V. (FSA) erstellt. Thema ist die Untersuchung der Staubwolkenentstehung durch Befüllvorgänge mit Holzpellets. Das aus dem Studium mitgebrachte theoretische Grundwissen ließ sich im Rahmen der Arbeit gut umsetzen und an einigen Stellen noch weiter vertiefen. Zudem nehme ich viele neue Kenntnisse aus der Masterarbeit mit. Für die Vermittlung dieser Kenntnisse, der theoretischen sowie praktischen Unterstützung und nicht zuletzt der guten Zusammenarbeit, möchte ich den nachfolgend genannten Personen danken.

Prof. Dr. Bernhard Hoffner sei, für die freundliche und engagierte Betreuung seitens der Hochschule, gedankt. Besonderen Dank richte ich an Prof. Dr. Siegfried Radandt sowie Dr. Albrecht Vogl für die Möglichkeit, die Themenstellung der vorliegenden Arbeit zu bearbeiten. Ein großer Dank ausgesprochen sei auch Herrn Dirk Lorenz für die intensive Betreuung bei der FSA und die fachlich sehr kompetente Unterstützung während meiner Arbeit. Des Weiteren möchte ich dem Team des Versuchsfeldes in Kappelrodeck für die freundliche und unterstützende Zusammenarbeit danken. Weiterer Dank gilt Matthias Schmitt, Madlen Schönherr, Michael Seithel, Pavlo Chupin, Hermann Schiebler, Dr. Christine Dannenbaum und allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der FSA/BGN, die für gute Zusammenarbeit und die freundliche Arbeitsatmosphäre gesorgt haben. Zu guter Letzt danke ich meiner Familie, für die motivierende Unterstützung während meines Studiums.

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Masterarbeit wird ein Versuchsstand aufgebaut, mit dem die praxisnahe Förderung von Holzpellets der Klasse EN-B (Industriepellets) in ein Silo durchgeführt werden kann. Im Silo wird, in drei Ebenen verschiedener, horizontaler Höhe über dem Siloboden, an jeweils zwei bis drei Messpunkten gleichzeitig, die zeitliche Entwicklung der Staubkonzentration während der Pelletförderung und der Zeit danach gemessen. Hintergrund dieser Messungen ist die Untersuchung der Fragestellung, ob bei der praxisnahen Förderung von Industrieholzpellets in ein Silo, gefährliche Staub-Luft-Gemische hinsichtlich Staubexplosionen entstehen können. Variiert wird dabei der Feinstaubanteil in den Pellets, die Förderleistung in das Silo, die Füllhöhe im Silo vor Versuchsbeginn und die Anordnung der Messpunkte im Silo.

Für den Versuchsaufbau, der auf dem Testgelände der BGN/FSA in Kappelrodeck (Schwarzwald) realisiert wird, findet das dort vorhandene Silo der Firma AZO, sowie ein ebenfalls vorhandener Becherelevator, Verwendung. An beiden Anlagenteilen werden erhebliche Umbauten vorgenommen. Weiterhin wird eine Siebmaschine konzipiert, konstruiert und aufgebaut. Die Siebmaschine dient der Herstellung definierter Holzpelletchargen und Holzpelletfeinstaub.

Die sicherheitstechnischen Kenngrößen des Holzpelletabriebs (Feinstaubanteil) werden bestimmt. Die untere Explosionsgrenze beträgt $UEG = 125 \text{ g/m}^3$. Die Staubungszahl ist $S = 8,08$ (Staubungsgruppe 3). Damit gehört der Holzpelletabrieb zu den mäßig staubenden Schüttgütern.

13 Versuche werden durchgeführt. Die Versuchsergebnisse sind im Rahmen der üblichen Streuung reproduzierbar. An keinem der Messpunkte wird die UEG überschritten. Es treten aber Hinweise darauf auf, dass unmittelbar über der Schüttkegeloberfläche und innerhalb des herabfallenden Förderstroms, in der vertikalen Symmetrieachse des Silos, die UEG überschritten sein könnte. Weiterhin wird festgestellt, dass die Staubkonzentration im Silo stark abhängig ist vom Feinstaubanteil und von der Förderleistung ins Silo. Bei der Förderung von Holzpellets mit sehr geringem Feinstaubanteil, steigt die Staubkonzentration in allen Messebenen von der Silowand zum Siloinneren hin an. Eine Abhängigkeit der Staubkonzentration von der Höhe über dem Siloboden kann nicht festgestellt werden. Bei der Förderung von Holzpellets mit 30 % Feinstaubanteil, ist in der unteren Messebene die Staubkonzentration am Silorand höher, als am nächsten Messpunkt in Richtung des Siloinneren. Die Staubkonzentration fällt mit zunehmender Höhe über dem Siloboden. Dort steigt die Staubkonzentration ebenfalls von der Silowand zum Siloinneren hin an.

Die Ergebnisse werden diskutiert und ein Ausblick auf weitere Versuche wird gegeben.

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Allgemeines

Immer wieder treten in der Industrie Staubexplosionen mit verheerenden Folgen auf. Die Ursachen dieser Explosionen müssen zum Schutze des Arbeitnehmers, der Produktionsanlage, aber auch vorbeugend gegenüber dem Produktionsausfall untersucht werden. Basierend auf diesen Untersuchungen sind präventive Maßnahmen sowohl zur Verhütung, als auch zur Schadensbegrenzung solcher Ereignisse zu treffen. Folgende Kriterien müssen für den Auftritt einer Staubexplosion erfüllt sein:

- Vorliegen einer entsprechenden Atmosphäre aus einem brennbaren Staub im explosionsfähigen Konzentrationsbereich
- Präsenz von Sauerstoff in ausreichend hoher Konzentration
- Ein ausreichend hoher Energieeintrag durch eine Zündquelle

In Abbildung 1.1 wird der Zusammenhang der drei Kriterien durch ein Gefahrendreieck nochmals bildlich dargestellt.

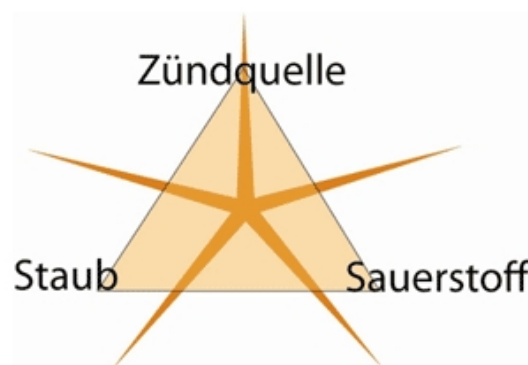


Abbildung 1.1: Bildliche Darstellung des Gefahrendreiecks.

Um Staubexplosionen vorzubeugen, bedarf es lediglich des Ausschlusses eines Explosionskriteriums. Hierbei wird in den primären und sekundären Explosionsschutz unterschieden. Die Vermeidung der explosionsfähigen Atmosphäre gehört zum primären

Explosionsschutz. Der Ausschluss dieser ist allerdings in den meisten Betrieben, die mit explosionsfähigen Stäuben arbeiten, nicht möglich, es sei denn, es liegen alternative, nicht staubförmige Einsatzstoffe vor. Weiterhin ist es möglich, den Staubkonzentrationsbereich zwischen der unteren und der oberen Explosionsgrenze (*UEG* und *OEG*) zu meiden. Zwischen diesen Grenzen liegt ein Staub-Luft-Gemisch vor, in welchem durch einwirken einer Zündquelle eine selbstständige Verbrennungsreaktion ablaufen kann. Des Weiteren kann der, zur Staubexplosion benötigte Sauerstoff, durch Verwendung eines Inertgases, z. B. Stickstoff, verdrängt werden. Durch die Inertisierung erhöhen sich allerdings die Betriebskosten und es besteht, bei einer Leckage der Anlage, Gesundheitsgefahr durch austretendes Inertgas.

Spricht man vom sekundären Explosionsschutz, so ist damit die Zündquellenvermeidung gemeint. Dazu ist es zweckmäßig, heiße Oberflächen zu isolieren, Aggregate und Förderleitungen zu erden, speziell für den Einsatz in explosionsgefährdeten Zonen bestimmtes Werkzeug zu nutzen oder Funken- und Glimmnesterkennungsanlagen zu installieren. Ein Restrisiko besteht dennoch. Zum Beispiel kann es durch, unbewusst in pneumatische Förderleitungen eingeschleuste, metallische Kleinteile zu Funkenschlag kommen. Auch können sich unbemerkt heiße Oberflächen durch aneinander schleifende Apparateile bilden. Zudem lassen sich Zündquellen, auch aus Kosten- und/oder Platzgründen, nicht immer vermeiden.

Ist es nicht möglich mindestens eine Komponente des Gefahrendreiecks zu eliminieren, müssen Maßnahmen ergriffen werden, die die Auswirkung einer Staubexplosion vermindern. Der hierbei greifende tertiäre Explosionsschutz wird auch konstruktiver Explosionsschutz genannt. Hierzu gehört unter anderem die explosionsdruckfeste oder explosionsdruckstoßfeste Bauweise der betrachteten Apparate, die Installation von Explosionsdruckentlastungen und/oder Explosionsunterdrückungen, sowie die Verhinderung von Flammen- und Explosionsübertragung durch Entkopplung.

Es ist naheliegend, dass alle genannten Explosionsschutzmaßnahmen sehr kostenintensiv sind. Gerade bei kleineren, produzierenden Betrieben wird die Wirtschaftlichkeit durch die Kosten dieser Maßnahmen beeinträchtigt. Fraglich ist vor allem die Notwendigkeit der Explosionsschutzmaßnahmen in Betrieben, welche sich mit der Produktion von abrasiven, groben Schüttgütern beschäftigen, deren Abrieb jedoch zu Staubexplosionen führen kann. Zu diesen Schüttgütern zählen zum Beispiel Getreide, Holz sowie Futtermittelpellets und Hackschnitzel. Während einer VDI-Tagung wurde thematisiert, dass in dieser Produktparte der Forschungsstand nicht ausreichend hoch ist, um mit Sicherheit eine Aussage darüber treffen zu können, ob die bei staubförmigen Gütern gängigen Explosionsschutzmaßnahmen auch auf grobe Schüttgüter übertragen werden können [1]. Deshalb wurde bei der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V. (FSA e. V.) durch Prof. Dr. Siegfried Radandt ein Projekt initiiert, welches die Untersuchung der Staubwolkenentstehung bei der Silobefüllung mit groben Schüttgütern zum Gegenstand hat. Der Grundstein für dieses Projekt sollte durch diese Masterarbeit gelegt werden, welche die Untersuchung der Staubwolkenentstehung durch Befüllvorgänge mit Holzpellets beinhaltet. Weitere, in der Projektplanung vorgesehene Untersuchungen von Getreide, Futtermittelpellets und Hackschnitzeln konnten im Rahmen dieser Masterarbeit nicht durchgeführt werden, da sie zu aufwendig für den Zeitraum von einem halben Jahres sind.

1.2 Das Projekt F-05-1401

Das Projekt F-05-1401 der FSA e. V. ist betitelt mit „Überprüfung der Füllmethode bei Silos – Staubentwicklung und Explosionsrisiko beim Befüllen mit Pellets, Getreide und ähnlichen Produkten“. Hierbei handelt es sich um ein Ende des Jahres 2014 gestartetes Projekt, dessen Bearbeitungsstatus zu Beginn der Masterarbeit gering war, d. h. es waren nur die von Prof. Dr. Radandt vorgegebenen Parameter als Eckdaten bekannt:

- Es sollten bindemittelfreie Industrieholzpellets im ungesieberten Zustand untersucht werden (worst-case).
- Die Untersuchung sollte auf dem zur BGN/FSA e. V. gehörenden Versuchsfeld in Kappelrodeck im Schwarzwald erfolgen.
- Während des Befüllvorganges sollte die Staubkonzentration im Silo mit Hilfe spezieller Messgeräte an sowohl axial, als auch radial unterschiedlichen Orten im Silo gemessen werden.
- Die sicherheitstechnischen Kenngrößen des sich bildenden Staubes sollte untersucht werden, insbesondere die UEG und die Staubungszahl S .

Die Ziele dieser Masterarbeit lassen sich daraus wie folgt ableiten:

1. Schaffung eines funktionierenden experimentellen Aufbaus, mit dem die oben aufgelisteten Kriterien erfüllt werden können.
2. Bestimmung der sicherheitstechnischen Kenngrößen des Holzpelletabriebs.
3. Orts- und zeitabhängige Bestimmung der Staubkonzentration und sicherheitstechnische Bewertung der im Silo entstehenden Holzstaub-Luft-Gemische bei unterschiedlichen Randbedingungen.

Kapitel 2

Vorarbeiten

2.1 Projektplanung

Durch die Zielsetzung und die vorgegebenen Eckdaten erschien folgende grobe Projektplanung sinnvoll:

1. Recherche zu ähnlichen Arbeiten, welche zur Orientierung dienen können.
2. Recherche zu allgemeinen Eigenschaften der Holzpellets.
3. Recherche zu gängigen Füllmethoden von Holzpelletsilos.
4. Auswahl geeigneter Apparaturen.
 - (a) Auswahl des Silos.
 - (b) Auswahl des Förderapparates.
 - (c) Auswahl der Staubkonzentrationsmessgeräte.
 - (d) Auswahl des Datenaufzeichnungsgerätes.
5. Beschaffung geeigneter Holzpellets.
6. Realisierung des Versuchsaufbaus in Kappelrodeck.
 - (a) Vorbereitung des Silos und Anbau des Fördersystems.
 - (b) Prüfung der Messgeräte und Aufbau der Messkette.
 - (c) Kalibrierung der Staubkonzentrationsmessgeräte.
 - (d) Aufbau einer Siebmaschine.
7. Durchführung und Auswertung der Versuche sowie Bewertung der Versuchsergebnisse.

In den folgenden Sektionen dieses Kapitels wird auf die ersten 5 Punkte dieser Projektplanung näher eingegangen. Die Punkte 6 und 7 sind so umfangreich, dass sie in eigenen Kapiteln abgehandelt werden.

2.2 Ähnliche Arbeiten

Die Recherche nach ähnlichen Arbeiten förderte einen Beitrag aus den VDI Berichten 1272 zu Tage, der auf eine Forschungsarbeit der FSA zurück geht. In dieser Arbeit ging es um die Frage, welchen Einfluss die Befüllungsart eines Silos auf den reduzierten Überdruck im Explosionsfall hat. Hierzu wurde unter anderem ein Silo mit diversen Stäuben axial und tangential pneumatisch befüllt und die Staubkonzentration in den entstehenden Staubwolken, in Abhängigkeit von Ort und Zeit, ermittelt. Zwar wurde bei der genannten Forschungsarbeit von [4] eine pneumatische Förderung verwendet, jedoch waren die beschriebenen Methoden und Ergebnisse sehr nützlich für den späteren Aufbau der Versuchsanordnung. Der Bericht war außerdem hilfreich, um mögliche messtechnische Probleme im Vorfeld zu lokalisieren und um ein Gefühl für das sich bildende Staubkonzentrationsprofil zu erlangen. Außerdem konnten aus dem Bericht Anregungen mitgenommen werden, wie man die Staubkonzentrationsmessorte im Silo anordnen könnte. Das verwendete Silo der Firma AZO, welches sich auf dem Versuchsfeld in Kappelrodeck befindet, ist prädestiniert für die Aufnahme von Staubkonzentrationsprofilen, da es über ausreichend Flansche zum Einbringen von Messgeräten verfügt.

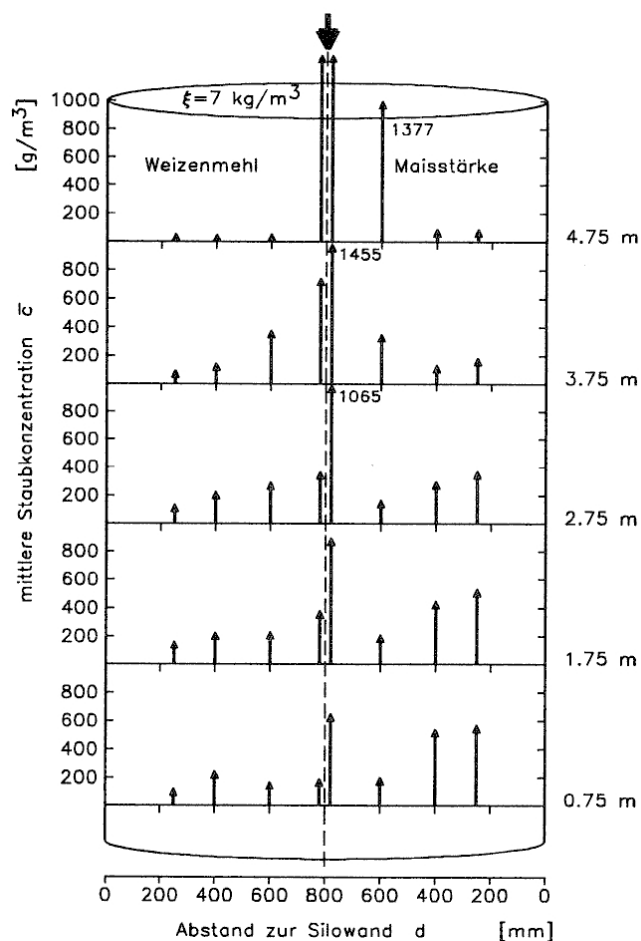


Abbildung 2.1: Darstellung des gemessenen Staubkonzentrationsprofils für die zentral-vertikale pneumatische Befüllung des AZO-Silos mit Weizenmehl und Maisstärke [4].

Abbildung 2.1 zeigt das in [4] ermittelte Staubkonzentrationsprofil für Maisstärke und Weizenmehl bei zentral-vertikaler pneumatischer Befüllung.

In der Abbildung ist gut zu erkennen, dass die Staubkonzentration in den Maisstärkewolken in den unteren drei Messebenen von der Silomitte zur Silowand hin ansteigt. In den oberen beiden Messebenen kehrt sich dieser Trend um, d. h. die Staubkonzentration ist in der Nähe der Silomitte am größten. Mit steigender Höhe über dem Siloboden sinkt die Staubkonzentration.

Für das Weizenmehl wurden andere Staubkonzentrationsprofile ermittelt. Bis auf die unterste Messebene stieg die Staubkonzentration stets vom Silorand zur Silomitte an. Die Staubkonzentration war beim Weizenmehl relativ gering von der Höhe über dem Siloboden abhängig.

Dieses Ergebnis basiert auf dem unterschiedlichen Staubungsverhalten von Weizenmehl und Maisstärke, was sich in den unterschiedlichen Staubungszahlen¹ der genannten Stäube widerspiegelt.

Die Erkenntnisse, die aus der Arbeit von [4] mitgenommen wurden, werden später in Kapitel 3.3 wieder aufgegriffen.

2.3 Allgemeine Eigenschaften von Holzpellets

Bei Holzpellets handelt es sich um kleine, zylindrische Körper aus Holz, die aus Holzspänen unter hohem Druck gepresst werden. Holz besteht im Wesentlichen aus Lignin und Zellulose. Aufgrund des hohen Drucks auf die Holzspäne verklebt das Lignin die Zellulosefasern, wodurch die Pellets formstabil werden. Die Holzspäne werden aus Waldholzresten, Sägemehl und Hobelspänen hergestellt. Letztgenannte sind ein Nebenprodukt aus Holzverarbeitungsanlagen, wie z. B. Sägewerken.

Holzpellets werden sowohl für Kleinf Feuerungsanlagen im privaten Bereich, als auch für industrielle Großanlagen hergestellt. Im Jahr 2010 wurden durch eine europäische Norm für die unterschiedlichen Pelletarten drei Qualitätsklassen eingeführt. Hierbei werden die Pellets genormt in die Klassen EN-A1, EN-A2 und EN-B.

Der Unterschied der Holzpelletarten ist in den Eigenschaften zu erkennen, welche sich im Wesentlichen auf die Verbrennung beziehen, also auf die chemischen Eigenschaften. Da die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Holzpellets nicht verbrannt werden, sind in der folgenden Tabelle 2.1 nur die Sollwertunterschiede in den physikalischen Eigenschaften genannt.

	A1 & A2	B
Länge [mm]	3, 15 – 40	-
Durchmesser [mm]	6 ± 1	4 – 10
Schüttdichte [g/m ³]	≥ 600	-
Mechanische Festigkeit [%]	$\geq 97,5$	-

Tabelle 2.1: Physikalische Eigenschaften der einzelnen Pelletklassen.

¹Maisstärke $S = 10,2$, Weizenmehl $S = 0,6$.

Ein weiterer Unterschied zwischen Holzpellets der Klassen EN-A und -B liegt darin, dass die Norm die Verwendung von Rinde bei der Herstellung der Pellets der Klasse EN-B erlaubt.

Holzpellets dürfen je nach Bedarf bis zu 2 % Bindemittel enthalten, um die mechanische Festigkeit zu gewährleisten. Wie aus der Tabelle 2.1 ersichtlich ist, sind die Holzpellets der Klasse EN-B (Industriepellets) nur in Bezug auf den Durchmesser genormt. Sie müssen deshalb keine Anforderungen hinsichtlich ihrer Festigkeit erfüllen. Dadurch ist die Festigkeit von Industriepellets in der Regel geringer, als die der Pellets der Klassen EN-A1 und EN-A2. Darin liegt die Forderung in dieser Untersuchung begründet, Industriepellets für die geplanten Messungen zu verwenden. Durch die geringere mechanische Festigkeit der EN-B-Pellets neigen diese zur stärkeren Abriebbildung, als Pellets der Klassen EN-A1 und EN-A2. Eine Untersuchung unter Verwendung von Industriepellets stellt deshalb eine worst-case-Betrachtung dar (siehe Kapitel 1.2).

2.4 Gängige Füllmethoden von Holzpelletsilos

Zur Projektplanung gehört des Weiteren die Recherche zu den gängigen, in der Holzpelletproduktion angewandten Förderarten und Füllmethoden der Holzpelletsilos. Ziel ist hierbei abschätzen zu können, wo die Atmosphäre mit der höchsten Staubkonzentration während des Produktionsprozesses zu erwarten ist.

Abbildung 2.2 zeigt eine schematisierte, graphische Darstellung einer Holzpelletierungsanlage. Der Holzpelletrohstoff wird zunächst von Verunreinigungen befreit und durch eine Hammermühle auf ca. 4 mm durchmessende Stücke zerkleinert. Anschließend erfolgt die Trocknung der Späne bei 90°C und die Zuführung in das Trockensilo. Die Trocknung dient der Qualitätssicherung und bringt die Holzspäne auf die gleiche Restfeuchte.

Bereits im Trockensilo wird die Atmosphäre eine hohe Staubkonzentration aufweisen. Da bei diesem Projekt allerdings die Staubwolkenentwicklung durch abrasives und grobes Schüttgut untersucht werden soll, ist die in diesem Produktionsschritt entstehende Atmosphäre nicht relevant.

Im nächsten Produktionsschritt werden die Späne befeuchtet, so dass ein einheitlicher Feuchtigkeitsgehalt von 10 % - 15 % erreicht wird. Hierbei erfolgt auch die Zugabe des Bindemittels. Dabei kann es sich um Melasse oder Stärke handeln. Der maximal zugelassene Anteil an Bindemittel beträgt 2 %.

Nach der Befeuchtung werden die Späne 10 - 15 Minuten gelagert, damit das Wasser in die Späne eindringen kann.

Anschließend werden die Späne der Matrizenpresse zugeführt, welche das Herzstück der Anlage bildet. Hierbei handelt es sich um eine mit Löchern perforierte Matrize, auf deren Innenseite zwei Koller laufen. Diese pressen die Späne durch die Löcher der Matrize nach draußen, wo die Stränge durch ein umlaufendes Messer gekappt und somit auf eine beliebige Länge zugeschnitten werden.

Nach ihrer Pressung werden die Holzpellets in einen Kühler befördert, wo sie aushärten. Abschließend werden die Pellets einem Pelletsilo zur Endlagerung zugeführt, wobei sie

zuvor gesiebt werden. Das in Abbildung 2.2 dargestellte Sieb ist nicht in allen Betrieben zwingend anzufinden [6]. In einigen Betrieben werden die Pellets zusammen mit dem Feinanteil, der aus Abrieb und ungepressten Spänen besteht, in das Produktsilo weiter gefördert. Der Feinanteil kann hierbei laut [6] bis zu 30 % Massenanteil betragen. Aus diesem Grund wurden als Vorgabe ungesiebte Holzpellets gefordert, um im Rahmen dieser Untersuchung eine worst-case-Betrachtung durchzuführen (siehe Kapitel 1.2).

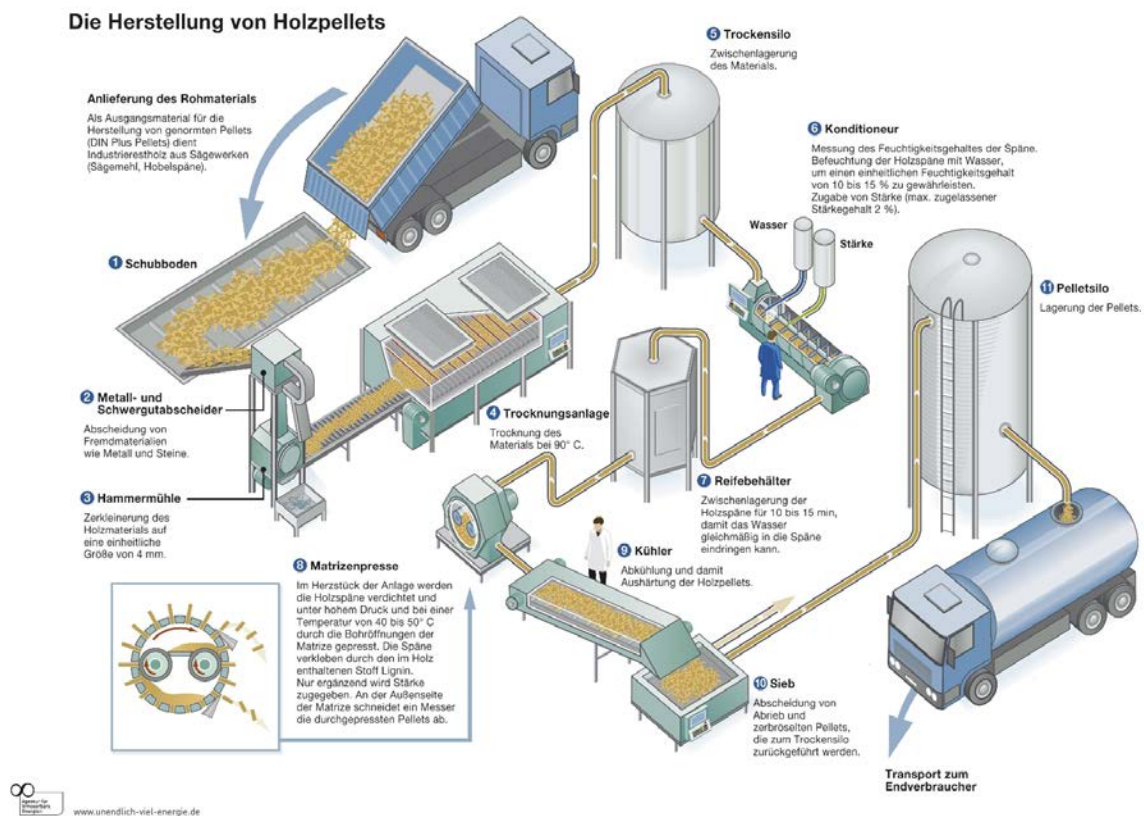


Abbildung 2.2: Graphische Darstellung einer Holzpelletieranlage (Quelle: siehe Abbildung)

Eine Matrizenpresse hat gewöhnlich eine Produktionsleistung von 4-5 t/h. Eine Befragung mehrerer Pelletproduzenten ergab, dass in Kleinbetrieben mit einer Presse, häufiger aber mit zwei Pressen produziert wird. Daraus ergibt sich eine Förderleistung von rund 8-10 t/h. Diese Leistung wurde den späteren Untersuchungen zugrunde gelegt.

Betrachtet man den zuvor beschriebenen Herstellungsprozess von Holzpellets, so ist für diese Arbeit die Analyse der Transportwege zwischen den einzelnen Produktionsstationen bzw. deren praktische Gestaltung von besonderer Relevanz. Man hat es mit vertikaler und horizontaler Förderung zu tun. Eingesetzt werden dafür Becherwerke und Trogkettenförderer. Diese mechanischen Förderarten sind vor allem deshalb häufig vorzufinden, weil sie die Holzpellets – im Gegensatz zu einer pneumatischen Förderung – vergleichsweise schonend transportieren. Die Beschädigung der Pellets noch während ihrer Produktion kann damit weitgehend unterbunden werden. Darüber hinaus sind diese mechanischen Förderarten relativ kostengünstig [6].

Weil sich diese Untersuchung möglichst nah an der industriellen Praxis orientieren soll, wurde deshalb festgelegt, für diese Arbeit auch eine mechanische Förderung zu verwenden.

2.5 Auswahl geeigneter Apparaturen

2.5.1 Auswahl des Silos

In Kapitel 2.2 wurde gezeigt, dass auf dem Versuchsgelände der BGN/FSA in Kappelrodeck ein Silo steht, das für die geplanten Untersuchungen in Frage kam. Das so genannte AZO-Silo (Abbildung in Anhang A.1) verfügt über viele Flansche zur Einführung von Messgeräten in das Siloinnere. Allerdings war es mit knapp 14 m Bauhöhe recht hoch und damit für die geplante Untersuchung eigentlich zu großvolumig. Das Silo bietet jedoch die Möglichkeit, Teile bzw. Ringsegmente herausnehmen zu können (Abbildung in Anhang A.1). Hierdurch wird das Silovolumen und die Bauhöhe deutlich geringer. Deshalb wurde beschlossen, das mittlere Ringsegment aus dem AZO-Silo herauszunehmen und das Silo anschließend für die geplanten Versuche zu verwenden.

2.5.2 Auswahl des Fördergerätes

Im vorherigen Kapitel 2.4 wurde gezeigt, dass die gängige Fördermethode von Holzpellets mechanischer Art ist. In vertikaler Richtung werden meist Becherelevatoren eingesetzt. Um die hohen Anschaffungskosten eines solchen Elevators zu vermeiden wurde beschlossen, den vor Ort befindlichen Elevator (Abbildung A.2) für die geplanten Versuche zu verwenden.

Weil der Elevator räumlich weit vom AZO-Silo entfernt stand und die Bauhöhe des Silos verringert wurde, waren erhebliche Umbauten erforderlich, um das AZO-Silo und den Becherelevator miteinander kompatibel zu machen. Dies ist in Kapitel 3 beschrieben.

2.5.3 Auswahl des Staubkonzentrationsmessgerätes

In den 1980er Jahren hat die BGN/FSA mit der Entwicklung eines Staubkonzentrationsmessgerätes (siehe Abbildung 2.3) begonnen, mit dem kontinuierliche Staubkonzentrationsmessungen in Staubwolken im Bereich² zwischen 1-1000 g/m³ möglich sind. Seitdem ist das Gerät mit der Bezeichnung SKG stetig weiter entwickelt worden und es existieren inzwischen diverse Typen, die an der Nummerierung in ihrer Bezeichnung zu erkennen sind.

Da im Rahmen dieser Arbeit gleichzeitig an mehreren Orten im Silo die Staubkonzentration gemessen werden sollte, kam nur das SKG 5 Typ 7 in Frage, da nur von diesem Gerät eine ausreichende Anzahl zur Verfügung stand. Das Messprinzip des Gerätes (siehe Abbildung 2.4) beruht auf der Schwächung eines Lichtstrahls, der ein definiertes Messvolumen mit der Länge l durchläuft. Auf dem Weg durch das Messvolumen verliert

²Der angegebene Konzentrationsbereich hängt vom Staub ab.

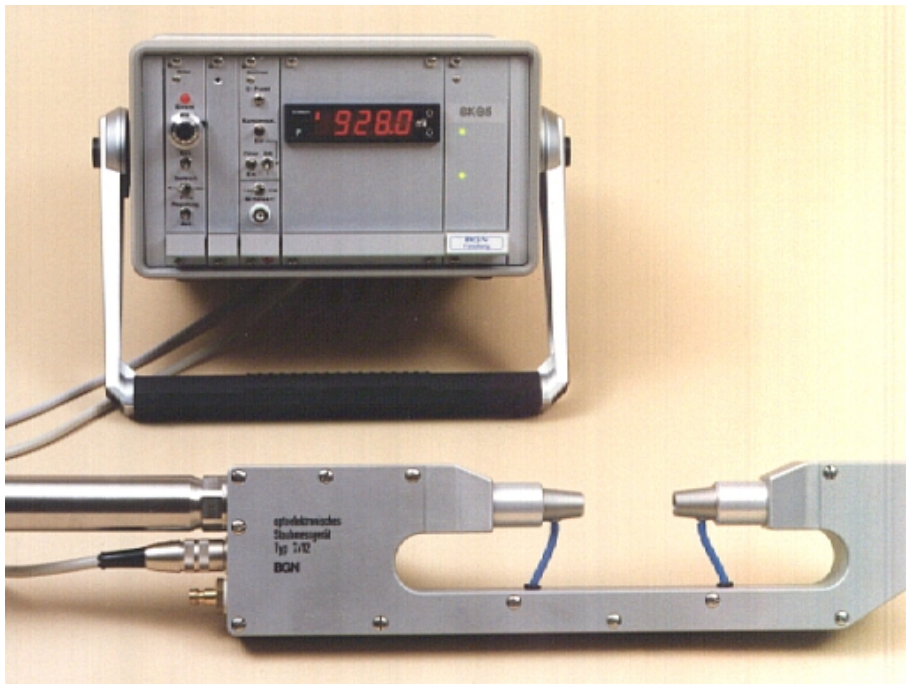


Abbildung 2.3: Foto des SKG 5 Typ 7. Das Gerät setzt sich aus dem Messkopf Typ 7 (Vordergrund) und dem Steuergerät SKG 5 (Hintergrund) zusammen (Quelle: Handbuch SKG 5).

der Lichtstrahl mit der Ausgangsintensität I_0 durch Absorption und Streuung an den, im Messvolumen befindlichen Staubpartikel an Intensität. Dieser Vorgang heißt Extinktion und wird durch das Lambert-Beer-Gesetz in (2.1) beschrieben.

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

In (2.1) ist c die Staubkonzentration, I die verbliebene Lichtintensität nach Durchlaufen der Strecke l und ϵ der Extinktionskoeffizient, der eine Stoffkonstante ist. Sind l und ϵ bekannt und ermittelt man I durch Messung, so ist die Staubkonzentration c durch Auflösung von (2.1) nach c direkt zugänglich. Der Extinktionskoeffizient ϵ muss für jeden Staub durch Kalibrierung bestimmt werden (siehe Kapitel 3.4).

Das SKG-Messsystem besteht aus zwei Teilen. Dem optoelektronischen Messkopf, welcher die Lichtschwächung im Messvolumen detektiert und dem mit ihm verbundenen Steuergerät, welches die gemessene Lichtintensität I in Form einer Proportionalspannung auf einer digitalen Anzeige darstellt. Abbildung 2.5 zeigt eine Skizze des Messkopfes. Wichtigste Komponenten des Messkopfes sind die Infrarotdiode, welche Licht mit einer Wellenlänge von 950 nm aussendet, und die Fotodiode, welche das Licht empfängt und mit Hilfe einer Elektronik letztendlich in eine Spannung umwandelt. Das Licht wird über eine Optik und einen Fremdlichtschutz gesendet bzw. empfangen. Weiterhin verfügt der Messkopf über einen Druckluftanschluss, der bei Bedarf genutzt werden kann. Damit werden über Druckluftdüsen der Fremdlichtschutz und die Linsen während des Betriebs von Verschmutzungen befreit. Dies wird durch ein Schnellentlüftungsventil ermöglicht, welches sich durch ein elektrisches Signal ansteuern lässt.

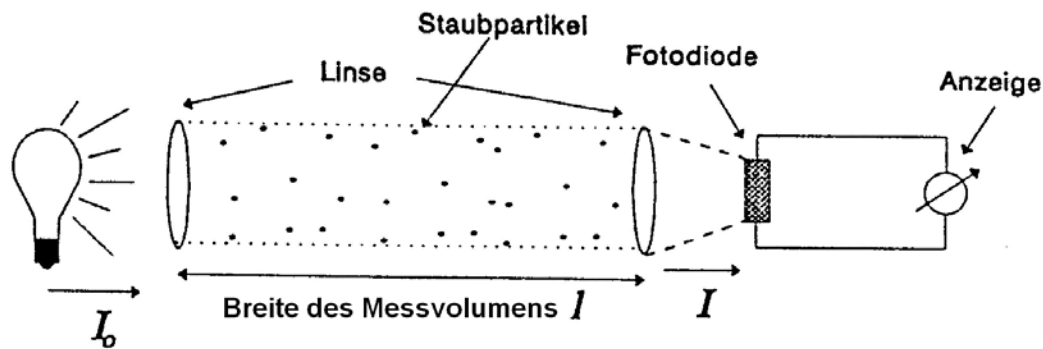


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung des Messprinzips der Staubkonzentrationsmessung mit dem SKG (Quelle: Handbuch SKG 5.)

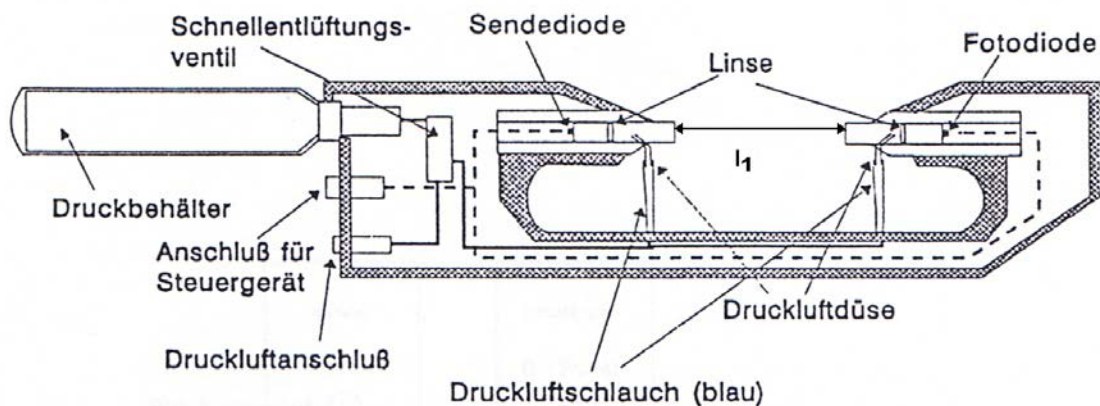


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung des Messkopfs Typ 7 (Quelle: Handbuch SKG 5).

2.5.4 Auswahl des Datenaufzeichnungsgerätes

Bei den geplanten Versuchen sollten 6 SKG eingesetzt werden. Das bedeutet, dass ein Datenaufzeichnungsgerät mit mindestens sechs Kanälen – besser mehr – benötigt wurde. Weiterhin war gefordert, dass das Gerät eine Abtastrate von ca. 1 s Dauer realisieren kann und dabei über ausreichend Speicherkapazität verfügt, um einige Minuten Daten aufnehmen zu können. Wegen der hohen Kanalanzahl kamen die vorhandenen Oszilloskope nicht in Frage. Wegen der Langsamkeit des zu messenden Vorgangs war der Einsatz der schnellen (und vor Ort knappen) Transientenrekorder unnötig. Deshalb fiel die Wahl auf den Datenlogger ALMEMO 2890-9 (siehe Abbildung 2.6) der Firma Ahlborn, von denen die BGN/FSA zwei Stück besitzt.

Der genannte Datenlogger verfügt über 10 Messkanäle, eine ausreichende Abtastrate, einen internen Speicher von 512 kB und die Möglichkeit, um einen externen Speicher erweitert zu werden. Über programmierbare Stecker lässt sich der Datenlogger mit den SKG-Steuergeräten verbinden. Programmierbar bedeutet, dass sich auf den Steckern der physikalische Zusammenhang zwischen der Messgröße und der anzuzeigenden Größe hinterlegen lässt. So lässt sich z. B. mit einem programmierten Stecker das elektrische Messsignal eines Thermoelements direkt als Temperatur auf dem Display anzeigen.



Abbildung 2.6: Foto des Datenloggers ALMEMO 2890-9 der Firma Ahlborn.

Im Fall der geplanten Staubkonzentrationsmessungen wurden allerdings gewöhnliche Spannungsstecker verwendet, da die Messergebnisse bereits als Spannung ausgegeben werden und deshalb nicht aufgearbeitet werden müssen.

Auf dem Datenlogger gespeicherte Messdaten können per PC aus dem Gerät ausgelesen werden. Dazu wird die ebenfalls von Ahlborn entwickelte Software AMR WinControl 6 verwendet. Nach dem Auslesen können die Messreihen im Texteditorformat gespeichert und mit gängigen Tabellenkalkulationsprogrammen ausgewertet werden.

Der Datenlogger wurde vor Beginn der Versuche um einen externen Speicher von 512 MB Datenspeichervolumen und sieben weiteren Steckern für die Messwertübertragung aufgerüstet.

2.6 Beschaffung geeigneter Holzpellets

Um die Menge der zu bestellenden Pellets abzuschätzen, wurde zunächst ein grober Versuchsplan erdacht, sowie überlegt, wie dieser praktisch umgesetzt werden kann. Da ein Parameter der Versuchsreihen die zu Versuchsbeginn vorhandene Füllhöhe im Silo sein sollte, sollte das Silo bei einigen Versuchen vor Versuchsbeginn teilbefüllt werden. Der Vorlagebehälter des Becherelevators fasst ca. 0,52 t Pellets. Da die Befüllung des Vorlagetrichters wiederum über Big Bags erfolgen sollte, welche per Kran über dem Einfülltrichter platziert werden, steigt der Aufwand für die Vorbereitung der Versuche mit dem Füllstand. Eine Zeitdauerabschätzung für diesen Arbeitsvorgang ergab, dass

fünf Füllungen des Vorlagebehälters das Maximum für die zu Versuchsbeginn vorhandene Füllhöhe darstellt.

Anschließend wurde ausgerechnet, welche Füllhöhe h oberhalb des Silokonus mit diesen $m = 2,5$ t Holzpellets im AZO-Silo erreicht wird. Mit der Schüttdichte der Holzpellets $\varrho = 600$ kg/m³ ergibt sich deren Volumen zu

$$V_h = \frac{m}{\varrho} = \frac{2.600 \text{ kg}}{600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 4,333 \text{ m}^3 \quad (2.2)$$

Aus dem Montageplan des AZO-Silos (Abbildung in Anhang A.1) liest man die Silomaße aus Tabelle 2.2 ab.

Kleiner Durchmesser des Silokonus d [m]	0,30
Höhe des Silokonus h_K [m]	1,21
Durchmesser des Silos D [m]	1,60
Höhe des unteren Segments h_u [m]	3,00
Höhe des oberen Segments h_o [m]	2,00

Tabelle 2.2: Wichtige Maße des AZO-Silos.

Mit diesen Werten berechnet sich das Volumen bis zur gesuchten Füllhöhe h über dem Silokonus aus

$$V_h = \underbrace{\frac{\pi h_K}{3} \left(\left(\frac{D}{2} \right)^2 + \frac{dD}{4} + \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right)}_{\text{Volumen Silokonus}} + \underbrace{\pi h \left(\frac{D}{2} \right)^2}_{\text{Volumen Silozylinder}} \quad (2.3)$$

Umgestellt nach h folgt

$$h = \frac{4V_h}{\pi D^2} - \frac{h_K}{3} \left(1 + \frac{d}{D} + \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right) = 1,66 \text{ m} \quad (2.4)$$

Dieser Wert wurde als ausreichend bewertet. Er entspricht etwa 1/3 der Wandhöhe (exklusive Silokonus).

Zusätzlich wurden 2,0 t Pellets als Reserve angesetzt. Damit ergab sich eine gewünschte Liefermenge von 4,5 t. Die in Abschnitt 1.2 genannten Anforderungen an die zu untersuchenden Holzpellets kombiniert mit der gewünschten Bestellmenge, führten zu Schwierigkeiten bei der Pelletbeschaffung. Für bindemittelfreie, ungesiebte Holzpellets der Klasse B ließ sich kein Lieferant für die oben genannte Menge finden. Die von den Lieferanten geforderte Mindestabnahmemenge von 20 t konnte aus Kostengründen und mangelnder Lagerkapazität nicht realisiert werden. Letztlich erklärte sich E.V.O in Offenbach zu einer Lieferung der gewünschten Menge bereit. Bei diesen Klasse B Pellets handelt es sich um Pellets, welche 1,5 % Roggenstärke als Bindemittel enthalten. Nach Rücksprache mit Prof. Dr. Radandt wurden diese aus zeitlichen Gründen bestellt.

Im Staublabor der BGN/FSA wurden die sicherheitstechnischen Kenngrößen der verwendeten Holzpellets, bestimmt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Anhang C zu sehen. Von besonderem Interesse ist hierbei die untere Explosionsgrenze *UEG* des Pelletabriebs, welche zu $UEG = 125 \text{ g/m}^3$ bestimmt wurde. Oberhalb dieses Staubkonzentrationswertes liegt ein zündfähiges Staub-Luft-Gemisch vor. Diese *UEG* wurde für die Bewertung der Messdaten in Kapitel 4.4 herangezogen.

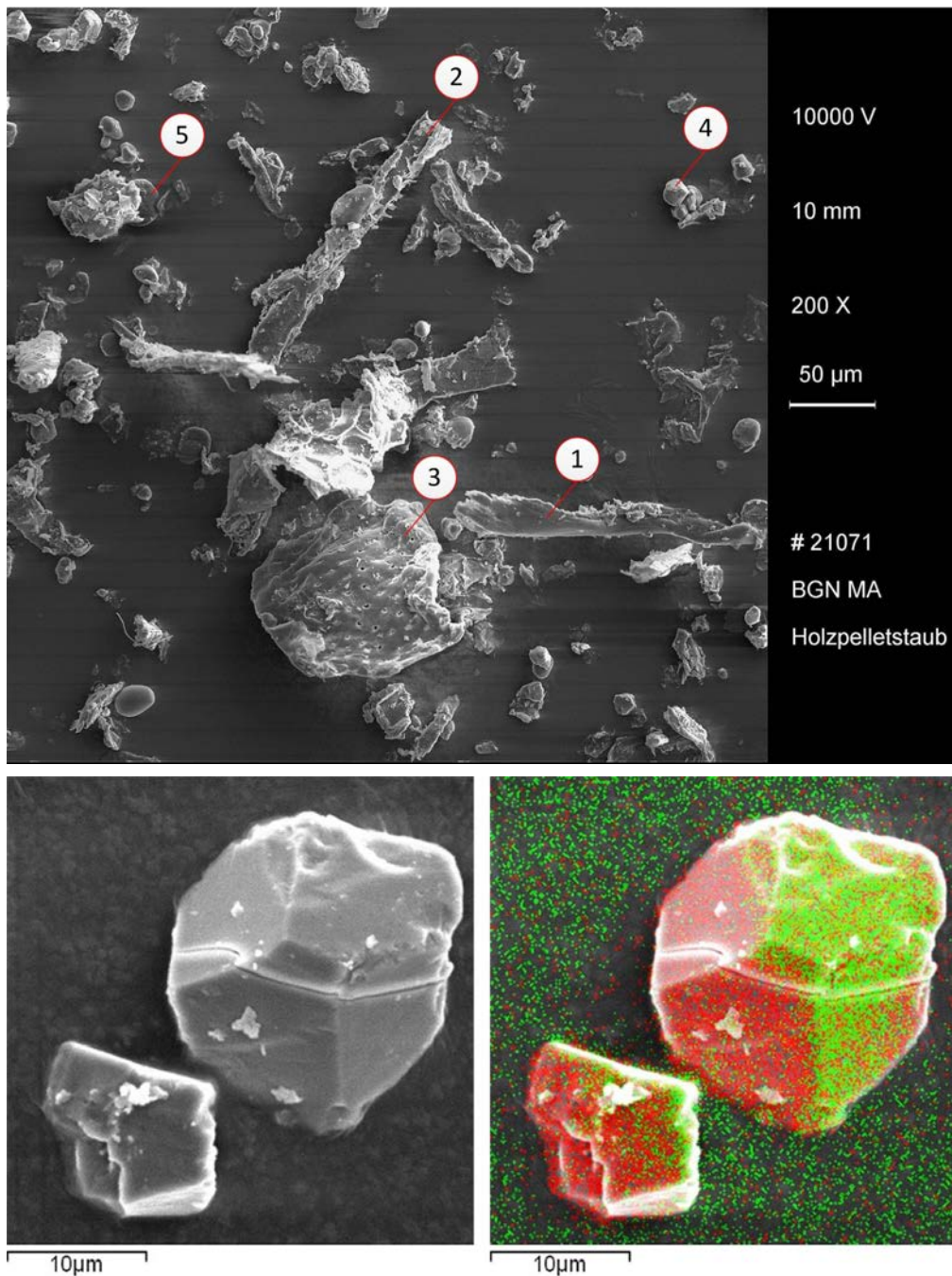


Abbildung 2.7: REM-Analyse des Holzstaubs (oben). REM-Aufnahme und EDX-Analyse (unten) eines der im Feinstaubanteil gefundenen Kristalle. Die rote Einfärbung kennzeichnet das Element Calcium und die grüne Einfärbung das Element Sauerstoff.

Zusätzlich wurde der Staub mit dem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Abbildung 2.7 (oben) zeigt die 200-fache Vergrößerung einiger Holzstaubpartikel. In der Abbildung ist erkennbar, dass die mit den Zahlen (1) und (2) markierten Holzpartikel in typischer, faseriger Struktur vorliegen. Der Holzpartikel (3) zeigt Querkanäle, die für Holz charakteristisch und für die Wasserversorgung zuständig sind.

Außerdem wurden Bestandteile der Maispflanze, also Reste die bei der Gewinnung von Maiskörnern anfallen, gefunden. Diese könnten beispielsweise Gewebefragmente der Maisspindel oder -kolbens und der Spelzen mit anhaftenden Haaren sein. Sie bestehen aus sklerotisiertem (stark verholztes) Gewebe. Weiterhin könnten sich Fruchtschalenfragmente von geschälten Maiskörnern darunter befinden, da zahlreiche Maisstärkekörner (4) auftreten. Somit könnte folglich auch klein geheckseltes Maisstroh Bestandteil der Holzpellets sein [5].

Weiterhin wurden Roggenstärkekörner (5) entdeckt. Die Roggenstärke stammt aus dem für die Holzpellets verwendeten Bindemittel. Darüberhinaus wurden Kristalle gefunden, welche durch eine EDX-Untersuchung als Calciumoxalat (siehe Abbildung 2.7, unten) identifiziert wurden. Diese kommen meist als Einschluss in pflanzlichem Gewebe vor und sind damit wahrscheinlich durch das Holz begründet.

Kapitel 3

Realisierung des Versuchsaufbaus

3.1 Vorbereitung des Silos

In Abschnitt 2.5.1 wurde das AZO-Silo für die Versuchsdurchführung ausgewählt. Um es für die Versuche verwenden zu können, mussten einige vorbereitende Maßnahmen durchgeführt werden. Der Montageplan des AZO-Silos ist in Anhang A.1 zu sehen.

Geplant war, die drei Silosegmente voneinander zu trennen, da sich das Silo mit dem auf dem Versuchsfeld vorhandenen Kran nur in Einzelteilen versetzen lässt. Außerdem sollte bei der späteren Montage auf das mittlere Segment verzichtet werden, um die Höhe des eigentlichen Silos, welche 10,74 m beträgt, um 2,5 m auf 8,24 m zu reduzieren, um dieses später mit dem Elevator befüllen zu können.

Zunächst wurde das Silo von der, mit ihm verbundenen, pneumatischen Förderleitung getrennt, welche meist für Untersuchungen an diesem Silo verwendet wird. Die fünf am Silokopf vorhandenen Druckentlastungsöffnungen wurden zwecks Witterungsschutz verschlossen. Weiterhin wurde die Elektrik am Silo, d. h. die Steckdosen und die Verkabelung des Rüttlers am Silokonus zurückgebaut. Vor dem Versetzen des Silos wurden zunächst alte Produktrückstände voriger Versuche entfernt und Toträume gereinigt. Weiterhin wurde eine externe Firma damit beauftragt, das vorhandene Gerüst um das Silo zu demontieren. Dieses Gerüst diente der einfacheren Installation von Sensoren, Zündern, Staubeinblasbehältern oder Reparaturarbeiten. Am neuen Standort wurde auf das Gerüst verzichtet, da das Silo nach Beendigung der Versuche wieder rückgebaut werden sollte. Zugang zu den Messstutzen sollte am neuen Standort durch eine mobile Hebebühne ermöglicht werden.

Nach diesen vorbereitenden Arbeiten wurden die Verschraubungen der Silowandsegmente und die Verankerung im Boden gelöst, so dass das Silo zum Becherelevator hin versetzt werden konnte. Abbildung 3.1 zeigt die Versetzung des unteren Teilstücks des Silos zum Elevator hin (links) und die Montage des Kopfstücks des Silos (rechts). Das Silo wurde auf der Ostseite des Elevators aufgestellt, da der Elevatorauswurf in diese Richtung zeigt.

Am neuen Standort wurden die Silosegmente wieder miteinander verschraubt und die Fallschutzsicherung der Leiter, welche vom Fuß des Silos zum Kopf führt, angebracht.



Abbildung 3.1: Versetzen des unteren Teilstücks des AZO-Silos zum Elevator hin (links), Montage des Kopfteils des Silos am neuen Standort (rechts).

3.2 Anbau des Elevators

Im nächsten Schritt musste der Elevator umgebaut und dessen Auswurf mit dem Kopf des Silos verbunden werden. Im Anhang A.2 ist der Montageplan des Elevators zu finden.

Zunächst wurde der Elevator auf Funktion getestet und von alten Produktresten befreit. Hierzu wurde der Elevator am Fuß mit Wasser befüllt und in Betrieb genommen. Nach zweimaligem Wechseln des Spülwassers war die Reinigung beendet.

Neben dem Auf- und Abgangsschacht, in denen der Gurt nebst Bechern nach oben bzw. nach unten läuft, verfügte der Elevator zu Beginn der Arbeit über einen weiteren Schacht. Dieser Schacht ist ein Rohr, welches im Rahmen eines Forschungsprojektes zum Thema "Druckentlastung an Becherelevatoren" zusätzlich montiert wurde. Dieses Zusatzrohr führte vom Abwurf am Kopf des Elevators senkrecht zum Elevatorfuß. In diesem Zustand warf der Elevator im laufenden Betrieb das Produkt in das Zusatzrohr ab, wo es zum Elevatorfuß fiel und von dort wieder nach oben gefördert wurde. Der Sinn dieses Zusatzrohres war, bei einer kleinen Produktmenge einen ständigen Produktfluss im Elevator zu gewährleisten und dabei das Verstopfungsrisiko auszuschalten.

Zum Verbinden des Elevators mit dem Silo wurde das Zusatzrohr des Elevators als

Fallrohr zum Silo hin umfunktioniert. Die Holzpellets konnten so über den am Silokopf axial angeordneten Stutzen in dieses hinein gelangen. Da das Zusatzrohr des Elevators aus mehreren Elementen bestand, ließ sich mit Hilfe von Rohrkrümmern, die auf dem Versuchsfeld vorhanden waren, eine Verbindung zum Silo herstellen. Das Fallrohr ist in Abbildung 3.2 gezeigt.



Abbildung 3.2: Fallrohr zwischen Elevatorabwurf und Silokopf.

Da für das Fallrohr kein passender Anschluss am Silo vorhanden war, wurde ein bereits vorhandenes Adapterstück für diesen Zweck angepasst. Das Adapterstück passte zwar auf das Fallrohr, hatte jedoch ein falsches Lochbild für das Anflanschen am Silo. Deshalb wurden Aussparungen in den Flansch des Adapters ausgebrannt (blau umrandet in Abbildung 3.3, links), die dem Lochbild des Siloflansches entsprachen. Weiterhin wurde ein Kreisring mit passendem Innen- und Außendurchmesser aus verzinktem Stahl angefertigt und ebenfalls mit dem Lochbild des Siloflansches versehen. Mit Hilfe dieses Kreisrings konnte das Adapterstück stabil und luftdicht mit dem Siloflansch verschraubt werden (Abbildung 3.3, rechts).

Diese, sowie alle anderen handwerklichen Arbeiten, wurden in der Werkstatt des Versuchsfeldes in Kappelrodeck durchgeführt.



Abbildung 3.3: Präpariertes Adapterstück (links). Montiertes Adapterstück mit übergeworfenem Kreisring (rechts).

Wegen der baulichen Gegebenheiten am Elevator konnten die Big Bags mit dem Kran nicht direkt über den Produktaufgabebehälter des Elevators geführt werden. Aus diesem Grund wurde eine Produkteintragshilfe hergestellt, welche aus einem Rohr mit einer speziellen Verankerungsvorrichtung besteht. Mit Hilfe dieser Verankerungsvorrichtung konnte das Rohr in einem 45°-Winkel auf den Rand des Produktaufgabebehälters aufgesetzt werden (Abbildung 3.4). Damit ist es möglich, Holzpellets aus am Kran hängenden Big Bags direkt in den Produktaufgabebehälter des Elevators zu füllen.



Abbildung 3.4: Eintragshilfe für die Befüllung des Aufgabetrichters.

Abschließend musste überlegt werden, wie die in Kapitel 2.4 genannte Förderleistung von 8-10 t/h mit dem gegebenen Elevator realisiert werden kann. Der Elevator verfügte bei einer Gesamthöhe von 15,125 m über 211 Becher. Hierdurch kam im normalen Betrieb eine Förderleistung von 150 t/h zustande. Daraus ergab sich die Notwendigkeit, die Förderleistung des Elevators anzupassen. Drei Optionen wurden dazu erdacht bzw. in Erwägung gezogen:

1. Reduzierung der Becheranzahl

Diese Methode ist gleichbedeutend mit einem sehr hohen Arbeitsaufwand, da eine Verringerung der Förderleistung um 140 t/h eine Entfernung von knapp 200 Bechern zur Folge gehabt hätte. Die Entnahme so vieler Becher würde dazu führen, dass die Förderung einen stark diskontinuierlichen Charakter am Elevatorauswurf hätte, was sich vermutlich negativ auf eine praxisnahe Staubwolkenbildung im Silo auswirken würde. Deshalb wurde diese Idee verworfen.

2. Reduzierung der Bandgeschwindigkeit mit Hilfe des Frequenzumrichters.

Mit Hilfe des Frequenzumrichter lässt sich die Drehzahl des Becherwerkantriebs regeln. Die Motordrehzahl darf allerdings einen gewissen Wert nicht unterschreiten, da sonst

die für den Abwurf benötigte Energie zu gering wird. Die Wurfparabel des Förderproduktes am Elevatorauswurf würde dadurch zu flach. Resultierend hieraus würden die Pellets durch den Abgangsschacht hinunter fallen und erst gar nicht das Fallrohr zum Silo hin erreichen. Durch Drosselung der Motordrehzahl konnte die gewünschte Förderleistung nicht erreicht werden.

3. Teilbedeckung des Produktabwurfs.

Eine weitere Möglichkeit der Förderleistungsabsenkung besteht darin, den Querschnitt des Elevatorabwurfsschachts durch Anbringung eines Prallbleches auf die Hälfte zu reduzieren. Dies hätte zur Folge, dass der Förderstrom von 150 t/h auf ca. 75 t/h gemindert wird. Ein Nachteil an dieser Methode ist allerdings, dass die Pellets, welche am Prallblech aufgehalten werden, zurück in den Abgangsschacht fallen und sich somit ein Risiko des Verstopfens ergibt. Durch regelmäßiges Leerfahren des Elevators sollte sich dieses Risiko allerdings eingrenzen lassen.

Weil Methode 1 wegen des hohen Aufwandes verworfen wurde und Methode 2 alleine nicht ausreichend ist, wurde die gewünschte Förderleistung durch die kombinierte Anwendung der Methoden 2 und 3 verwirklicht:

Durch das Anbringen eines Prallbleches mit den Abmessungen 900 mm × 19,5 mm × 1 mm wurde die Hälfte des Abwurfquerschnitts verdeckt und damit der Produktabwurf in Richtung Silo halbiert. Das Prallblech wurde mit zwei Winkeln an der Wandung der Elevatorhaube angeschraubt. Zur Lärmreduzierung und zur Stabilisierung wurde auf das Prallblech mittig ein L-Profil-Stab aufgeschweißt (Abbildung 3.5).



Abbildung 3.5: Am Elevatorabwurf montiertes Prallblech.

Weiterhin wurde am Elevatorschaltschrank ein Frequenzumrichter installiert, von dem aus die Drehzahl des Elevatorantriebs stufenlos reguliert werden kann. Zur Einstellung der gewünschten Förderleistung wurde der Elevator kurzzeitig, bei voll gefülltem

Aufgabetrichter, in Betrieb genommen, so dass die Becher im Aufgangsschacht gefüllt waren. Die geringe Menge an Pellets, welche bei diesem Vorgang in das Silo gefördert wurde, wurde entfernt. Anschließend wurde ein leerer Big Bag unter den Auslauf des Silos gehängt. Nun wurde der Elevator erneut in Betrieb genommen und die Zeit, die für die Entleerung des Produktaufgabetrichters benötigt wurde, gestoppt. Anschließend wurden die in das Silo geförderten Pellets mittels einer Kranwaage gewogen und durch Quotientenbildung aus Pelletmasse und gemessener Förderzeit die Förderleistung des Elevators bestimmt. Dieser Vorgang wiederholte sich, bis die gewünschte Förderleistung von 10 t/h erreicht war.

Abschließend wurde über die Druckentlastungsöffnung am Kopf des Elevators eine Folie als Sicherheitseinrichtung gespannt.

3.3 Prüfung der Messgeräte und Aufbau der Messkette

An allen sechs Messköpfen Typ 7 wurde die Länge des Messvolumens auf $l = 50$ mm eingestellt. Anschließend wurden die Messköpfe mit den Steuergeräten SKG 5 verkabelt und deren Ausgangssignale auf zwei Oszilloskope gegeben. Der Verlauf der Ausgangssignale wurde ca. 30 Minuten lang verfolgt um sicher zu gehen, dass die Geräte exakt funktionieren. Dabei wurde eines der Steuergeräte als defekt erkannt und durch ein anderes ersetzt.

Nach bestandenem Funktionstest wurden die Messköpfe mit den Druckluftpatronen voran in die vorbereiteten Halterungen eingeführt. Mit Hilfe dieser speziell angefertigten Halterungen konnten die SKG-Messköpfe durch die Anschlussflansche an der Siloseitenwand in das Innere des Silos geführt und dort positioniert werden. Die zur Messsignalübertragung benötigten Kabel wurden von den Messköpfen aus durch die Halterungen hindurch geführt, so dass sie am Messstand mit den Steuergeräten verbunden werden können. Für die Montage der Halterungen an den Siloflanschen wurden besondere Adapterflansche benötigt, durch welche die Halterungen geführt und bei den gewünschten Einschubtiefen fixiert werden konnten. Fünf dieser Flansche waren bereits vorhanden, ein sechster musste wegen der SKG-Anzahl gefertigt werden. Dazu wurde eine CAD-Konstruktion des Flansches (siehe Anhang B) erstellt und dessen



Abbildung 3.6: Zur Montage im Silo vorbereiteter Messkopf.

Herstellung anschließend in Auftrag gegeben. Abbildung 3.6 zeigt einen, für die Montage im Silo vorbereiteten Messkopf.

Von den sechs fertig präparierten Messköpfen mit Halterungen wurden jeweils zwei auf insgesamt drei Ebenen des Siloinnenraums verteilt. Die Verteilung der Messköpfe ist schematisch in Abbildung 3.7 dargestellt. Die drei Messebenen werden mit U_i (unten), M_i (Mitte), und O_i (oben) gekennzeichnet. Hierbei wurden die Messköpfe in etwa wie in [4] positioniert, da eine ähnliche Staubkonzentrationsverteilung, wie bei den damaligen Versuchen erwartet wurde (unten hohe Konzentration in Silowandnähe, oben hohe Konzentration nahe der vertikalen Symmetrieachse). Deshalb erhöht sich mit steigendem Index i die Einschubtiefe der Messköpfe in das Silo. Als Einschubtiefe ist der Abstand des Messvolumenmittelpunktes zur Silowand definiert. Die Werte für die Einschubtiefen können Abbildung 3.7 entnommen werden.

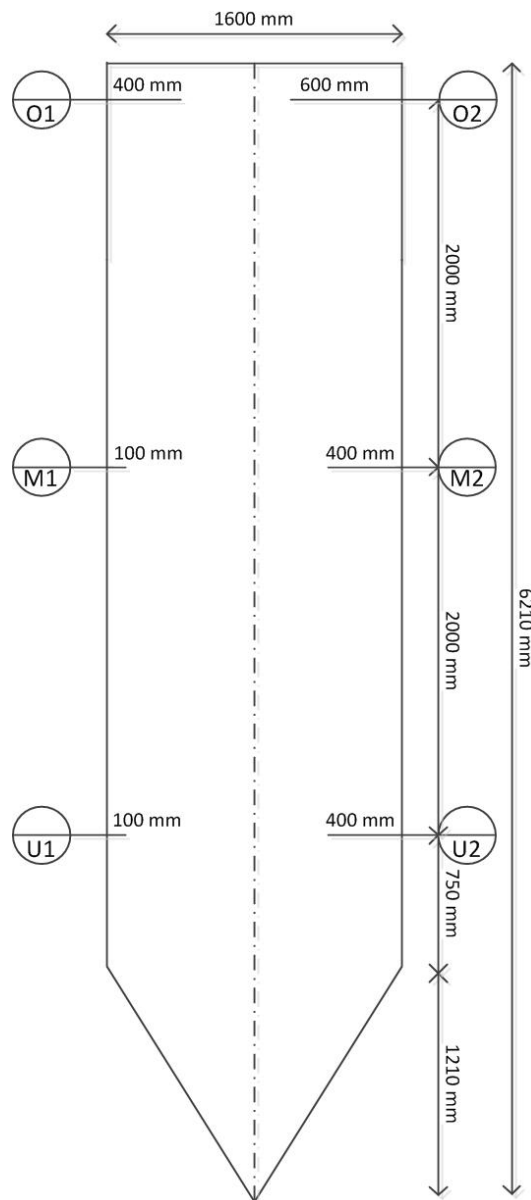


Abbildung 3.7: Schematisierte Messstellenverteilung im Inneren des AZO-Silos.

Die Einschubtiefe von 600 mm wurde als Maximalwert festgelegt, da ein Überschreiten dieses Wertes ein Eindringen von Holzpellets in das Messvolumen zur Folge haben könnte.

Die Messköpfe wurden bei der Montage so ausgerichtet, dass das Messvolumen vom Gehäuse des Messkopfes geschützt wird. Dadurch soll vermieden werden, dass größere Partikel und/oder Pellets durch das Messvolumen fallen und somit ein Fehlsignal erzeugen. Abbildung 3.8 veranschaulicht dies.



Abbildung 3.8: In das Silo eingeführter Messkopf des Staubkonzentrationsmessgeräts (Blick durch einen Flansch an der seitlichen Silowand).

Am Fuß des Silos wurde der Messstand (Abbildung 3.9) aufgebaut. Er bestand im Wesentlichen aus den sechs Steuergeräten SKG 5 zur numerischen Darstellung und Ausgabe der Messdaten, dem ALMEMO-Datenlogger zur Aufnahme der Messdaten und einem Laptop zum Auslesen des Datenloggers und zur grafischen Anzeige der Messdaten.

Bei einem Testlauf der Messkette wurde festgestellt, dass die druckluftbetriebene Reinigung der optischen Linsen in den Messköpfen eine starke Streuung der Messwerte verursachte. Aus diesem Grund wurde bei den späteren Versuchen auf diese Reinigung verzichtet. Im Übrigen wurde wegen der geplanten kurzen Zeitspanne eines Messzyklusses und wegen der vermuteten, relativ niedrigen Staubkonzentration keine starke Linsenverschmutzung an den Messköpfen erwartet.



Abbildung 3.9: Messstand mit den sechs SKG 5-Steuergeräten, dem ALMEMO-Datenlogger und einem Laptop zum Auslesen der Messdaten.

3.4 Kalibrierung der SKG 5 Typ 7

Wie bereits in Kapitel 2.5.3 erwähnt wurde, muss für eine Staubkonzentrationsmessung mit dem SKG für jeden zu messenden Staub der Extinktionskoeffizient durch einen Kalibriervorgang bestimmt werden. Dieser Kalibriervorgang besteht im Wesentlichen aus der Erstellung einer Kalibrierkurve, die mit Hilfe einer Regressionsrechnung mit (2.1) aus zuvor gewonnenen Kalibrierpunkten gewonnen wurde. Der freie Parameter bei der Regression ist der Extinktionskoeffizient ε .

3.4.1 Suspensionsmethode

Bei der Suspensionsmethode wurde ein Kalibrierpunkt erstellt, indem ein Kalibriergefäß, dessen geometrische Form das Messvolumen des Typs 7 gänzlich ausfüllte, in den Strahlengang gebracht wurde, wobei es auf einem Magnetrührer stand (Abbildung 3.10, oben). In das Gefäß wurde ein zuvor gemessenes Volumen an Ethanol gegeben. Das SKG musste nun wieder auf die Anzeige $U = 0 \text{ mV}$ abgeglichen werden, da die Gefäßfenster und das Ethanol andere Lichtabsorptionseigenschaften besitzen als die Luft. In das Ethanol wurde nun eine genau abgewogene Portion des betreffenden Staubes gegeben und mit Hilfe eines Rührfisches bei mäßiger Drehzahl eine Staub-Ethanol-Suspension hergestellt. Der angezeigte Spannungswert wurde abgelesen und notiert.

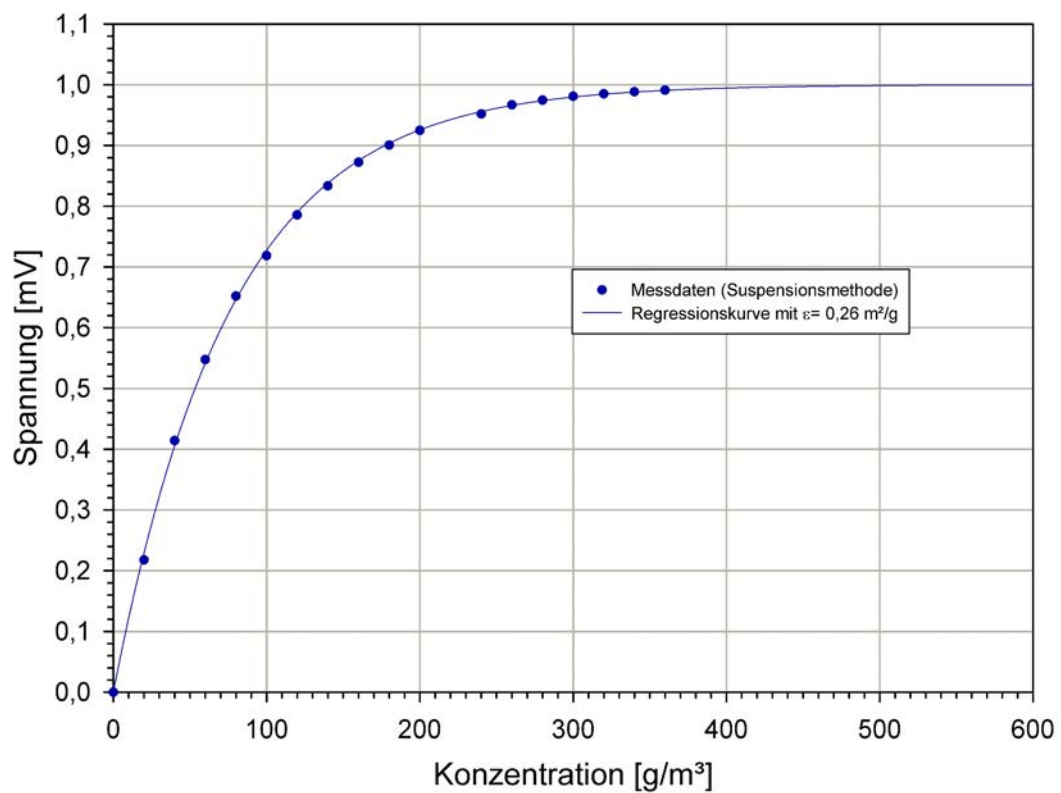
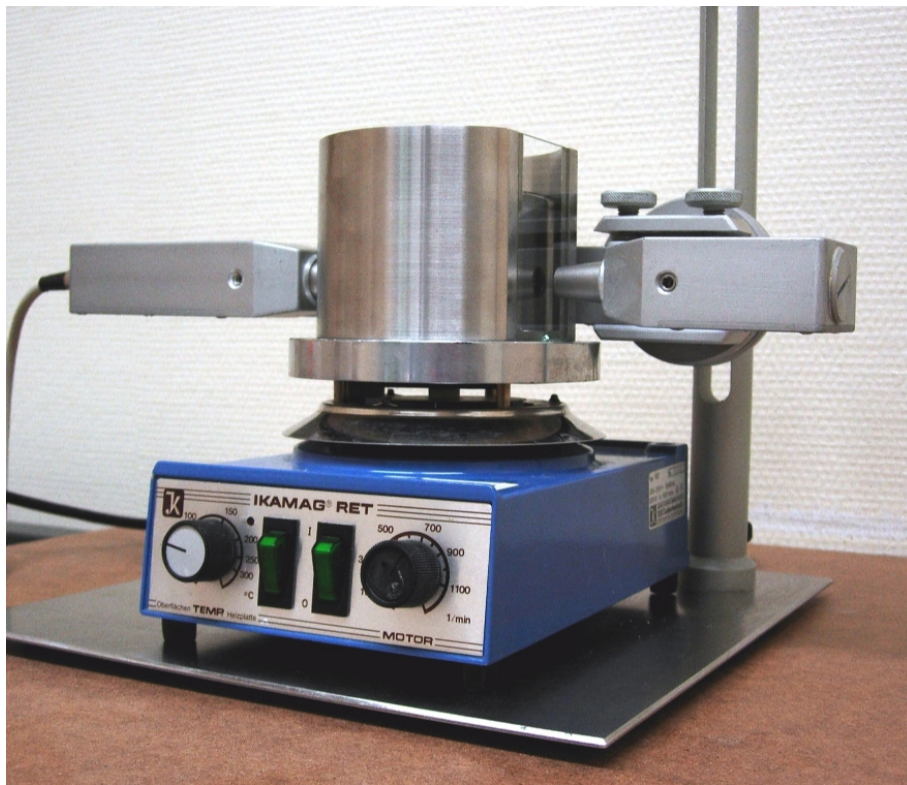


Abbildung 3.10: Aufbau zur SKG-Kalibrierung mit Hilfe der Suspensionsmethode (oben). Messergebnis der SKG-Kalibrierung auf Holzpelletfeinstaub mit Hilfe der Suspensionsmethode (unten).

Der Quotient aus Staubmasse und Ethanolvolumen ergibt die zugehörige Staubkonzentration. Durch anschließende Zugabe weiterer Staubportionen und jeweiligem Ablesen des Spannungswertes entstanden weitere Kalibrierpunkte.

Die beschriebene Prozedur wurde mit abgeseibtem Feinstaubanteil der Holzpellets durchgeführt (siehe Kapitel 3.5). Die erhaltenen Kalibrierpunkte sind nebst Regressionskurve in Abbildung 3.10, unten gezeigt. Es ergab sich ein Extinktionskoeffizient von $\varepsilon = 0,26 \text{ m}^2/\text{g}$.

3.4.2 Gravimetrische Methode

Die Suspensionsmethode lässt sich bei einer Vielzahl von Stäuben anwenden, jedoch nicht bei allen. Manche Stäube lösen sich in Ethanol auf oder – wie z. B. Holzstäube – quellen in Ethanol über die Messzeit auf. Deshalb ist der im vorigen Abschnitt bestimmte Wert von $\varepsilon = 0,26 \text{ m}^2/\text{g}$ mit Vorsicht zu genießen. Um diesen Wert zu überprüfen, wurde der Extinktionskoeffizient des Holzpelletfeinstaubes mit Hilfe einer alternativen Methode bestimmt. Diese Bestimmungsart heißt gravimetrische Methode.

Die Bestimmung des Extinktionskoeffizienten mit Hilfe der gravimetrischen Methode ist quasi ein Nebenprodukt der Bestimmung der sicherheitstechnischen Kenngröße Staubungszahl gemäß der Richtlinie VDI 2263 Blatt 9 „*Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren - Beurteilung, Schutzmaßnahmen, Bestimmung des Staubungsverhaltens von Schüttgütern*“. Die Staubungszahl S beschreibt die Neigung eines Schüttguts zur Staubwolkenbildung. Weil für den zu untersuchenden Holzpelletfeinstaub sowieso die Staubungszahl S bestimmt werden sollte, konnten an dieser Stelle zwei Aufgaben in einem Arbeitsgang erledigt werden. Die Kenntnis der Staubungszahl des Holzpelletfeinstaubes ermöglicht später die Einordnung der Messergebnisse in Bezug auf Stäube mit anderen Staubungszahlen.

Im Folgenden wird der Aufbau (Abbildung 3.11) und das Messverfahren der Apparatur grob beschrieben. Die Apparatur besteht aus einem Vorlagebehälter, in den der zu untersuchende Staub eingefüllt wurde. Am Boden des Behälters befindet sich eine Doppelwendelschnecke zur Förderung des Staubes in die Messkammer der Apparatur. Beim Aufprall auf den Boden der Messkammer bildete sich eine Staubwolke, deren Staubkonzentration mit dem SKG 5 aufgenommen wurde. Die Hülsen der Sende- und Empfangsdiode sind seitlich durch die Wandung der Messkammer so in diese eingeführt, dass sich der Strahlengang des SKGs nicht mit dem herabfallenden Produkt kreuzte. Die Förderzeit wurde mit 300 s festgelegt, die anschließende Sedimentationszeit betrug 350 s.

Mit der Kalibrierung des SKG 5 wurde bereits während der Förder- und Sedimentationszeit begonnen. In der Messkammer der Apparatur befanden sich fünf Glasplättchen ($22 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 0,1 \text{ mm}$), deren Gewicht vor Messbeginn bestimmt wurde (siehe Abbildung 3.11, rechts unten). Bei der Bestimmung der Staubungszahl bildet sich auf den Glasplättchen eine Staubschicht, deren Dicke von der Aufenthaltsdauer der Plättchen in der Messkammer abhängig ist. Während der Förder- und Sedimentationszeit wurden die Glasplättchen zeitlich versetzt entnommen, erneut gewogen und



Abbildung 3.11: Apparatur zur Bestimmung der Staubungszahl im Zentrallabor der BGN in Mannheim (links). Blick in die Messkammer der Apparatur (rechts). Am unteren Bildrand sind die fünf Metallschlitzen mit den Glasplättchen zu sehen.

durch Differenzbildung die auf den Glasplättchen sedimentierte Staubmasse bestimmt. Anschließend wurden die Plättchen nacheinander in die Kalibrierstation gelegt. Diese Kalibrierstation besteht aus einer Halterung für das Plättchen, welche sich im Strahlengang eines senkrecht angeordneten SKGs befand (siehe Abbildung 3.12).



Abbildung 3.12: Glasplättchenhalterung der Kalibrierstation (links). Übersichtsfoto der Kalibrierstation (rechts).

Durch den Start der Kalibrierstation wurde das Glasplättchen in einem bestimmten Muster durch das Messvolumen des Typs 7 bewegt, so dass es an unterschiedlichen Stellen durchstrahlt wurde. Ein nachgeschaltetes Messgerät speicherte die Spannungs-

werte, die an den einzelnen Rasterpunkten ermittelt wurden und bildete anschließend das arithmetische Mittel der Messwerte. Grundlegend für diese Kalibrierungsmethode ist die Annahme, dass die durchstrahlte Staubmasse auf dem Plättchen die gleiche Lichtschwächung hervorruft wie die gleiche Staubmasse im aufgewirbelten Zustand im Messvolumen des Typs 7. Mit dieser Annahme lässt sich die Staubkonzentration berechnen aus

$$c = \frac{m_G}{l A_G} \quad (3.1)$$

mit A_G als Glasplättchenfläche, m_G für die auf dem Glasplättchen sedimentierte Staubmasse und l als Länge des Messvolumens. Bestimmt man für alle fünf Glasplättchen auf diese Weise die Staubkonzentration und ordnet die gemessenen Spannungen zu, so erhält man fünf Kalibrierpunkte. Für den Holzpelletfeinstaub ergaben sich die Kalibrierpunkte aus Tabelle 3.1.

Nr. Glasplatte	1	2	3	4	5
Spannung [mV]	170	336	535	821	896
Konzentration [g/m ³]	5,11	15,91	23,30	48,30	67,61

Tabelle 3.1: Gravimetrisch bestimmte Kalibrierpunkte für den Holzpelletfeinstaub.

Analog zu Kapitel 3.4.1 konnte mit den Kalibrierpunkten aus Tabelle 3.1 eine Kalibrierkurve erstellt werden. Es ergab sich ein Extinktionskoeffizient von $\varepsilon = 0,16 \text{ m}^2/\text{g}$. In Abbildung 3.13 sind die mit beiden Methoden gewonnenen Kalibrierkurven vergleichend dargestellt. Dem Diagramm entnimmt man, dass bei gleicher Spannung U die gravimetrisch bestimmte Kalibrierkurve zu höheren Staubkonzentrationen führt. Im Sinne einer worst-case-Betrachtung und wegen des Aufquellens des Holzpelletfeinstaubes in Ethanol wurde deshalb für alle weiteren Messungen von Holzpelletfeinstaub mit dem SKG 5 Typ 7 der Extinktionskoeffizient $\varepsilon = 0,16 \text{ m}^2/\text{g}$ verwendet.

Ersetzt man in (2.1) die Lichtintensität durch die Messspannung und löst die Gleichung anschließend nach der Staubkonzentration c auf, so erhält man

$$c = \frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{(-l\varepsilon)} = \frac{\ln\left(\frac{U}{U_0}\right)}{(-l\varepsilon)} = \frac{\ln\left(\frac{I}{1000}\right)}{(-0,05 \cdot 0,16)} \quad (3.2)$$

als Verknüpfung zwischen Messspannung und Staubkonzentration für die geplanten Messungen mit dem Holzpelletfeinstaub.

Mit Hilfe von (3.2) kann nun auch die Staubungszahl bestimmt werden. Ein Messdurchlauf, also $t_f = 300 \text{ s}$ Staubförderzeit plus $t_s = 350 \text{ s}$ Sedimentationszeit, lieferte einen Spannungsverlauf, wie er in Abbildung 3.14 zu sehen ist.

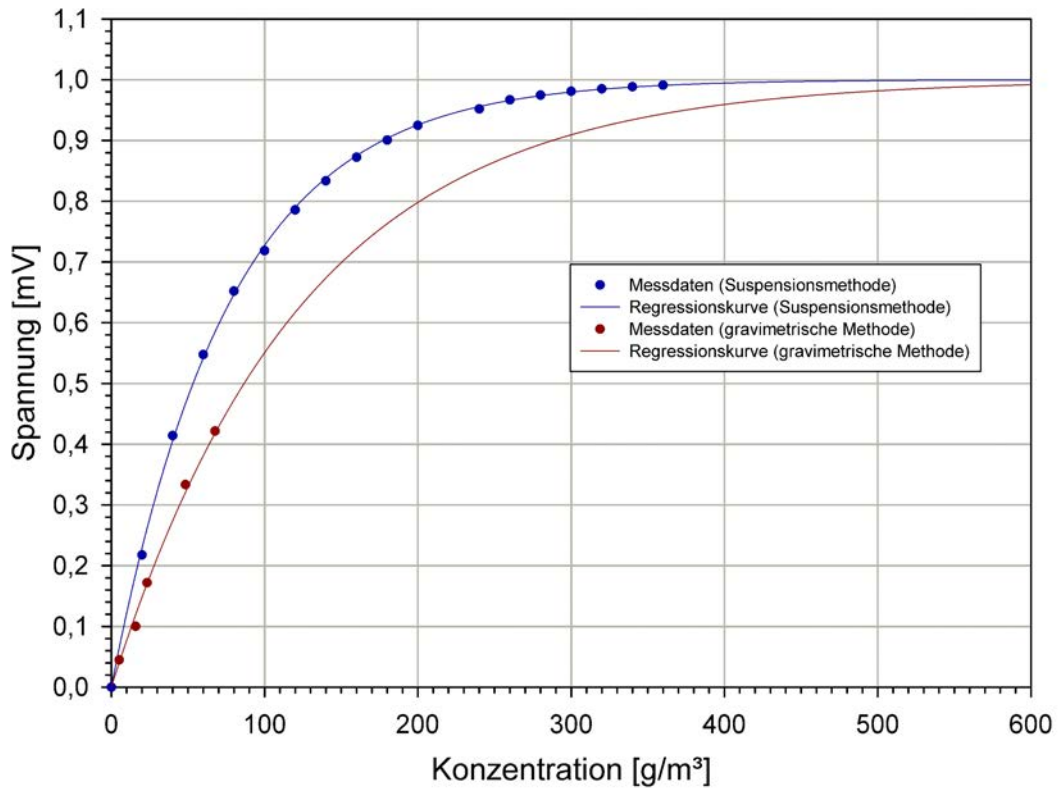


Abbildung 3.13: Vergleich der gemäß Suspensionsmethode und gravimetrischer Methode gewonnenen Kalibrierkurven.

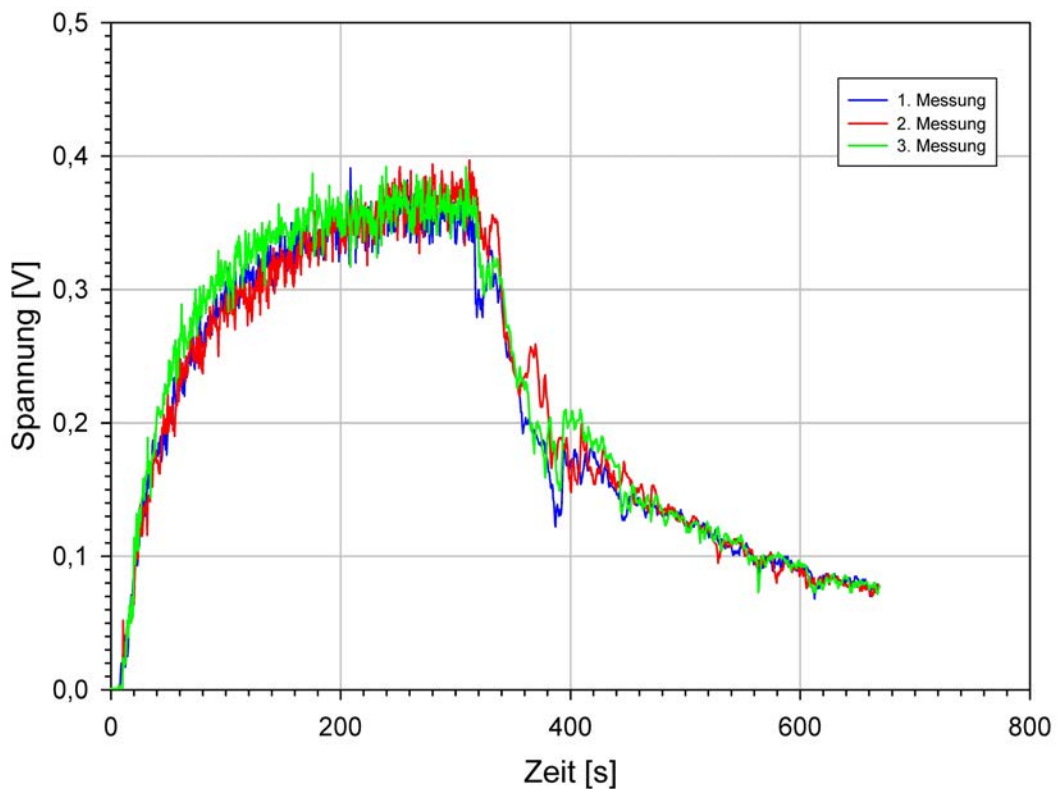


Abbildung 3.14: Gemessene Spannungsverläufe bei der Bestimmung der Staubungszahl von Holzpelletfeinstaub.

Da für die Staubungszahlmessung jeweils drei Einzelmessungen durchgeführt wurden, ergeben sich drei Spannungsverläufe. Mit (3.2) wurden diese Spannungsverläufe in Staubkonzentrationsverläufe umgerechnet und mit

$$S_i = \frac{\text{m}^3/\text{g}}{t_f + t_s} \int_0^{t_f+t_s} c(t) dt \quad (3.3)$$

per Definition die drei Einzelwerte der Staubungszahl S_i berechnet. Das arithmetische Mittel aus den drei Einzelwerten S_i ist dann die Staubungszahl S . In Abbildung C.1 in Anhang C sind die Ergebnisse der Staubungszahlbestimmung im Detail für den Holzpelletfeinstaub aufgelistet. Die ermittelte Staubungszahl ist $S = 8,08$. Holzpelletfeinstaub fällt damit in die Staubungsgruppe 3.

3.5 Aufbau einer Siebmaschine

Die zu untersuchenden, im Vorlagetrichter des Elevators aufzugebenden, ungesiebten Pellets setzten sich als Schüttung aus Holzpellets und deren Abrieb zusammen. Die Holzpellets wurden wie in den Kapiteln 2.3 und 2.6 beschrieben angeliefert, jedoch gesiebt. Deshalb musste die benötigte Menge an Abrieb (30 Gew.% der Schüttung) künstlich erzeugt werden. Zu diesem Zweck mussten die Pellets mechanisch belastet werden. Dies geschah, indem Pellets im Elevator bei langsamer Drehzahl im Kreis gefördert wurden. Hierbei entstand Abrieb, der später bei höherer Drehzahl mit den Pellets in das Silo gefördert werden konnte.

Vor Beginn der eigentlichen Versuche musste der Anteil des Abriebs am Fördergut bekannt sein, um die gewonnenen Messwerte auf einen Abrieb- bzw. Feinstaubanteil beziehen zu können. Das bedeutete die Notwendigkeit einer Fördergutaufarbeitung. Deshalb musste zunächst der im Elevator erzeugte Feinstaubanteil, dessen prozentualer Anteil am Gesamtgewicht unbekannt war, abgetrennt und später genau dosiert wieder hinzugegeben werden. Auf diese Weise wurde ein Holzpellet-Abrieb-Gemisch mit 30 Gew.% Feinstaubanteil erzeugt. Die beschriebene Gemischaufbereitung fiel nach jedem Versuch erneut an, da sich das Holzpellet/Abrieb-Gemisch während eines Versuches in seiner Zusammensetzung veränderte. Durch weiteren Abrieb erhöhte sich der Feinstaubanteil und gleichzeitig ging durch Lecks Feinstaub verloren.

Für die Trennung solcher Mengen an Feinstaub (ca. 400 kg pro Versuch) vom Holzpellet/Abrieb-Gemisch galt es also eine geeignete, kontinuierlich und schonend arbeitende Siebmaschine zu verwenden. Eine Recherche ergab, dass es nicht wirtschaftlich gewesen wäre, eine solche Siebmaschine für die benötigte Zeitspanne zu mieten. Darüberhinaus ließ sich keine Siebmaschine finden, welche die benötigten Anforderungen gänzlich erfüllt hätte.

Deshalb wurde für diese Trennaufgabe eine möglichst einfach gehaltene Trommelsiebmaschine geplant und gebaut, welche zudem in Nachfolgearbeiten weiter verwendet werden kann. Die Maschine sollte aus einer perforierten, im flachen Winkel angestellten Trommel bestehen, welche um die Längsachse rotiert. Die Aufgabe des Siebguts sollte

an der oberen Öffnung der Trommel erfolgen. Das Zusammenspiel von Trommelrotation und -gefälle sollte dafür sorgen, dass die Pellets zur unteren Öffnung transportiert werden, während der Abrieb durch die Löcher fällt und als Feinanteil gesammelt wird.

Im Folgenden wird der Aufbau der Siebmaschine beschrieben. Hierbei wird nur auf die wichtigen Maße der einzelnen Komponenten eingegangen. Eine detaillierte Konstruktionszeichnung mit Stückliste befindet sich in Anhang B.

Zwei Lochbleche mit den Abmessungen von $1000\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$, einem Lochdurchmesser von $3,5\text{ mm}$ und einer freien Fläche von $32,65\%$ wurden zunächst zu einer Trommel mit einem Durchmesser von 630 mm gebogen und am Stoß zusammengeheftet. Da die Löcher des Lochblechs bei der Herstellung ausgestanzt wurden, lag auf einer Seite des Blechs an jedem Loch ein Grat vor. Diese Seite liegt auf der Außenseite der Siebtrommel, so dass die Holzpellets bei der Siebung geschont wurden. An die nun 2000 mm lange Trommel wurde ein weiteres gebogenes und geheftetes Blech mit dem gleichen Durchmesser angesetzt (punktgeschweißt), wodurch sich die Trommel um 160 mm verlängerte. Dies dient dem sauberen Auslauf der Pellets aus der Trommel im Betrieb (siehe hierzu Anhang B, Blatt 8).

Zur Stabilisation der Siebtrommel wurden Ringe angefertigt, welche jeweils über drei Speichen gestützt werden. Die Ringe wurden aus Flacheisen gebogen und haben einen Durchmesser von 630 mm . Diese Speichen sind im 120° -Winkel angeordnet und treffen im Mittelpunkt des Rings an einer Buchse aufeinander (siehe Anhang B, Blatt 6). Die Speichen wurden per Kehlnaht sowohl am Ring als auch an der Buchse verschweißt. Die Ringe wurden im Inneren der Trommel mit dem Lochblech verschraubt und versteifen somit die Trommel. Durch die Buchsen der beiden Ringe wurde eine Hohlwelle mit einer Gesamtlänge von 2.440 mm geführt und an den Buchsen verschraubt (siehe Abbildung 3.15).



Abbildung 3.15: Montierte Welle der Trommelsiebmaschine.

Die Hohlwelle wurde motorseitig mit der Motorwelle verbunden, die über einen Wellenabsatz verfügt und somit in die Hohlwelle passt. Am anderen Ende ist die Motorwelle von innen abgedreht, so dass sie auf die vom Motor kommende Antriebswelle aufgesteckt werden konnte. An beiden Enden der Motorwelle wurde diese durch Schraubverbindungen mit den anstoßenden Wellen verbunden (siehe hierzu Anhang B, Blatt 7). Lagerseitig wurde eine Welle aus Vollmaterial in die Hohlwelle gesteckt, um von einem Lager aufgenommen werden zu können.

Der letztlich für die Siebmaschine verwendete Motor mit $P = 0,55 \text{ kW}$ Antriebsleistung und einer Drehzahl von $n = 11 \text{ min}^{-1} = 0,18\bar{3} \text{ s}^{-1}$ war im Technikum der BGN/FSA bereits vorhanden. Um zu prüfen, ob dieser Motor für die Siebmaschine geeignet ist, wurde die kritische Drehzahl n_k nach [7] bestimmt. Die kritische Drehzahl hängt von der Zentrifugalbeschleunigung und der Erdbeschleunigung ab. Bei Siebvorgängen sollte diese Drehzahl nicht überschritten werden, da ansonsten die Zentrifugalkraft zu hoch wird und somit der Siebeffekt abnimmt. Nach [7] gilt für die kritische Winkelgeschwindigkeit ω_k die Gleichung

$$\omega_k = \sqrt{\frac{g}{r_T}} = \sqrt{\frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{0,315 \text{ m}}} = 5,581 \text{ s}^{-1} \quad (3.4)$$

mit $r_T = 0,315 \text{ m}$ als Siebtrommelradius. Mit Gleichung (3.5) errechnete sich die Winkelgeschwindigkeit der Motorwelle zu

$$\omega = 2\pi n = 1,152 \text{ s}^{-1} \quad (3.5)$$

Nach [7] betragen gängige Winkelgeschwindigkeiten von Siebtrommeln zwischen 25% - 50% der kritischen Winkelgeschwindigkeit. Es wird in diesem Bereich von einer Kaskadenbewegung der Schüttung gesprochen, d. h. die obere Schicht des Schüttguts gleitet auf dem Gutbett herab. Bildet man den Quotienten aus der Winkelgeschwindigkeit der Motorwelle und der kritischen Winkelgeschwindigkeit der Siebmaschinentrommel und multipliziert mit 100 so folgt

$$\frac{\omega}{\omega_c} \cdot 100 = \frac{1,152 \text{ s}^{-1}}{5,581 \text{ s}^{-1}} \cdot 100 = 20,6 \% \quad (3.6)$$

Da es sich bei den Pellets um spröde Einzelpartikel handelt ist eine Abweichung der unteren Grenze der gängigen Winkelgeschwindigkeiten um 5% vertretbar. Die Holzpellets werden dadurch schonender gesiebt, wodurch weiterer Abrieb durch den Siebvorgang selbst minimiert wird. Vorgreifend ist zu erwähnen, dass während des Betriebs der Siebmaschine beobachtet wurde, dass die Schüttgutbewegung einer Kaskadenbewegung entspricht.

Weil bei dem Siebvorgang mit der Entstehung von explosionsfähigen Atmosphären gerechnet werden musste, wurde geprüft, ob beim Betrieb der Maschine gefährliche heiße Oberflächen entstehen können. Dazu wurde die Drehzahl der Siebmaschinentrommel bei Einsatz des oben genannten Motors der Berechnung zu Grunde gelegt. Damit wurde die maximal mögliche Relativgeschwindigkeit zwischen zwei eventuell aneinander

reibenden Teilen der Siebmaschine berechnet. Die maximal mögliche Geschwindigkeit tritt an der Außenseite der Siebtrommel auf. Mit dem Siebtrommelradius $r_T = 0,315 \text{ m}$ ergibt sich diese Tangentialgeschwindigkeit v_t aus

$$v_t = \omega r_T = 1,152 \text{ s}^{-1} \cdot 0,315 \text{ m} = 0,363 \text{ m/s} \quad (3.7)$$

Die berechnete Tangentialgeschwindigkeit $v_t = 0,363 \text{ m/s}$ ist auch die maximal mögliche Relativgeschwindigkeit zu den umliegenden Oberflächen, da letztgenannte sich nicht bewegen. Bisher wurden allgemein Relativgeschwindigkeiten unter $v_{\text{Rel}} = 1 \text{ m/s}$ als unkritisch für die Entstehung heißer Oberflächen angesehen. Der in (3.7) berechnete Wert beträgt rund 1/3 dieser kritischen Relativgeschwindigkeit. Im Jahr 2015 mehrten sich zwar die Hinweise darauf, dass die 1 m/s-Regel nicht mehr als allgemein geltend eingestuft werden kann und durch eine Fallbetrachtung ersetzt werden muss [9], jedoch ist die in (3.7) ermittelte Relativgeschwindigkeit so niedrig, dass die obige Betrachtung für eine Abschätzung des Risikos des Auftretens zündfähiger heißer Oberflächen ausreicht.

Für die Lagerung der Siebtrommel wurde ein Gestell aus Rechteckrohr gefertigt (siehe Anhang B, Blatt 3 & 4). Hierbei wurde das Höhenmaß des Gestells so gewählt, dass am Auslauf der Siebtrommel ein Big Bag zum Auffangen der sauberen Holzpellets aufgestellt werden kann. Weiterhin weist das Gestell in Richtung der Siebtrommelrotationachse ein Gefälle von 4° auf. Motorseitig befindet sich am Gestell ein Podest, welches über passende Bohrungen zum Lochbild des Motorsockels verfügt. Auf der Lagerseite wurde direkt auf dem Gestell ein Pendelkugellager durch eine Schraubverbindung angebracht. Abbildung 3.16 zeigt die auf dem Gestell montierte Siebtrommel (zu diesem Zeitpunkt noch ohne Pendelkugellager).



Abbildung 3.16: Auf dem Gestell montierte Siebtrommel.

Nachdem durch die rechnerischen Prüfungen die Entscheidung für den Einsatz des Motors aus dem Technikum Kappelrodeck gefallen war, wurde im nächsten Arbeitsschritt eine Auffangwanne aus verzinktem Feinblech unterhalb der Siebtrommel montiert. Die Wanne besteht aus einem Auslauf sowie zwei weiteren Teilelementen, welche als Wandung der Wanne dienen. Am oberen Rand wurde die Wanne abgekantet, so dass sie am Gestell verschraubt werden konnte. Am Stoß wurden die beiden Elemente, von denen eines einen leichten Überstand aufweist, vernietet und mit Silikon abgedichtet. Abbildung 3.17 zeigt die in das Gestell eingehängte Wanne. Zudem ist die Wanne samt ihrer Vermaßung im Anhang B Blatt 5 dargestellt.



Abbildung 3.17: Gestell der Siebmaschine mit Siebtrommel und Wanne (ohne Auslauf).

Um die Siebmaschine mühelos befüllen zu können, wurde ein Trichter montiert, der sich von einem Durchmesser von 244 mm auf 150 mm verjüngt und in ein, um 50° angestelltes, Einlaufrohr übergeht (siehe Anhang B, Blatt 15, 16 & 17). Das Einlaufrohr wurde in die Siebtrommel eingeführt, damit diese im späteren Betrieb sauber befüllt werden kann. Bei der Befüllung wurde der Big Bag mit den Holzpellets per Kran über die Siebmaschine gehoben und der untere Auslauf des Big Bags in den Trichter gehängt. Um den Trichter öffnen und schließen und dadurch den Durchsatz grob dosieren zu können, wurde ein Flachschieber eingebaut. Dieser Schieber wird außerhalb des Trichters über zwei Schienen geführt. Der Trichter wurde mit einer Halterung am Gestell der Siebmaschine per Schraubverbindung befestigt.

Zur Vermeidung von Staubwolkenbildung während des Siebvorganges wurde die Siebtrommel gänzlich verkleidet. Hierfür wurden drei Stützbögen aus Flacheisen gebogen, die am Gestell montiert über die Siebtrommel führen (siehe Anhang B, Blatt 9). Jeweils ein Bogen wurde in Höhe der Öffnungen der Siebtrommel angebracht. Der dritte Bogen wurde mittig platziert. Auf die Stützbögen wurden Blechhauben gesetzt, um

die Siebmaschine von oben zu verschließen. Diese Hauben bestehen aus gebogenen und gekantetem verzinktem Blech, so dass sie auf dem Gestell verschraubt werden können. Auch an den Stirnseiten der Siebtrommel wurden Bleche zur Verkleidung eingepasst. Sowohl auf der Motor- als auch auf der Lagerseite wurden jeweils zwei Bleche montiert. Jeweils ein Blech reicht von der Staubwanne bis auf Höhe der Hohlwelle. Von dort aus reicht das jeweils zweite Blech bis zum Scheitelpunkt des Stützbogens oberhalb der Siebtrommel (siehe Anhang B, Blatt 12 & 13). In das Blech auf der Motorseite wurden Aussparungen für die Welle und das Eintragsrohr geschnitten. Das Blech auf der Lagerseite besteht hingegen aus zwei sichelförmigen Teilelementen, die um die Trommel herum führen. Die Bleche wurden an den Rändern abgekantet, damit sie an der Staubwanne vernietet und auf den Stützbögen angeschraubt werden konnten. Die Nietverbindungen wurden abschließend mit Silikon abgedichtet. Zwischen die Kante der Blechhaube und dem Gestell wurde eine Banddichtung geklebt, ebenso in die Spalte zwischen den Hauben und den Stützbögen. Abbildung 3.18 zeigt die Siebmaschine mit den aufgesetzten Hauben und den Verkleidungen auf den Stirnseiten.



Abbildung 3.18: Siebmaschine mit aufgesetzter Haube.

Auch der Siebtrommel wurde auf der Austragsseite ein Blech zum Schutz vor Staubeinmission in den Außenraum eingesetzt. Dieses kreisförmige Blech wurde auf den Durchmesser der Siebtrommel zugeschnitten. Um den Austrag der Pellets trotz des Stirnbleches zu ermöglichen, wurde eine Aussparung in einem Winkel von 55° vorgenommen. Die dabei entstandenen Kanten wurden zum Schutz vor Verletzungen mit einem Kantenschutz aus Gummi abgedeckt. Letzteres gilt auch für die Kante der aus der Siebmaschine herausragenden Siebtrommel. Das Stirnblech wird mit Hilfe einer Halterung, welche mit dem Gestell der Siebmaschine verschraubt ist, in Position gehalten (siehe hierzu Abbildung 3.19).

Ein Testlauf der Siebmaschine brachte zufriedenstellende Ergebnisse. Die aus der Siebmaschine ausgetragene Fein- und Grobfraktion wurden einer Siebanalyse unterzogen. Dabei werden die Massenanteile der Korngrößenintervalle des zu untersuchenden



Abbildung 3.19: Stirnblech der Siebmaschine (noch ohne Kantenschutz).

Schüttguts bestimmt. Abbildung 3.20 zeigt die Anteile der Fraktionen bezogen auf die Feingut- und Grobgutmasse. Da die Siebtrommel eine Lochweite von 3,5 mm besitzt, ergibt sich eine theoretische Trenngrenze von 3,5 mm. Das bedeutet, dass das abgeseibte Feingut Partikel bis zu einer Korngröße von 3,5 mm Durchmesser beinhalten sollte. Das Grobgut sollte demgegenüber alle Partikel oberhalb einer Korngröße von 3,5 mm Durchmesser enthalten. Betrachtet man die Ergebnisse in Abbildung 3.20 erkennt man, dass der Feinanteil einen geringen Anteil an Überkorn aufweist. Ebenso weist das Grobgut einen geringen Anteil an Unterkorn auf. Die reale Trenngrenze liegt nach [8] bei der Korngröße, welche zu gleichen Teilen in Fein- und Grobgut vorliegt. Demnach lässt sich eine Trenngrenze von 3,78 mm ermitteln. Diese liegt um 7,4 % über der theoretischen Trenngrenze und ist somit akzentabel.

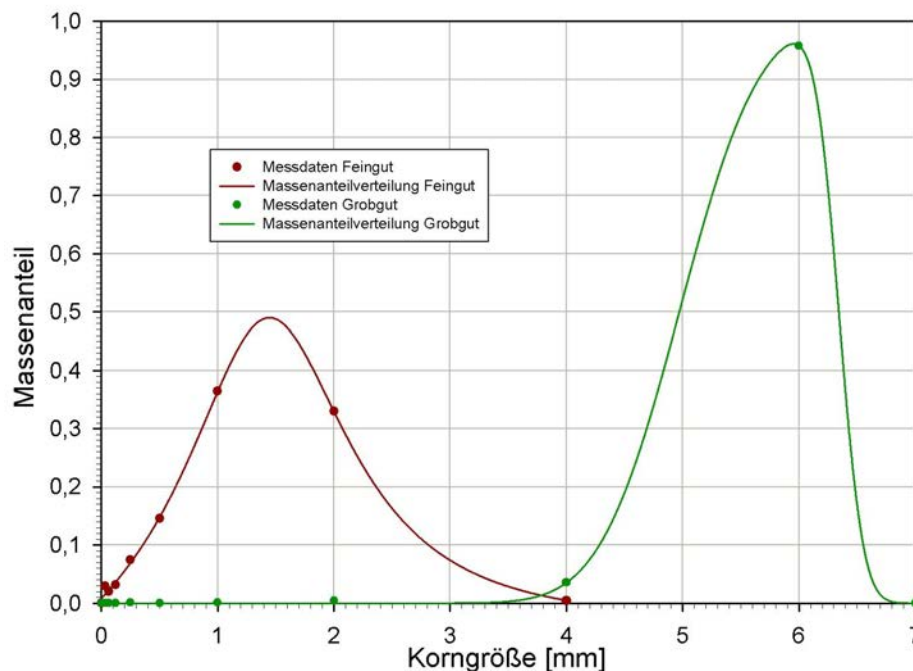


Abbildung 3.20: Anteile der Fraktionen der Feingut- und Grobgutmasse.

Kapitel 4

Durchführung der Versuche

4.1 Versuchsprogramm und Allgemeines

Aufgrund der Kürze der zur Verfügung stehenden Zeit und der Limitierung durch den experimentellen Aufbau konnte lediglich der Einfluss von vier Parametern auf die Staubwolkenbildung im Silo untersucht werden. Aus Überlegungen und der Erfahrung von [1],[2],[3],[4] heraus wurden folgende Parameter gewählt:

1. Feinanteil (Abrieb)
2. Füllstand im Silo H
3. Förderleistung des Elevators \dot{P}
4. Messkopfanordnung

Deshalb wurde das in Tabelle 4.1 aufgelistete Versuchsprogramm aufgestellt und abgearbeitet.

Die Holzpellets wurden aus dem Silo ausgelassen, gesiebt und in 9 nummerierte Big Bags verpackt. Die Säcke Nr. 5 und 6 wurden für die Erzeugung von Feinanteil verwendet. Die für die Versuche verwendeten Pellets wurden nach jedem Versuch abgesiebt, um einerseits den Abrieb zu sammeln und andererseits für jeden Versuch gleiche Ausgangsbedingungen (abriebsfreie Holzpellets) zu schaffen. Nach dem Absieben wurden die Pellets wieder in ihre Herkunfts-Big Bags verpackt.

Als erster Parameter wurde die Messkopfanordnung variiert (siehe Tabelle 4.2). Hätten sich dabei signifikante Unterschiede in den Messergebnissen ergeben, die eindeutig auf die Anordnung der Messköpfe zurückzuführen gewesen wären, hätte das Versuchsprogramm daran angepasst werden müssen.

Anschließend wurde die Füllhöhe im Silo zu Beginn der Förderung variiert. Auch für diese Versuche wurden gesiebte Holzpellets verwendet, um nicht gleichzeitig zwei Parameter zu verändern.

Danach wurde erstmals ein Versuch mit 30 % Feinanteil durchgeführt mit einem darauf folgenden Referenzversuch.

Nr.	Parameter			Messpunktschema	Anmerkung
	Feinanteil [%]	H [m]	\dot{P} [t/h]		
1	0	0	10	Variante 1	Big Bag 1
2	0	0	10	Variante 2	Big Bag 1
3	0	1,21	10	Variante 1	Big Bags 2 + 7
4	0	1,96	10	Variante 1	Big Bags 3 + 8
5	0	2,87	10	Variante 3	Big Bags 4 + 9
6	30	1,21	10	Variante 1	Big Bags 1 + 2
7	30	1,21	10	Variante 1	Big Bags 3 + 4, Ref. 6
8	30	0	10	Variante 1	Big Bag 1
9	30	0	6	Variante 1	Big Bag 2
10	30	0	20	Variante 1	Big Bag 3
11	0	0	10	Variante 1	Big Bag 7, Ref. 2
12	0	0	10	Variante 1	Big Bag 8, Ref. 2
13	0	0	10	Variante 1	Big Bag 9, Ref. 2

Tabelle 4.1: Versuchsprogramm. Ref. X bedeutet Referenzversuch zu Versuch Nr. X.

Als letzter Parameter wurde die Förderleistung des Elevators verändert, wobei diese Versuche ebenfalls mit einem definierten Holzpellet-Feinanteil-Gemisch durchgeführt wurden. Hier wurde bei höchster Förderleistung der worst-case-Zustand erwartet. Abschließend wurden drei Referenzversuche zu Versuch Nr. 2 durchgeführt um zu sehen, wie reproduzierbar die Versuchsergebnisse sind.

Variante 1	U_1	U_2	M_1	M_2	O_1	O_2
Einschubtiefe [mm]	100	400	100	400	400	600
Höhe über Silokonusoberkante [mm]	750	750	2.000	2.000	4.000	4.000
Variante 2	U_1	U_2	U_3	M_1	M_2	O_2
Einschubtiefe [mm]	100	400	600	100	400	600
Höhe über Silokonusoberkante [mm]	750	750	750	2.000	4.000	4.000
Variante 3	M_1	M_2	M_3	O_1	O_2	O_3
Einschubtiefe [mm]	100	400	600	400	600	100
Höhe über Silokonusoberkante [mm]	2.000	2.000	2.000	4.000	4.000	4.000

Tabelle 4.2: Orte der Messköpfe im Silo bei den Anordnungsvarianten 1, 2 und 3. Die Einschubtiefe ist die Strecke vom Mittelpunkt des Typ 7-Messvolumens bis zur Silowand (siehe Abbildung 3.7).

4.2 Versuchsbeschreibung

4.2.1 Förderung gesiebter Holzpellets ins leere Silo

Zu Beginn des ersten Versuches wurden die Steuergeräte der SKGs eingeschaltet und so eingestellt, dass die Spannungsanzeige 1000 mV anzeigt. Da die angezeigte Spannung einem Drift unterliegt war es wichtig, die Geräte so früh wie möglich vor der Staubkonzentrationsmessung einzuschalten und vor dem Messbeginn gegebenenfalls nachzuregeln. Der Datenlogger wurde vorbereitet.

Anschließend wurde ein Big Bag mit gesiebten Holzpellets per Kran über die Schüttguttrutsche am Vorlagetrichter des Elevators gehoben. Hier wurde der untere Auslauf des Big Bags in die Schüttguttrutsche geführt und vorsichtig geöffnet. Die Holzpellets rieselten so über die Schüttguttrutsche in den Vorlagetrichter, dessen Auslaufschieber zum Elevator hin geschlossen sein musste. Nach Befüllung des Vorlagetrichters wurde die Schüttguttrutsche zurück gebaut und der Deckel des Vorlagetrichters geschlossen. Anschließend wurde geprüft, ob der Siloauslauf geschlossen ist. Für die spätere Siloentleerung wurde ein leerer Big Bag an die dafür vorgesehenen Halterungen unter dem Siloauslauf gehängt und diesem eine Palette untergelegt.

Der Elevator wurde nun kurz in Betrieb genommen und das Auslassventil des Vorlagetrichters so lange geöffnet, bis alle Becher im Aufgangsschacht des Elevators gefüllt waren¹. Der Vorlagetrichter des Elevators wurde erneut mit Holzpellets aufgefüllt.

Nach einer erneuten Überprüfung der Steuergeräte der SKGs auf eine Ausgangsspannung von 1000 mV wurde der Elevator in Betrieb genommen und gleichzeitig die Datenspeicherung am Datenlogger eingeschaltet. Nach einer Förderdauer von in der Regel ca. 90 s (entspricht bei einer Förderleistung von 10 t/h einer Fördermenge von 250 kg) wurde die Förderung gestoppt. Die Datenaufzeichnung wurde gestoppt sobald sich die Spannungsanzeige an den SKGs nicht mehr veränderte. Dies wurde als Beendigung der Sedimentationsphase gewertet.

Anschließend wurden die Holzpellets aus dem Silo in den Big Bag abgelassen. Der auf der Palette stehende Big Bag wurde per Stapler angehoben, die Schlaufen des Big Bags aus der Halterung am Silo genommen und der Big Bag zur Siebmaschine transportiert. Hier wurde der Big Bag per Kran über die Siebmaschine gehoben und über deren Einlauftrichter entleert. Am Feingutaustrag der Siebmaschine wurde ein Sack zur Aufnahme des Abriebs befestigt. Unter dem Auslauf der Siebtrommel wurde eine Palette positioniert, über der ein leerer Big Bag an den angehobenen Gabeln eines Gabelstaplers aufgespannt wurde (siehe Abbildung 4.1). Unter Kontrolle des kontinuierlichen Auslaufs der Pellets aus dem Big Bag wurde der gesamte Inhalt des Big Bags gesiebt. Der aufgefangene Feinanteil wurde gelagert und die Pellets nach augenscheinlicher Prüfung auf Veränderung für den nächsten Versuch verwendet.

Abschließend wurden die Messköpfe ausgebaut, gereinigt und erneut montiert.

Versuch Nr. 2 wurde auf die gleiche Art und Weise durchgeführt, jedoch mit dem Unterschied, dass auf den Messpunkt O_1 verzichtet und stattdessen ein zusätzlicher Messpunkt U_3 in der unteren Messebene eingeführt wurde (siehe Tabelle 4.2).

¹Sobald das Geräusch von herabfallenden Pellets im Fallrohr zwischen Elevator und Silo zu vernehmen war, wurde der Elevator abgeschaltet.



Abbildung 4.1: Siebmaschine im Betrieb.

4.2.2 Förderung gesiebter Holzpellets ins teilbefüllte Silo

Bei den Versuchen mit teilbefülltem Silo wurde im ersten Arbeitsgang die Pelletvorlage in das Silo eingetragen. Der richtige Füllstand wurde durch Berechnung des Fördervolumens des Elevators und anschließender Förderzeitmessung eingestellt:

Der Konus des Silos fasst laut dem ersten Summanden der Gleichung (2.3) ein Volumen von

$$V_K = \frac{\pi h_K}{12} (D^2 + dD + d^2) = 0,991 \text{ m}^3 \quad (4.1)$$

Mit der Schüttdichte der Holzpellets von $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$ ergibt sich daraus eine Masse von

$$m_K = \rho V_K = 594,6 \text{ kg} \quad (4.2)$$

Über die Förderleistung des Elevators ließ sich damit die Dauer t_f bis zur vollständigen Silokonussfüllung berechnen zu

$$t_f = \frac{m_K}{\dot{P}} = \frac{594,5 \text{ kg} \cdot 3.600 \frac{\text{s}}{\text{h}}}{10.000 \frac{\text{kg}}{\text{h}}} = 214,0 \text{ s} \quad (4.3)$$

Dementsprechend wurde bei den Versuchen Nr. 3 und 6 über eine Förderdauer von 214 Sekunden Pellets ins Silo gefördert, um die Produktvorlage einzufüllen.

Bei den Versuchen Nr. 3 bis 5 wurde das Silo von Versuch zu Versuch nicht entleert, sondern das vom Vorgängerversuch eingeförderte Material gleich als Teil der Produktvorlage genutzt. Durch die festgelegte Förderdauer von $t_f = 90$ s während eines Versuches konnte über die Förderleistung die Fördermasse m_f und damit das eingeförderte Volumen V_f berechnet werden. Mit (2.3) folgt damit die durch den Versuch eingetragene zusätzlich Füllhöhe h_f .

$$m_f = 250 \text{ kg} \quad \Rightarrow \quad V_f = 0,4166 \text{ m}^3 \quad \Rightarrow \quad h_f = 207 \text{ mm} \quad (4.4)$$

Auch bei den weiteren Versuchen mit Produktvorlage wurde diese Methode benutzt, um die gewünschten Füllhöhen einzustellen. Vereinfachend wurde hierbei die Oberfläche der Holzpellets im Silo als Ebene und nicht als Schüttkegel angenommen. Eine Übersicht der Füllstände vor und nach den Versuchen ist in Abbildung 4.2 zu sehen.

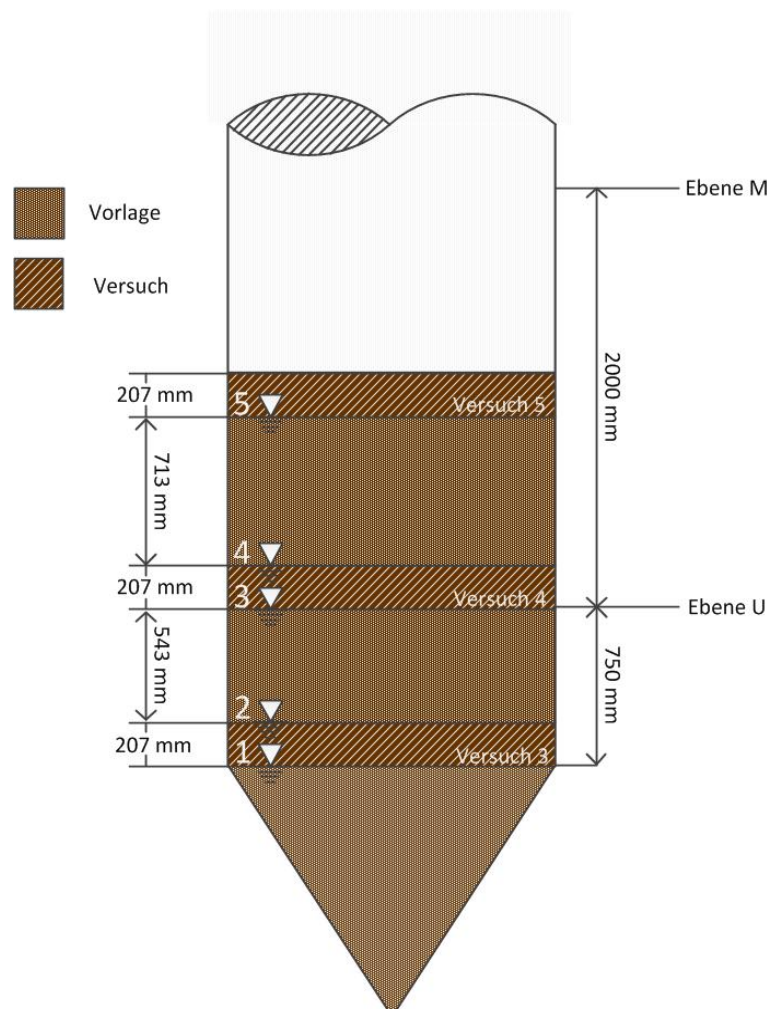


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der Füllstände vor und nach den Versuchen Nr. 3 bis 5. Es bedeuten: 1 - gefüllter Konus, 2 - Füllstand nach dem dritten Versuch, 3 - Vorlage für den vierten Versuch, 4 - Füllstand nach dem vierten Versuch und 5 - Vorlage für den fünften Versuch.

Weil die Messköpfe bei diesen Einfüllvorgängen verschmutzten, wurden sie bei den Versuchen Nr. 3 bis 7 nach Erstellen der Produktvorlage ausgebaut, gereinigt und anschließend wieder eingesetzt. Für den Versuch Nr. 5 wurden die beiden Messköpfe aus der unteren Messebene ausgebaut, gereinigt und jeweils einer davon in die mittlere und obere Messebene eingebaut (Variante 3, siehe Tabelle 4.2).

Nach den Versuchen mit Produktvorlage wurden Elevator und Silo entleert und die Holzpellets gesiebt. Das hierbei anfallende Feingut reichte aus, um die Versuche mit erhöhtem Abriebanteil durchzuführen.

4.2.3 Förderung ungesiebter Holzpellets

Die Versuche mit den ungesiebten Pellets erfolgten im Wesentlichen wie in den beiden vorigen Abschnitten beschrieben. Der einzige Unterschied lag in der Aufbereitung des Förderproduktes. Dazu wurde die Masse eines mit gesiebten Pellets gefüllten Big Bags mit Hilfe einer Kranwage bestimmt. Das zu fördernde Produkt sollte laut Abschnitt (2.4) aus einer Mischung aus 70 % Grobanteil und 30 % Feinanteil bestehen, d. h. die gewogene Masse im Big Bag stellten diese 70 % Grobanteil dar. Bezogen auf diese Masse wurde das Gewicht des unterzumischenden Feinanteils berechnet. Während der Befüllung des Vorlagetrichters des Elevators wurde der Feinanteil den Holzpellets zugegeben. Bei dieser Mischung wird im Folgenden von ungesiebten Pellets gesprochen.

Die Versuche Nr. 6 bis 10 wurden mit ungesiebten Pellets durchgeführt, wobei Versuch Nr. 7 als Referenzversuch für Versuch Nr. 6 ausgelegt wurde.

4.3 Versuchsergebnisse

Im Großen und Ganzen konnten alle 13 Versuche an insgesamt 12 Versuchstagen erfolgreich durchgeführt werden. Die Randbedingungen zu diesen Versuchen sind in Tabelle D.1 aufgelistet.

Vor Beginn der Versuchsreihe wurde eine Probe der angelieferten Pellets entnommen. Um einen visuellen Eindruck von der Veränderung der Pellets durch die Versuche zu bekommen, wurde nach Beendigung der Versuchsreihe eine Probe der Pellets aus Big Bag 1 entnommen. In Abbildung 4.3 sind beide Proben nebeneinander fotografisch dargestellt. Deutlich ist eine Zerkleinerung der Holzpellets durch die mechanische Beanspruchung während der Versuche zu erkennen.

Für die spätere Auswertung bzw. Diskussion mussten die Messdaten aufgearbeitet werden. Zum einen war die Umrechnung der gemessenen Spannungen in Staubkonzentrationen notwendig und zum anderen mussten Fehler aus den Messdaten heraus korrigiert werden, die durch die Verschmutzung der Messkopfoptiken durch den vorhandenen Staub während der Messung entstanden². Die Aufarbeitung der Messergebnisse wird im Folgenden exemplarisch an der Spannungskurve der Messstelle O_1 des Versuchs Nr. 3 beschrieben. Abbildung 4.4 zeigt die entsprechenden Rohdaten.

²Dieses Problem besteht bei dem SKG 5 Typ 7 generell. Bei dem weiter entwickelten SKG 6 Typ 17 konnte diese Schwäche beseitigt werden. Leider besitzt die FSA zur Zeit nur eines dieser Geräte.



Abbildung 4.3: Holzpellets vor (links) und nach (rechts) der Versuchsreihe.

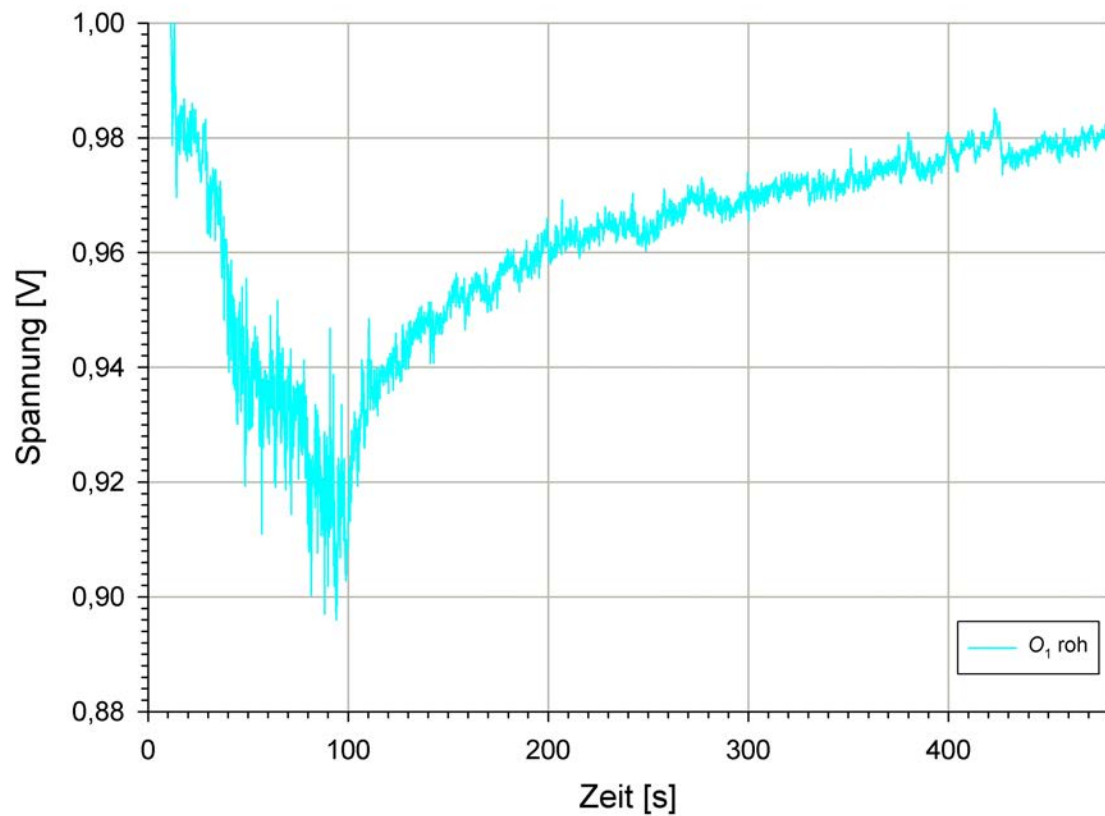


Abbildung 4.4: Aus dem Datenlogger ausgelesene Spannungsmesswerte für die Messstelle O_1 bei Versuch Nr. 3.

In einem ersten Schritt wird der gerätebedingte (elektronische) Nullpunktdrift korrigiert, indem mit Hilfe einer speziellen Software³ dieser Drift subtrahiert oder addiert wird (abhängig von der Richtung des Drifts).

Die SKGs wurden im Modus „Invertierung aus“ betrieben, was bedeutet, dass sich steigende Staubkonzentration in sinkendem Spannungswert niederschlägt und umgekehrt. Saubere Luft erzeugt den Spannungswert 1 V. Für die weitere Datenbearbeitung wurden die Kurven computergestützt invertiert, d. h. saubere Luft ruft den Spannungswert 0 V hervor und maximale Staubbiladung die Anzeige 1 V. Nach der Drift-Korrektur und Invertierung sieht der ausgewählte zeitliche Spannungsverlauf aus wie in Abbildung 4.5 gezeigt. Im Folgenden wird diese Spannungskurve O_1 genannt.

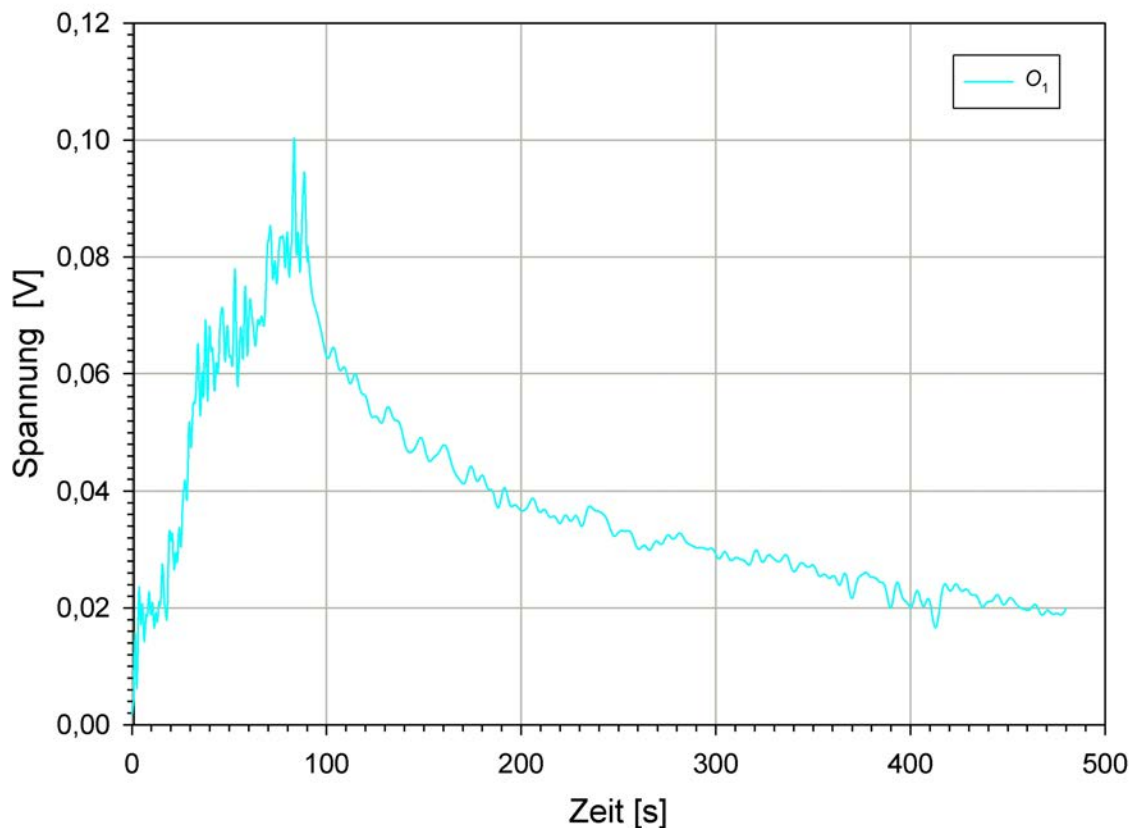


Abbildung 4.5: Spannungsverlauf der Messstelle O_1 bei Versuch Nr. 3 nach der Drift-Korrektur und Invertierung.

Es ist zu erkennen, dass die Messspannung mit Beginn der Pelletförderung steigt. Nach ca. 90s wurde der Elevator abgeschaltet und die Sedimentationsphase begann. Gegen Ende der Sedimentationsphase nähert sich die Messspannung asymptotisch einem konstanten Wert. Dieser Wert ungleich von Null zeigt den Verschmutzungsgrad der Linsen an, welcher eine bestimmte Staubkonzentration vortäuscht. Während des Versuchs setzte sich mit wachsender Messdauer mehr und mehr aufgewirbelter Staub auf den Linsen der Messköpfe ab und verfälscht somit zunehmend die Messspannung. Diese Messwertverfälschung muss nachträglich so gut wie möglich korrigiert werden.

³Hier die Software TableCurve 2D, welche hervorragend für die tabellenkalkulatorische Bearbeitung und das Fitten von Messdaten geeignet ist.

Nach [3] kann angenommen werden, dass die Verschmutzung der Linsen proportional zur Staubkonzentration c und zur Messdauer t ist. Die Proportionalitätskonstante wird hier Verschmutzungsfaktor η genannt. Damit gilt für die am SKG angezeigte Spannung $U(t)$ zum Zeitpunkt t die Gleichung

$$U(t) = U_w(t) + \eta \int_0^t U_w(t) dt \quad (4.5)$$

mit $U_w(t)$ als die am SKG angezeigten Spannung wenn die Linsen des Messkopfes sauber wären. Aufgelöst nach $U_w(t)$ folgt

$$U_w(t) = U(t) - \eta \int_0^t U_w(t) dt \quad (4.6)$$

mit

$$f(t) = \eta \int_0^t U_w(t) dt \quad (4.7)$$

als Verschmutzungsfunktion der Linsen. Die Integralgleichung (4.5) bzw. (4.6) ist analytisch nicht zu lösen, weil zwei Unbekannte darin vorkommen und für die zeitabhängige Messspannung $U(t)$ kein geschlossener Term vorliegt. Man erkennt an (4.6), dass die gesuchte Messspannung $U_w(t)$ bekannt ist, wenn die Verschmutzungsfunktion $f(t)$ zugänglich ist. Mit Unterstützung von [3] wurde deshalb ein Näherungsverfahren entwickelt, um die Verschmutzungsfunktion $f(t)$ abzuleiten.

Bei diesem Verfahren erfolgte im ersten Schritt die Berücksichtigung der Verschmutzung zunächst durch eine lineare Korrektur. Dazu wurde aus den grob korrigierten Messdaten aus Abbildung 4.5 der Messpunkt (t_P, U_P) herausgegriffen, an dem die Spannungskurve augenscheinlich in einen konstanten Spannungswert übergeht (im Beispiel der Endpunkt). Dieser Punkt markiert das Ende der Sedimentationsphase im Silo. Mit Hilfe der Koordinaten des ausgewählten Punktes wurde die lineare Funktion

$$U_0(t) = \frac{U_P}{t_P} t \quad (4.8)$$

erzeugt. Die Gerade $U_0(t)$ bildet den Untergrund, der die Linsenverschmutzung als linear ansteigende Funktion darstellt. Subtraktion dieses linearen Untergrunds von der Spannungskurve O_1 lieferte den in Abbildung 4.6 dargestellten linear korrigierten Spannungsverlauf.

Der so korrigierte Spannungsverlauf wurde nun zunächst mit dem $U_w(t)$ in Gleichung (4.7) identifiziert. Das Integral über diesem korrigierten Spannungsverlauf ist demnach das Integral über $U_w(t)$ aus Gleichung (4.7). Die Integration wurde mit der Software TableCurve 2D durchgeführt, indem ein Fit durch den linear korrigierten Spannungsverlauf gelegt (Abbildung 4.7) und dieser anschließend numerisch integriert wurde.

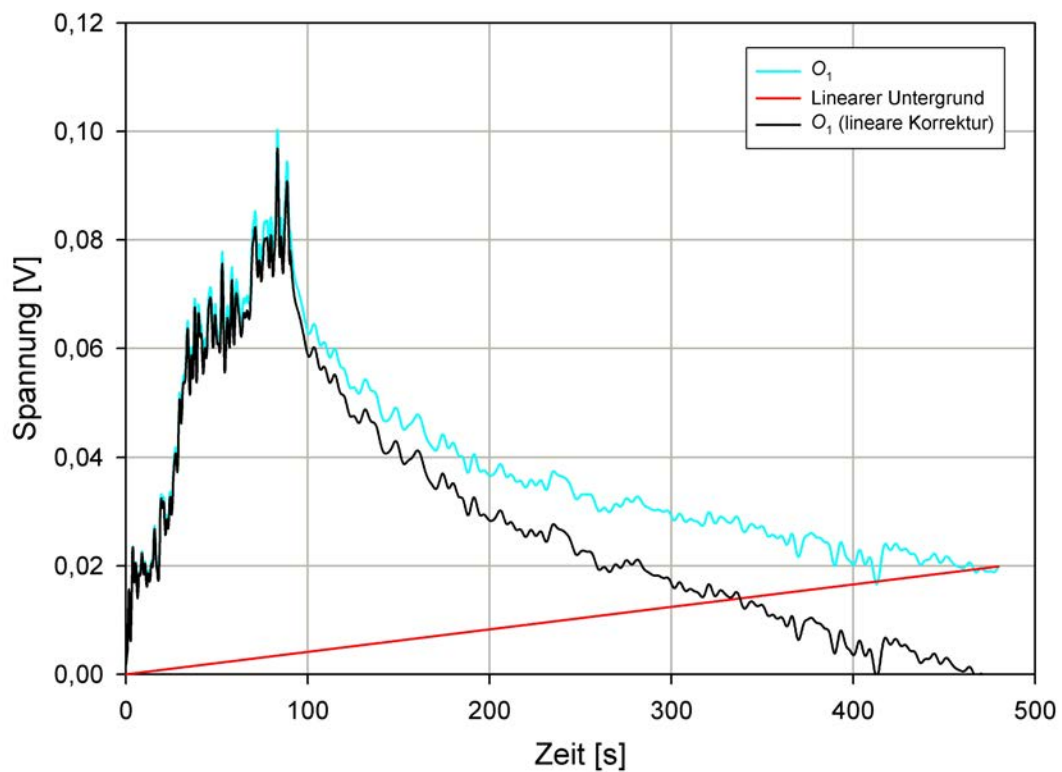


Abbildung 4.6: Spannungskurve O_1 , linearer ermittelter Untergrund $U_0(t)$ (rot) und linear korrigierter Spannungsverlauf (schwarz).

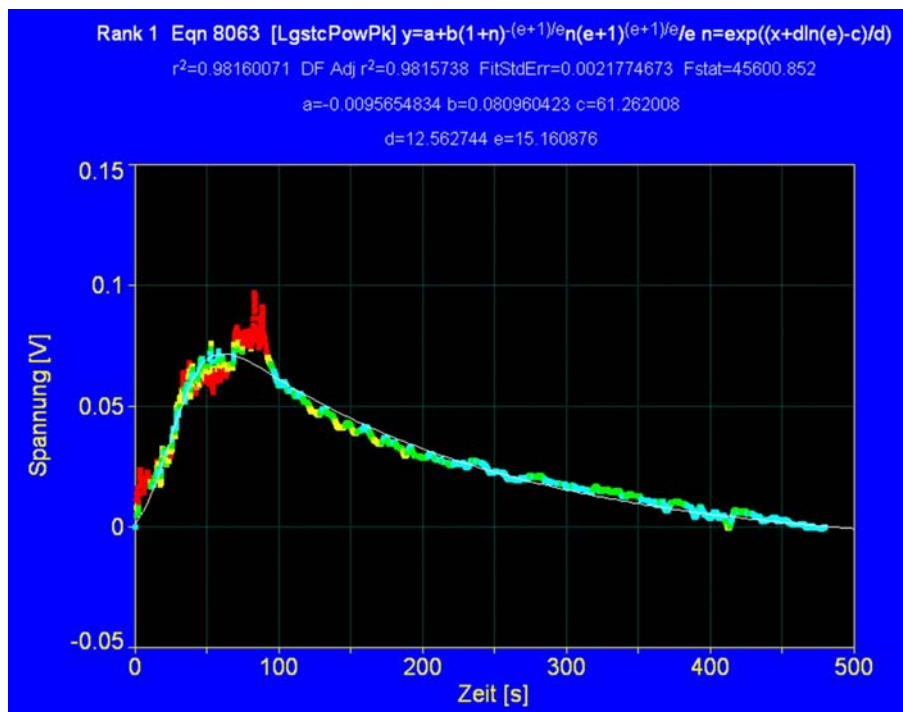


Abbildung 4.7: Fit durch die linear korrigierten Messdaten der Messstelle O_1 von Versuch Nr. 3.

Um die Verschmutzungsfunktion $f(t)$ zugänglich zu machen, musste noch der Verschmutzungsfaktor η beschafft werden. Letztgenannter ergab sich aus der Überlegung, dass am Ende der Sedimentationsphase im Silo – also zum Zeitpunkt t_P – die Bedingung $U_w(t_P) = 0 \text{ V}$ gelten muss. Da zu diesem Zeitpunkt kein Staub mehr in der Luft ist, wird die Anzeige $U(t_P)$ nur von der Linsenverschmutzung erzeugt. Übertragen in die Gleichung (4.5) liefert

$$U(t_P) = \eta \int_0^{t_P} U_w(t) dt \quad (4.9)$$

Auflösen von (4.9) nach η ergibt

$$\eta = U(t_P) \left(\int_0^{t_P} U_w(t) dt \right)^{-1} \quad (4.10)$$

Damit konnte die Verschmutzungsfunktion $f(t)$ für die Spannungskurve O_1 bestimmt werden. Beide sowie das zugehörige Integral über $U_w(t)$ sind in Abbildung 4.8 gezeigt. Anschließend wurde die Verschmutzungsfunktion von der Spannungskurve O_1 subtrahiert. Da es sich hierbei um eine nicht-lineare Korrektur handelt wird diese im Folgenden auch so bezeichnet. Das Ergebnis dieser nicht-linearen Korrektur zeigt Abbildung 4.9.

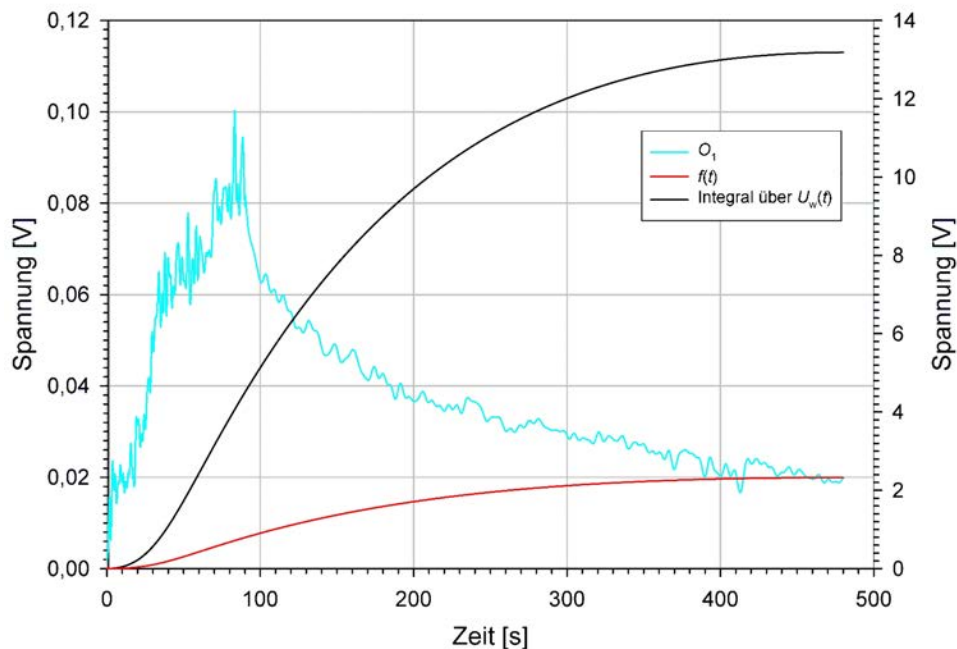
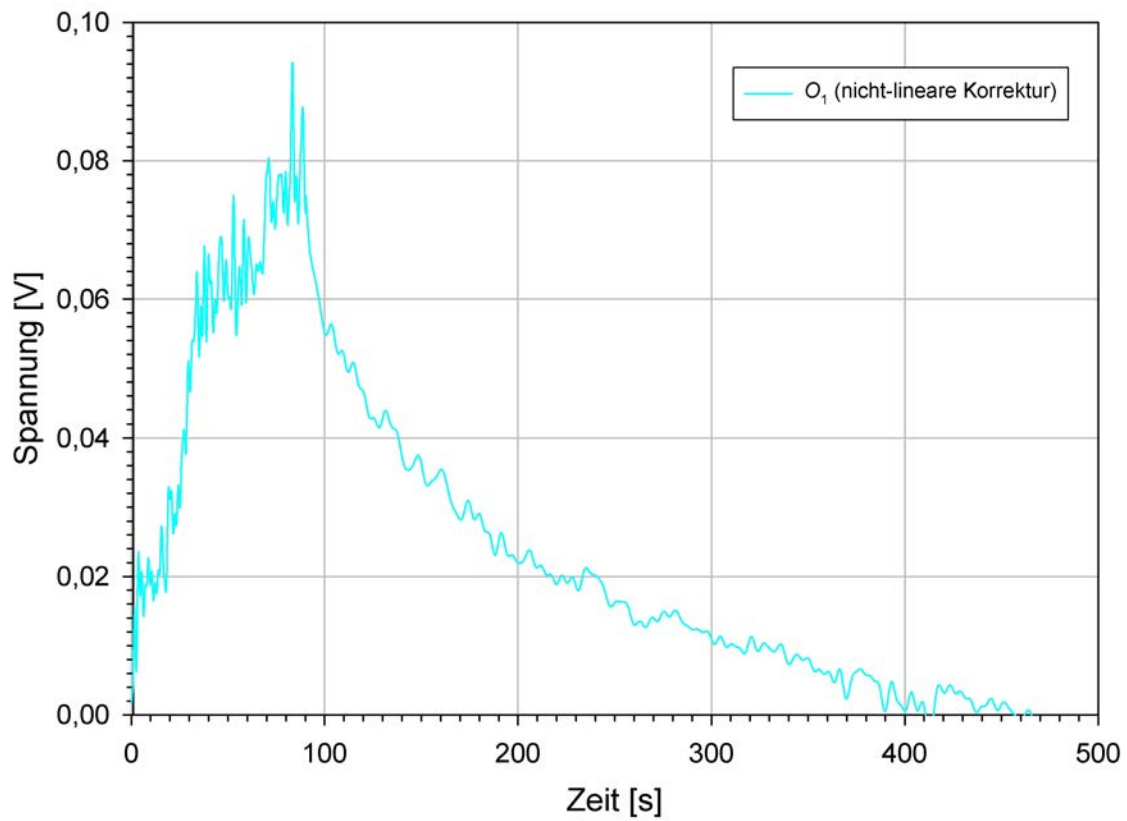
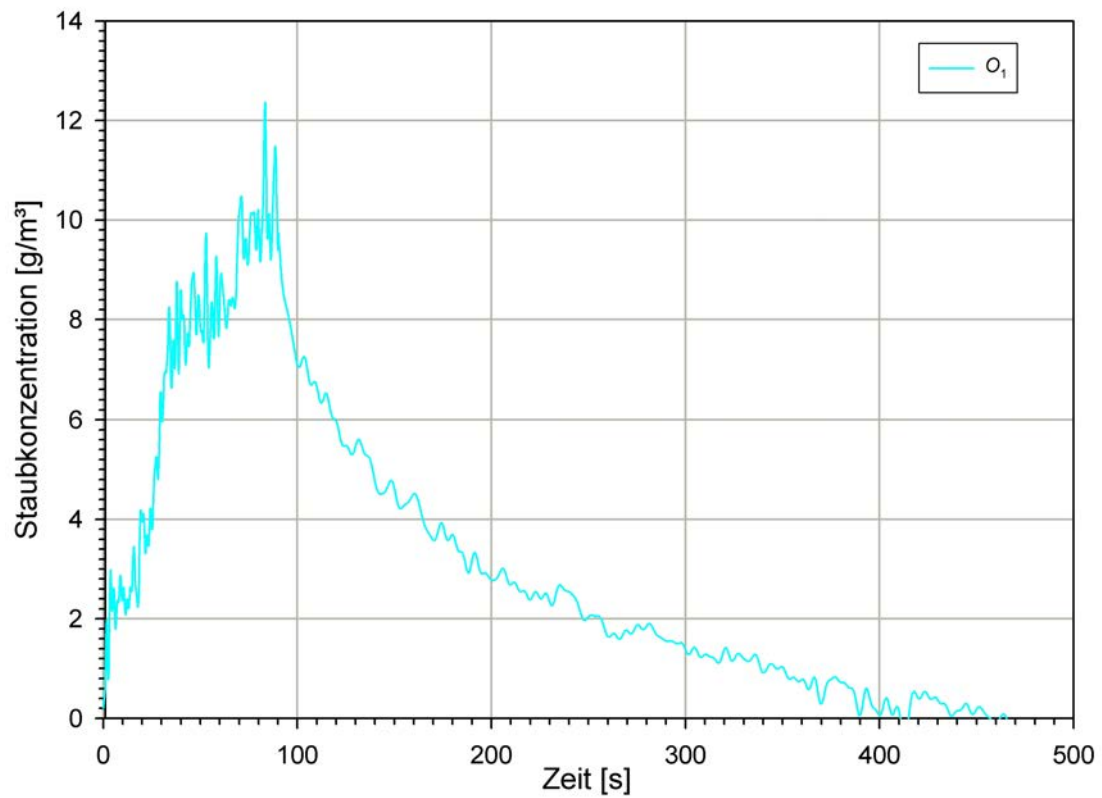


Abbildung 4.8: Spannungskurve O_1 , das zugehörige Integral über $U_w(t)$ und die zugehörige Verschmutzungsfunktion.

Abbildung 4.9: Nicht-lineare Korrektur der Spannungskurve O_1 des Versuchs Nr. 3.Abbildung 4.10: Staubkonzentrationsverlauf an der Messstelle O_1 bei Versuch Nr. 3.

Abschließend wurde die nicht-linear korrigierte Spannungskurve mit Hilfe von Formel (3.2) in eine Staubkonzentrationskurve umgerechnet. Das Resultat dieser Umrechnung ist in Abbildung 4.10 dargestellt. An der Messstelle O_1 des Versuchs Nr. 3 wurde damit eine maximale Staubkonzentration von $12,4\text{g/m}^3$ bestimmt.

Auf die beschriebene Weise wurden die Daten aller Messstellen jedes Versuchs aufgearbeitet. Die Staubkonzentrationskurven sind in Anhang D zusammengestellt.

4.4 Versuchsauswertung

4.4.1 Zeitlicher Verlauf der Staubkonzentration

Vor der eigentlichen Analyse der Messdaten müssen diese einer Prüfung auf Eignung unterzogen werden. Wichtig ist vor allem die Frage, ob sich während der Förderdauer von in der Regel ca. 90s ein ausgeprägtes Maximum in der Staubkonzentration einstellte. Wäre dies nicht der Fall, wären keine Aussagen über Explosionsrisiken möglich. Untersucht man die, nach Messorten und Versuchen aufgeschlüsselten, Staubkonzentrationskurven in Anhang D aufmerksam, stellt man fest, dass die Kurven in den meisten Fällen ein Plateau zum Ende der Förderdauer hin ausgebildet hatten. Hier kann man vom Erreichen eines Staubkonzentrationsmaximums sprechen. Wenige Kurven (knapp 9%) zeigten allerdings kein ausgeprägtes Maximum, d. h. augenscheinlich sieht es so aus, als ob bei weiterer Förderung die Staubkonzentrationen weiter gestiegen wären. Dies betrifft die Kurven U_i von Versuch Nr. 6 und 10, die Kurve U_1 von Versuch Nr. 11 sowie die Kurven M_i von Versuch Nr. 6. Weiterhin zeigten die Kurven an den Messorten U_i von Versuch Nr. 4 kein Maximum, was daran liegt, dass die beiden Messköpfe an den genannten Orten während der Förderzeit von den Holzpellets verschüttet wurden. Bei allen anderen genannten Kurven bzw. Versuchen war meist die untere Messebene betroffen. Dies erklärt sich dadurch, dass sich die Oberfläche des Schüttkegels während der Messung merklich an die untere Messebene annäherte. Weil erfahrungsgemäß die Staubkonzentration nahe über der Schüttkegeloberfläche am höchsten ist, wurde die Ausbildung eines Staubkonzentrationsmaximums durch die Annäherung dieser Oberfläche an die Messköpfe erschwert. Bei dem Versuch Nr. 10 kam hinzu, dass die Förderdauer kürzer war, als die sonst üblichen rund 90s. Der Grund dafür war die hohe Förderleistung, die zur Folge hatte, dass die dadurch höhere Menge an, vom Prallblech abprallende Pellets, den Abgangsschacht des Elevators verstopfen würde. Deshalb war die Ausbildung der Staubwolke vermutlich nicht vollständig.

Aufgrund der geringen Anzahl der Kurven ohne ausgeprägtes Staubkonzentrationsmaximum und weil die Gründe für die fehlenden Maxima bekannt sind, wurden die gewonnenen Staubkonzentrationskurven für die weitere Auswertung als geeignet angesehen. Eine Ausnahme bildet die Betrachtung des Explosionsrisikos in Kapitel 4.4.7. Dort wurde bei den Kurven ohne ausgeprägte Maxima ein Sicherheitszuschlag von rund 20% auf die gemessenen Spitzenwerte angesetzt, um die tatsächlichen maximalen Staubkonzentrationen c_{\max} abzuschätzen. Ein Vergleich aller Kurven eines Versuches bzw. ein Kreuzvergleich zwischen Versuchen mit gleichen bzw. ähnlichen Randbedingungen ergab die Höhe dieses Sicherheitszuschlages.

4.4.2 Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse

Der nächste wichtige Test der Messdaten auf Tauglichkeit ist die Prüfung auf Reproduzierbarkeit. Die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse ist die Grundvoraussetzung für das Ableiten von allgemeinen Aussagen, die auf den Messergebnissen beruhen.

Bis auf die Anordnung der Messköpfe wurden die Versuche Nr. 1, 2, 11, 12 und 13 mit den gleichen Randbedingungen durchgeführt, nämlich Förderung gesiebter Holzpellets in das leere Silo. Ebenso wurden die Versuche Nr. 6 und 7 mit gleichen Randbedingungen durchgeführt. Hier wurden ungesiebte Pellets in das Silo gefördert, wobei der Silokonus zuvor befüllt worden war.

Die Untersuchung auf Reproduzierbarkeit bestand im Vergleich der Kurvenformen und im Vergleich der erreichten Maximalwerte in der Staubkonzentration an identischen Messstellen zwischen den Versuchen mit gleichen Randbedingungen. In Abbildung 4.11, oben sind die Kurven der Messstelle M_1 , die dort während der Versuche Nr. 1, 2, 11, 12, und 13 aufgenommen wurden, gemeinsam in einem Diagramm dargestellt. In Tabelle 4.3 und Abbildung 4.11, unten wurden die, bei den genannten Versuchen gemessenen, maximalen Staubkonzentrationen zusammengestellt. In Abbildung 4.12 ist das gleiche für die Versuche Nr. 6 und 7 zu sehen. Bei der Bestimmung der Maxima wurden scharfe Peaks, die nur aus einem Messpunkt bestehen, nicht berücksichtigt. Diese Peaks entstanden dadurch, dass sich größere Partikel durch die Messvolumina der Typen 7 bewegten. An den Messorten mit dem Index 2 – also die Orte, welche näher an den herabfallenden Pellets lagen – entstanden vermehrt solche Peaks. Insbesondere aber am Messort O_2 . Der Grund dafür ist, dass der Messkopf an O_2 sehr tief in das Silo ragte und deshalb zuweilen Teile des Förderstroms auf den Messkopf prasselten und so in das Messvolumen des dort installierten Typs 7 gerieten.

Die zeitlichen Verläufe der Staubkonzentrationskurven in Abbildung 4.11, oben sind sehr ähnlich. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen in der Höhe ihres Maximalwertes und im Kurvenverlauf während der Sedimentationsphase. Letzt genannter wurde jedoch stark beeinflusst durch die Kurvenkorrekturprozedur, welcher in Kapitel 4.3 beschrieben wurde. Deshalb spiegeln diese Kurventeile nur bedingt die Realität wider.

Nr.	c_{\max} [g/m ³]						
	U_1	U_2	U_3	M_1	M_2	O_1	O_2
1	28,2	29,4	-	25,7	20,3	20,4	40,6
2	40,1	40,1	41,7	31,9	31,4	-	50,2
11	41,7	49,6	-	36,5	49,5	35,6	53,2
12	36,9	45,6	-	30,2	48,5	35,1	46,2
13	24,5	38,7	-	23,2	40,4	25,7	54,6
6	44,1	31,6	-	30,4	28,3	23,2	31,9
7	48,0	39,1	-	30,9	33,7	27,3	51,8

Tabelle 4.3: Maximal erreichte Staubkonzentration c_{\max} an den Messorten U_i , M_i und O_i bei den Versuchen Nr. 1, 2, 11, 12 und 13 sowie Nr. 6 und 7.

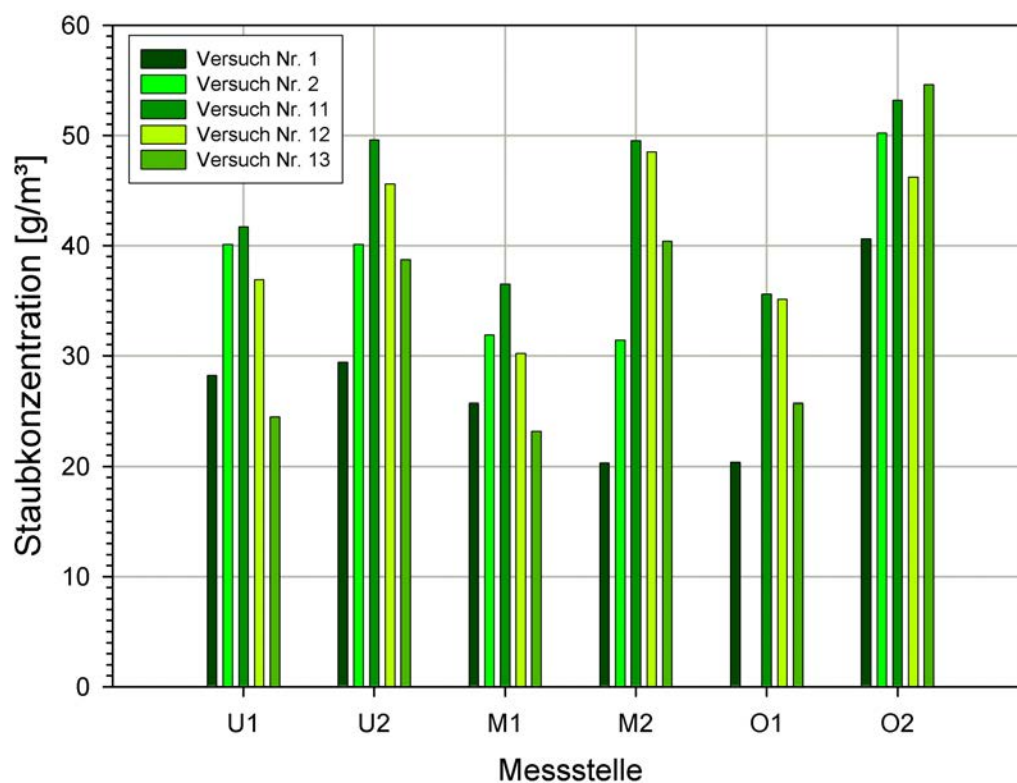
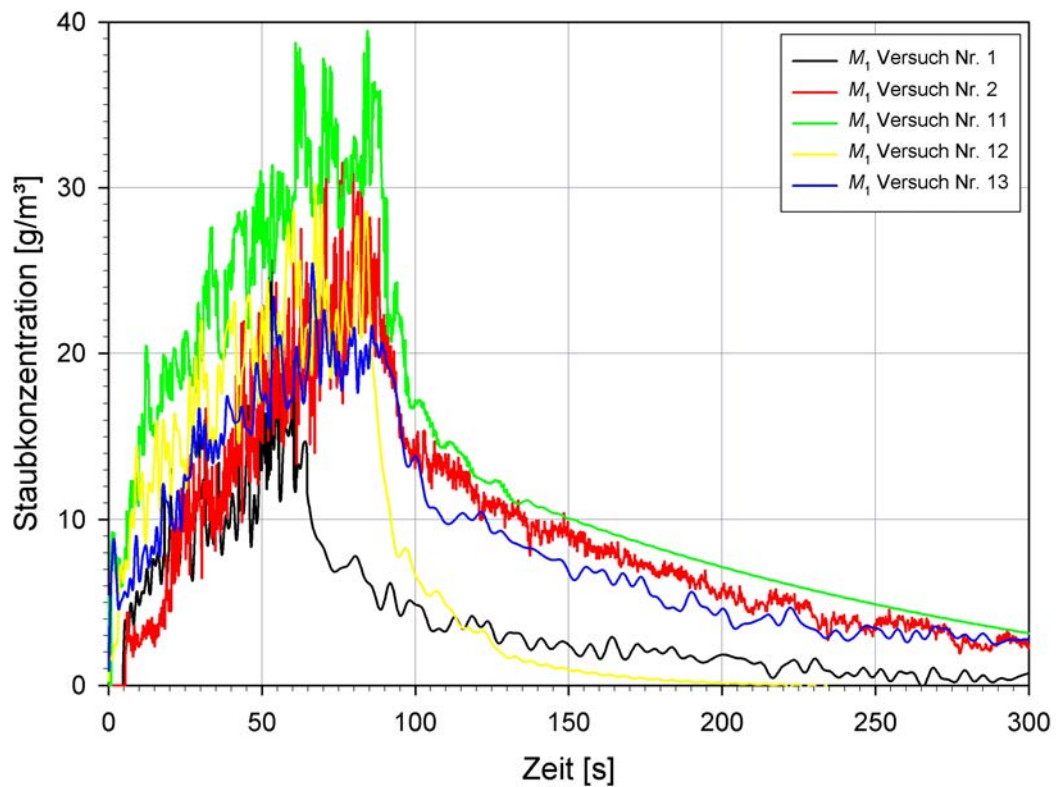


Abbildung 4.11: Zeitlicher Verlauf der Staubkonzentration an der Messstelle M_1 während der Versuche Nr. 1, 2, 11, 12 und 13 (oben). Vergleichende Darstellung der maximalen Staubkonzentration c_{\max} an den Messorten U_i , M_i und O_i bei den Versuchen Nr. 1, 2, 11, 12 und 13 (unten).

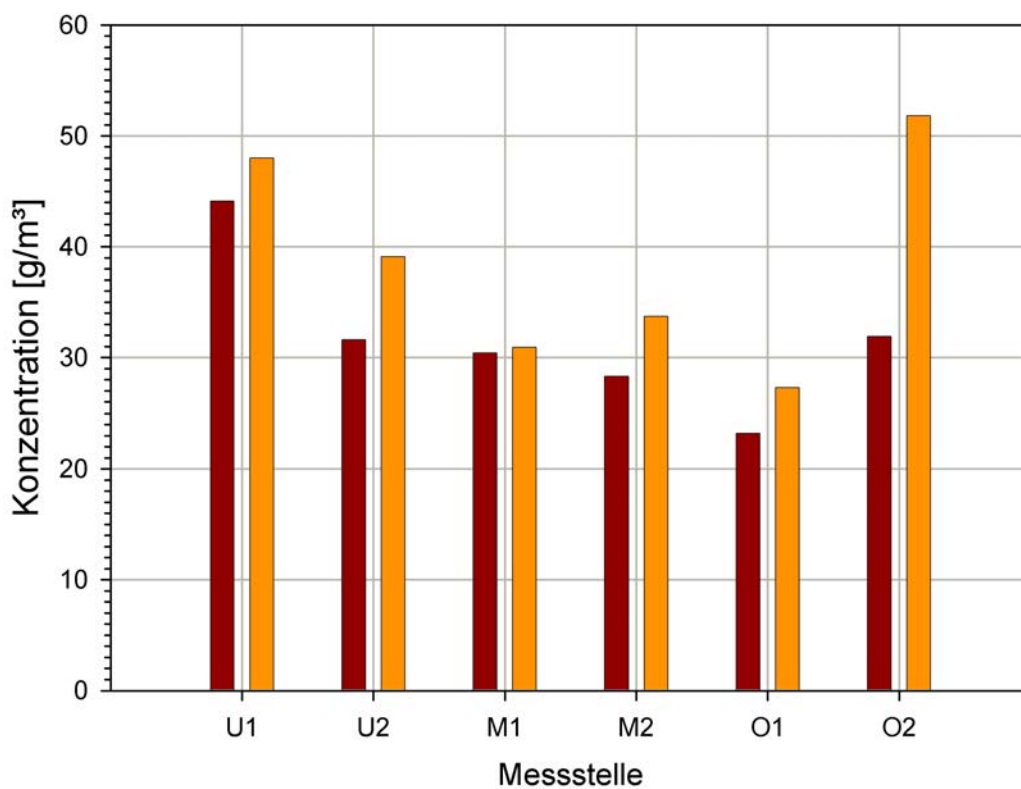
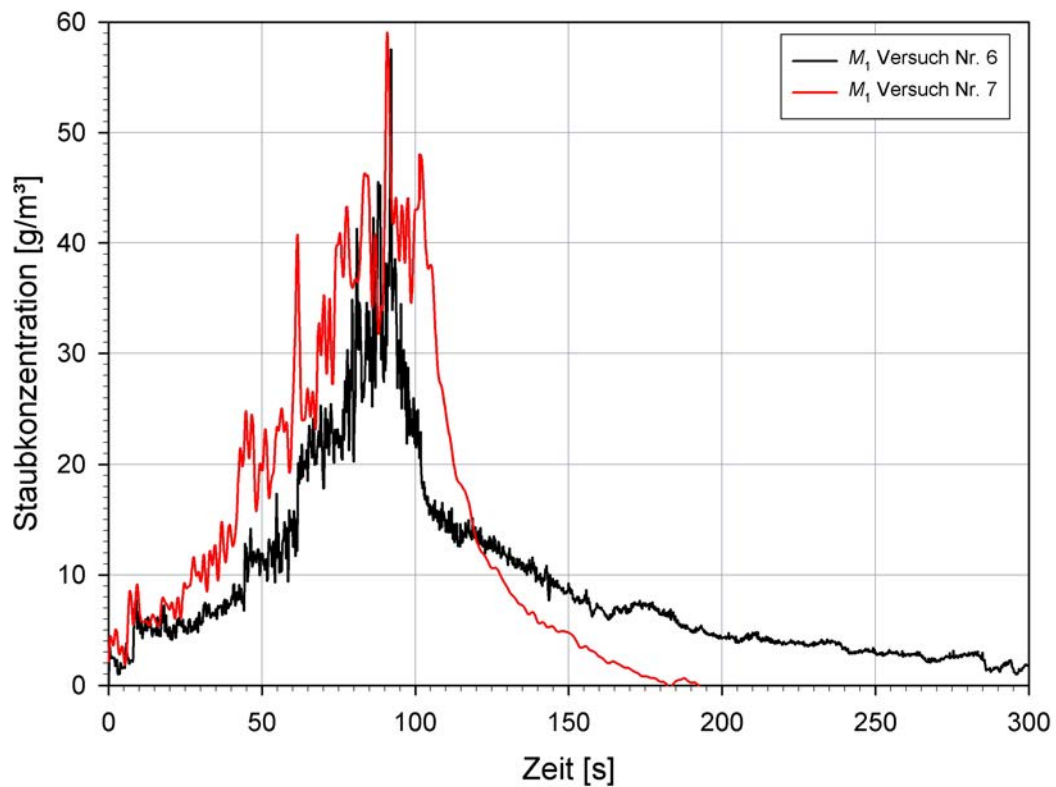


Abbildung 4.12: Zeitlicher Verlauf der Staubkonzentration an der Messstelle M_1 während der Versuche Nr. 6 und 7 (oben). Vergleichende Darstellung der maximalen Staubkonzentration c_{\max} an den Messorten U_i , M_i und O_i bei den Versuchen Nr. 6 und 7 (unten).

Die Kurventeile während der Förderzeit sind jedoch so ähnlich, dass hier von guter Reproduzierbarkeit gesprochen werden kann. Dass die Staubkonzentrationskurve von Versuch Nr. 1 früher einbricht als die der anderen Versuche liegt daran, dass die Förderdauer bei Versuch Nr. 1, aufgrund eines Ausfalls des Elevators, kleiner als 90 s war.

Bei der Betrachtung der Kurvenmaxima in Abbildung 4.11, unten fällt zunächst auf, dass die maximale Staubkonzentration bei Versuch Nr. 1 niedriger war, als bei den anderen vier Versuchen. Dies hat drei Ursachen:

Erstens war die Förderdauer bei Versuch Nr. 1 aufgrund des genannten Elevatorausfalls geringer, als bei den anderen Versuchen. Dadurch war die Staubwolkenbildung vor allem im unteren Silobereich nicht vollständig.

Zweitens wurden bei Versuch Nr. 1 Pellets benutzt, die praktisch noch keine mechanische Beanspruchung erlebt hatten. Ihre Gesamtoberfläche war deshalb geringer, als die bei den Versuchen Nr. 2, 11, 12 und 13. Deswegen war mit hoher Wahrscheinlichkeit weniger Abrieb im Spiel.

Drittens war der Wassergehalt der Luft bei Versuch Nr. 1 erheblich höher, als bei den Vergleichsversuchen (siehe Tabelle D.1 und Abbildung 4.13). Wie in [10] gezeigt wurde, hängt die Fähigkeit von Stäuben, Staubwolken auszubilden, stark vom Wassergehalt in der Luft ab.

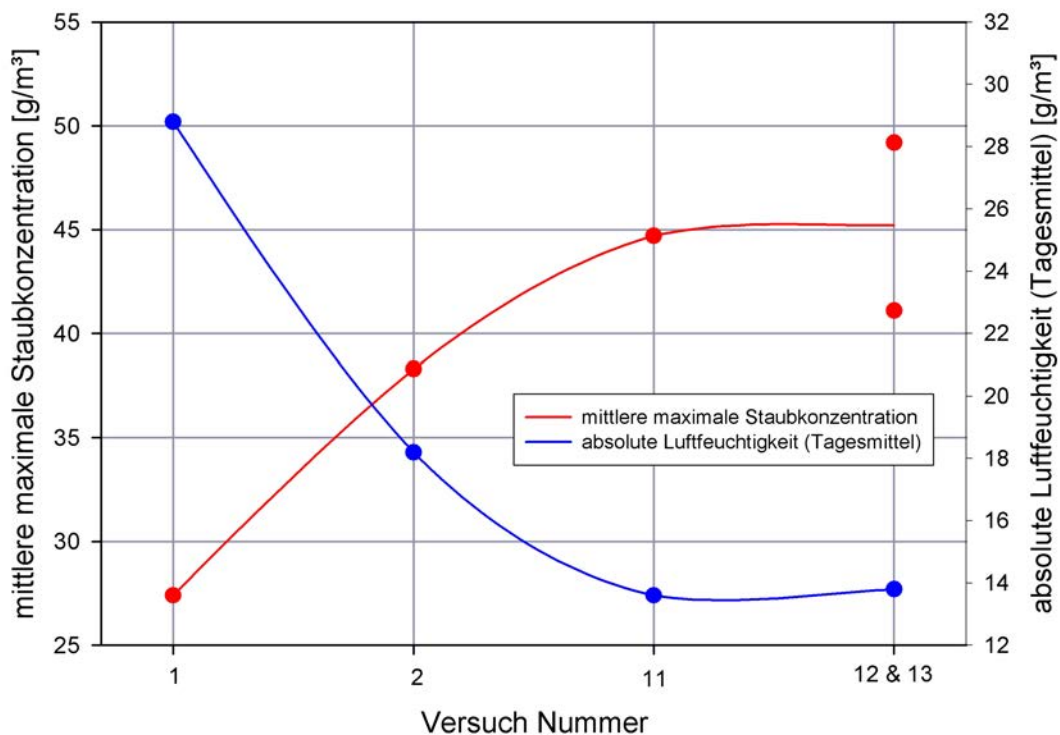


Abbildung 4.13: Absolute Luftfeuchtigkeit (Tagesmittel) und maximale Staubkonzentration (gemittelt über alle Messstellen) aufgetragen über die Versuchsnummern.

Dieser Effekt ist auch der Grund dafür, warum die maximale Staubkonzentration bei Versuch Nr. 13 deutlich geringer ist als bei Versuch Nr. 12. Letzt genannter wurde am frühen Morgen des 31.07.2015 durchgeführt im Gegensatz zu Versuch Nr. 13, welcher in

den Mittagsstunden des selben Tages, bei erheblich höherer absoluter Luftfeuchtigkeit, abgearbeitet wurde. Bei den übrigen Versuchen Nr. 2, 11 und 12 ist die Streuung in den Staubkonzentrationsmaxima angesichts der Messaufgabe als durchaus im Rahmen befindlich anzusehen. Reproduzierbarkeit war bei den Versuchen mit gesiebten Pellets deshalb gegeben.

Beim Vergleich der Kurvenverläufe und Staubkonzentrationsmaxima bei den Versuchen Nr. 6 und 7 ist ohne Mühe eine sehr gute Reproduzierbarkeit erkennbar (siehe Abbildung 4.12). Einzig bei der Messstelle O_2 gibt es eine größere Abweichung in der gemessenen maximalen Staubkonzentration. Da an dieser Messstelle aber besonders häufig Konzentrationspeaks auftraten, sind diese Daten von geringerer Aussagekraft. Alles in allem kann die Qualität der Messergebnisse als gut bewertet werden.

4.4.3 Abhängigkeit der Staubkonzentration vom Messort

Bei der Diskussion der Staubkonzentrationsprofile im AZO-Silo wurden Versuche mit gleichen Randbedingungen zusammengefasst.

Zunächst wurde die Staubverteilung bei den Versuchen Nr. 1, 2, 11, 12 und 13 beleuchtet. Dazu wurden die Abbildung 4.11 unten, sowie die Abbildungen D.14, D.19 und D.20 herangezogen. An den Säulenhöhen der genannten Balkendiagramme liest man ab, dass die Staubkonzentration während der Versuche zur vertikalen Symmetrieachse des Silovolumens hin zunimmt. Dies gilt für alle Messebenen. Das Niveau der gemessenen maximalen Staubkonzentrationen lag zwischen 20 g/m^3 und 55 g/m^3 . Es konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Messebenen festgestellt werden.

Bei den Versuchen Nr. 3 bis 5, also die Versuche, bei denen gesiebte Holzpellets ins teilbefüllte Silo gefördert wurden, zeigte sich ein ähnliches Bild wie bei den oben genannten Experimenten. Wieder war die Staubkonzentration in der Mitte des Silos höher, als am Rand. Evident wird dies aus den Werten in der Tabelle 4.4 und den Diagrammen in den Abbildungen D.15 und D.16.

Nr.	$c_{\max} \text{ [g/m}^3\text{]}$							
	U_1	U_2	M_1	M_2	M_3	O_1	O_2	O_3
3	23,9	18,4	10,1	17,5	-	12,4	28,3	-
4	250*	250*	13,7	18,8	-	15,5	34,4	-
5	-	-	21,3	27,9	30,9	17,8	33,5	18,2
8	85,3	78,5	62,8	79,4	-	43,5	73,5	-
9	24,7	21,1	22,7	26,1	-	18,9	44,6	-
10	76,7	98,5	54,4	71,9	-	38,2	69,5	-

Tabelle 4.4: Maximal erreichte Staubkonzentration c_{\max} an den Messorten U_i , M_i und O_i bei den Versuchen Nr. 3, 4, und 5 sowie 8, 9 und 10. Bei dem mit * gekennzeichneten Werten handelt es sich um Schätzungen.

Eine Ausnahme von dieser Regel ist das Messergebnis von Versuch Nr. 3. Hier war die maximale Staubkonzentration an U_1 höher als an U_2 . Schaut man sich die Konzentrationskurven dieses Versuches in Abbildung D.3 an so fällt auf, dass die an U_1 gewonnene Kurve zum Ende der Förderzeit hin einen Sprung nach oben macht. In der Kurve von U_2 ist dieser Sprung auch zu erkennen, jedoch ist dieser dort erheblich schwächer ausgeprägt. Dies weist auf ein kurzzeitiges lokales Ereignis in der Nähe von U_1 hin. Es wurden Staubkonzentrationsspitzen zwischen 10 g/m^3 und 35 g/m^3 erreicht.

Während des Versuches Nr. 4 wurden die beiden Typen 7 an U_1 und U_2 nach ca. 75 s bzw. 99 s Förderzeit verschüttet. Abbildung 4.14 zeigt die entsprechenden Staubkonzentrationskurven in hoher zeitlicher Auflösung rund um die Verschüttungszeitpunkte. Man erkennt in der Abbildung, dass die Staubkonzentrationen kurz vor dem Verschütten scheinbar stark anstiegen. Das bedeutet, dass im Bereich unmittelbar über der Oberfläche des Schüttkegels relativ hohe Staubkonzentrationen auftraten. Diese lagen um 250 g/m^3 . Diese Messdaten könnten möglicherweise aber auch durch Partikel hervorgerufen worden sein, die durch das Messvolumen gefallen sind.

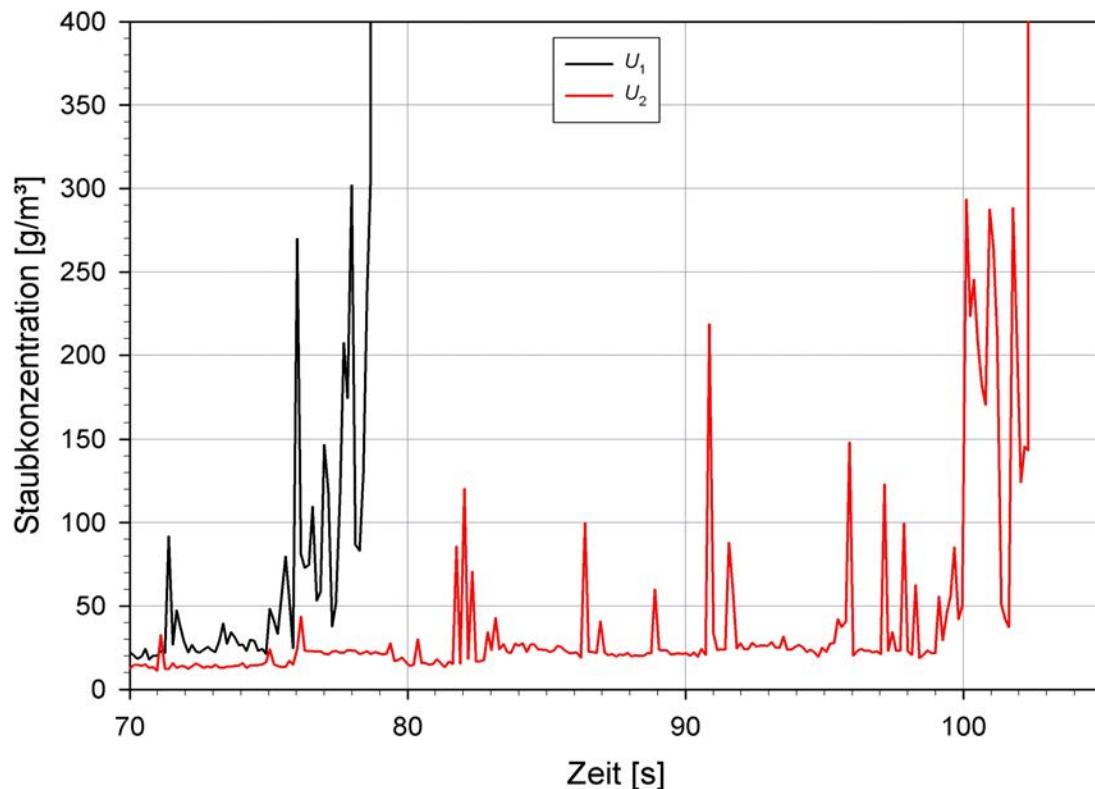


Abbildung 4.14: Ausschnittsvergrößerung der Staubkonzentrationskurven an den Messorten U_1 und U_2 von Versuch Nr. 4.

Bei den Versuchen mit ungesiebten Holzpellets (Nr. 6 bis 10) zeigte sich ein anderes Bild (Abbildungen 4.12, unten und D.16 bis D.18). Bis auf Versuch Nr. 10 (höhere Förderleistung) wurde bei allen Versuchen eine relativ hohe Staubkonzentration an der Messstelle U_1 erreicht. Mit steigender Höhe im Silo fällt die Staubkonzentration tendenziell ab, wobei dort die Staubkonzentration zur Silomitte hin wieder zunimmt. Lediglich bei den Versuchen Nr. 7 und 9 war das Staubkonzentrationsmaximum an der Messstelle

O_2 noch höher als dasjenige an der Messstelle U_1 . Auffällig ist der große Unterschied im Niveau der maximalen Staubkonzentration bei den unterschiedlichen Versuchen. Wurden bei den Versuchen Nr. 6, 7 und 9 nur Maximalwerte zwischen 20 g/m^3 und 55 g/m^3 erreicht, so waren es bei den Experimenten Nr. 8 und 10 Ergebnisse zwischen 40 g/m^3 und 100 g/m^3 , also etwa doppelt so hoch. Dies erklärt sich durch Unterschiede in der Förderleistung und durch verschiedene Füllhöhen zu Beginn der einzelnen Versuche.

4.4.4 Einfluss des Feinanteils auf die Staubkonzentration

Es wurde erwartet, dass die Versuche mit 30 % Feinanteil zu höheren Staubkonzentrationen führen, als diejenigen ohne Feinanteil. Mittelt man die maximalen Staubkonzentrationswerte der Messebenen aller Versuche ohne Feinstaubanteil und aller Versuche mit Feinstaubanteil, so erhält man folgendes Ergebnis:

	U_i	M_i	O_i
$\bar{c}_{\text{max,ohne}} [\text{g/m}^3]$	35,3	28,1	37,3
$\bar{c}_{\text{max,mit}} [\text{g/m}^3]$	54,8	44,1	42,2

Tabelle 4.5: Gemessene maximale Staubkonzentration in den Messebenen U_i , M_i und O_i gemittelt über alle Versuche ohne Feinanteil und über alle Versuche mit Feinanteil.

In der unteren und mittleren Messebene erhielt man mit Feinanteil eine um 55 % bzw. 56 % höhere mittlere maximale Staubkonzentration, als bei den Versuchen ohne Feinanteil. In der oberen Messebene machte dieser Unterschied rund 13 % aus. Der größte gemessene Unterschied der Einzelmessungen mit gesiebten und ungesiebten Pellets betrug rund 80 % (O_2 bei Versuch Nr. 13 und U_2 bei Versuch Nr. 10).

Damit ist nachgewiesen, dass bei der mechanischen Förderung von ungesiebten Holzpellets in Silos erheblich größere Staubkonzentrationen entstehen, als bei der gleichen Förderung von gesiebten Holzpellets. Die Anzahl der Versuche ist ausreichend groß, damit dieses Ergebnis als statistisch gesichert gelten kann.

4.4.5 Einfluss des Füllstandes auf die Staubkonzentration

Mittelt man die maximalen Staubkonzentrationswerte der Messebenen U_i , M_i und O_i der Versuche Nr. 1 bis 5 und 11 bis 13 (alle ohne Feinanteil bei $\dot{P} = 10 \text{ t/h}$) und trägt die Ergebnisse über die zu Beginn der genannten Versuche vorhandene Füllhöhe im Silo auf, so erhält man die Grafik in Abbildung 4.15. Das Diagramm zeigt, dass die Förderung in das leere Silo höhere Staubkonzentrationen im Silo hervorrief als die Förderung ins teilbefüllte Silo. Dieses Ergebnis wird gestützt durch den Vergleich der gemessenen maximalen Staubkonzentrationen der Versuche Nr. 6 und 7 (teilbefülltes Silo) auf der einen Seite und Nr. 8 (leeres Silo) auf der anderen Seite (Abbildungen D.16 und D.17 und Tabellen 4.3 und 4.4). Während Versuch Nr. 8 wurden erheblich höhere Staubkonzentrationswerte erreicht als während der Versuche Nr. 6 und 7 bei sonst gleichen Parametern. Der Grund dafür ist vermutlich der harte Aufprall der Holzpellets auf der

Silokonusswand. Dort werden Pellets und Feinanteil, ähnlich wie auf einem Trampolin, zurück in das Siloinnere geschleudert. Bei bereits vorhandener Teilbefüllung zeigt sich ein schwachen Anstieg der maximalen Staubkonzentrationen mit weiter steigender Füllhöhe im Silo (Abbildung 4.15). Aufgrund der geringen Versuchsanzahl und den relativ starken Schwankungen der Messwerte kann letztere Aussage allerdings nicht als statistisch gesichert gelten.

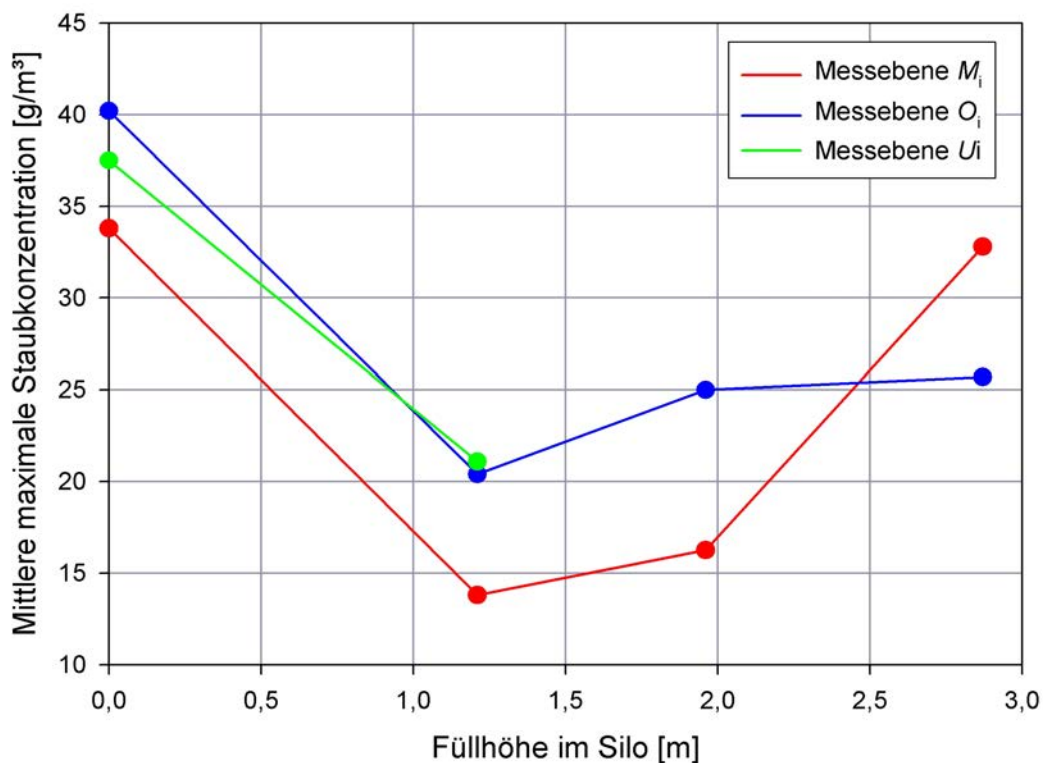


Abbildung 4.15: Maximale Staubkonzentrationen gemittelt über die Messebenen U_i , M_i und O_i der Versuche Nr. 1 bis 5 und 11 bis 13 aufgetragen über die Füllhöhe im Silo.

4.4.6 Einfluss der Förderleistung auf die Staubkonzentration

Bei den Versuchen Nr. 8 bis 10 wurde die Förderleistung ins Silo variiert. Trägt man die über die Messebenen gemittelten maximalen Staubkonzentrationsmesswerte dieser Versuche gegen die Förderleistung auf, ergibt sich das Diagramm in Abbildung 4.16. Es zeigt sich, dass die maximalen Staubkonzentrationswerte mit der Förderleistung ansteigen, wobei sich dieser Anstieg zu höherer Förderleistung hin abzuschwächen scheint. Letzteres gilt vor allem für die oberen Messebenen M_i und O_i .

Wie bereits in Abschnitt 4.4.1 erwähnt wurde, konnte bei Versuch Nr. 10 wegen der kurzen Förderdauer kein ausgeprägtes Staubkonzentrationsmaximum für die untere Messebene erreicht werden. Deshalb wurde diesem Messpunkt 20% des Messwertes aufgeschlagen (Abbildung 4.16). Damit konnte die Aussage abgeleitet werden, dass der Einfluss der Förderleistung auf die maximale Staubkonzentration im Silo mit steigender Höhe über der Schüttkegeloberfläche abnimmt und umgekehrt. Es scheint ein Wert

für die Förderleistung zu existieren, oberhalb dem die maximale Staubkonzentration in deutlicher Entfernung von der Schüttkegeloberfläche nicht mehr mit der Förderleistung weiter wächst. Generell konnte eine starke Abhängigkeit der maximalen Staubkonzentration im Silo bei Förderleistungen bis 10 t/h festgestellt werden und zwar in allen Messebenen.

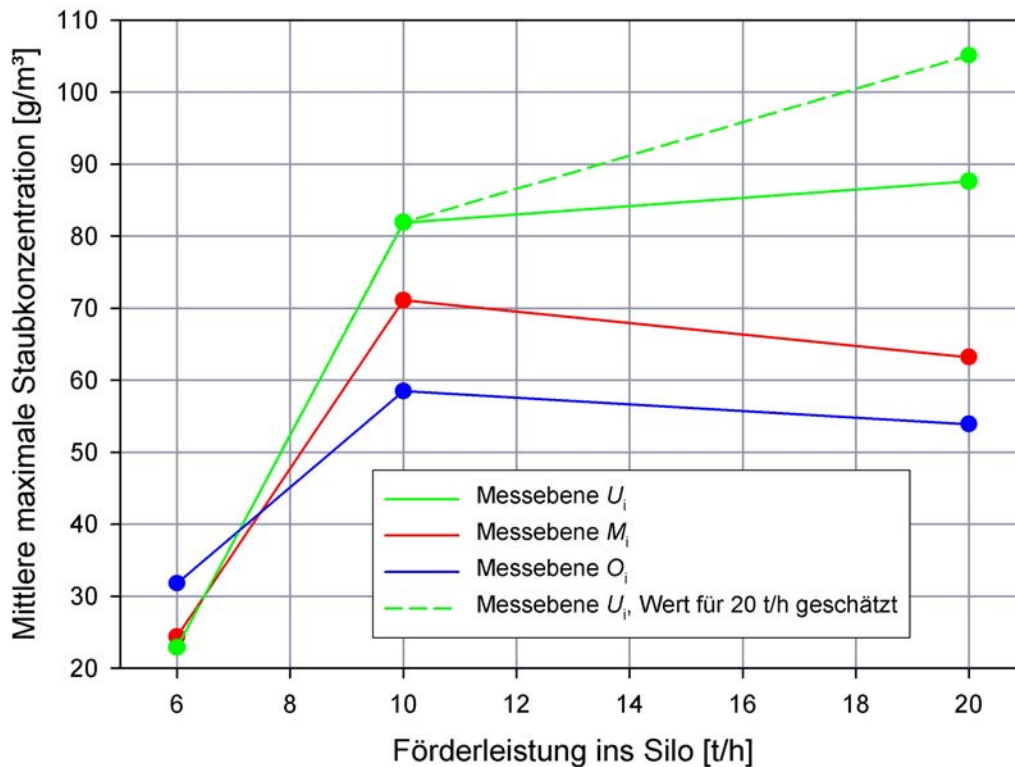


Abbildung 4.16: Maximale Staubkonzentrationen gemittelt über die Messebenen U_i , M_i und O_i der Versuche Nr. 8 bis 10 aufgetragen über die Förderleistung ins Silo.

4.4.7 Betrachtung des Staubexplosionsrisikos

Die Frage nach dem Explosionsrisiko bei der mechanischen Förderung von Holzpellets in Silos ist gleichbedeutend mit der Frage, ob zu irgendeinem Zeitpunkt an irgendeinem Ort im Silo die untere Explosionsgrenze (UEG) überschritten wurde. Im Staublabor der BGN/FSA wurden die sicherheitstechnischen Kenngrößen für den Holzpelletabtrieb bestimmt. Anhang C entnimmt man den Wert von

$$UEG = 125 \text{ g/m}^3 \quad (4.11)$$

Alle Staubkonzentrationsmesswerte in den Tabellen 4.3 und 4.4 sowie in den Abbildungen in Anhang D liegen unterhalb dieser UEG . Auch wenn die Maximalwerte der wenigen Versuche, deren Messkurven kein ausgeprägtes Plateau zeigten, mit einem Zuschlag von 20% versehen werden, ändert sich nichts an diesem Ergebnis. Das Maxima

von U_2 bei Versuch Nr. 10 kommt in diesem Fall aber mit $c_{\max} = 118,2 \text{ g/m}^3$ gefährlich nahe an die *UEG* heran.

Noch kritischer müssen allerdings die Ergebnisse gesehen werden, die während des Versuches Nr. 4 durch die Verschüttung der Messköpfe an U_i gewonnen wurden (Tabelle 4.4 und Abbildung 4.14): Kurz vor den Punkten auf der Zeitachse in Abbildung 4.14, an denen die beiden Staubkonzentrationskurven scharf nach oben schießen, wurden die jeweilige Staubkonzentration unmittelbar über der Oberfläche des Holzpellet-Schüttkegels gemessen. Es ergaben sich Messwerte um $c_{\max} \approx 250 \text{ g/m}^3$. Aufgrund des Kurvenverlaufs kann nicht festgestellt werden, ob dieser Wert eine reale Staubkonzentration darstellt oder ob er durch Festkörper hervorgerufen wurde, die durch die Messvolumina der beiden SKGs wanderten. Basierend auf den im Rahmen dieser Arbeit gewonnen Messdaten kann somit nicht ausgeschlossen werden, dass sich zumindest unmittelbar über der Schüttkegeloberfläche ein explosionsfähiges Staub/Luft-Gemisch bildete.

Bei den meisten Versuchen zeigte sich, dass die Staubkonzentration in Richtung der zentralen Symmetrieachse des Silos zunahm. Es muss deshalb damit gerechnet werden, dass auch im herab fallenden Förderstrom selbst die *UEG* möglicherweise überschritten wurde.

Kapitel 5

Diskussion und Ausblick

Diese Arbeit hatte drei wesentliche Ziele. Erstens sollte ein funktionierender experimenteller Aufbau geschaffen werden, mit dem Industrieholzpellets möglichst praxisnah in ein Silo gefördert werden können und mit dem die Variation von Parametern wie z.B. der Förderleistung möglich ist. Zweitens sollte in diesem Silo während der Pelletförderung und kurz danach die Staubkonzentration orts- und zeitaufgelöst bei veränderlichen Randbedingungen gemessen werden. Das dritte Ziel war die Bestimmung der sicherheitstechnischen Kenngrößen des Holzpelletabriebs. Nachfolgend werden die Ergebnisse dieser Arbeit diskutiert und ein Ausblick auf weiterführende Arbeiten gegeben.

5.1 Diskussion der Ergebnisse

5.1.1 Aufbau des Versuchsstandes

Wie in Kapitel 3 beschrieben wurde, war die Planung und Realisierung eines Versuchsstandes für die angestrebte Messaufgabe von Erfolg gekrönt.

Besonders hervorzuheben ist die Konstruktion und der Aufbau der Siebmaschine, mit der die Holzpellets für jeden Versuch neu aufbereitet wurden und mit der gezielt Abrieb hergestellt wurde. Diese Maschine zeigte keine Mängel und arbeitete bzw. arbeitet absolut zufriedenstellend.

Am Elevator konnten während der Versuche zwei Schwächen festgestellt werden: Erstens war der Produktaufgabebehälter des Elevators für manche Parameterkombinationen zu klein. Bei Versuchen mit höherer Förderleistung, konnte deshalb die maximale Staubkonzentration im Silo aufgrund zu kurzer Förderzeit nicht erreicht werden.

Zweitens bildeten sich während der Versuche immer wieder größere Ablagerungen an Holzpellets und Abrieb im Elevatorfuß. Dies führte gelegentlich zu technischem Versagen des Elevators.

5.1.2 Messergebnisse

In Kapitel 4 ist die Gewinnung, die Aufarbeitung und die Auswertung der Messergebnisse beschrieben. Es konnten die Parameter Feinstaubanteil, Silofüllstand, Förderleistung und Messkopfanordnung untersucht werden. Aufgrund der Kürze der für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Zeit konnten lediglich 13 Versuche durchgeführt werden. Naturgemäß ist dadurch die statistische Aussagefähigkeit des Datensatzes nicht besonders gut. Dennoch sind folgende Aussagen möglich:

1. Die Messergebnisse sind im Rahmen der üblichen Streuung reproduzierbar.
2. Die absolute Luftfeuchtigkeit hat einen erheblichen Einfluss auf die Staubkonzentration im Silo.
3. Zu keiner Zeit wurde an den sechs Messstellen die *UEG* überschritten. Möglich ist, dass unmittelbar über der Schüttkegeloberfläche und im herab fallenden Förderstrom in der zentralen Symmetrieachse des Silos zumindest zeitweise explosionsfähige Staub/Luft-Gemische auftraten.
4. Bei gesiebten Holzpellets stieg die Staubkonzentration von der Silowand zur Silomitte hin an. Eine Abhängigkeit der Staubkonzentration von der Einbauhöhe der Messköpfe konnte nicht festgestellt werden.
5. Bei ungesiebten Pellets stieg die Staubkonzentration in der unteren Messebene von der Silomitte zum Silorand hin an. Mit steigender Höhe über dem Siloboden nahm die Staubkonzentration ab, wobei hier die Staubkonzentration wieder vom Silorand zur Silomitte hin wuchs.
6. Die *gemittelten* maximal erreichten Staubkonzentrationen lagen bei ungesiebten Holzpellets um bis zu 56 % höher, als bei gesiebten Pellets. Bei der Einzelmessung betrug dieser Unterschied maximal rund 80 %.
7. Die Förderung von Holzpellets in das leere Silo erzeugte eine höhere Staubkonzentration, als die Förderung in das zuvor teilbefüllte Silo. Es zeigte sich ferner eine schwache Tendenz, dass die Staubkonzentration bei steigender Füllhöhe wächst.
8. Bei Förderleistungen bis 10 t/h war die Staubkonzentration im Silo stark von der Förderleistung abhängig. Diese Abhängigkeit sank mit steigender Höhe über dem Siloboden. Ebenso sank diese Abhängigkeit bei höheren Förderleistungen oberhalb 10 t/h.
9. Die Staubungszahl des Holzpelletabriebs wurde zu 8,08 bestimmt. Also gehört der Holzpelletabrieb in die Staubungsklasse 3 und zählt damit zu den mäßig staubenden Schüttgütern. Deshalb können die hier gewonnenen Erkenntnisse nur auf Schüttgüter übertragen werden, die die nachfolgend genannten Bedingungen *gleichzeitig* erfüllen: Der Feinanteil hat eine kleinere Staubungszahl als 8, die *UEG* liegt über 125 g/m^3 und das Verhältnis von Feinanteil zu Grobanteil ist kleiner als das der hier verwendeten ungesiebten Industrieholzpellets.

5.1.3 Sicherheitstechnische Kenngrößen

Die Messung von sicherheitstechnischen Kenngrößen ist eine Standardaufgabe der BGN/FSA. Dementsprechend professionell ist die Laborausstattung. Die Arbeitsabläufe sind optimiert. Deshalb konnte die Bestimmung der sicherheitstechnischen Kenngrößen des Holzpelletabtriebs reibungslos und sicher durchgeführt werden.

5.2 Ausblick

5.2.1 Genauere Untersuchung der lokalen Staubkonzentration

Wie bereits in den Kapiteln 4.4.7 und 5.1.2 dargelegt wurde, kann es nicht ausgeschlossen werden, dass während der durchgeführten Versuche lokal die *UEG* überschritten wurde. Dies gilt für den Bereich unmittelbar oberhalb des Schüttkegels und direkt im herab fallenden Förderstrom in der vertikalen Symmetrieachse des Silos. Die gewonnenen Messdaten weisen auf diese Möglichkeit hin, lieferten aber keine Sicherheit. Aus diesem Grund müssen weitere Versuche durchgeführt werden, um diesbezüglich fundiertes Wissen zu gewinnen. Denkbar sind Experimente ähnlich dem Versuch Nr. 4, in deren Verlauf die Messköpfe im Silo verschüttet werden. In unmittelbarer Nähe der Messköpfe sind dabei zusätzlich pyrotechnische Zünder montiert, die kurz vor der Verschüttung der Messköpfe gezündet werden. Gelingt die Zündung der Staubwolke, ist der Beweis dafür erbracht, dass die *UEG* überschritten wurde und die an den SKGs angezeigten Staubkonzentrationen real waren und nicht durch Partikel vorgetäuscht wurden. Ähnliche Versuche sollten in der vertikalen Symmetrieachse des Silos während der Pelletförderung durchgeführt werden.

5.2.2 Elevatorreinigung

Die Auswertung der Messergebnisse zeigte, dass sich die Staubentwicklung durch die Förderung von Holzpellets in gesiebttem und ungesiebttem Zustand zuweilen nicht stark voneinander unterschied. Dies überraschte. Überlegungen zu möglichen Ursachen für diese Beobachtung führten darauf, dass die während der Versuche aufgetretenen Verschmutzungen am Elevatorfuß dafür verantwortlich gewesen sein könnten. Deshalb sollte eine geringe Zahl an weiteren Versuchen durchgeführt werden, bei denen der Elevatorfuß vor jedem Experiment aufwendig gereinigt wird. Anhand dieser Versuche kann überprüft werden, ob Versuche mit ungesiebtten und gesiebtten Holzpellets bei sonst gleichen Parametern zu den gleichen Resultaten führen, wie sie im Rahmen dieser Arbeit ermittelt wurden. Auch muss darüber nachgedacht werden, wie die Verschmutzungsproblematik des Elevators konstruktiv beseitigt werden kann.

5.2.3 Versuchsaufbau

Da das Prallblech am Kopf des Elevators aufgrund Verstopfungsgefahr eine Begrenzung der Förderzeit bedeutet, ist hier eine Überprüfung auf bauliche Maßnahmen erforder-

lich. Weiterhin wäre die Überlegung anzustellen, ob es sinnvoll wäre eine kontinuierliche Förderung aus einem größeren Vorlagebehälter in den Vorlagetrichter des Elevators zu realisieren. Hierbei könnte zum Beispiel ein mobiles Silo als Vorlagebehälter dienen und ein Trogkettenförderer die Förderstrecke zum Vorlagetrichter des Elevators übernehmen. Damit wäre gewährleistet, dass der Elevator das Silo über eine längere Zeit beschicken kann und sich sicher ein Plateau in den Staubkonzentrationskurven ausbildet. Der Versuch Nr. 10 könnte dann erneut durchgeführt werden sowie weitere Experimente zur Frage des Einflusses der Förderleistung auf die Staubkonzentration im Silo.

Weiterhin sollte überprüft werden, ob der Versuchsaufbau durch konstruktive Maßnahmen so umgestaltet werden kann, dass danach die Siebmaschine direkt unter dem Auslauf des AZO-Silos steht. Durch diese Maßnahme müssten die Holzpellets nach einem Versuch nicht erst in einen Big Bag gefüllt werden, um anschließend der Siebmaschine zugeführt zu werden. Hierdurch würde sich ein Arbeitsschritt einsparen lassen, was den Zeitaufwand pro Versuch verringern würde.

5.2.4 Verwendete Holzpellets

Zwei der Anforderungen an die Holzpellets, die zu Beginn dieser Arbeit gefordert waren, konnten nicht erfüllt werden. Dies waren die Eigenschaften, dass es sich um ungesiebte und bindemittelfreie Pellets handeln sollte. Dieser Umstand ist in der Logistik und im Produktionsverfahren der kontaktierten Pelletfirmen begründet. Nach Rücksprache mit Prof. Dr. Radandt wurde in diesem Punkt von den ursprünglichen Vorgaben abgewichen, da die Arbeit einem sehr engen Zeitplan unterlag. Letztendlich wurden gesiebte Industrieholzpellets mit einem Bindemittelanteil von 1,2 % Roggenstärke verwendet. Untersuchungen unter dem Rasterelektronenmikroskop zeigten, dass sich in dem aus den Pellets gewonnenen Staub auch Restprodukte aus der Maisproduktion wie (z. B. Maisstärke) befinden. Deshalb muss es das Ziel weiter führender Arbeiten sein, Holzpellets zu verwenden, welche den in Kapitel 1.2 beschriebenen Vorgaben entsprechen. Diese Arbeiten sollten jedoch erst dann in Angriff genommen werden, wenn die in den vorigen Kapiteln 5.2.1 bis 5.2.3 beschriebenen Aufgaben mit den bisher verwendeten Pellets abgearbeitet wurden.

Literaturverzeichnis

- [1] S. RADANDT: *Private Mitteilung*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., Mannheim, 2015.
- [2] A. VOGL: *Private Mitteilung*, Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel und Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., Mannheim, 2015.
- [3] D. LORENZ: *Private Mitteilung*, Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel und Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., Mannheim, 2015.
- [4] F. HAUERT, H. FOGT, A. VOGL, D. WENNERBERG, S. RADANDT: *Staubverteilung und Geschwindigkeitsparameter in einem pneumatisch befüllten Silo mit numerischen Simulationen*, VDI-Berichte 1272, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996.
- [5] C. DANNENBAUM: *Private Mitteilung*, Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel und Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., Mannheim, 2015.
- [6] K. MEYER: *Private Mitteilung*, Neuero Farm- und Fördertechnik GmbH, Melle-Buer, 2015.
- [7] P. SCHMIDT, R. KÖRBER, M. COPPERS: *Sieben und Siebmaschinen, Grundlagen und Anwendungen*, Wiley-VCH, 2003.
- [8] B. HOFFNER: *Skriptum zur Vorlesung Mechanische Verfahrenstechnik 1*, Hochschule Mannheim, 2013.
- [9] D. LORENZ, P. Chupin, M. Seithel: *Untersuchung der Entstehung heißer Oberflächen durch Reibvorgänge*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., Mannheim, 2015.
- [10] K. LAUER: *Untersuchung des Einflusses der elektrostatischen Aufladung von Stäuben auf die Neigung dieser Stäube zur Staubwolkenbildung*, Diplomarbeit, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V. und Hochschule Mannheim, 2003.
- [11] H. LINDER: *Physik für Ingenieure*, 17. Auflage, Hanser, 2006.

Anhang A

Technische Zeichnungen

AZO-Silo

Elevator

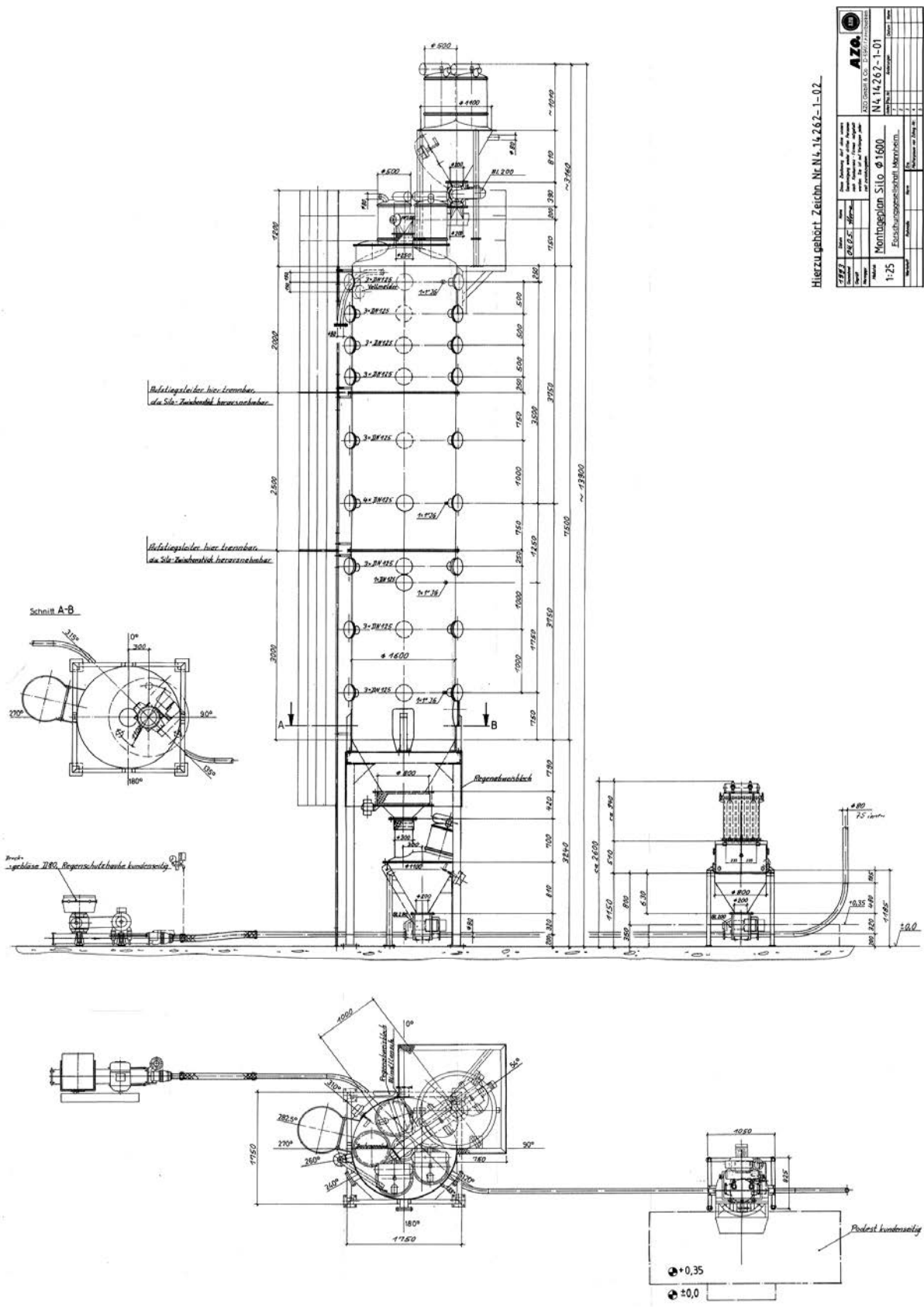


Abbildung A.1: Technische Zeichnung des AZO-Silos.

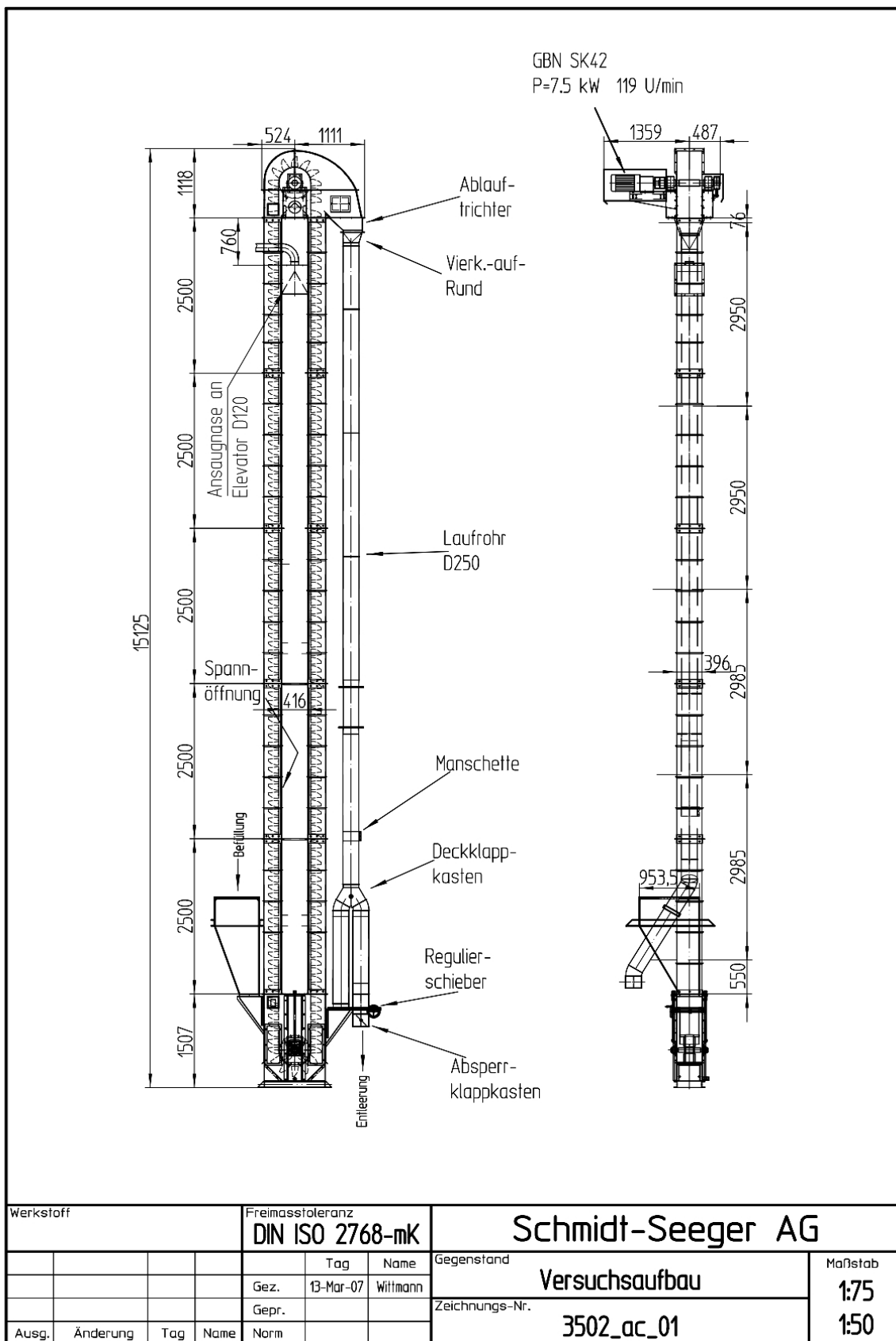


Abbildung A.2: Technische Zeichnung des Elevators.

Anhang B

Konstruktionszeichnungen

Adapterflansch

Siebmaschine

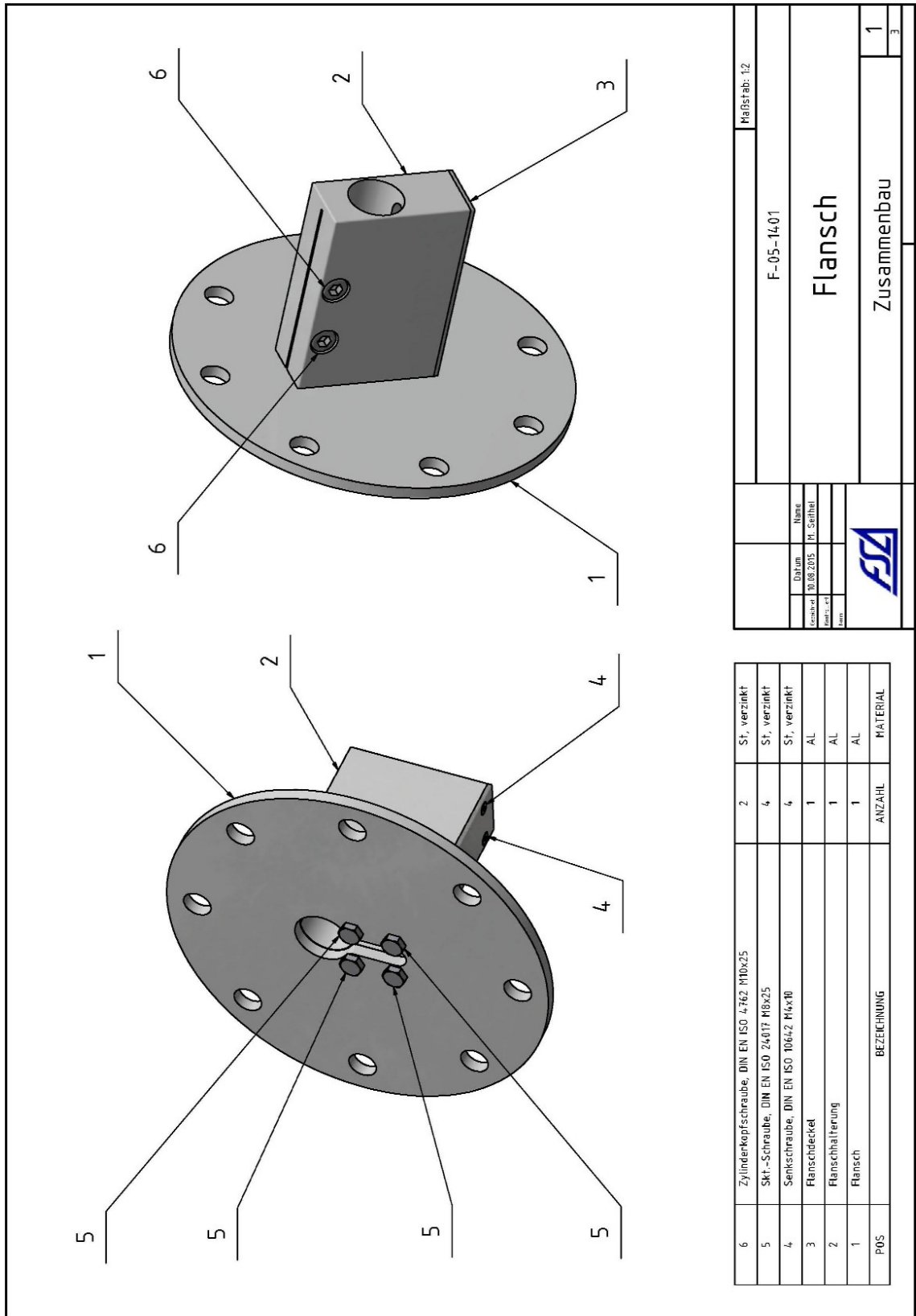


Abbildung B.1: Konstruktionszeichnung des Adapterflansches.

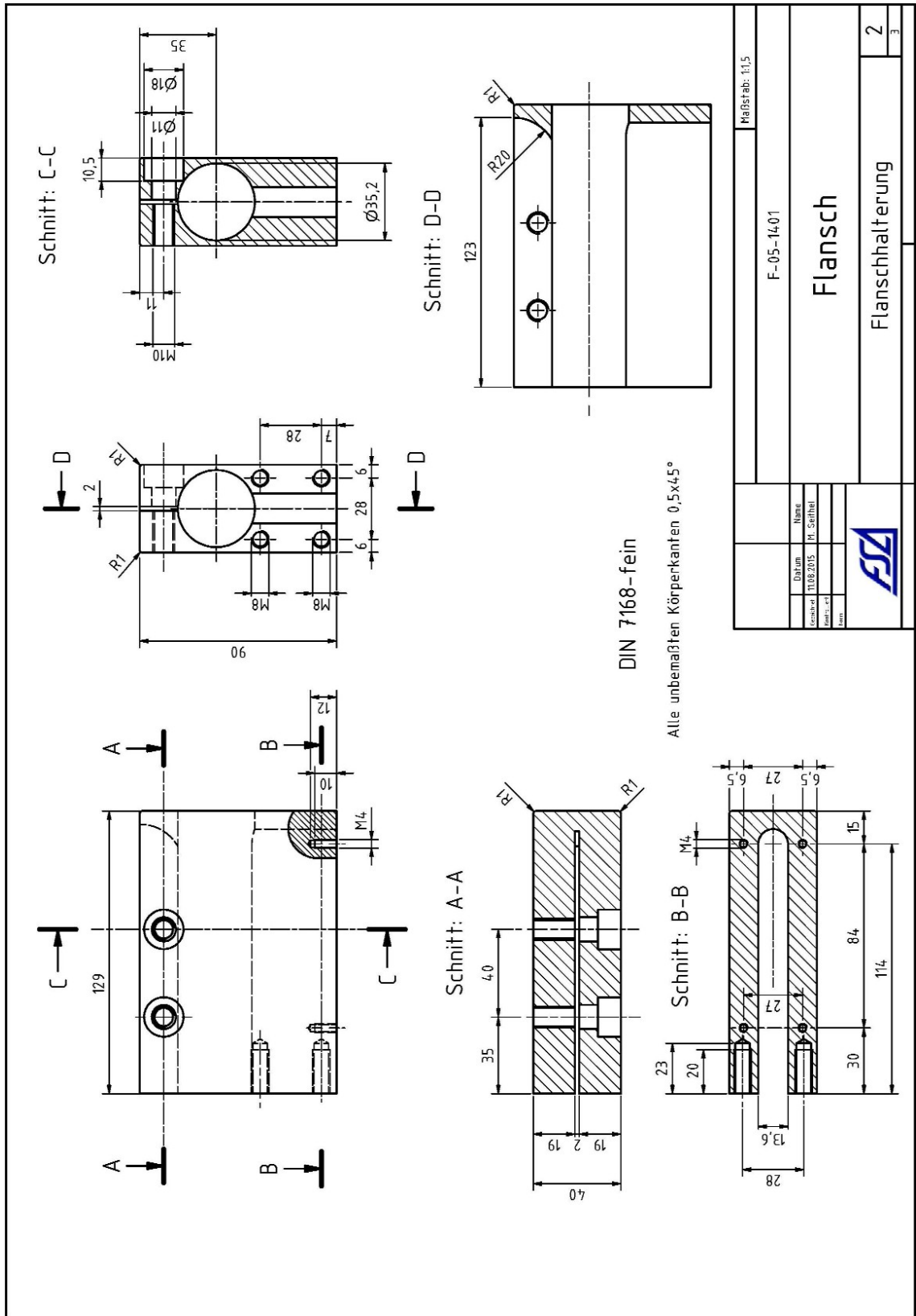


Abbildung B.2: Konstruktionszeichnung des Adapterflansches.

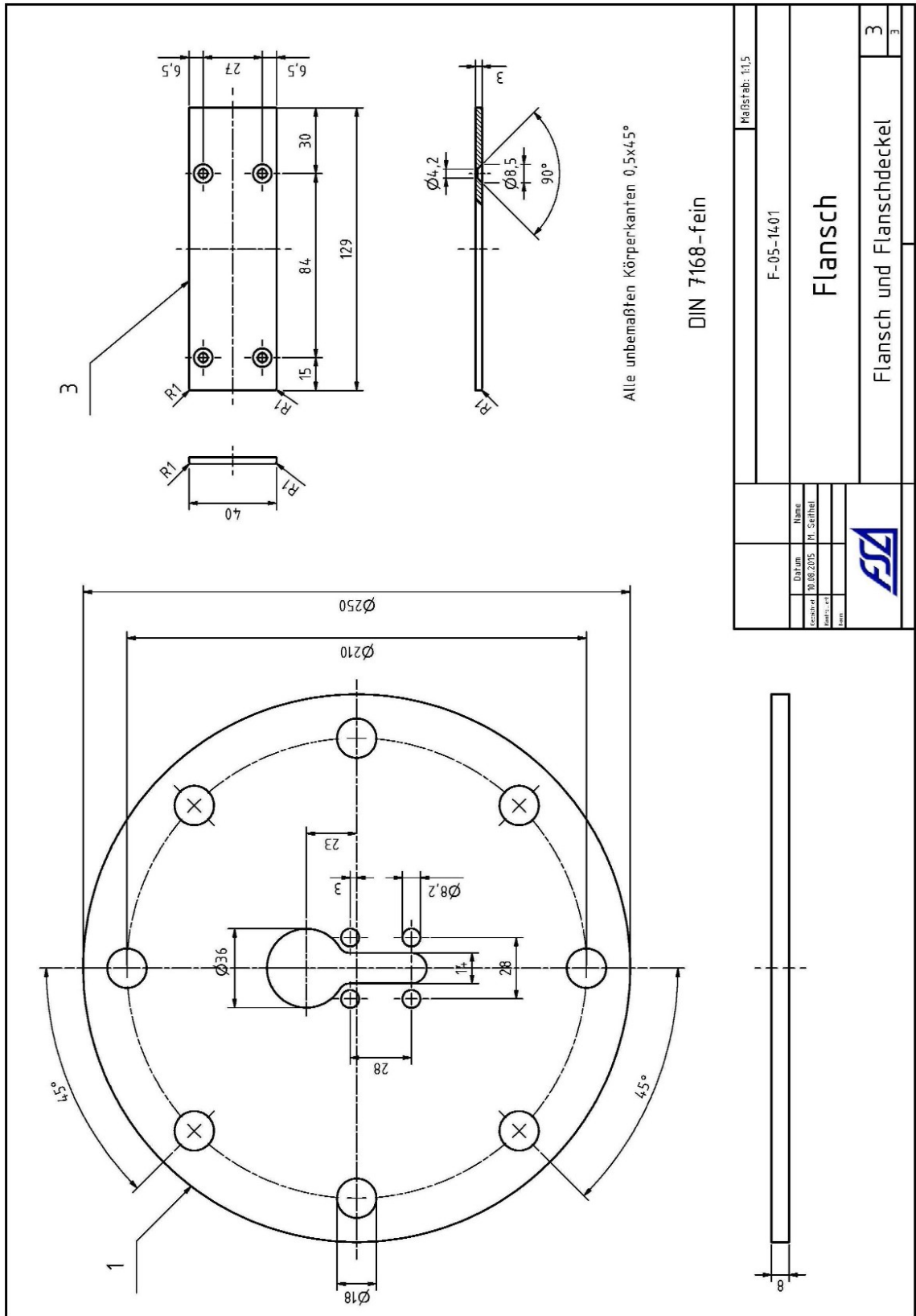


Abbildung B.3: Konstruktionszeichnung des Adapterflansches.

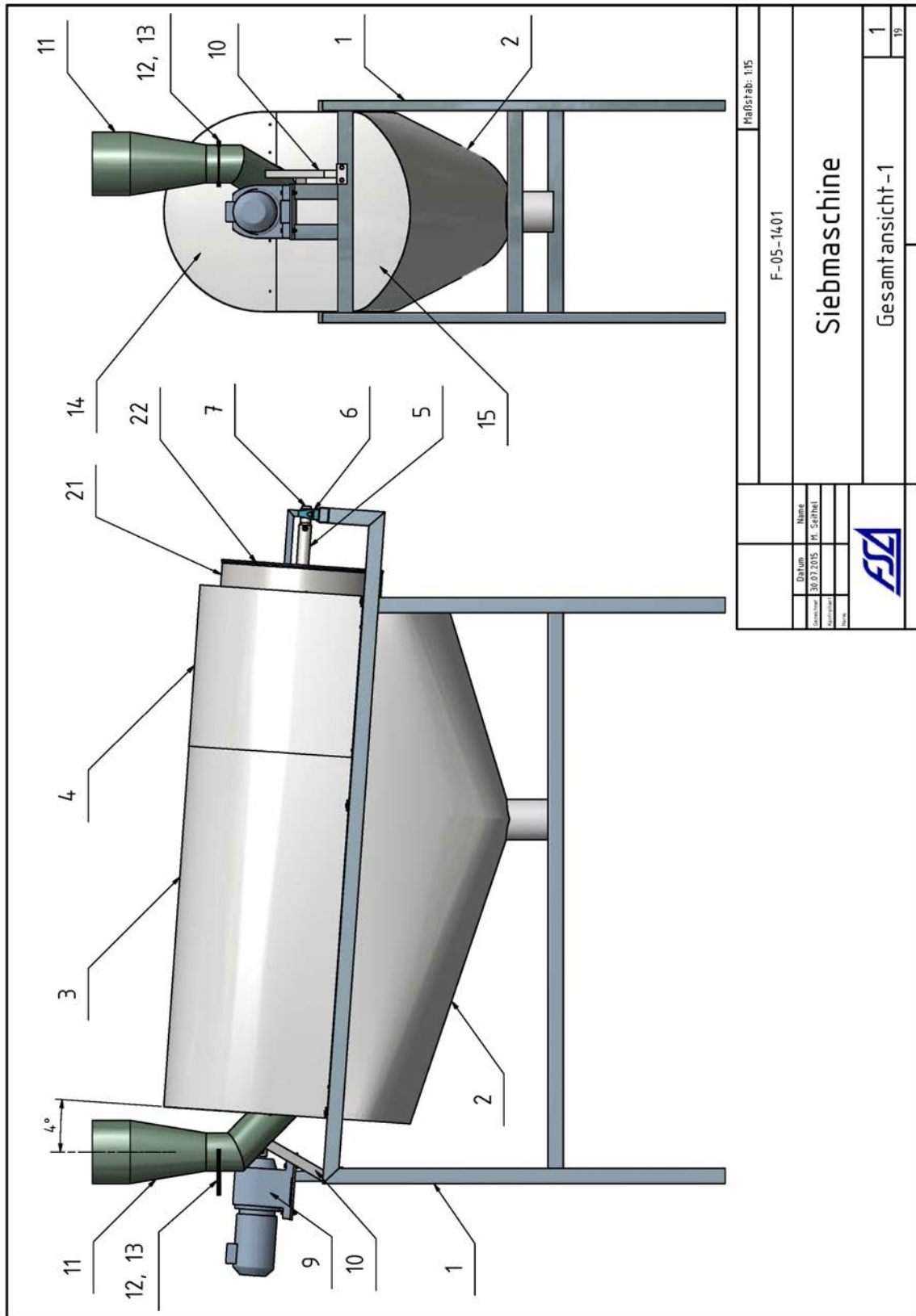


Abbildung B.4: Konstruktionszeichnung zur Siebmaschine.

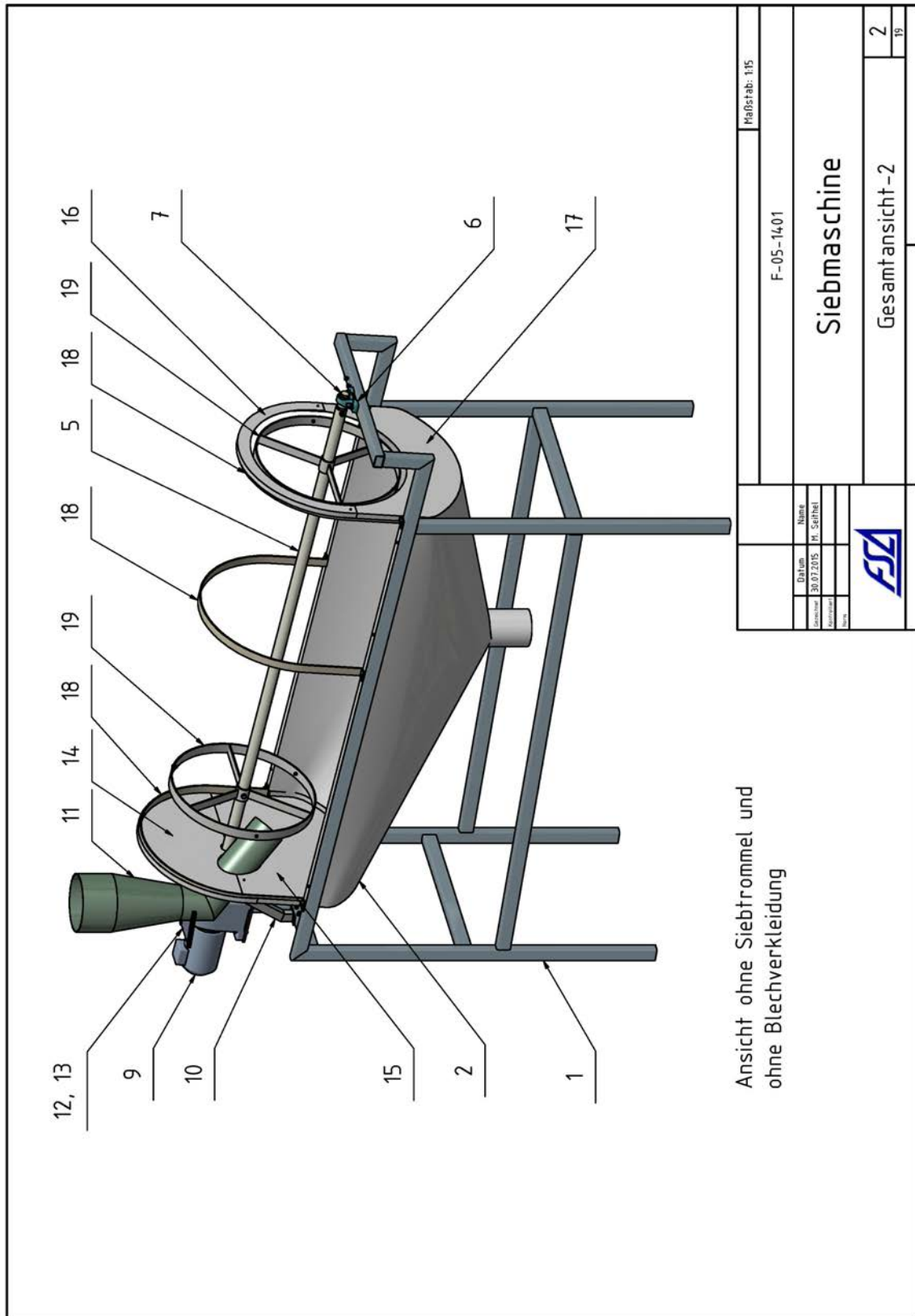


Abbildung B.5: Konstruktionszeichnung zur Siebmaschine.

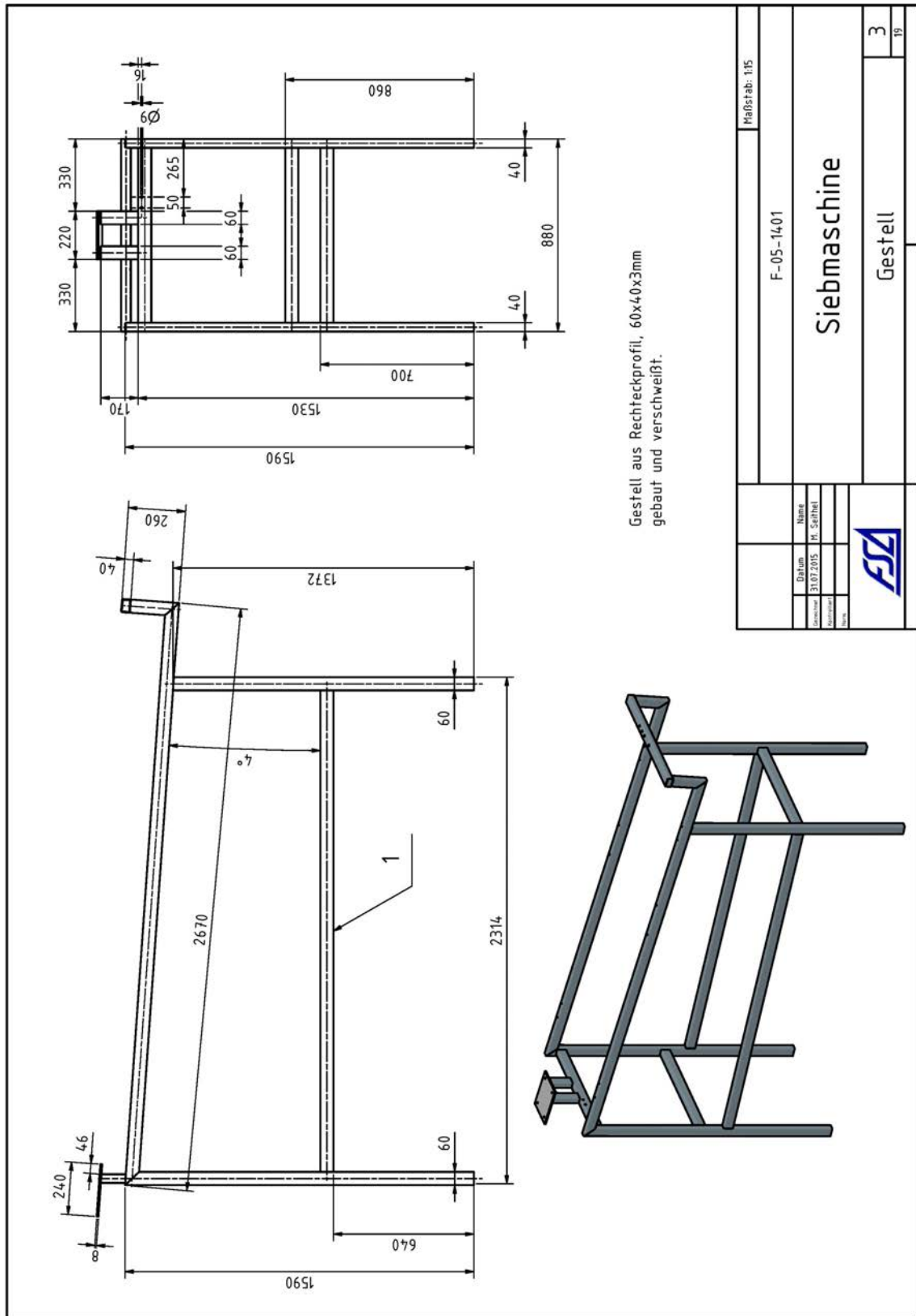


Abbildung B.6: Konstruktionszeichnung zur Siebmaschine.

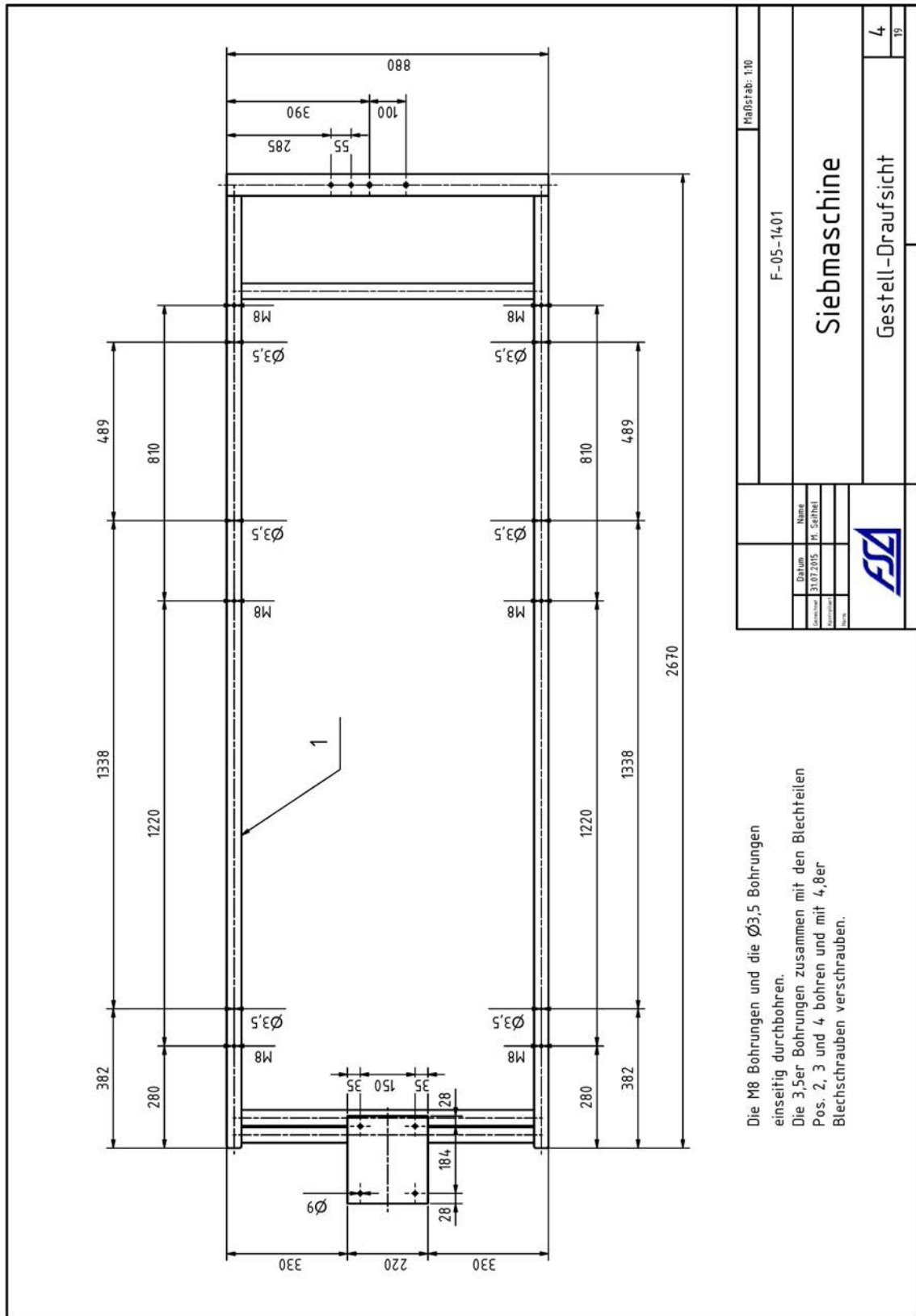


Abbildung B.7: Konstruktionszeichnung zur Siebmaschine.

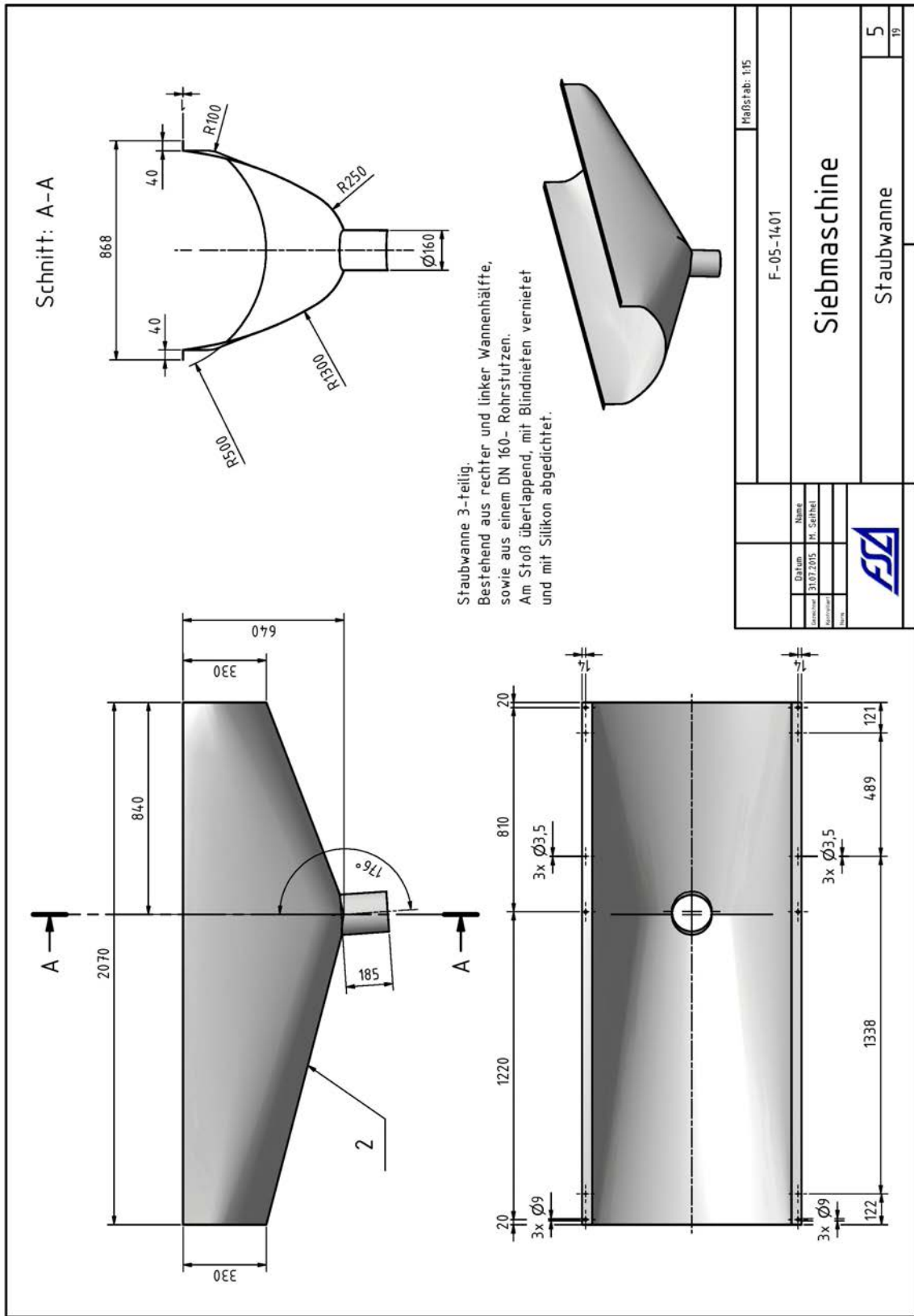


Abbildung B.8: Konstruktionszeichnung zur Siebmaschine.

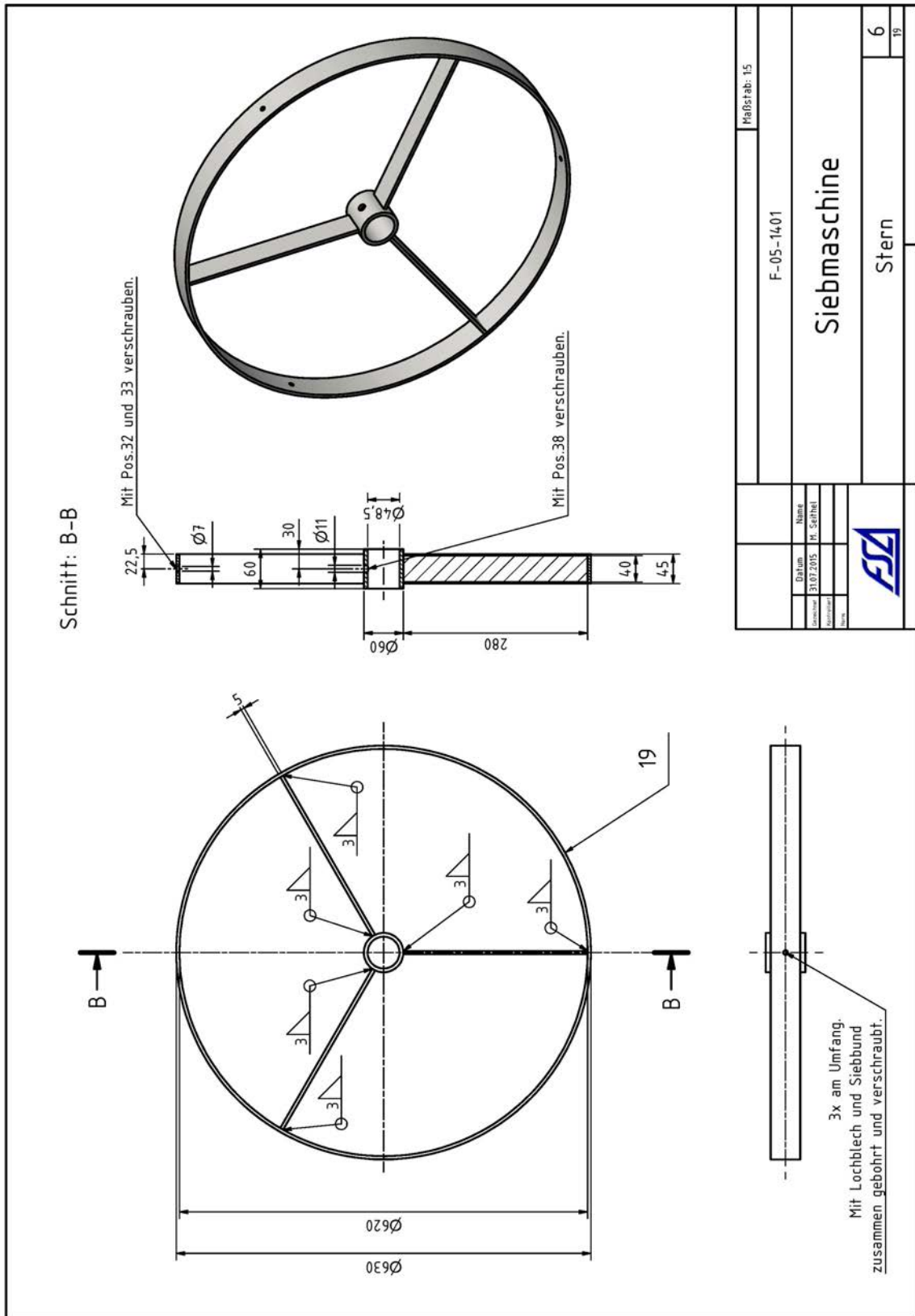


Abbildung B.9: Konstruktionszeichnung zur Siebmaschine.

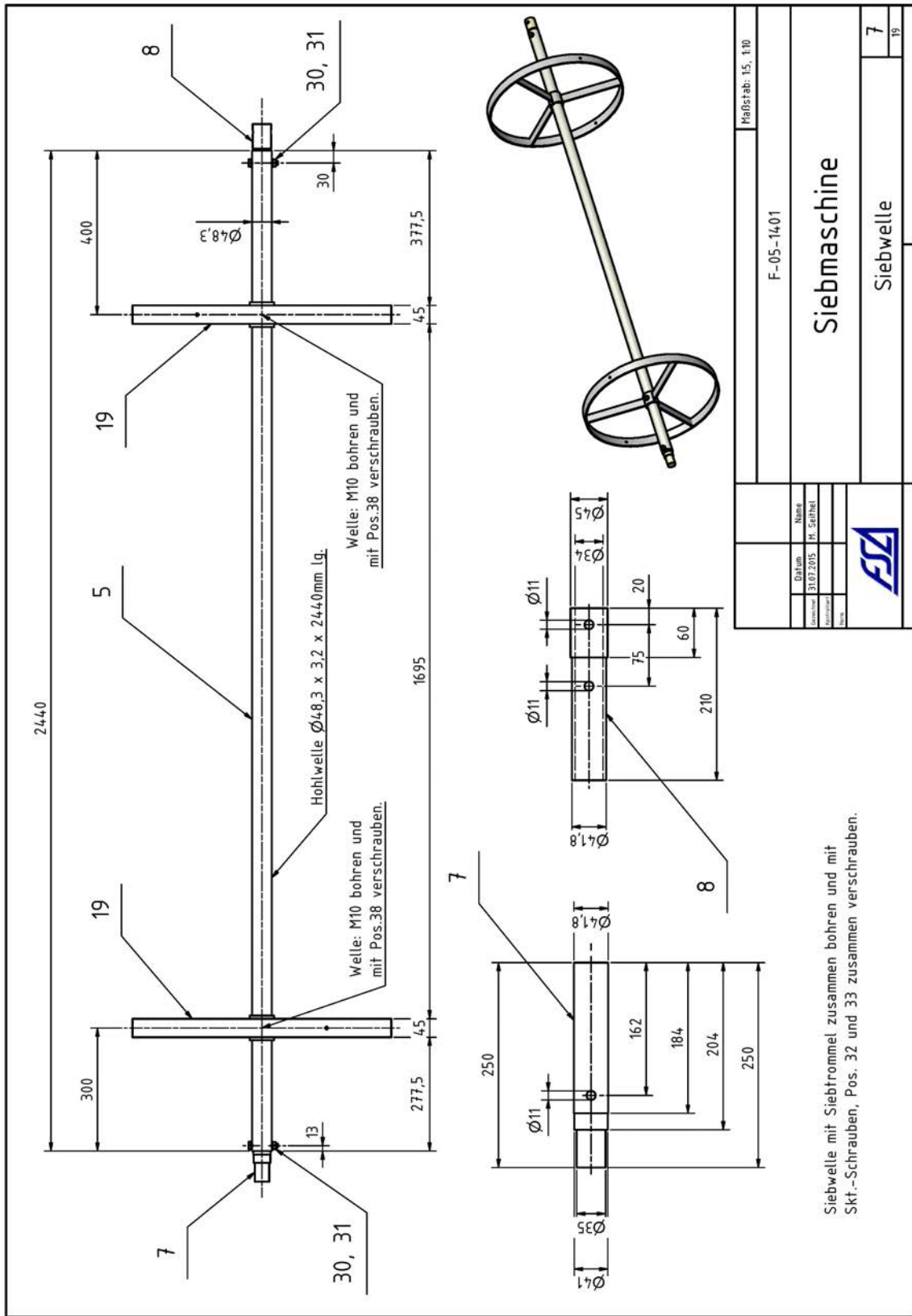


Abbildung B.10: Konstruktionszeichnung zur Siebmaschine.

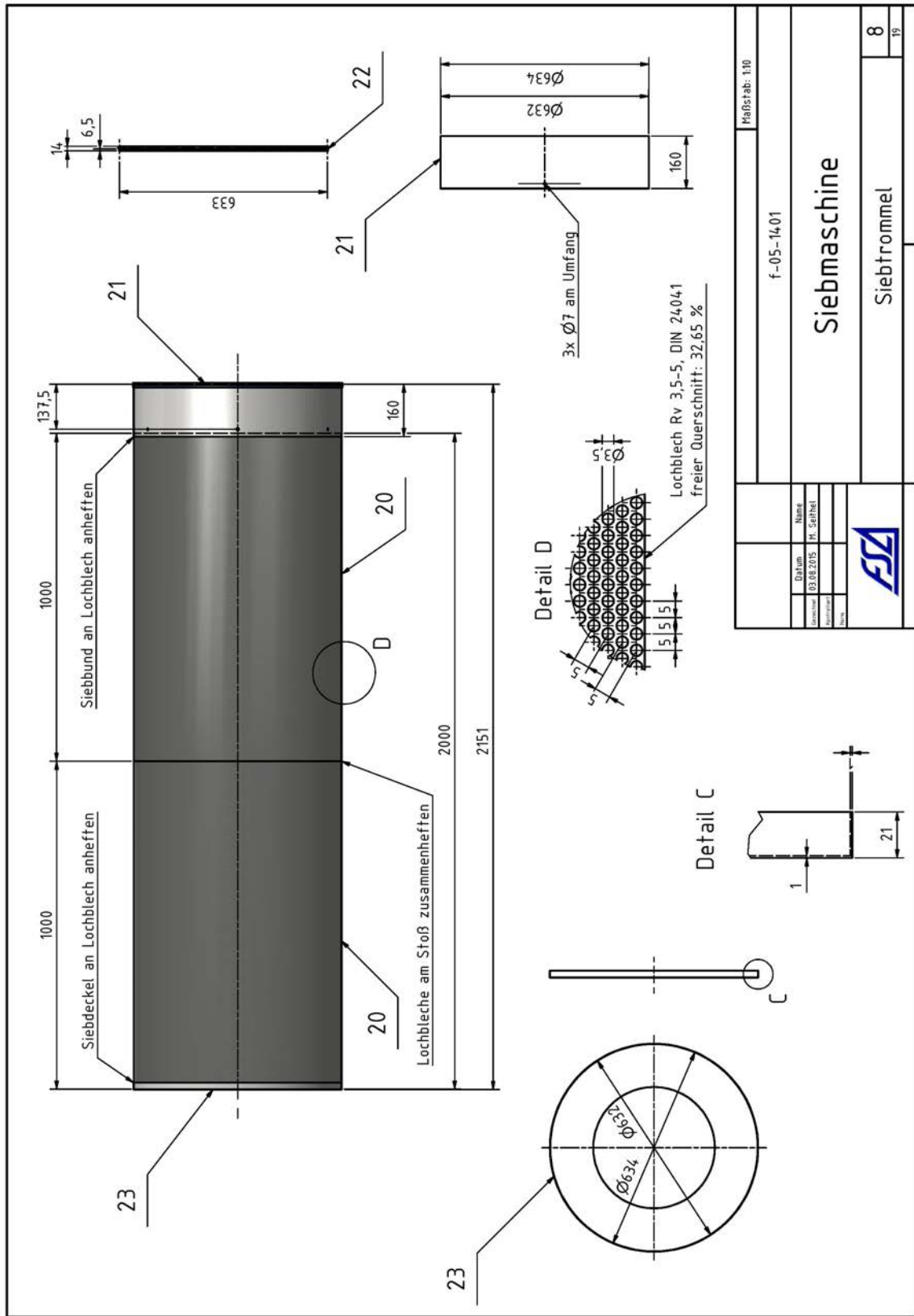


Abbildung B.11: Konstruktionszeichnung zur Siebmaschine.

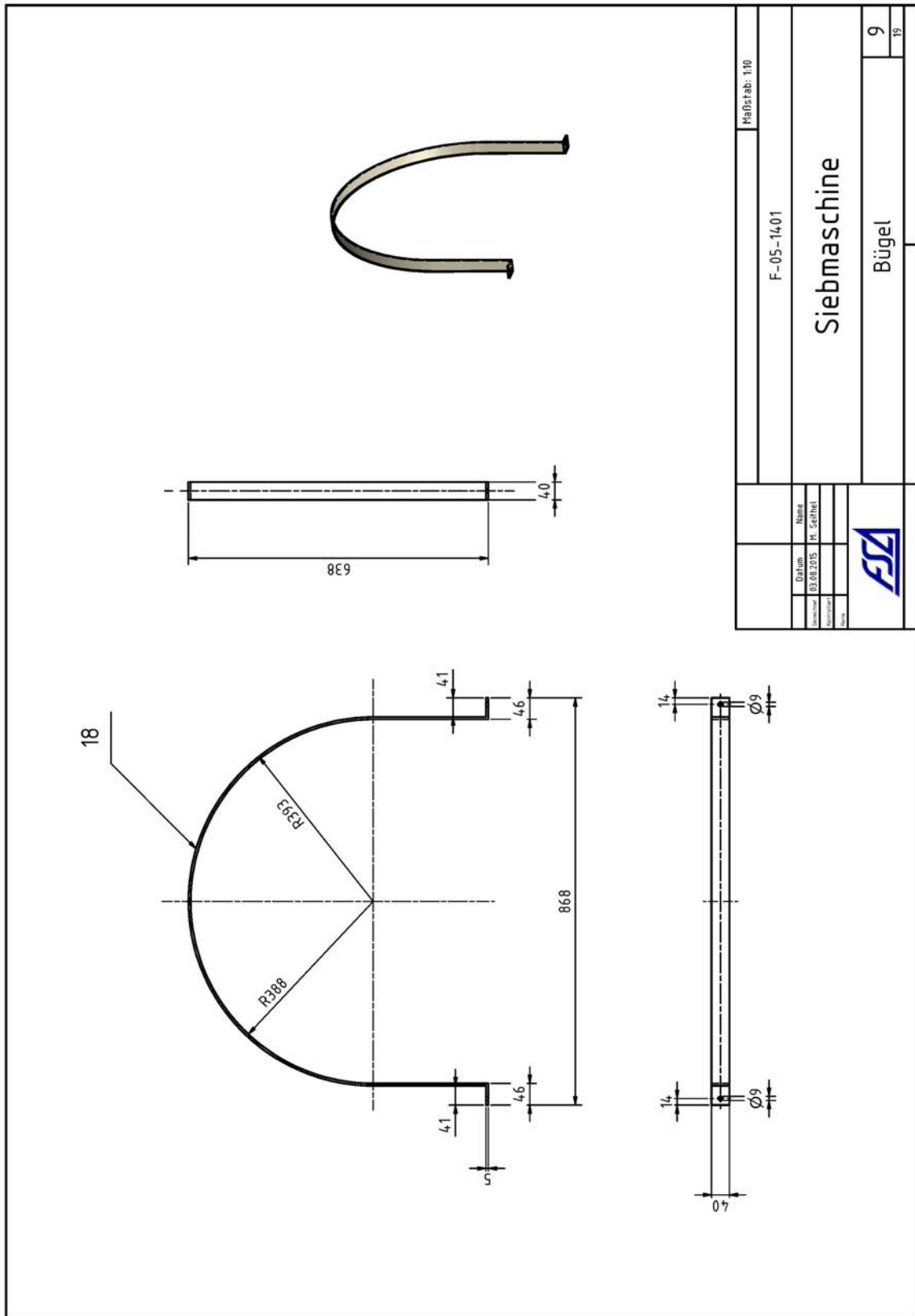


Abbildung B.12: Konstruktionszeichnung zur Siebmaschine.

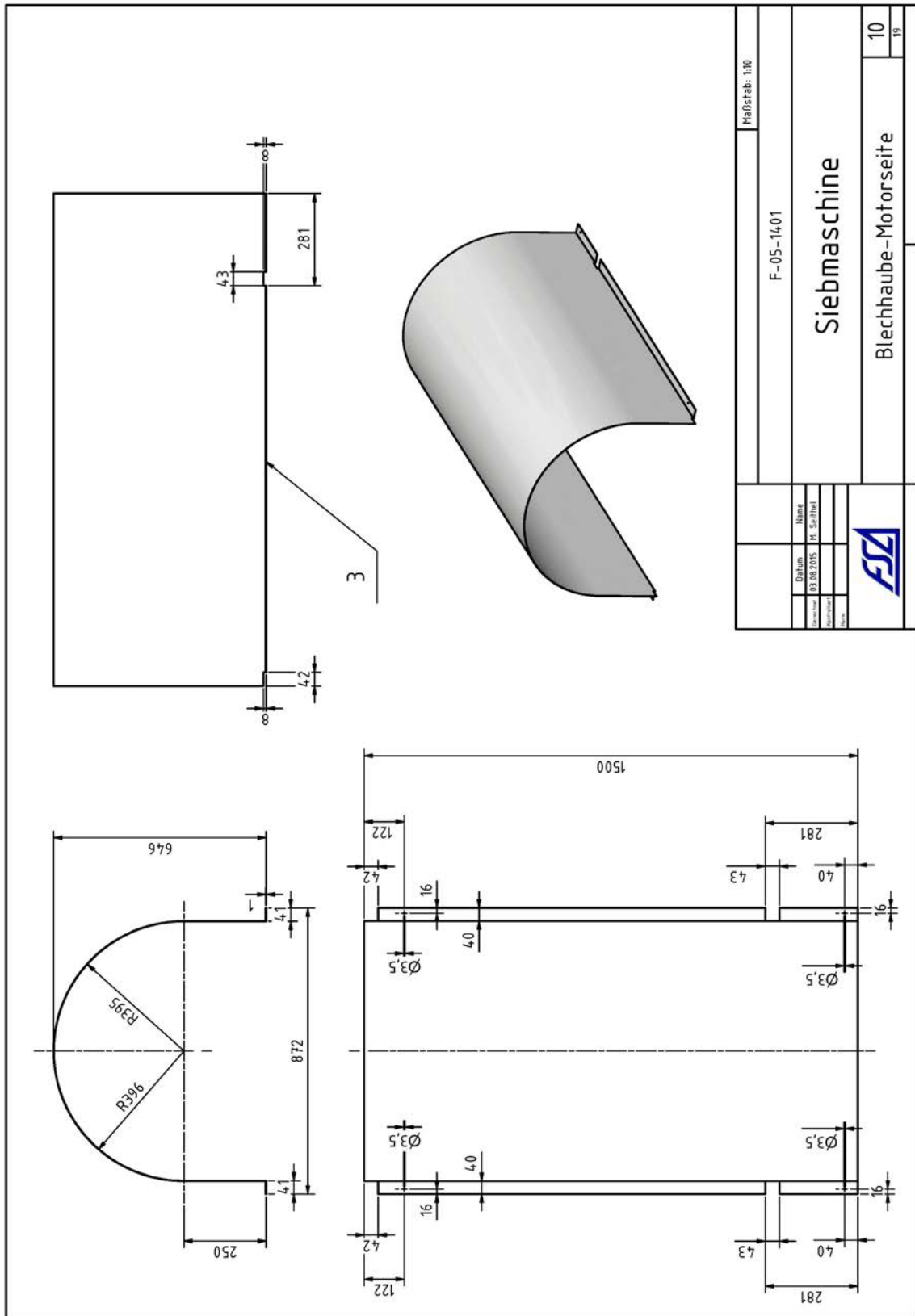


Abbildung B.13: Konstruktionszeichnung zur Siebmaschine.

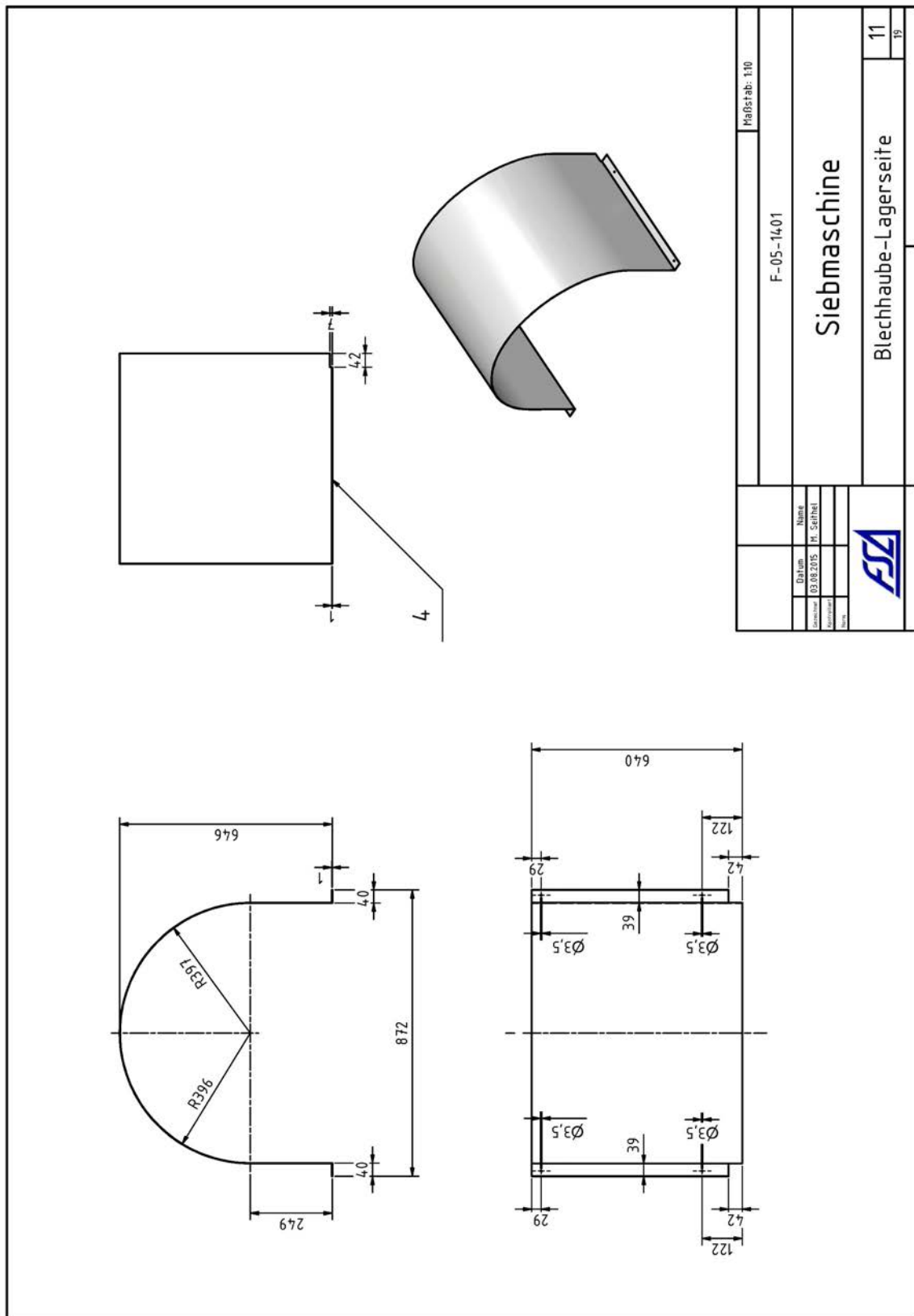


Abbildung B.14: Konstruktionszeichnung zur Siebmaschine.

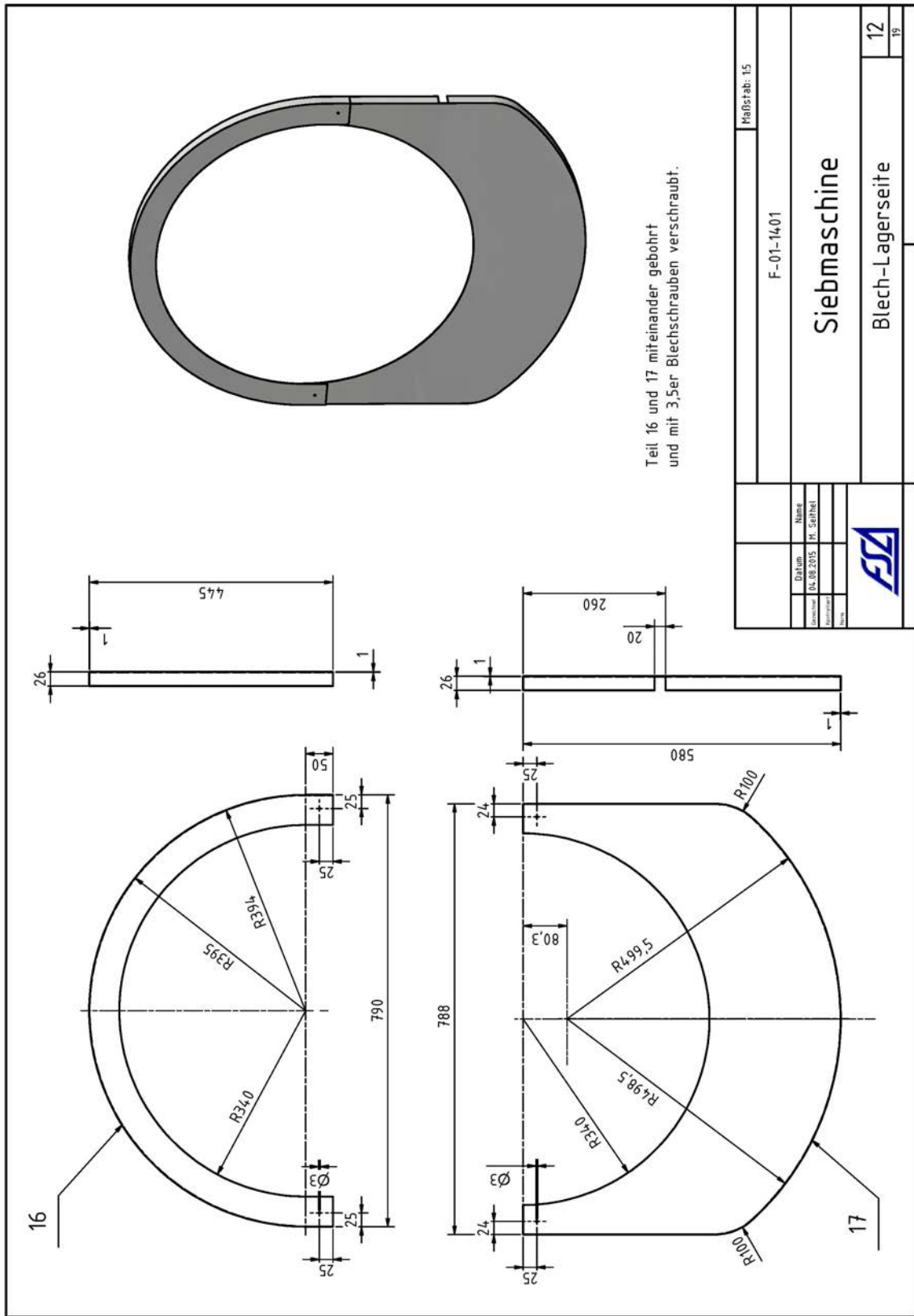


Abbildung B.15: Konstruktionszeichnung zur Siebmaschine.

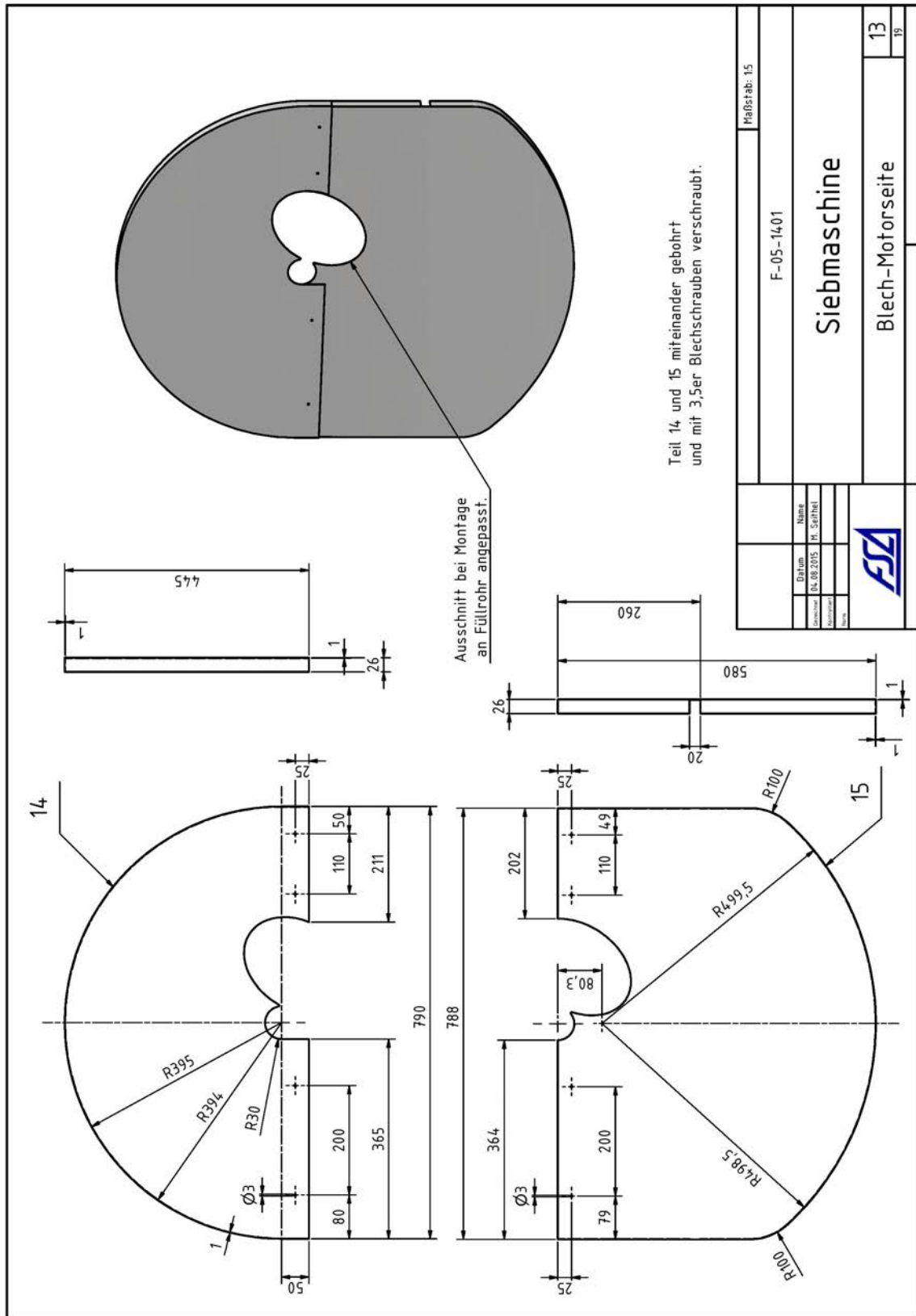


Abbildung B.16: Konstruktionszeichnung zur Siebmaschine.

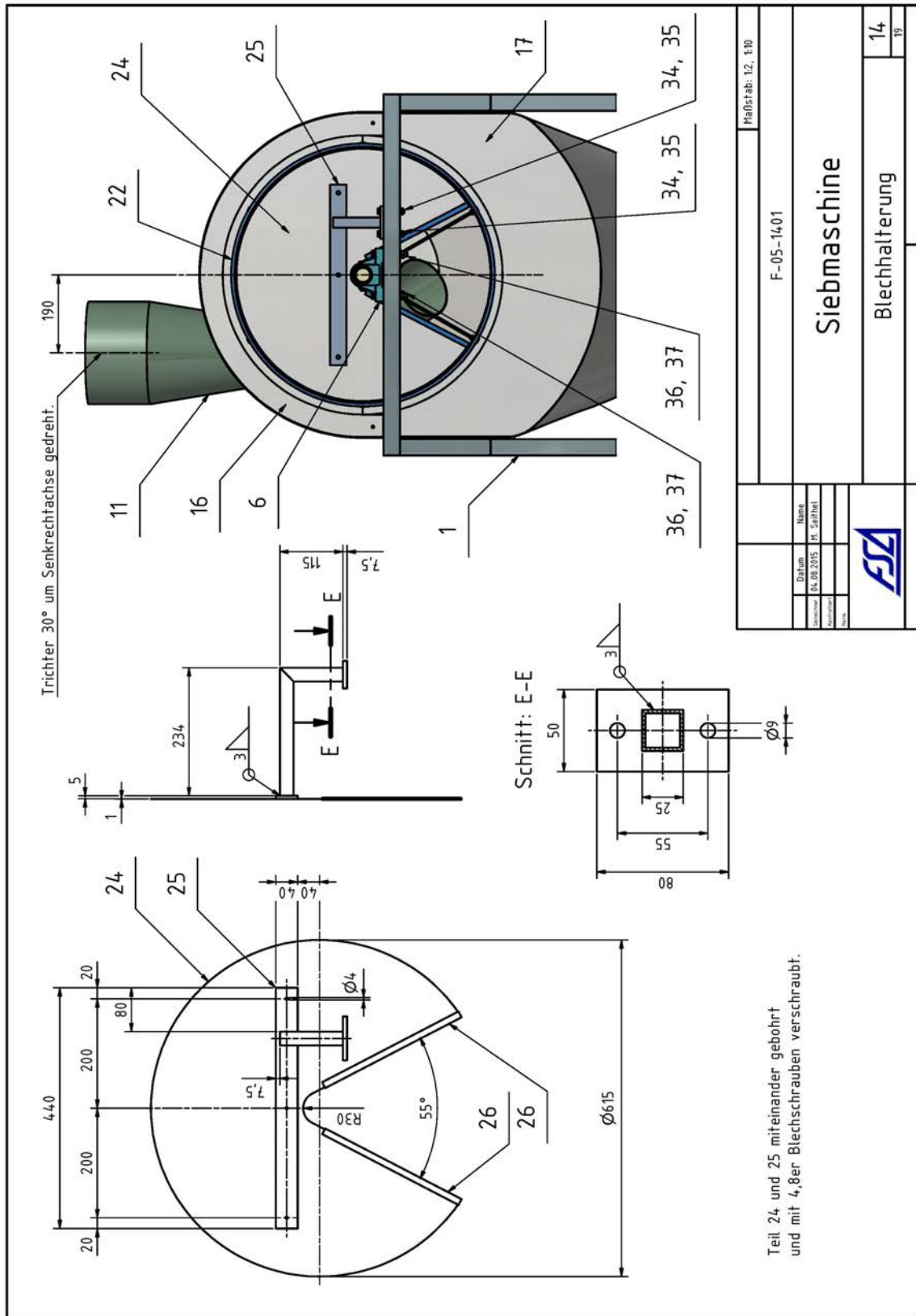


Abbildung B.17: Konstruktionszeichnung zur Siebmaschine.

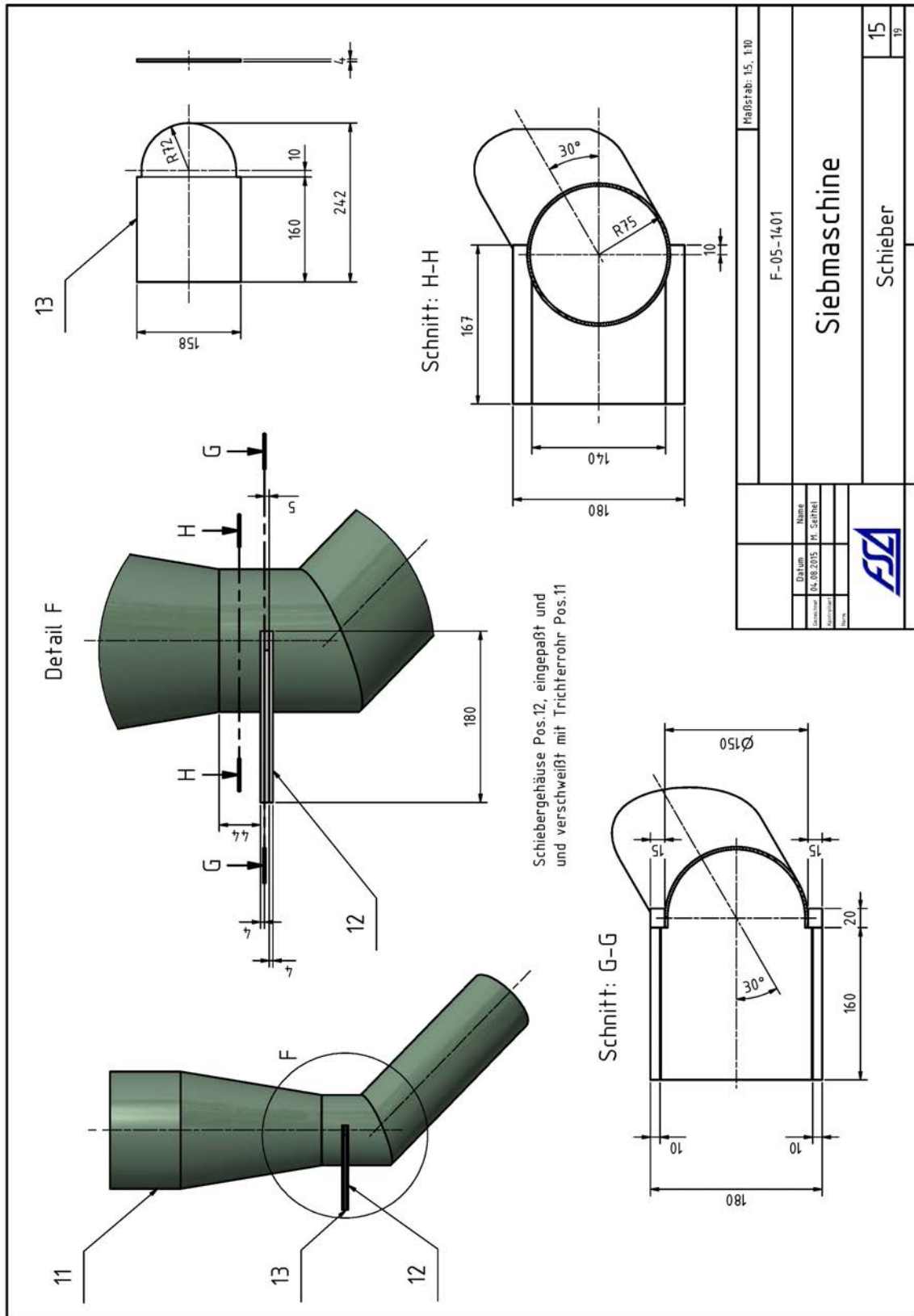


Abbildung B.18: Konstruktionszeichnung zur Siebmaschine.

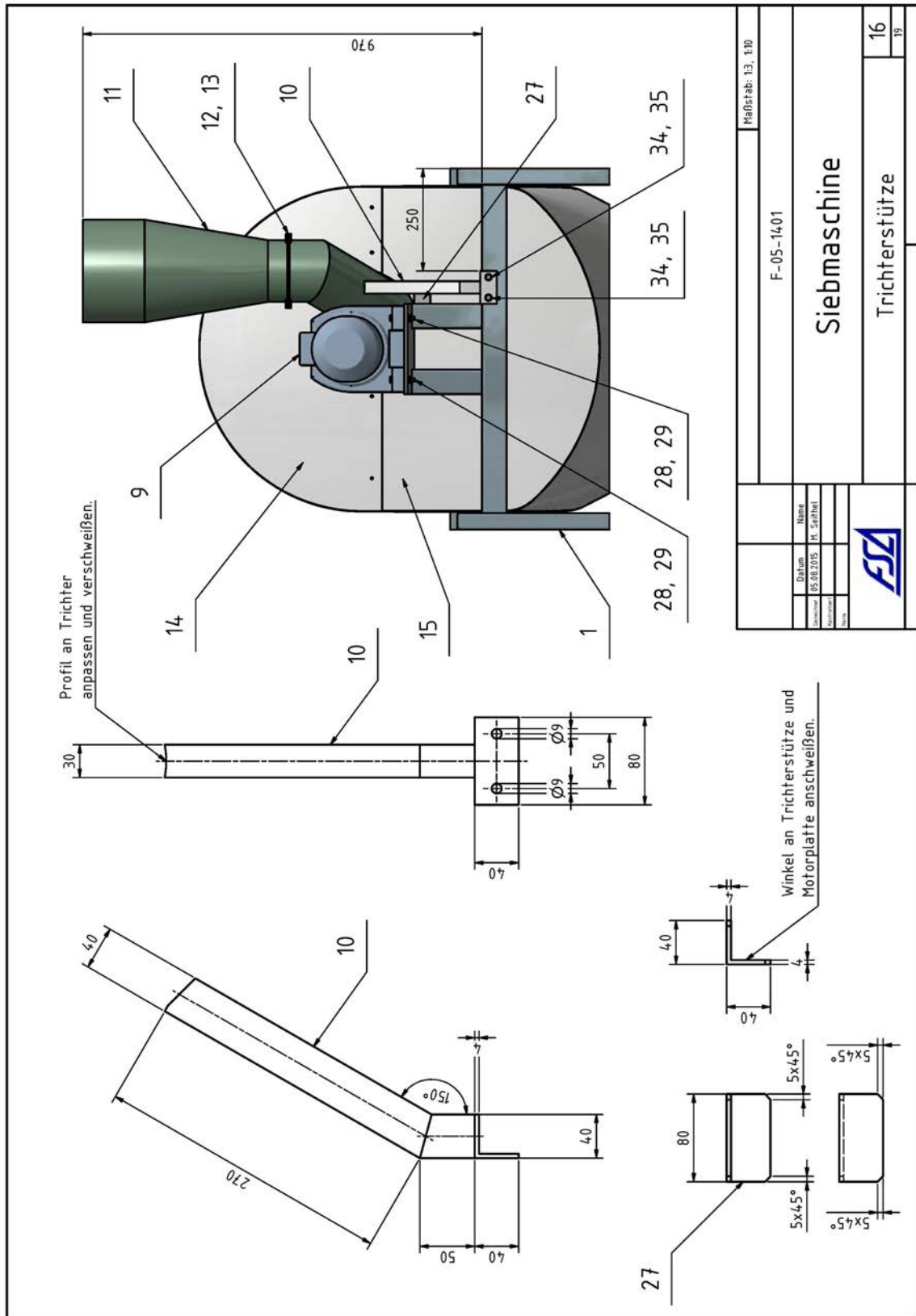


Abbildung B.19: Konstruktionszeichnung zur Siebmaschine.

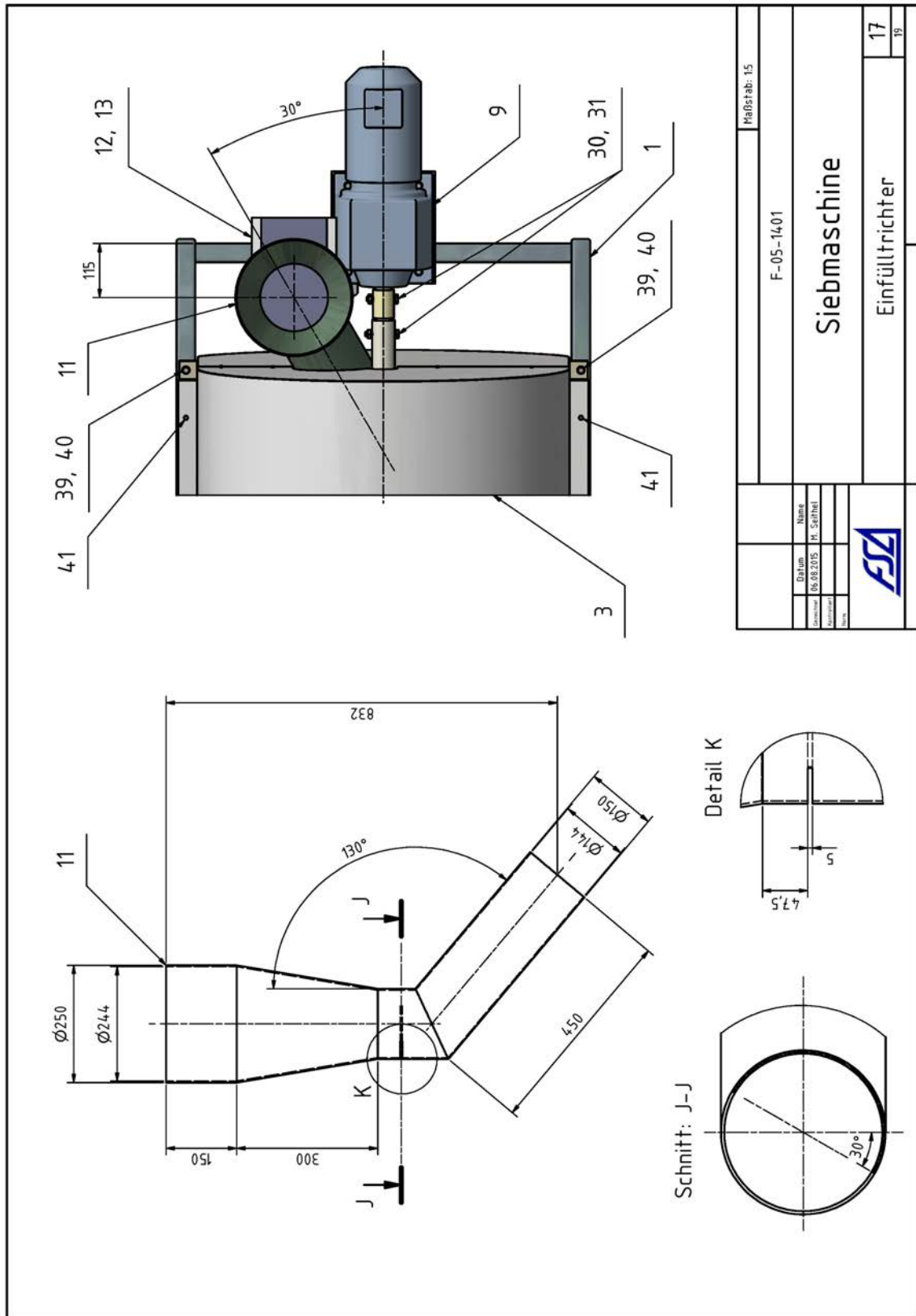


Abbildung B.20: Konstruktionszeichnung zur Siebmaschine.


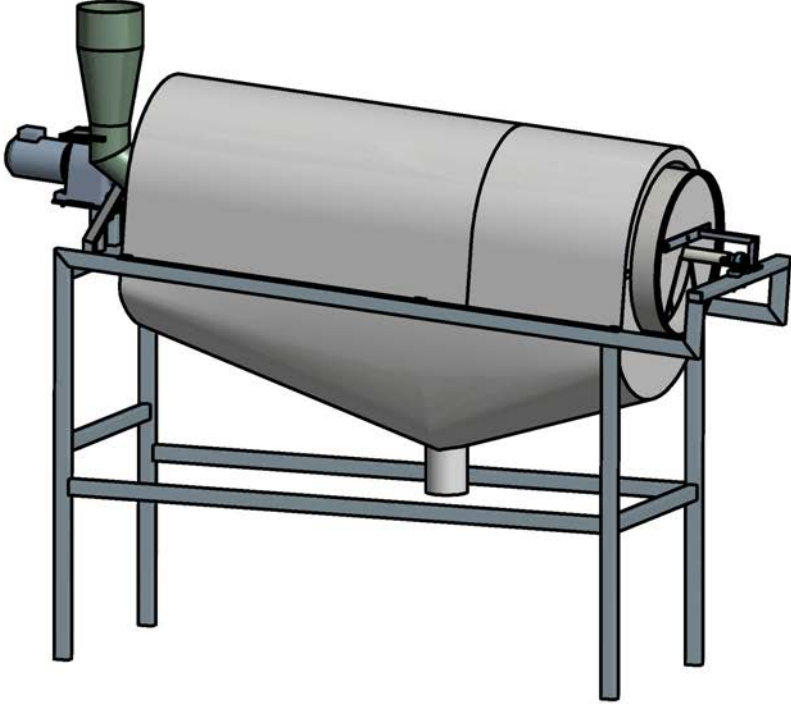
35	Scheibe, DIN 125-1 B B 8,4	8	St, verzinkt
34	Skt.-Schraube mit Mutter DIN EN 24014 M8x60	4	St, verzinkt
33	Scheibe, DIN 125-1 B B 6,4	12	St, verzinkt
32	Skt.-Schraube mit Mutter DIN EN 24017 M6x18	6	St, verzinkt
31	Scheibe, DIN 125-1 B B 10,5	6	St, verzinkt
30	Skt.-Schraube mit Mutter DIN EN 24017 M10x65	3	St, verzinkt
29	Scheibe, DIN 125-1 B B 8,4	8	St, verzinkt
28	Skt.-Schraube mit Mutter DIN EN 24014 M8x55	4	St, verzinkt
27	Winkel, 4x40x40x80mm	1	St 37
26	Gummiprofil, Kantenschutz TU1-186 Gummi EPDM, 2000mm lg.	2	Gummi
25	Blechhalterung: Rohr, 3x25x25x500mm, Flacheisen, 5x40x440mm	1	St 37
24	Stirnblech: 1mm Feinblech, 1000x1000x1mm	1	St 37, verzinkt
23	Siebdeckel: 1mm Feinblech, 1000x1000x1mm	1	V2A
22	Gummiprofil, Kantenschutz TU1-186 Gummi EPDM, 1000mm lg.	1	Gummi
21	Siebbund: Blech, 160x2000x1mm	1	V2A
20	Lochblech, 1000x2000x1mm, Rv3,5-5, DIN 24041	2	V2A
19	Stern: Flacheisen, 5x40x1000mm, Flacheisen, 5x45x2000mm	2	V2A
18	Bügel: Flacheisen, 5x40x2000mm	3	St 37
17	Blech-Lagerseite-unten: Feinblech verzinkt, 1000x1000x1mm	1	St 37, verzinkt
16	Blech-Lagerseite-oben: Feinblech verzinkt, 500x1000x1mm	1	St 37, verzinkt
15	Blech-Motorseite-unten: Feinblech verzinkt, 1000x1000x1mm	1	St 37, verzinkt
14	Blech-Motorseite-oben: Feinblech verzinkt, 500x1000x1mm	1	St 37, verzinkt
13	Schieber	1	St 37
12	Schiebergehäuse	1	St 37
11	Trichter	1	St 37
10	Trichterstütze: Rechteckrohr 40x30x3mm	1	St 37
9	Getriebemotor: SEW-Eurodrive, Typ: R67 DT80K4, 0,55kW	1	Getriebemotor
8	Motorwelle	1	V2A
7	Lagerwelle	1	V2A
6	Pendelkugellager: INA GG ASE 07-E	1	Wälzlagerstahl
5	Hohlwelle: Rohr, 48,3x3,2x2440mm	1	V2A
4	Blechhaube-Lagerseite: Feinblech verzinkt, 1000x2000x1mm	1	St 37, verzinkt
3	Blechhaube-Motorseite: Feinblech verzinkt, 1500x3000x1mm	1	St 37, verzinkt
2	Staubwanne: Feinblech verzinkt, 1500x3000x1mm	2	St 37, verzinkt
1	Gestell: Rechteckrohr, 60x40x3x6000mm	4	St 37
POS	BEZEICHNUNG	ANZAHL	MATERIAL
			Maßstab: 1:1
F-05-1401			
Datum		Name	
Bezeichnet	06.08.2015	M. Seithel	
Kontrolliert			
Name			
		Stückliste-1	
		18	
		19	

Abbildung B.21: Stückliste zur Siebmaschine.




44	Silikon-Kleber, Fa. Pattex 310ml	3	Silikon												
43	Blindniet DIN EN ISO 15977 3,2x10	30	St, verzinkt												
42	Skt.-Blechschaube DIN ISO 1479-CST 3,5x9,5	5	St, verzinkt												
41	Skt.-Blechschaube DIN ISO 1479-CST 4,8x16	9	St, verzinkt												
40	Scheibe, DIN 125-1 B B 8,4	6	St, verzinkt												
39	Skt.-Schraube DIN 24017 M8x20	6	St, verzinkt												
38	Skt.-Schraube DIN EN 24017 M10x14	2	St, verzinkt												
37	Scheibe, DIN 125-1 B B 10,5	10	St, verzinkt												
36	Skt.-Schraube mit Mutter DIN EN 24014 M10x80	4	St, verzinkt												
POS	BEZEICHNUNG	ANZAHL	MATERIAL												
			Maßstab: 1:1												
F-05-1401															
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Datum</th> <th>Name</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Gezeichnet</td> <td>06.08.2015</td> <td>M. Seithel</td> </tr> <tr> <td>Kontrolliert</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Notiz</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Datum	Name	Gezeichnet	06.08.2015	M. Seithel	Kontrolliert			Notiz			<h1>Siebmaschine</h1>	
	Datum	Name													
Gezeichnet	06.08.2015	M. Seithel													
Kontrolliert															
Notiz															
		<h2>Stückliste-2</h2>													
			19												
			19												

Abbildung B.22: Stückliste zur Siebmaschine.

Anhang C

Sicherheitstechnische Kenngrößen

FSA	Bestimmung der Staubungsverhaltens von Schüttgütern nach VDI 2263 Blatt 9					Datum: 25.06.2015
						Prüfer: Schoenherr
Produkt-identifikation	Produktbezeichnung	Pelletabrieb				
	ProduktNr.	F-05-1401	Probenort	MA		
	Lieferant	EVO / Benjamin Schmidt Dynamostr. 7 68165 - Mannheim				
Produkt-eigenschaften	Produktfeuchte	Wert in %				Prüfverfahren
		7				Trockenschrank
	Schüttdichte	Wert in g/cm ³				Prüfverfahren
		0,405				SMG 53466
	Korngrößenverteilung	Werte Q3 in %				Prüfverfahren
		<500µm	<250µm	<125µm	<63µm	<32µm
30,1		15,5	8,1	5,0	3,0	
Umgebungseigenschaften	Lufttemperatur	21 °C				
	relative Luftfeuchte	56 %				
Probenaufbereitung	keine					
Kalibrierung	Staubsaammelplättchen	1	2	3	4	5
	Staubmasse in mg	0,9	2,80	4,1	8,5	11,9
	Messspannung mV	170	336	535	821	896
	Koeffizienten	ε in m ² /g			B ₂	B ₁
0,160			0,03205363	1000		
Messung	Nummer	1		2		3
	Rückwaage in kg	2,176		2,268		2,224
	Staubungszahl S _i	7,86		8,08		8,31
Staubungszahl		8,08				
Standardabweichung in %		2,27				
Staubungsgruppe		3				
Abweichung vom Verfahren		Produkt wurde mehrmals in den Probenbehälter gegeben				

Abbildung C.1: Ergebnisse der Staubungszahlbestimmung für den Holzpellet-Feinstaub.

F-05-1401

Übersicht Prüfergebnisse

witem

Produkt: *Pelletabrieb*

Datum: *24.6.15*

Produktnummer: *1782AF*

1. Bestimmungsverfahren:

Korngrößenverteilung		Feuchtigkeitsbestimmung		Probenvorbereitung		Prüfapparatur (p _{max} , Kst-Wert und UEG)	
Luftstrahlsieb	X	Trockenschrank	X	Urmuster	X	20-l-Kugel	X
Rüttelsieb		Feuchteanalysator		Genormtes Muster	X	1 m ³ Behälter	
Laserbeugung							

2. Korngrößenanalyse

Einwaage [g]:	20,000				
Prüfverfahren:	Luftstrahlsieb				
Siebgröße [µm]	500	250	125	63	32
m _{Rück} [g]	<i>13,927</i>	<i>16,891</i>	<i>18,572</i>	<i>18,998</i>	<i>19,401</i>
Anteil Gew. %	<i>30,1</i>	<i>15,5</i>	<i>8,1</i>	<i>5,0</i>	<i>3,0</i>

24.06.2015 10:14
 Pre 1 FEUCHTIGKEIT
 Heizen STANDARD
 Temp.Ende 90 °C
 Start M.STILLST.
 Ende AUTOMATISCH

Siebgröße [µm]	4000	2000	1000
m _{Rück} [g]			<i>0</i>	<i>0,096</i>	<i>6,691</i>
Anteil Gew. %			<i>100</i>	<i>99,5</i>	<i>66,5</i>

PRODUKTNR: PELLETABRIEB

GStart + 4.5632 g
 13.0 min + 7.48 %L
 14.0 min + 7.52 %L
 15.0 min + 7.55 %L
 16.0 min + 7.57 %L
 17.0 min + 7.59 %L

3. Restfeuchte

(Trocknung bei 105°C für 1 h im Trockenschrank)

Schale leer [g]	<i>1,7672</i>	Gewicht ohne Sch: Gew. % Wasserverlust
Einwaage Ausgangszustand [g]	<i>7,5713</i>	
Einwaage nach Trocknung [g]	<i>7,1725</i>	
Feuchte mit Sartorius [%]:	<i>7,59</i>	
Feuchtigkeitsbestimmung (Urmuster):	<i>6,87</i>	

GEnde + 4.2169 g
 17.0 min + 7.59 %L

Name:

4. HMA, 20L Kugel, MZE, Zünd-, Glimm-, Brennprüfung

Explosionsfähigkeit Hartmannapparat	<i>nb</i>	(DA)
Maximaler Explosionsüberdruck p _{max} :	<i>8,2</i>	bar
Maximaler zeitlicher Druckanstieg (dp/dt) _{max} :	<i>594</i>	bar·s ⁻¹
Staubspezifische Kenngröße K _{st} :	<i>161</i>	bar·m·s ⁻¹
Untere Explosionsgrenze UEG:	<i>125</i>	g/m ³
Mindestzündenergie MZE ¹ :	<i>0,01</i>	< MZE ≤ 0,03
Mindestzündenergie MZE ² :	<i>nb</i>	< MZE ≤
Zündtemperatur ZT:	<i>480</i>	°C
Glimmtemperatur GT:	<i>290</i>	°C
Brennbarkeit BZ:	<i>5</i>	

¹ bestimmt mit Induktivität im Entladekreis ² bestimmt ohne Induktivität im Entladekreis

n.b. - nicht bestimmt

Abbildung C.2: Sicherheitstechnische Kenngrößen für den Holzpellet-Feinstaub.

Anhang D

Versuchsergebnisse

Nr.	Datum	T_L [°C]	F_r [%]	F_a [g/m ³]
1	02.07.2015	37,0	65,9	28,8
2	06.07.2015	30,4	58,8	18,2
3	07.07.2015	36,1	68,6	28,7
4	08.07.2015	23,8	54,0	11,6
5	09.07.2015	23,1	58,3	12,0
6	10.07.2015	26,9	52,1	13,3
7	13.07.2015	24,6	68,6	15,4
8	18.07.2015	30,7	75,1	23,6
9	22.07.2015	34,3	65,8	25,0
10	24.07.2015	33,2	65,3	23,4
11	30.07.2015	22,5	68,5	13,6
12	31.07.2015	24,6	61,5	13,8
13	31.07.2015	24,6	61,5	13,8

Tabelle D.1: Datum, Lufttemperatur T_L (Tagesmaximum), relative Luftfeuchtigkeit F_r (Tagesmittel) und absolute Luftfeuchtigkeit F_a (Tagesmittel) zu den durchgeführten Versuchen.

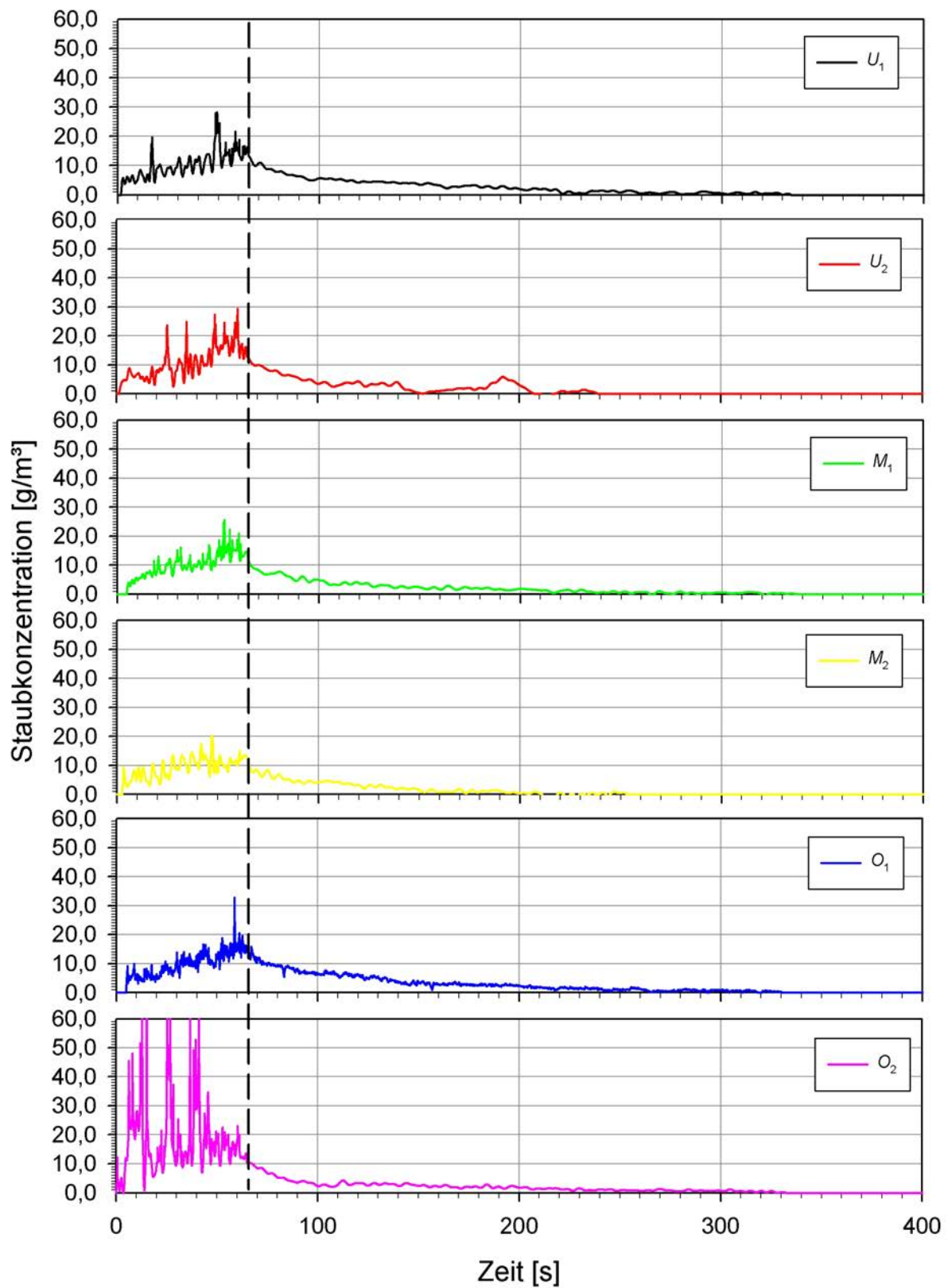


Abbildung D.1: Gemessene Staubkonzentrationsverläufe bei Versuch Nr. 1. Weil der Elevator während des Versuchs ausfiel betrug die Förderzeit hier nur 65 s. Die gestrichelte Linie markiert das Förderzeitende.

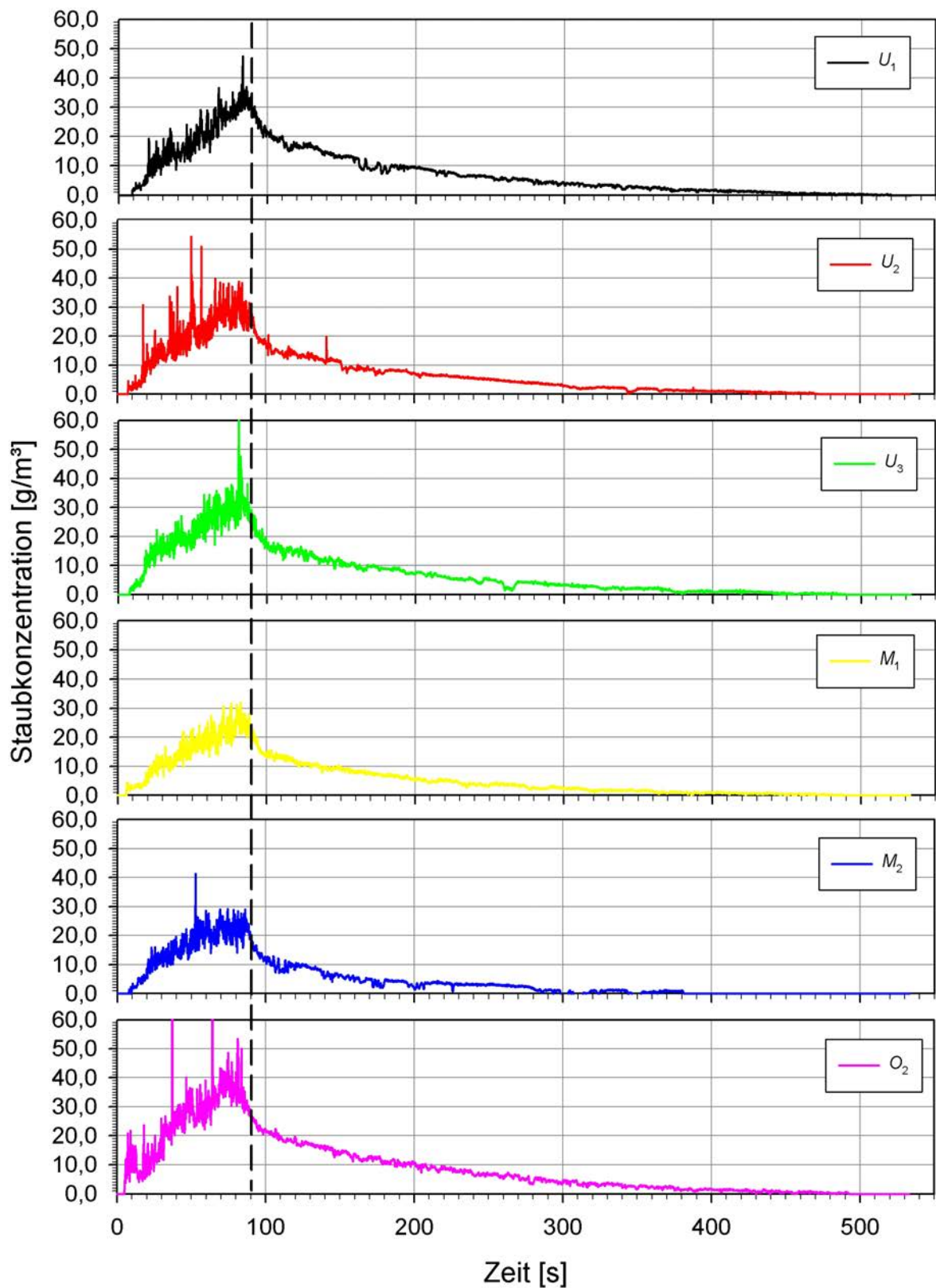


Abbildung D.2: Gemessene Staubkonzentrationsverläufe bei Versuch Nr. 2. Die gestrichelte Linie markiert das Förderzeitende.

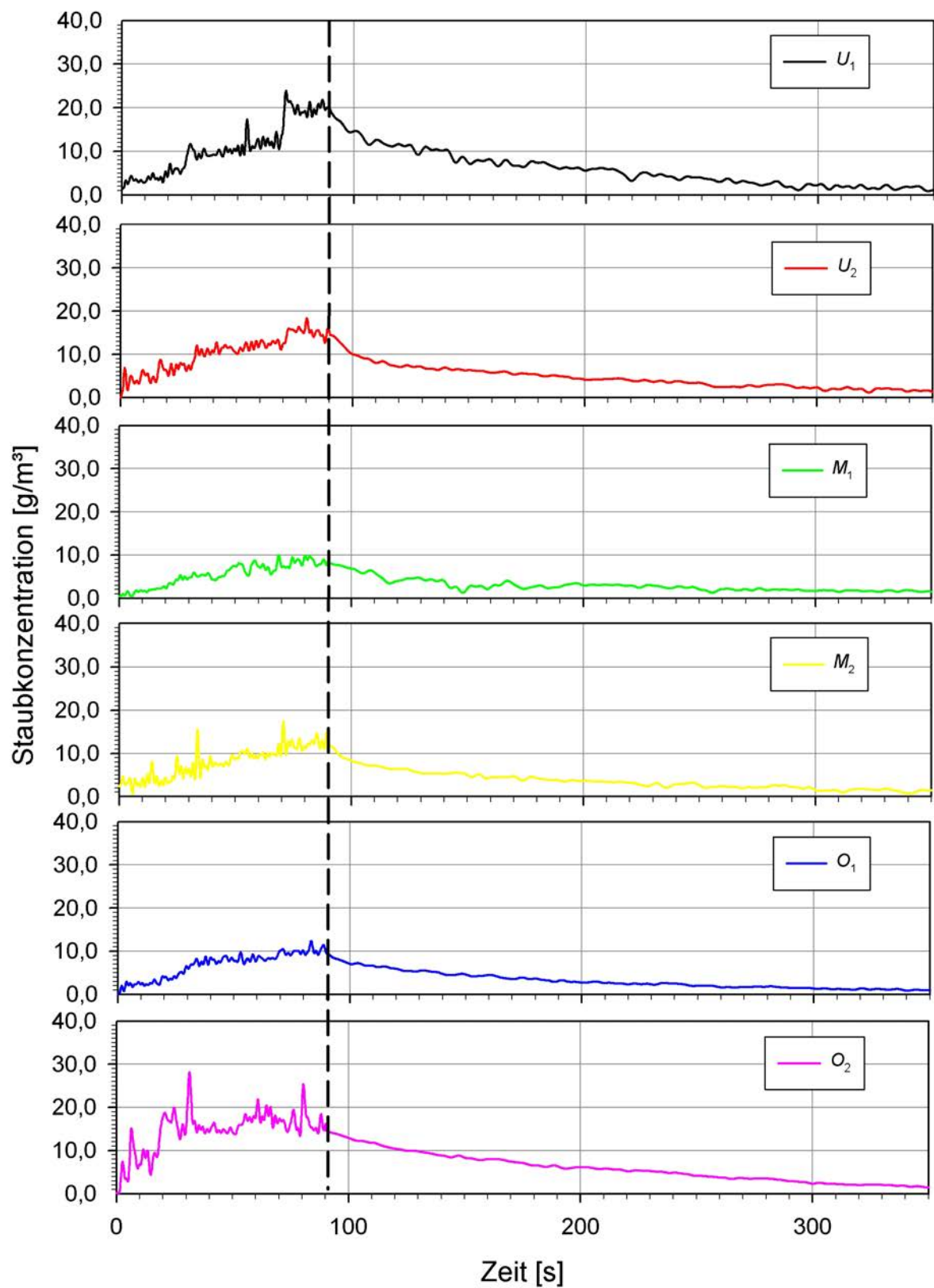


Abbildung D.3: Gemessene Staubkonzentrationsverläufe bei Versuch Nr. 3. Die gestrichelte Linie markiert das Förderzeitende.

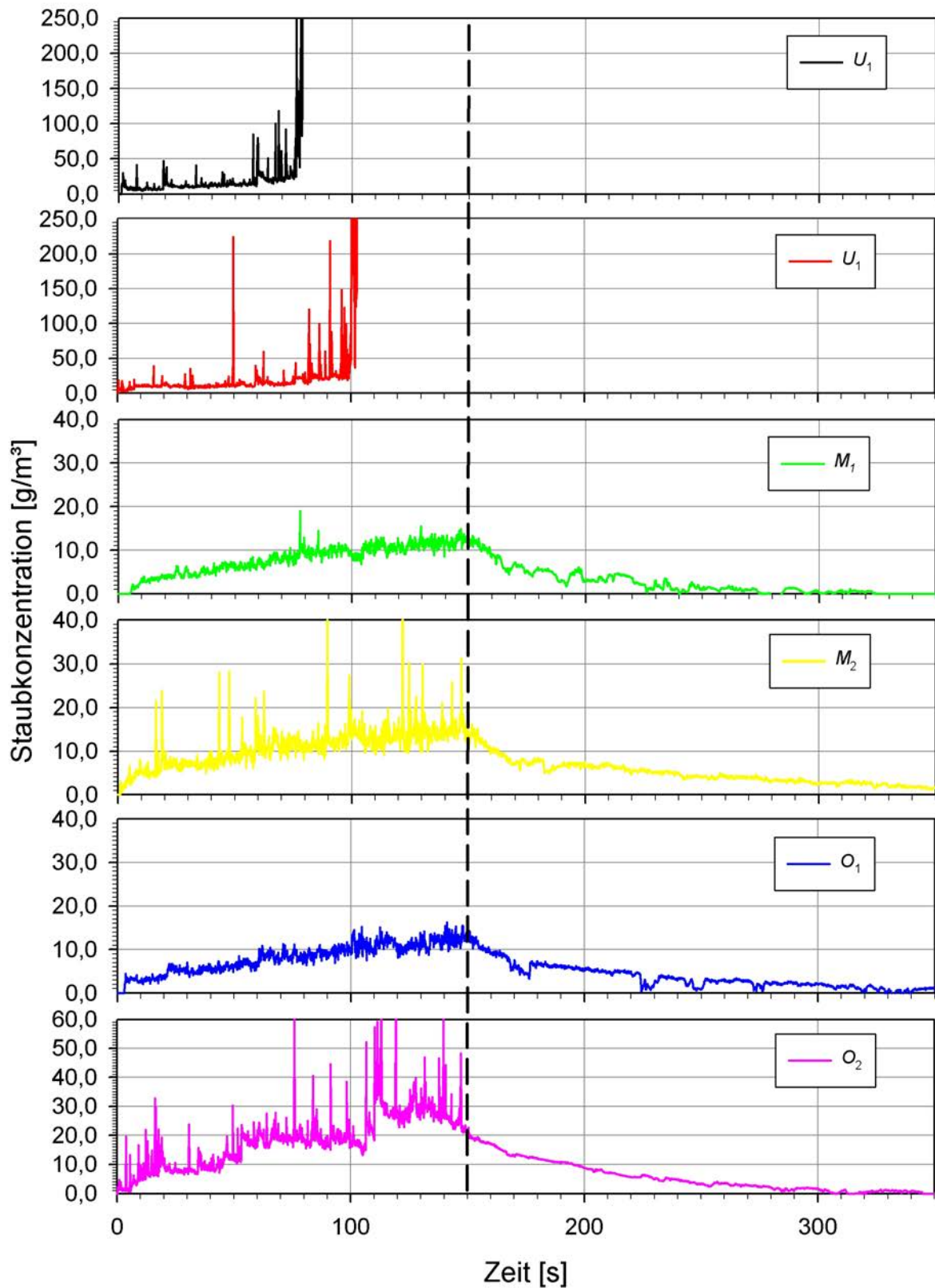


Abbildung D.4: Gemessene Staubkonzentrationsverläufe bei Versuch Nr. 4. Die Messpunkte U_1 und U_2 wurden während des Versuchs vom Fördergut verschüttet. Die gestrichelte Linie markiert das Förderzeitende.

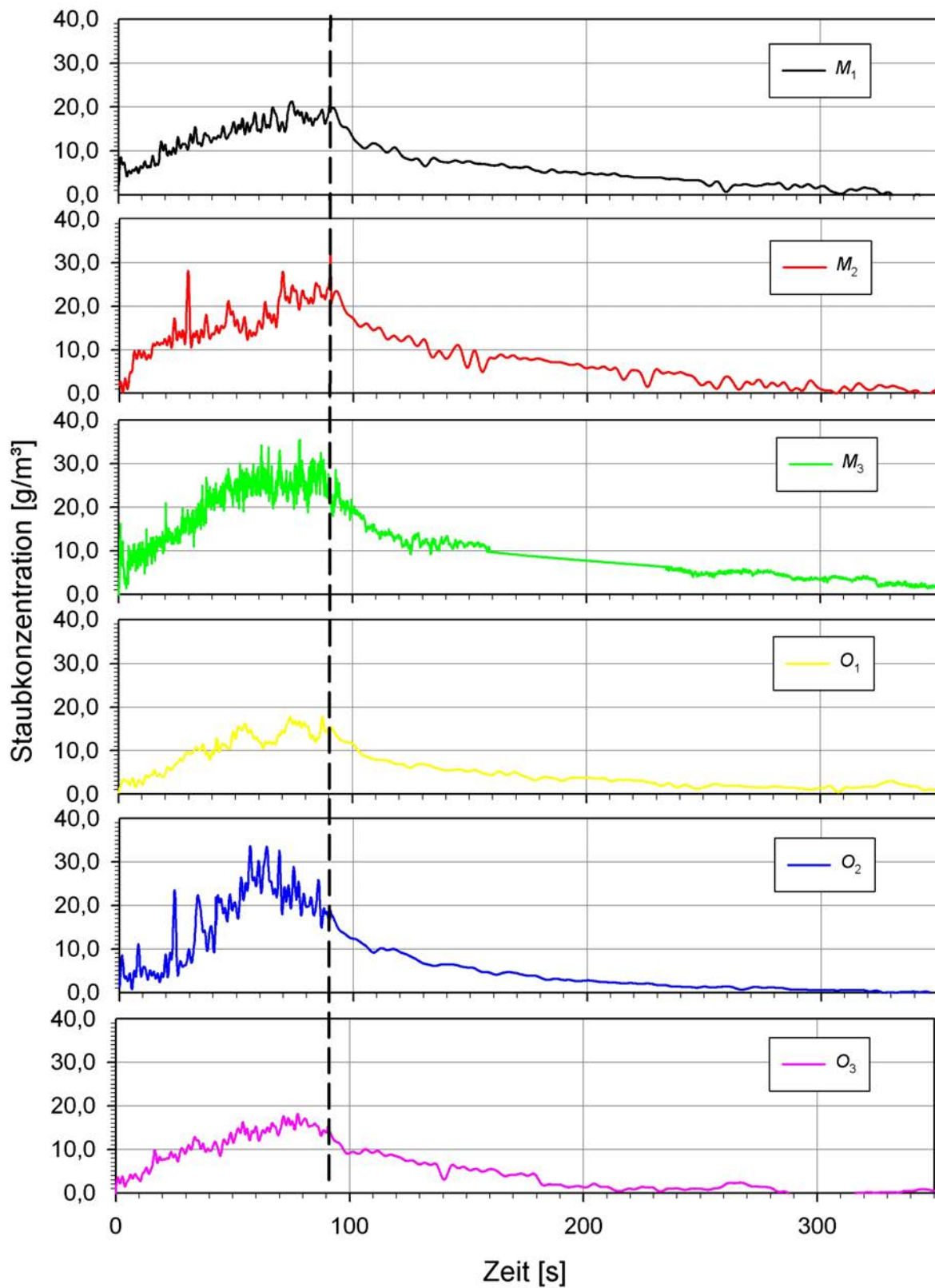


Abbildung D.5: Gemessene Staubkonzentrationsverläufe bei Versuch Nr. 5. Die gestrichelte Linie markiert das Förderzeitende.

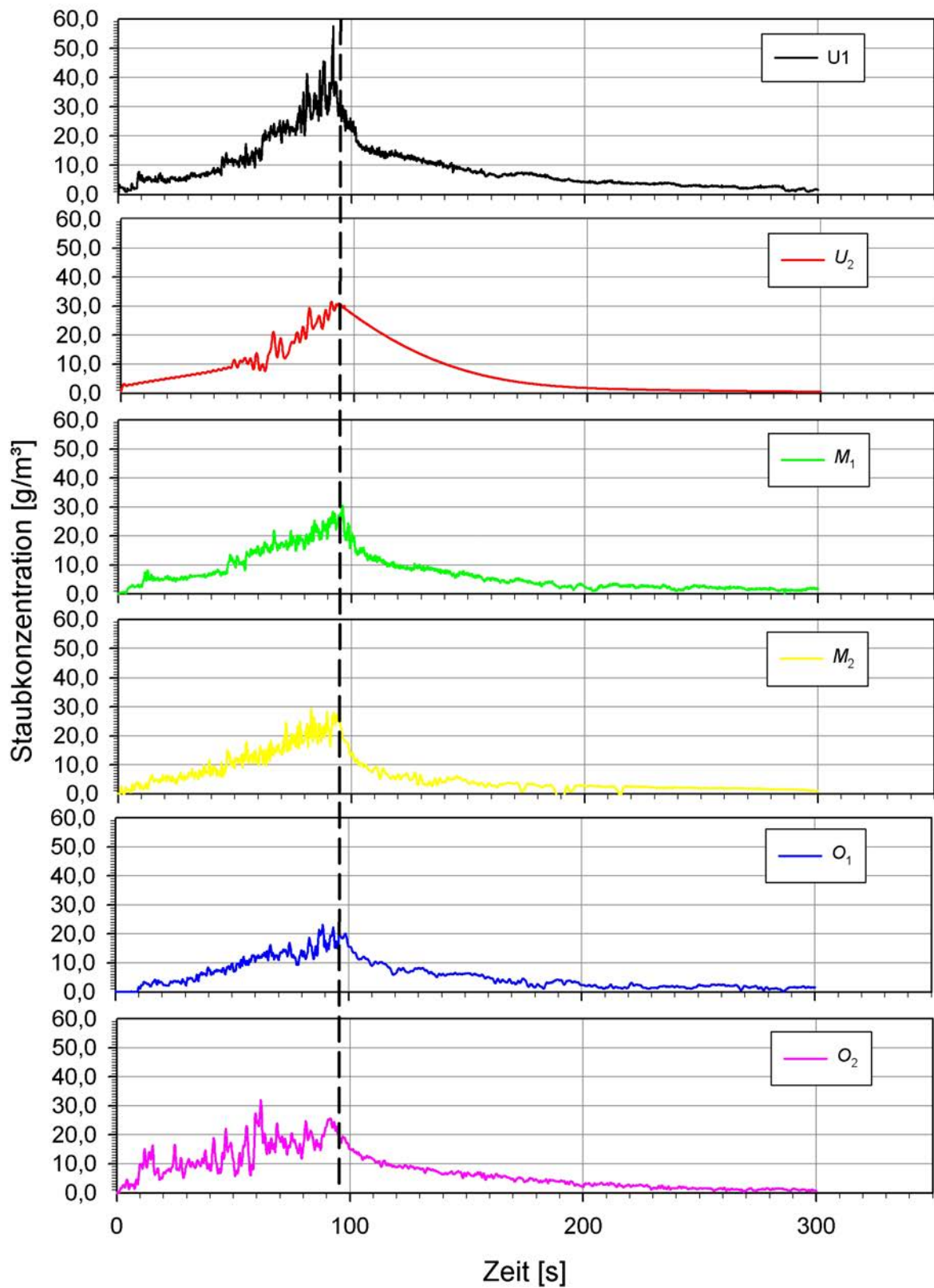


Abbildung D.6: Gemessene Staubkonzentrationsverläufe bei Versuch Nr. 6. Die gestrichelte Linie markiert das Förderzeitende.

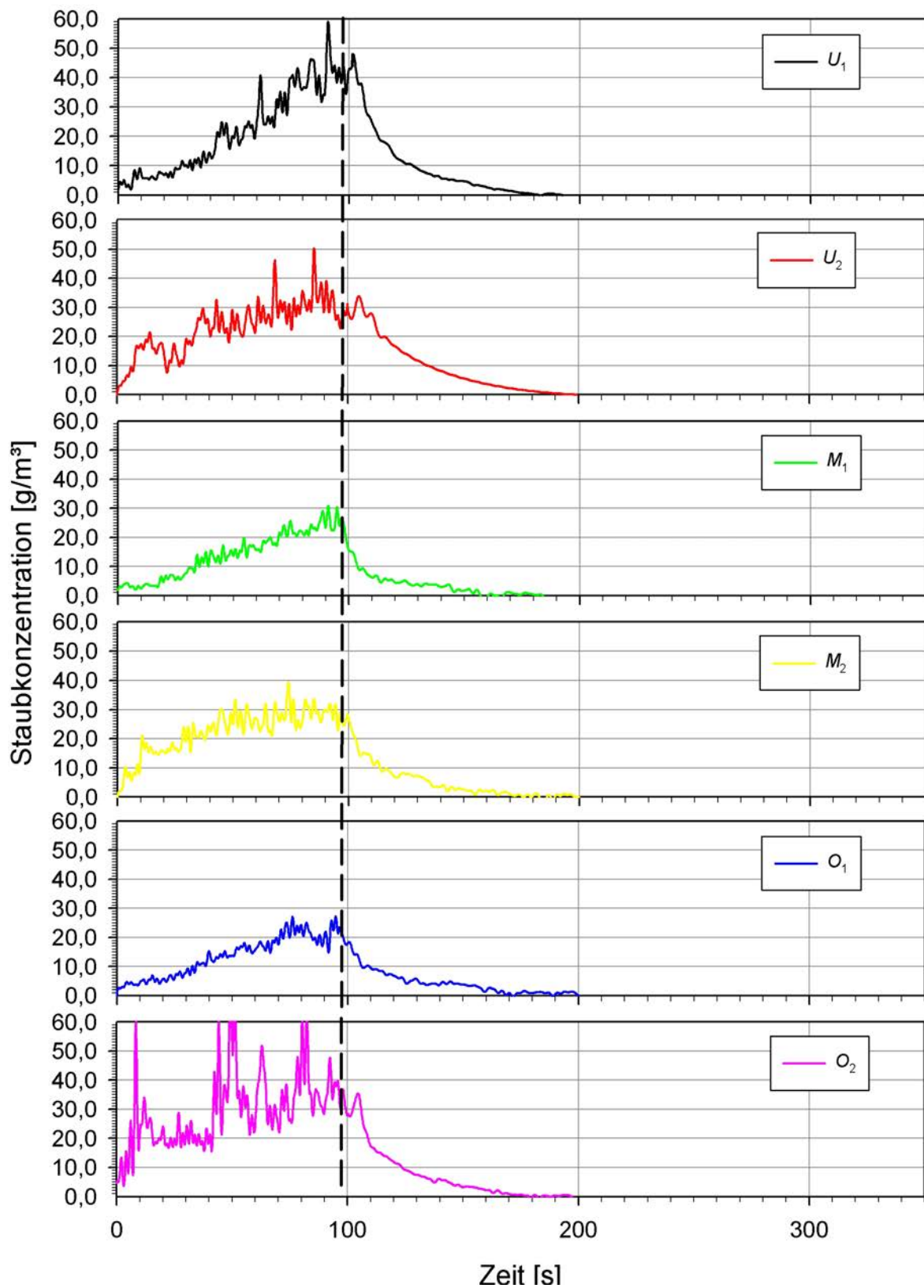


Abbildung D.7: Gemessene Staubkonzentrationsverläufe bei Versuch Nr. 7. Die gestrichelte Linie markiert das Förderzeitende.

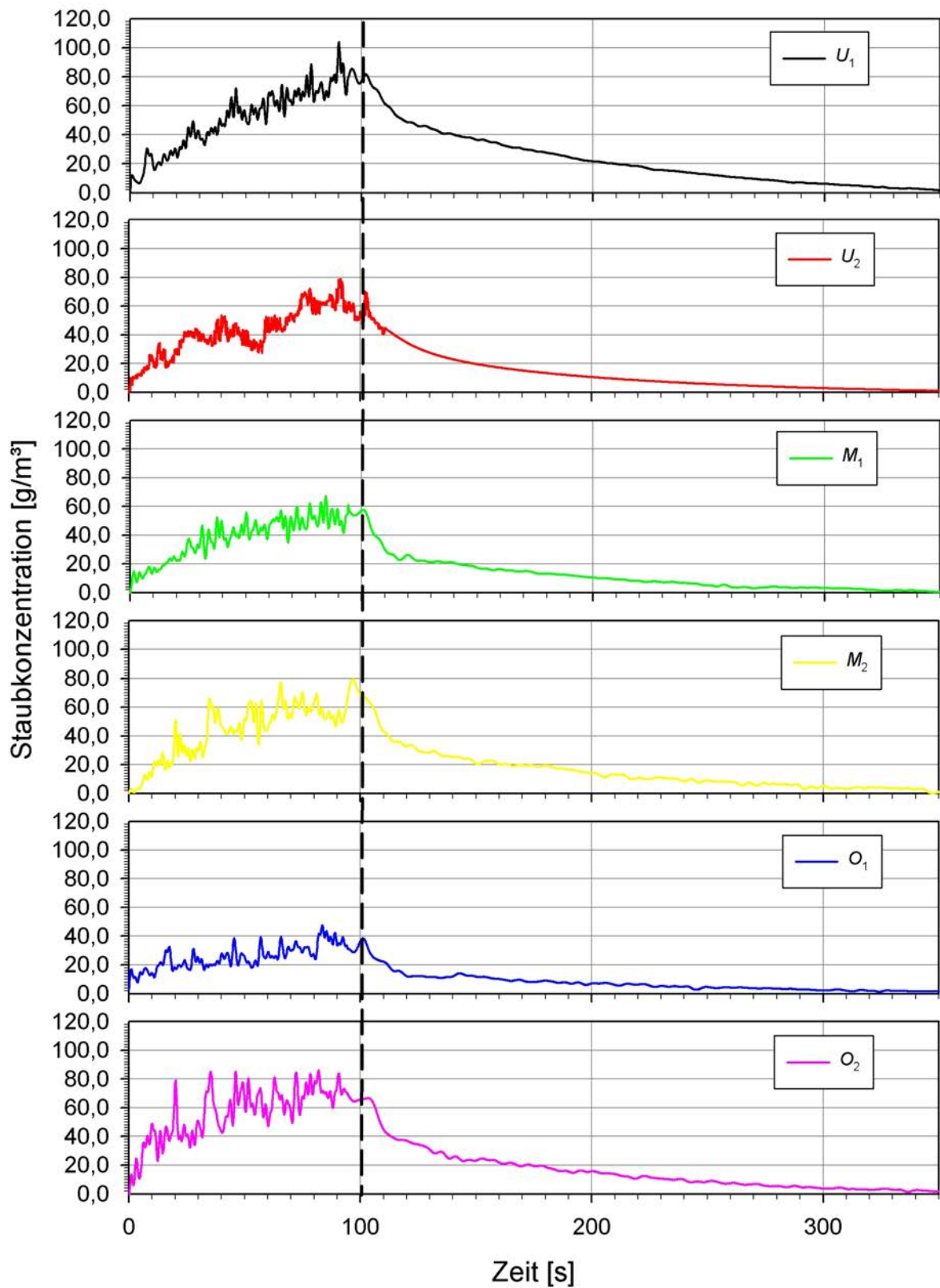


Abbildung D.8: Gemessene Staubkonzentrationsverläufe bei Versuch Nr. 8. Die gestrichelte Linie markiert das Förderzeitende.

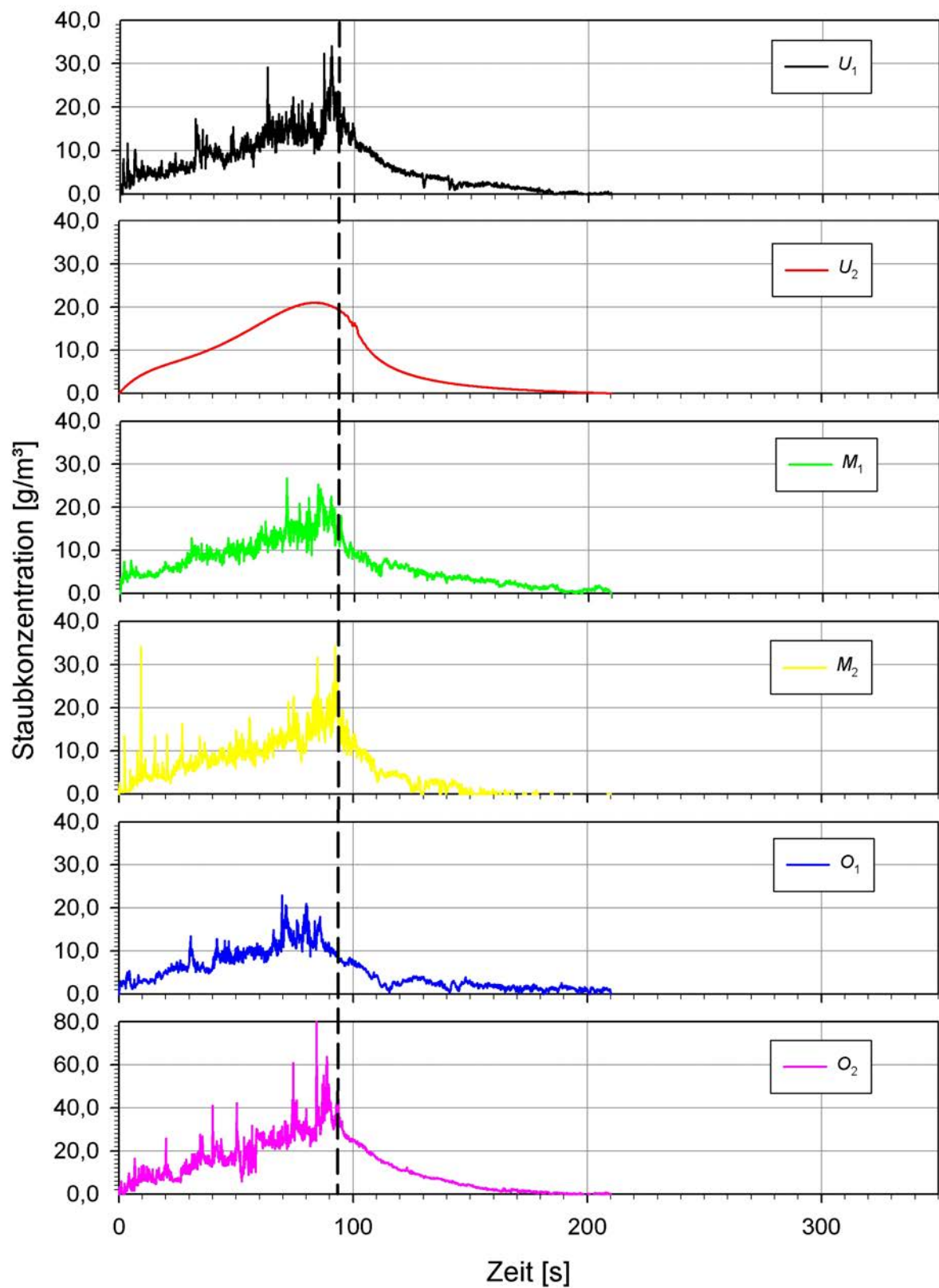


Abbildung D.9: Gemessene Staubkonzentrationsverläufe bei Versuch Nr. 9. Die gestrichelte Linie markiert das Förderzeitende.

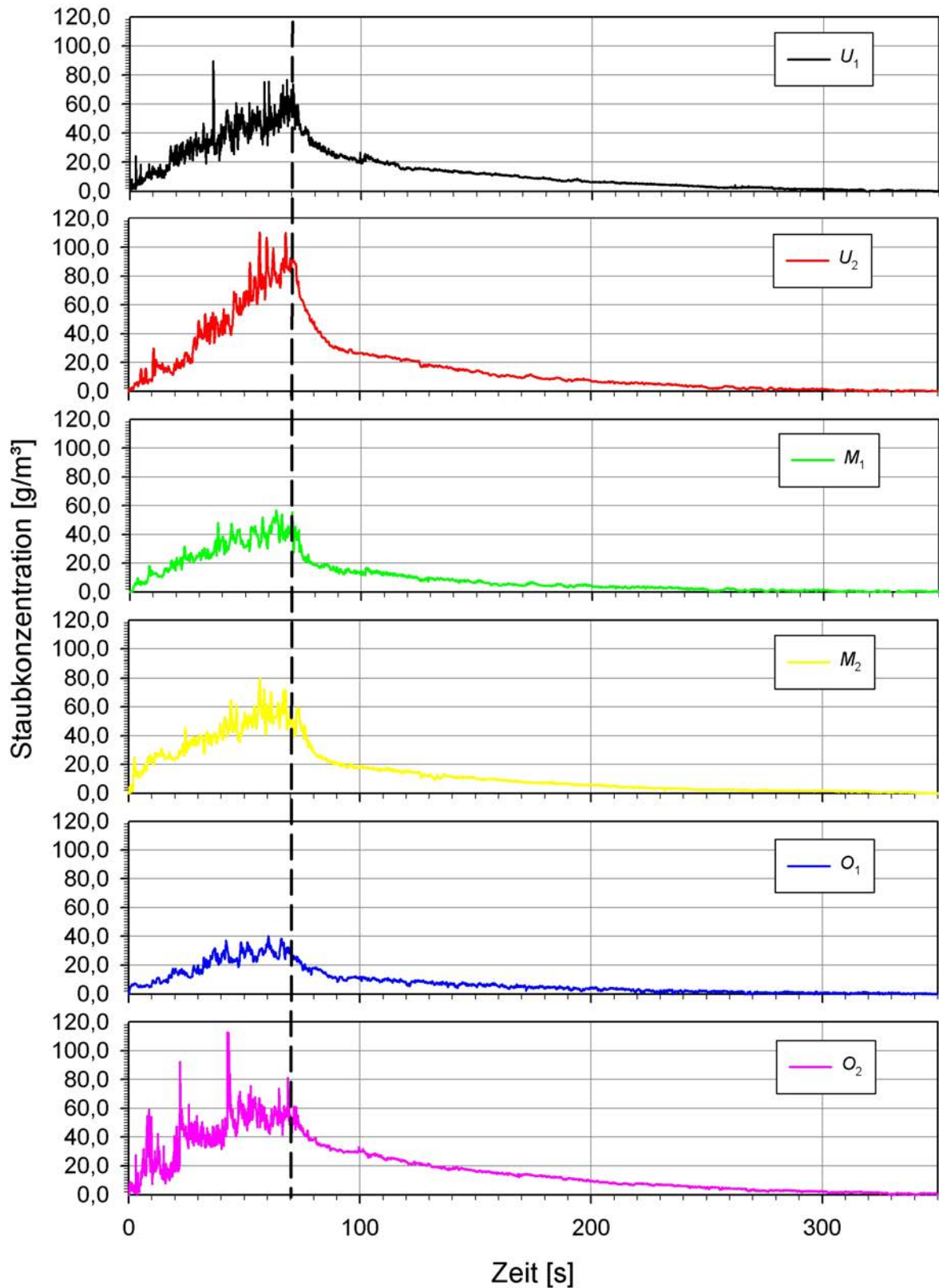


Abbildung D.10: Gemessene Staubkonzentrationsverläufe bei Versuch Nr. 10. Wegen der doppelten Förderleistung betrug die Förderdauer nur ca. 70 s. Die gestrichelte Linie markiert das Förderzeitende.

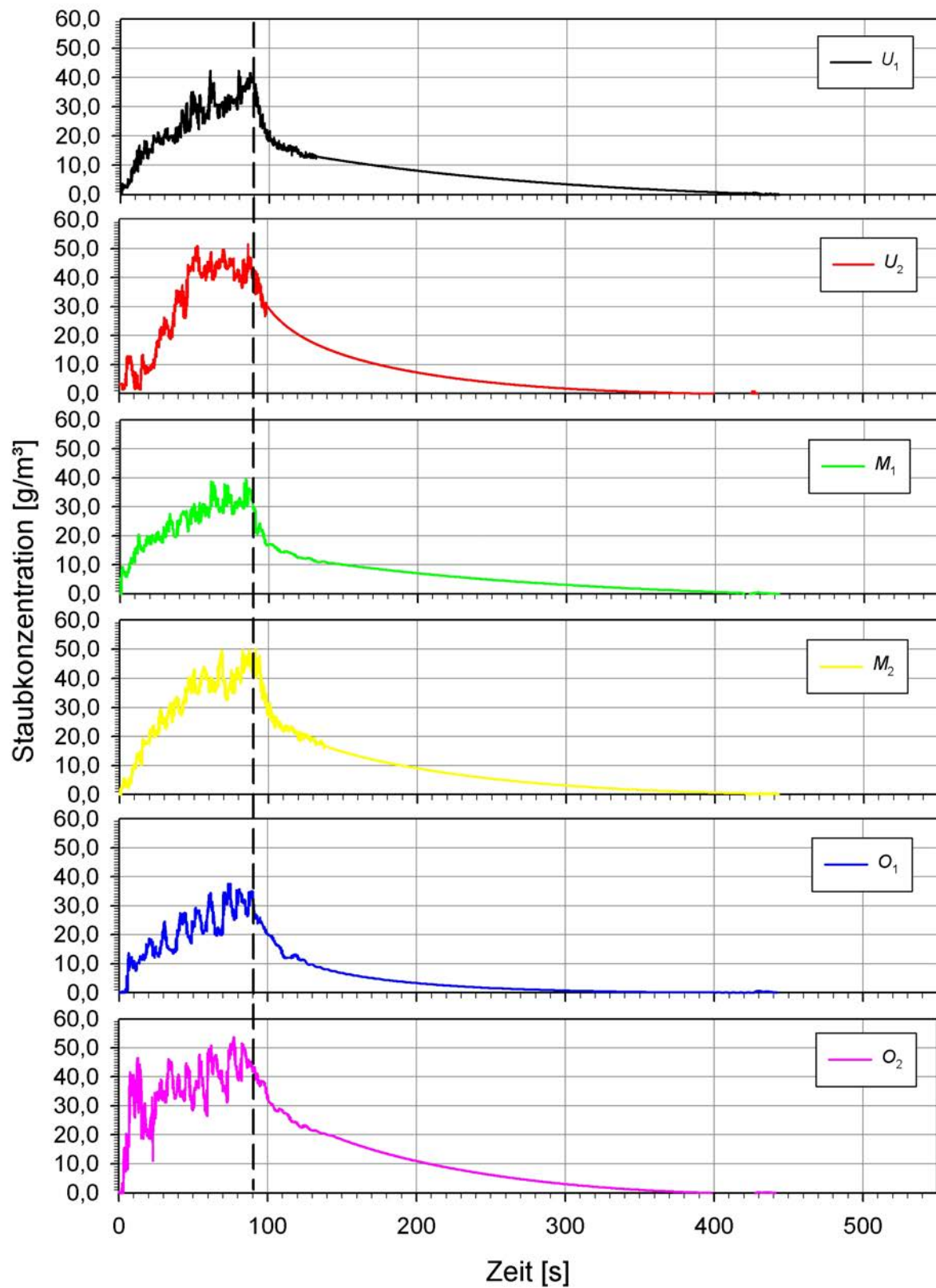


Abbildung D.11: Gemessene Staubkonzentrationsverläufe bei Versuch Nr. 11. Die gestrichelte Linie markiert das Förderzeitende.

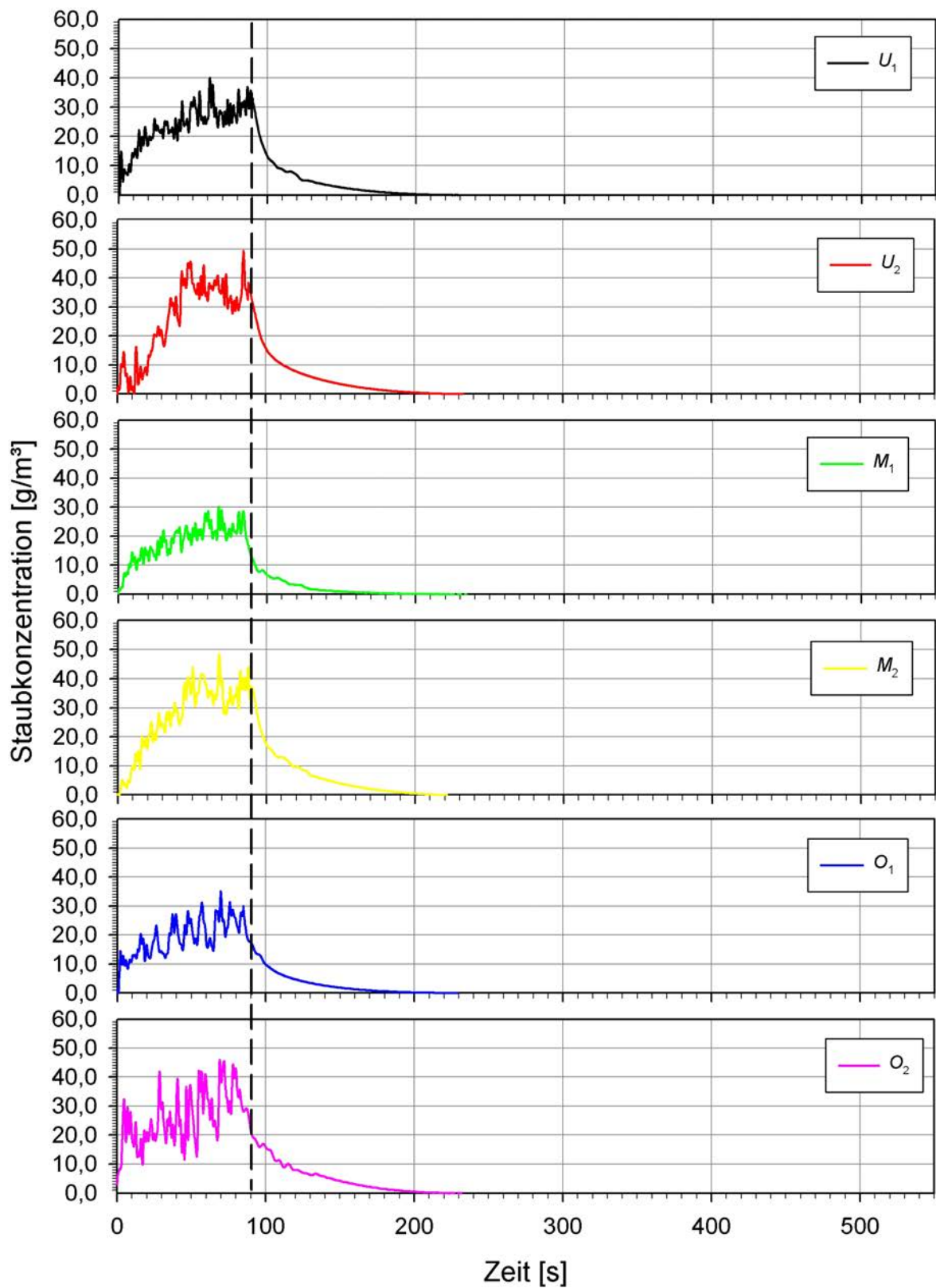


Abbildung D.12: Gemessene Staubkonzentrationsverläufe bei Versuch Nr. 12. Die gestrichelte Linie markiert das Förderzeitende.

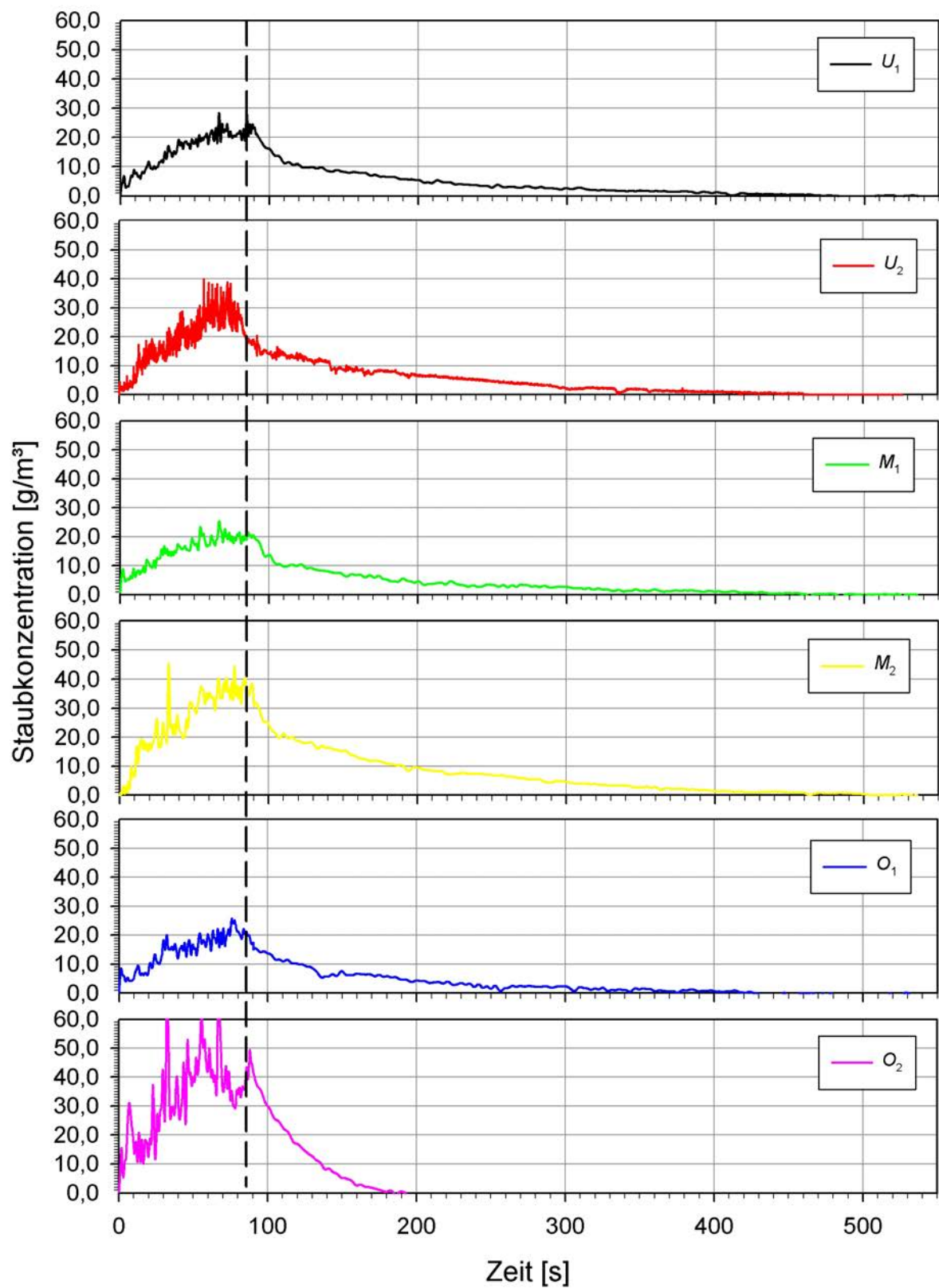


Abbildung D.13: Gemessene Staubkonzentrationsverläufe bei Versuch Nr. 13. Die gestrichelte Linie markiert das Förderzeitende.

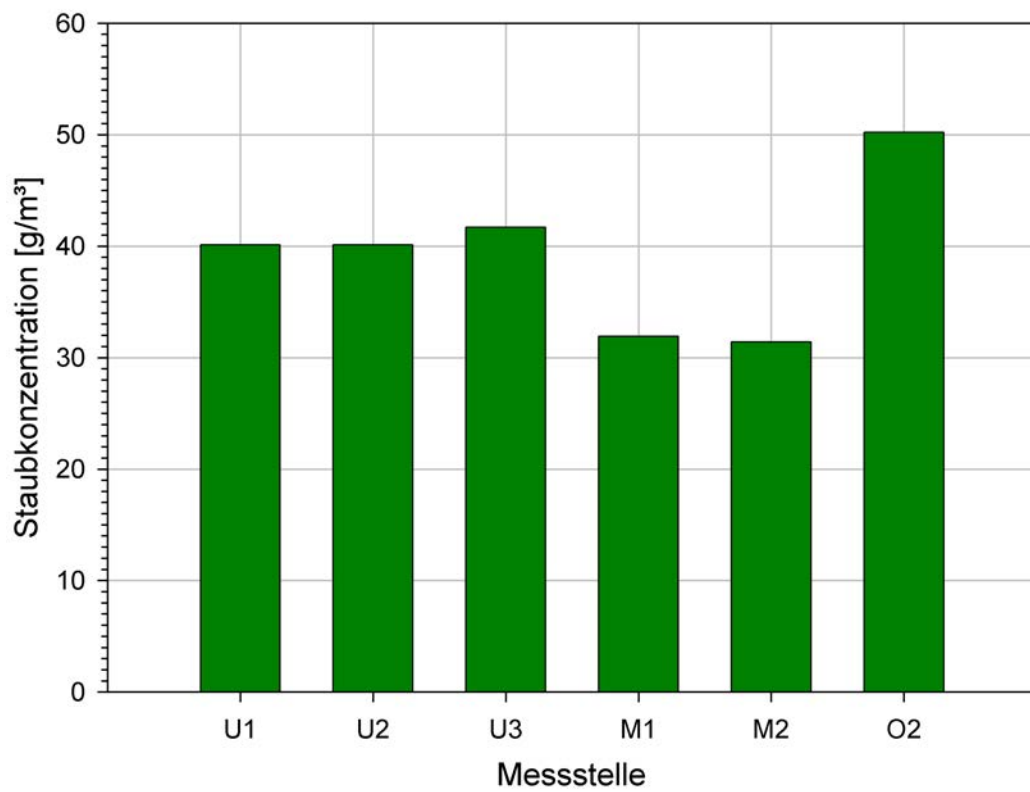
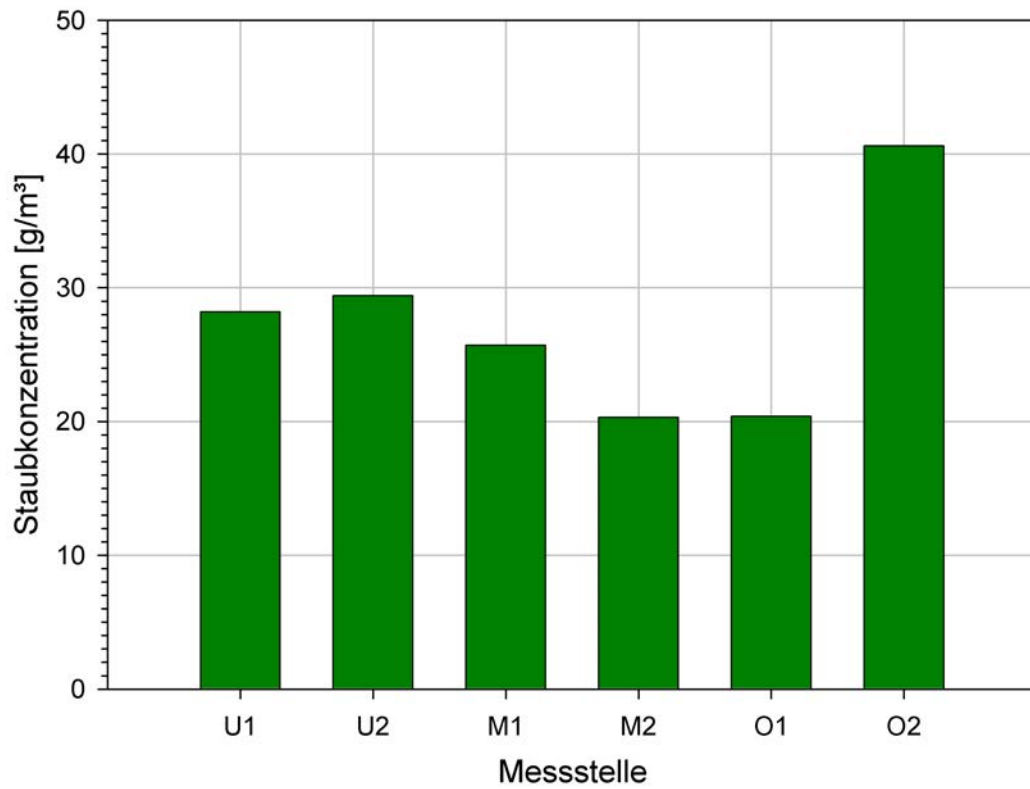


Abbildung D.14: Maximale Staubkonzentrationen an allen Messstellen bei Versuch Nr. 1 (oben) und 2 (unten).

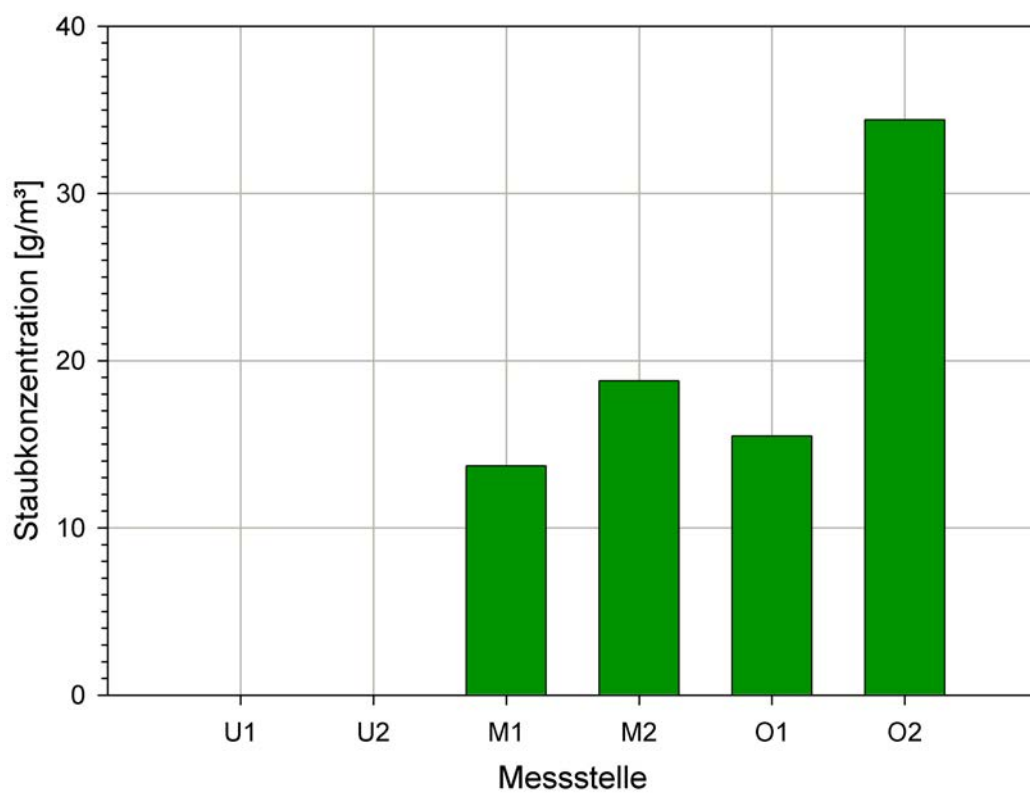
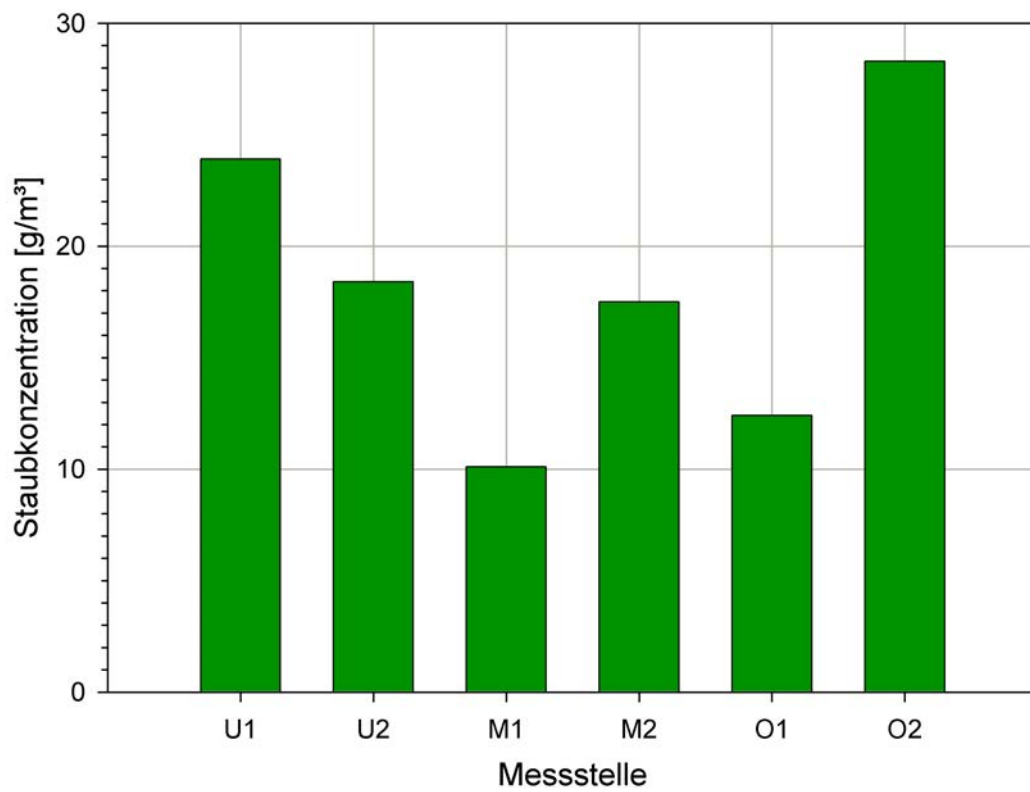


Abbildung D.15: Maximale Staubkonzentrationen an allen Messstellen bei Versuch Nr. 3 (oben) und 4 (unten).

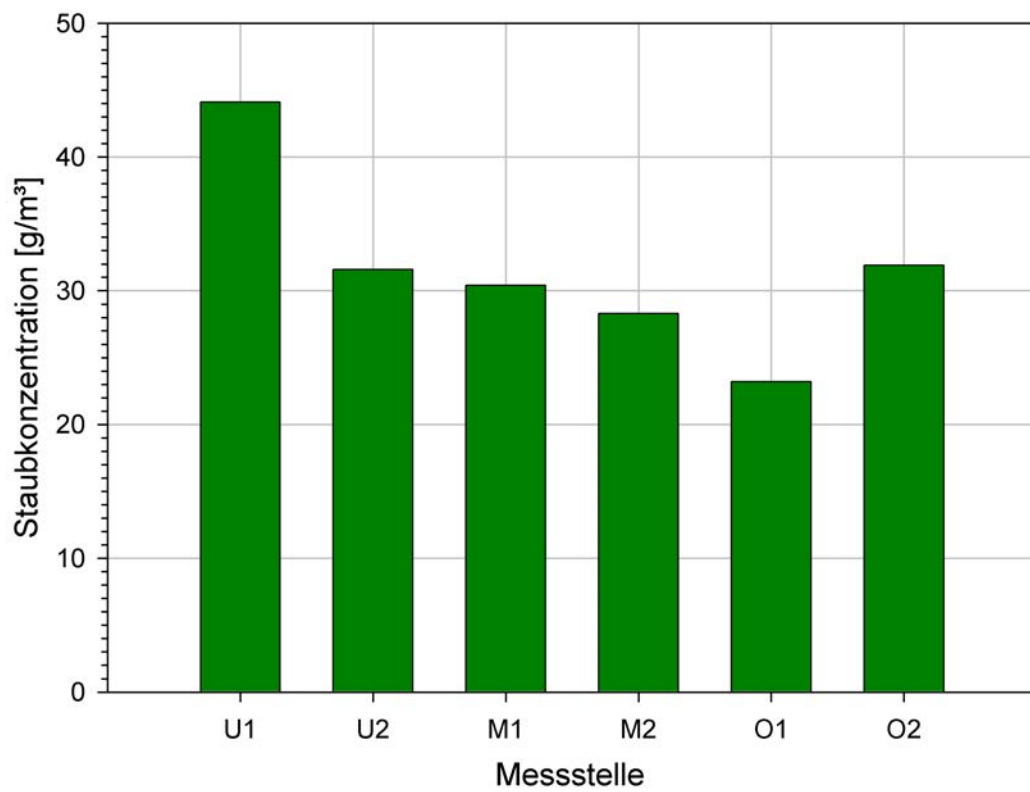
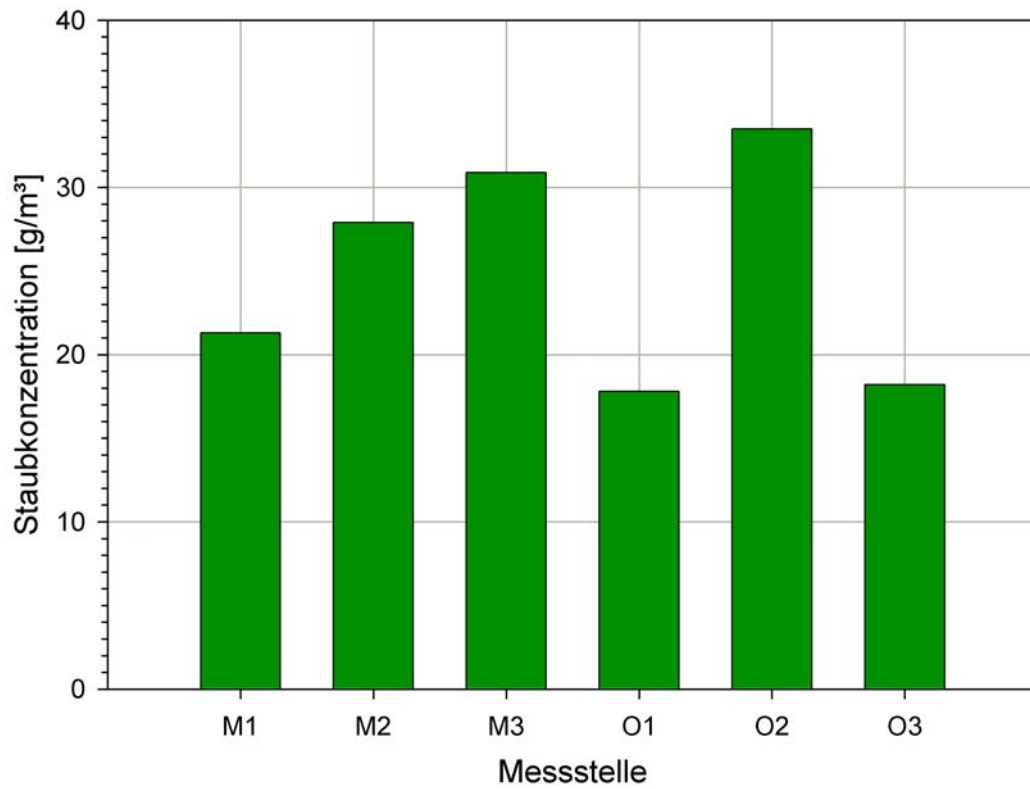


Abbildung D.16: Maximale Staubkonzentrationen an allen Messstellen bei Versuch Nr. 5 (oben) und 6 (unten).

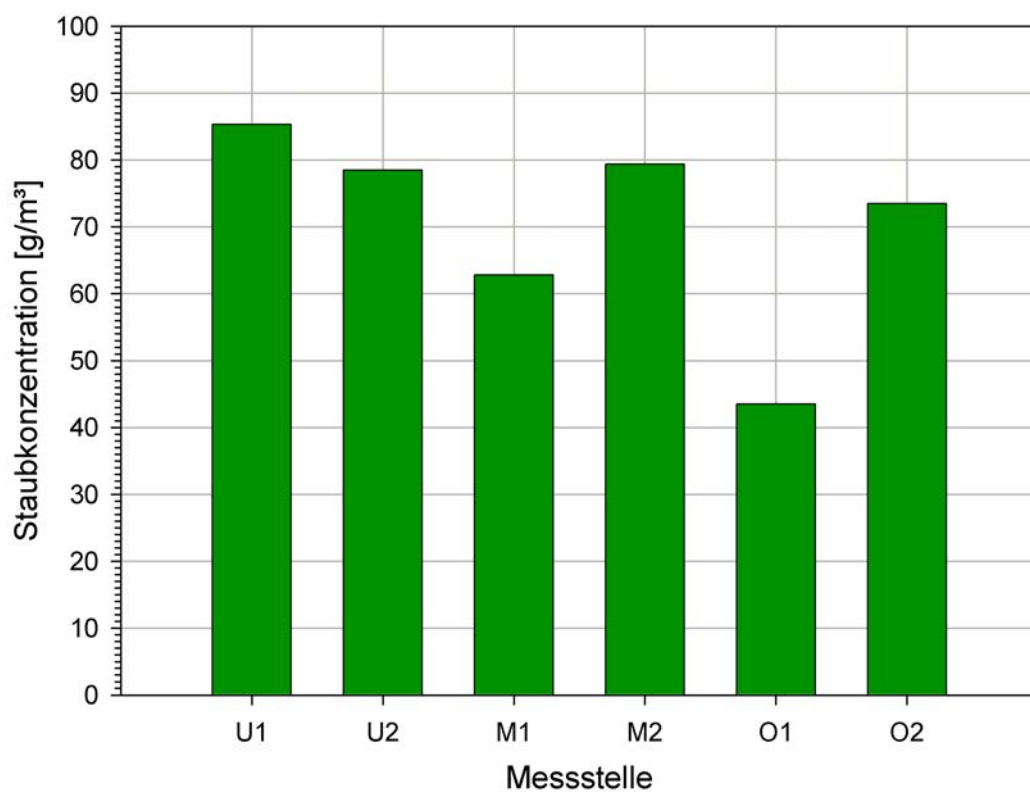
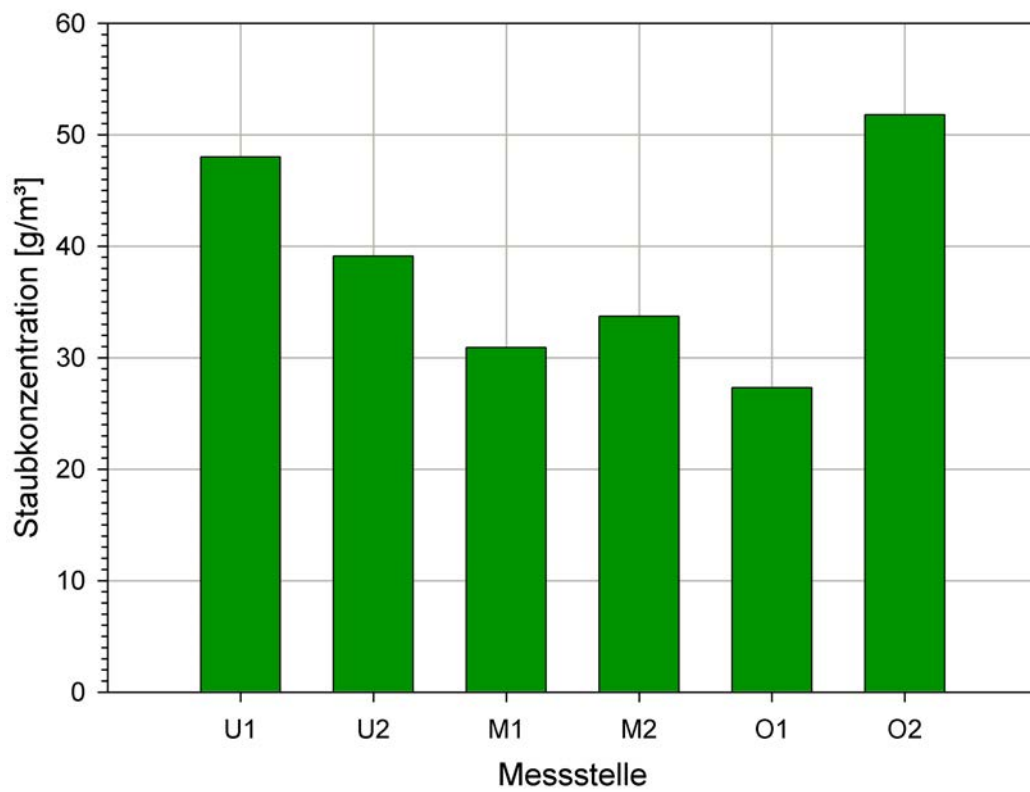


Abbildung D.17: Maximale Staubkonzentrationen an allen Messstellen bei Versuch Nr. 7 (oben) und 8 (unten).

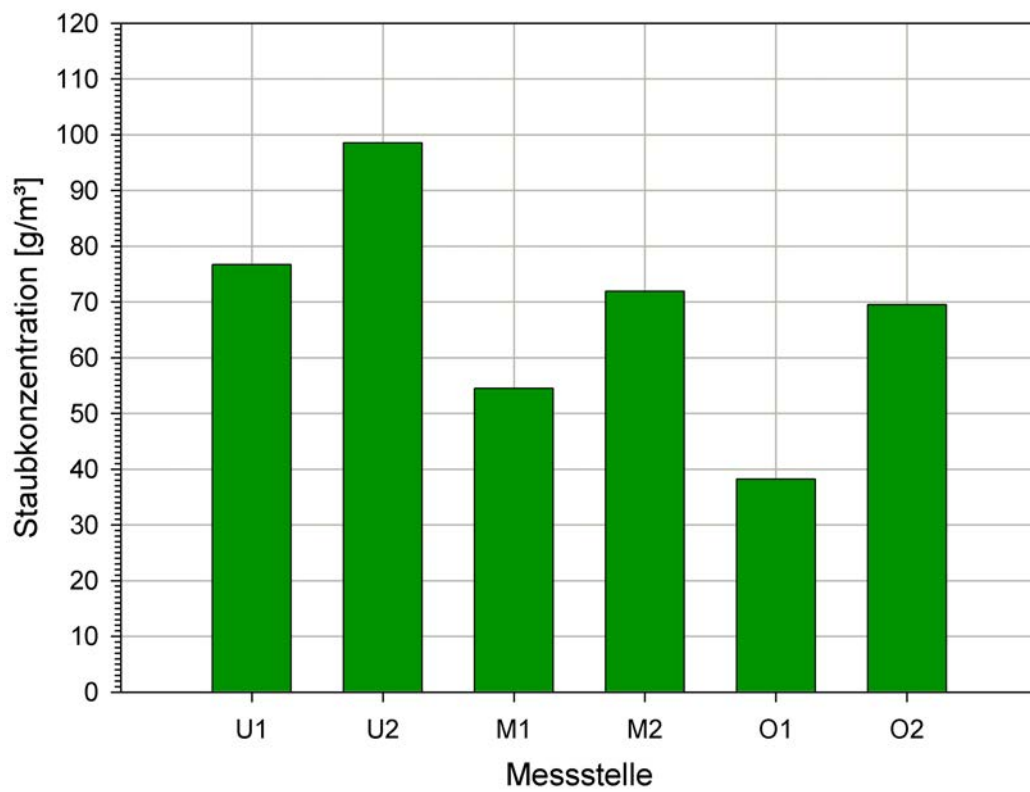
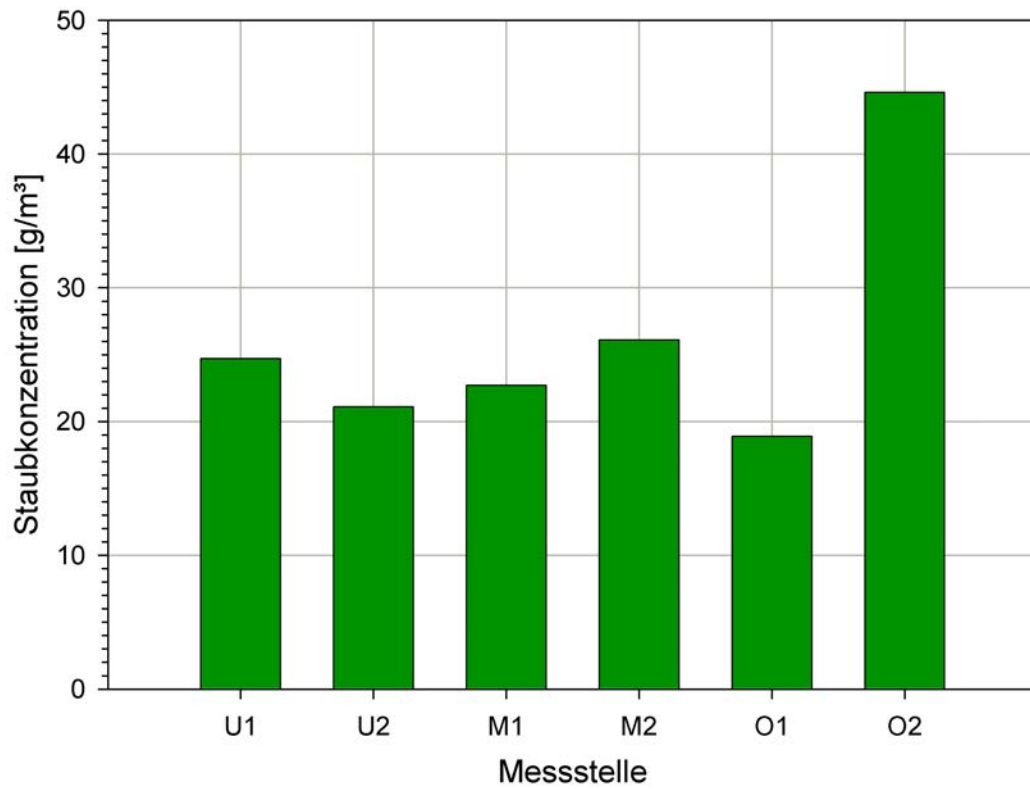


Abbildung D.18: Maximale Staubkonzentrationen an allen Messstellen bei Versuch Nr. 9 (oben) und 10 (unten).

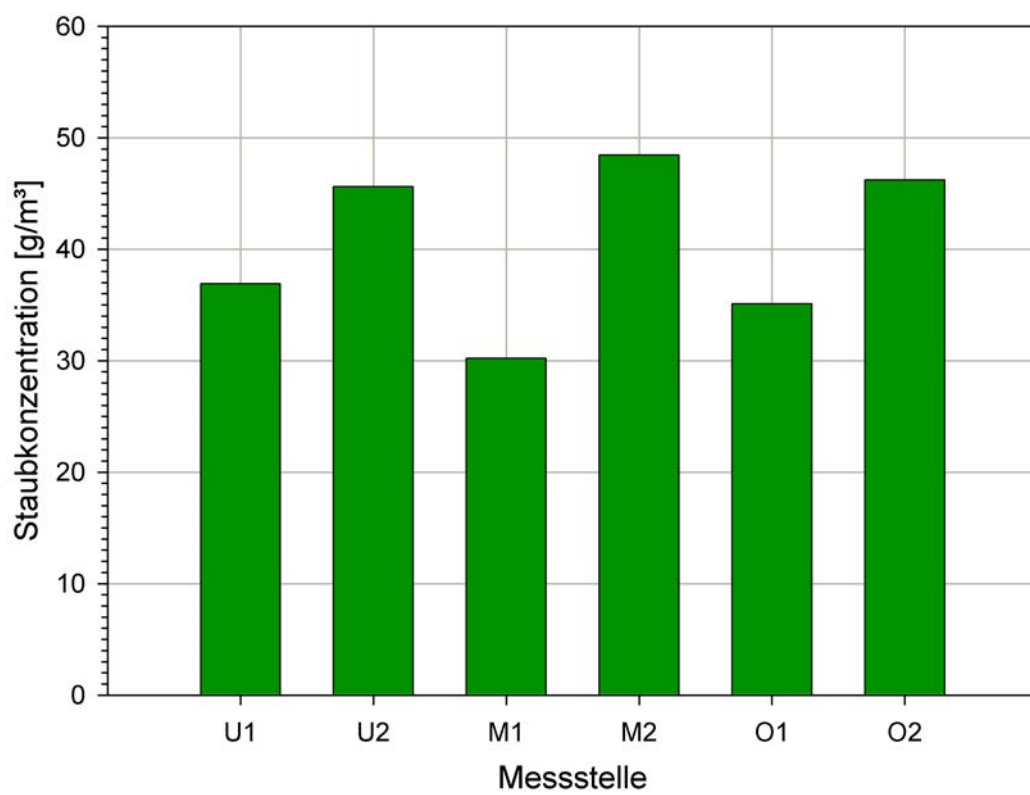
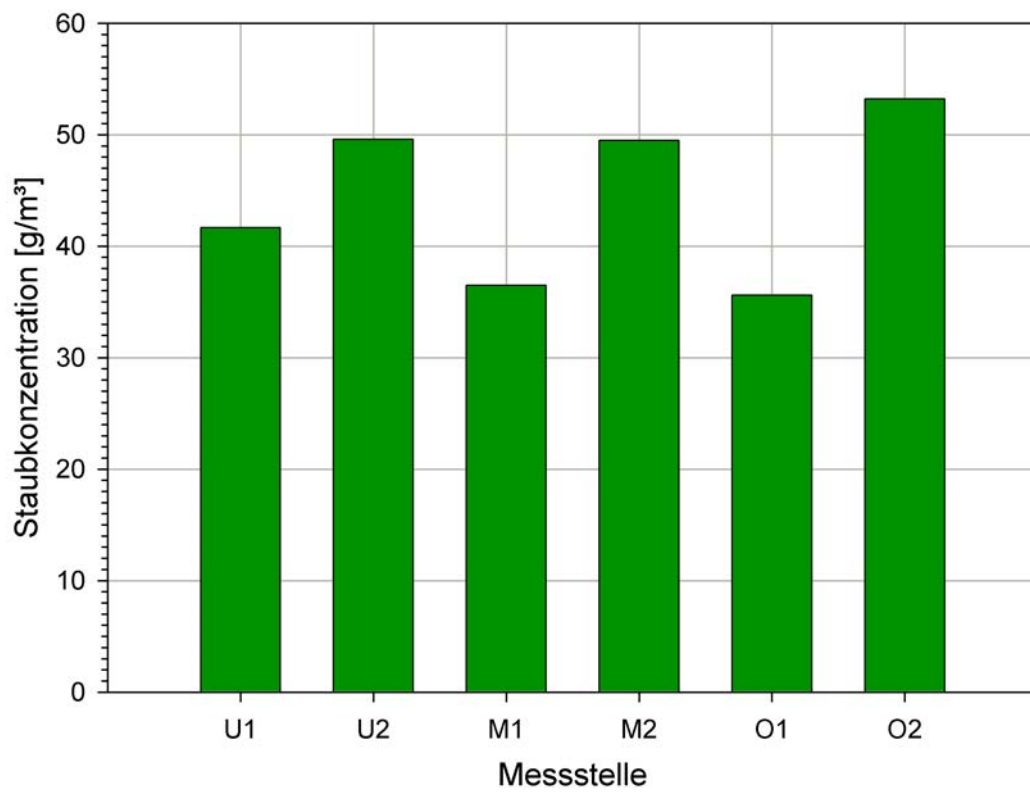


Abbildung D.19: Maximale Staubkonzentrationen an allen Messstellen bei Versuch Nr. 11 (oben) und 12 (unten).

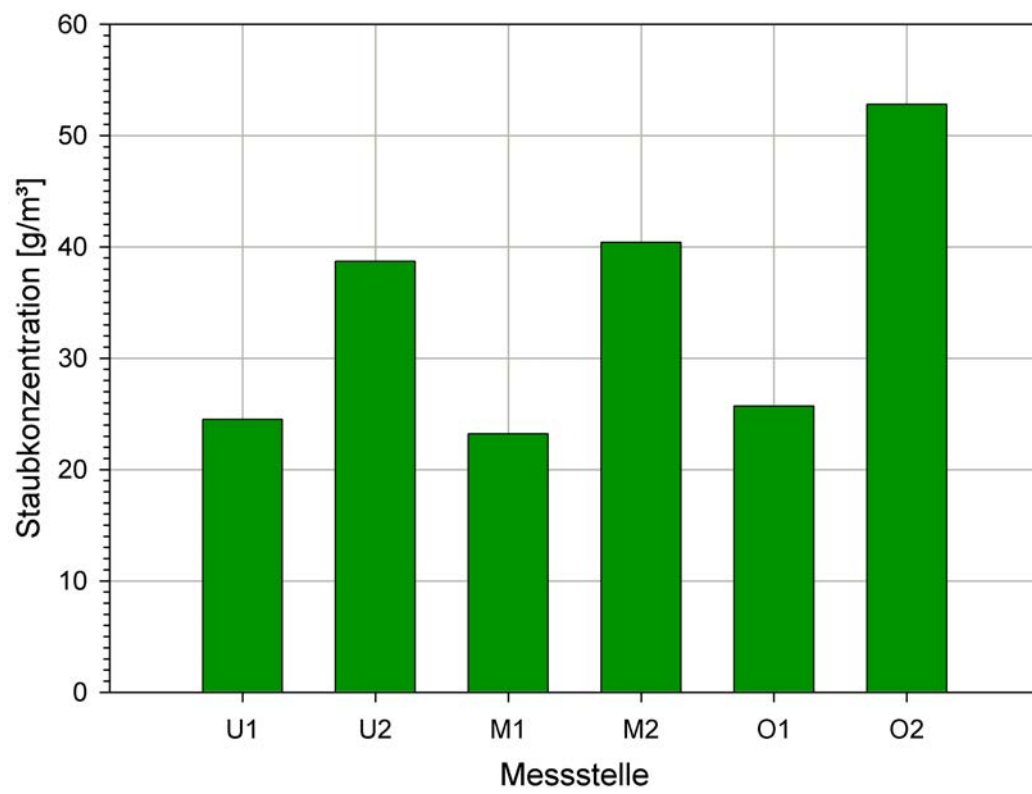


Abbildung D.20: Maximale Staubkonzentrationen an allen Messstellen bei Versuch Nr. 13.