

Staubkonzentrations-
messungen in einem
Horizontal-Mischer
mit dem SKG 5 Typ 15

G-05-0901

Projekt Nr. G-05-0501

Staubkonzentrationsmessungen in einem Horizontal-Mischer mit dem SKG 5 Typ 15

Dirk Lorenz
Diplom-Physiker

Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe, Bereich Prävention,
Zentrallabor, Sachgebiet Physik/Tecnik

Pavel Chupin
Master of Science (FH)

Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe, Bereich Prävention,
Zentrallabor, Sachgebiet Physik/Tecnik & Forschungsgesellschaft für angewandte
Systemsicherheit und Arbeitsmedizin mbH

Michael Seithel
Techniker

Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe, Bereich Prävention,
Zentrallabor, Sachgebiet Physik/Tecnik

Mannheim, Juni 2011

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1 Einleitung	2
1.1 Allgemeines	2
1.2 Zielsetzung	2
2 Das Staubkonzentrationsmessgerät SKG 5	3
2.1 Messprinzip	3
2.2 Aufbau des Gerätes	5
2.2.1 Messeinheit	5
2.2.2 Anzeige- und Steuereinheit	6
2.2.3 Kalibrierung	7
2.3 Anpassen des SKG 5	9
3 Vorbereitung und Planung	12
3.1 Auswahl der Stäube	12
3.2 Umbau des Typs 15 und Halterungsaufbau	13
3.2.1 Umbau des Typs 15	13
3.2.2 Aufbau einer Halterung	13
3.3 Messprogramm	14
4 Messungen am Horizontal-Mischer	15
4.1 Beschreibung des Mixers	15
4.2 Messorte	17
4.3 Messaufbau	19
4.4 Durchführung der Messungen	19
4.5 Messergebnisse und Auswertung	21
4.6 Diskussion der Ergebnisse	24

4.6.1	Staubungszahl, Befüllungsgrad und Staubkonzentration	24
4.6.2	Messort, Befüllungsgrad und Staubkonzentration	26
4.6.3	Fazit	29
A	Kalibrierung	31
B	Messergebnisse grafisch dargestellt	33
B.1	Weizenmehl	33
B.2	Maisstärke	42
B.3	Braunkohlenstaub	51

Liste der Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
c	g/m^3	Staubkonzentration
c_W	g/m^3	Weizenmehlkonzentration in der Luft
c_M	g/m^3	Maisstärkekonzentration in der Luft
c_B	g/m^3	Braunkohlenstaubkonzentration in der Luft
E	-	Extinktion
h	cm	Höhe über der Achse des Mixers
I	W/m^2	Bestrahlungsstärke auf eine Photodiode bei Anwesenheit einer absorbierenden Substanz im Messvolumen des SKG 5
I_0	W/m^2	Bestrahlungsstärke auf eine Photodiode ohne Anwesenheit einer absorbierenden Substanz im Messvolumen des SKG 5
l	mm	Breite des Messvolumens beim SKG 5
L_W	m	Distanz zwischen der Wellenlängsachse des Mixers und dem äußeren Rand der Mischwerkzeuge
OEG	g/m^3	obere Explosionsgrenze
S	-	Staubungszahl
SG	-	Staubungsgruppe
U	mV	elektrische Spannung
UEG	g/m^3	untere Explosionsgrenze
v_U	m/s	Mischgeschwindigkeit oder Tangentialwindigkeit am äußeren Rand der Rührwerkzeuge im Mischer
V_K	m^3	Bruttovolumen der Mischkammer
V_n	m^3	Nettovolumen der Mischkammer
V_W	m^3	Volumen der Welle und Mischwerkzeuge
Γ	%	Befüllungsgrad
κ	m^2/kg	Absorptionskoeffizient
ν	1/s, U/min	Rotationsfrequenz der Rührwerkzeuge im Mischer

Zusammenfassung

In einem Horizontal-Mischer werden Staubkonzentrationsmessungen mit Hilfe eines speziellen Messgerätes durchgeführt. Die Messungen dienen dem Zweck festzustellen, ob im Mischer staubexplosionsgefährliche Konzentrationen auftreten können. Variiert wird der Befüllungsgrad, die Umlaufgeschwindigkeit der Rührwerkzeuge und die Staubart bzw. die Staubungszahl. Die speziell für diesen Messzweck entwickelte Messeinheit des **Staubkonzentrationsmessgerätes SKG 5** liefert für verschiedene Messpositionen in dem Mischer zuverlässige Messwerte.

Es wird gezeigt, dass es häufig zur Bildung explosibler Staub/Luftgemische im Mischer kommt. Eine Ausnahme bilden Stäube mit sehr kleiner Staubungszahl (Staubungsgruppe 1). Bei langsamen Mischvorgängen werden mit solchen Stäuben häufig die unteren Explosionsgrenzen nicht erreicht.

Der Befüllungsgrad des Mischvolumens spielt für die Staubwolkenbildung eine geringere Rolle als die Staubungszahl und die Mischgeschwindigkeit. Letztgenannter Parameter hat nachweislich den größten Einfluss auf die Staubwolkenbildung bzw. auf die Höhe der Staubkonzentration im Mischvolumen.

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Allgemeines

Bis zum heutigen Tage wird Staubexplosionsschutz an Mischern in Form der These betrieben, dass sich keine explosiblen Staub/Luftgemische im Mischvolumen bilden können. Dies gilt insbesondere wenn der Befüllungsgrad 70% und mehr beträgt. Im Rahmen eines Projektes unter der Leitung der DEKRA EXAM GmbH soll untersucht werden, ob diese Annahme tatsächlich realistisch ist. Zu diesem Zweck führte die DEKRA EXAM GmbH Zündversuche in einem Horizontal-Mischer durch, den die Firma Gebr. Lödige GmbH freundlicherweise zur Verfügung stellte. Es gelang, Staubexplosionen in diesem Mischer zu generieren und das auch bei hohem Befüllungsgrad von $\Gamma = 70\%$. Damit war klar, dass dieser in der Literatur genannte Wert in Frage gestellt werden muss.

Um mehr über die zündgefährdeten Bereiche im Mischer zu erfahren, sollten innerhalb des Projektrahmens zunächst Staubkonzentrationsmessungen im genannten Horizontal-Mischer durchgeführt werden. Diese Aufgabe übernahm die FSA GmbH, da diese über ein selbst entwickeltes, spezielles Staubkonzentrationsmessgerätes SKG 5 besitzt.

1.2 Zielsetzung

Da die Standard-Messeinheit (Typ 7) des SKG 5 zu groß ist, um zwischen den Mischwerkzeugen des Mixers platziert zu werden, bestand die erste Aufgabe darin, eine kleinere Messeinheit zu konstruieren, bei der gleichzeitig das Problem behoben werden sollte, dass die Optik des Messgerätes durch den Staub verschmutzt.

Sobald die neue Messeinheit einsatzbereit ist, sollte an möglichst vielen Messorten in dem zur Verfügung gestellten Mischer die Staubkonzentration über der Zeit in Abhängigkeit von Messort, Staubart (Staubungszahl) und Umlaufgeschwindigkeit der Rührwerkzeuge¹ gemessen werden.

¹Die tangentielle Geschwindigkeit der entferntesten Punkte der Rührwerkzeuge von der Drehachse.

Kapitel 2

Das Staubkonzentrationsmessgerät SKG 5

2.1 Messprinzip

Bei dem Messgerät SKG 5 erfolgt die Staubkonzentrationsmessung mit Hilfe einer im Staub/Luft-Gemisch befindlichen Messeinheit. Das Messprinzip basiert auf der Schwächung eines Lichtstrahls beim Durchlaufen einer Staubwolke. Im Messvolumen befindliche Staubpartikel absorbieren und streuen beim Durchlaufen desselben das beim SKG 5 verwendete Infrarotlicht. Dieses Prinzip wird auch Transmissionsverfahren genannt. Die Messeinheit des Instruments besteht aus einem Sender (Infrarot-Diode und Linse) und einem gegenüberliegenden, in der optischen Achse positionierten Empfänger (Foto-Diode und Linse). Der Sender emittiert einen Lichtstrahl einer bestimmten Intensität I_0 in Richtung des Empfängers. Der Empfänger erfasst die durch das Staub/Luft-Gemisch reduzierte Lichtintensität I . Dieses Prinzip zur Messung der Staubkonzentration ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

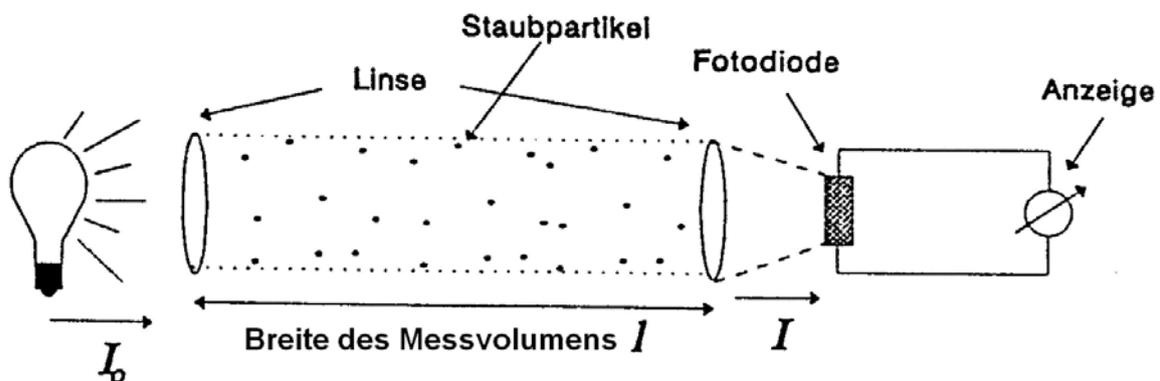


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Messprinzips.

Der Anteil der durchgelassenen Strahlungsintensität I/I_0 wird als Transmissionsgrad bezeichnet. Extinktion oder optische Dichte wird der negative Logarithmus des Transmissionsgrades genannt. Die Extinktion E leitet sich aus dem Lambert-Beer-Gesetz

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

ab. Durch Umstellen und Logarithmieren folgt:

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

Die Extinktion ist, wie in den Gleichungen zu erkennen ist, das Produkt aus den drei Größen Staubkonzentration c , Breite l des Messvolumens und Extinktionskoeffizient κ . Der Extinktionskoeffizient muss über eine Kalibriermessung am zu prüfenden Staub ermittelt werden (siehe Abschnitt 2.2.3). Damit folgt für die gesuchte Staubkonzentration c

$$c = -\frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{\kappa \cdot l} = -\frac{\ln\left(\frac{1000-U}{1000}\right)}{\kappa \cdot l} \quad (2.3)$$

Wird anstatt der Lichtintensitäten die am Steuergerät angezeigte Spannung U in der Einheit mV verwendet, ergibt sich der rechte Teil in der Formel 2.3.

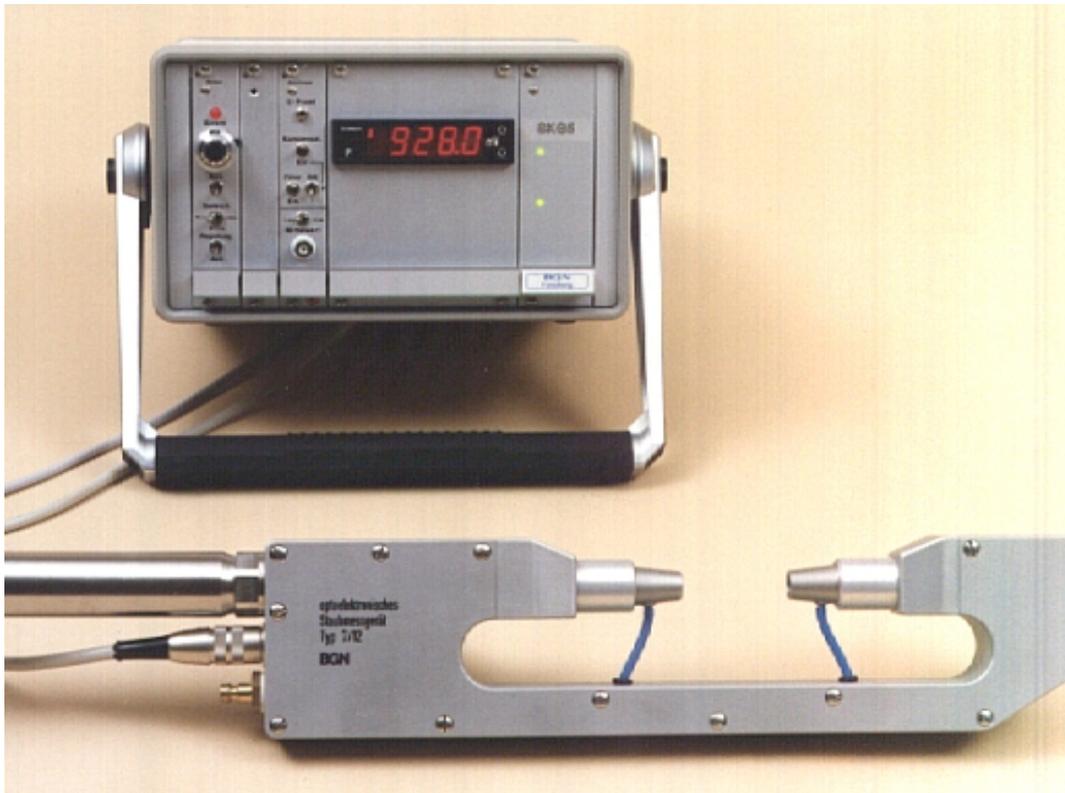


Abbildung 2.2: SKG 5, Anzeige- und Steuereinheit (hinten) und optoelektronische Messeinheit Typ 7 (vorne).

2.2 Aufbau des Gerätes

Das Staubkonzentrationsmessgerät SKG 5 (Abbildung 2.2) besteht aus zwei wesentlichen Komponenten. Zum einen ist das die Messeinheit (enthält je eine Sender- und Empfänger-Diode), mit der die Messdaten erfasst werden. Zum anderen ist das die Anzeige- und Steuereinheit, die der Verarbeitung der erhaltenen Daten und deren Darstellung dient.

2.2.1 Messeinheit

In der Messeinheit des SKG 5 sind die optoelektronischen Bauelemente untergebracht, welche zum Messen der Lichtschwächung benötigt werden. Es handelt sich bei dem Sender um eine Infrarotdiode mit einer Wellenlänge von 950 nm, sowie bei dem Empfänger um eine Fotodiode, welche im genannten Spektralbereich empfindlich ist. Zur optimalen Lichtbündelung wurden optische Linsen, die für die geometrischen Verhältnisse in der Messeinheit ausgelegt sind, vor die Dioden gesetzt. Weil die Sende-Diode im Brennpunkt der Linse sitzt, verlässt das von der Sende-Diode emittierte infrarote Licht die Linse als näherungsweise paralleler Lichtstrahl. Die Linse der Empfänger-Diode bündelt das ankommende Licht in ihrem Brennpunkt, wo die Empfänger-Diode sitzt. Um die Optik vor Staub zu schützen, wurde vor jeder Linse eine konisch zulaufende Distanzhülse geschraubt. Diese verhindert weiterhin, dass Fremdlicht auf die Linsen fällt, was zu Messfehlern führen würde. Die Spannungsversorgung der Dioden sowie das Auslesen der Daten erfolgt durch eine siebenpolige Leitung, welche die Mess- und Steuereinheit miteinander verbindet.

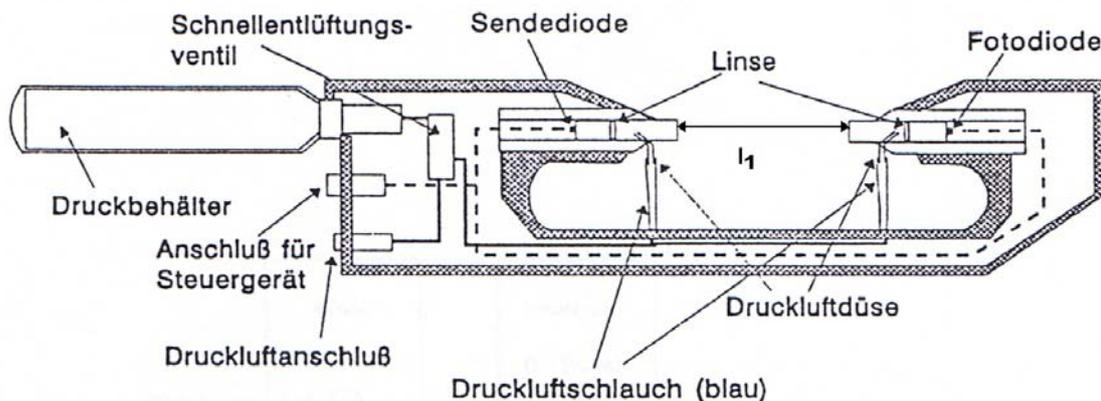


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Messeinheit Typ 7.

Mit einer speziellen Reinigungsvorrichtung können die Linsen während der Messung gesäubert werden. Das Reinigungssystem ist in Abbildung 2.3 schematisch dargestellt. Zum System gehören der zylinderförmige Druckluftbehälter, das Schnellentlüftungsventil, Schläuche zur Leitung der Luft und die in die Distanzhülsen eingearbeiteten Düsen. Die Reinigung verläuft in zwei Schritten. Dabei spielt das 2/3-Wege-Ventil eine bedeutende Rolle. Im ersten Schritt wird über das Ventil der Druckluftbehälter (Volumen = 100cm^3) mit Luft befüllt. Dies erfolgt durch die Druckluftleitung (6 bis 8bar)

welche an der Messeinheit angeschlossen ist. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass die verwendete Luft öl- und kondensatfrei ist, um eventuelle Verklebungen an der Optik ausschließen zu können. Im zweiten Schritt erfolgt die Umschaltung des Ventils, wobei schlagartig die gesamte gespeicherte Luft im Druckluftbehälter entleert wird. Dies erfolgt durch die an den Distanzhülsen angebrachten Düsen, welche die Luft direkt auf die optischen Linsen geben und diese vom abgesetzten Staub befreien. Die Zeitpunkte der Reinigung können frei gewählt und über das Schnellentlüftungsventil manuell oder elektrisch geschaltet werden [1], [2].

2.2.2 Anzeige- und Steuereinheit

Die Anzeige- und Steuereinheit des SKG 5 besteht aus einem Netzteil, zwei Platinen für die Sende- und Empfänger-Diode sowie einem digitalen Display zur Anzeige der gemessenen Spannungswerte in mV. Beide Platinen für die Dioden sind an der Frontseite der Steuereinheit mit Regelementen versehen, durch die die Feinabstimmung der Dioden erfolgt (Abb. 2.4). Dabei dient die von vorne gesehen linke Platine der Steuerung der Sende-Diode. An der Frontplatte befindet sich eine Leuchtdiode (Abb. 2.4, Pos. 1), welche signalisiert, ob ein Strom durch den Schaltkreis der Sende-Diode fließt oder nicht. Die Leuchtdiode verändert je nach Stromstärke ihre Helligkeit. Mit dem Schalter (Abb. 2.4, Pos. 3) lässt sich die Sende-Diode zwecks Überprüfung des Gerätes bzw. der Dioden ein- bzw. ausschalten, ohne den Strahlengang optisch unterbrechen zu müssen.

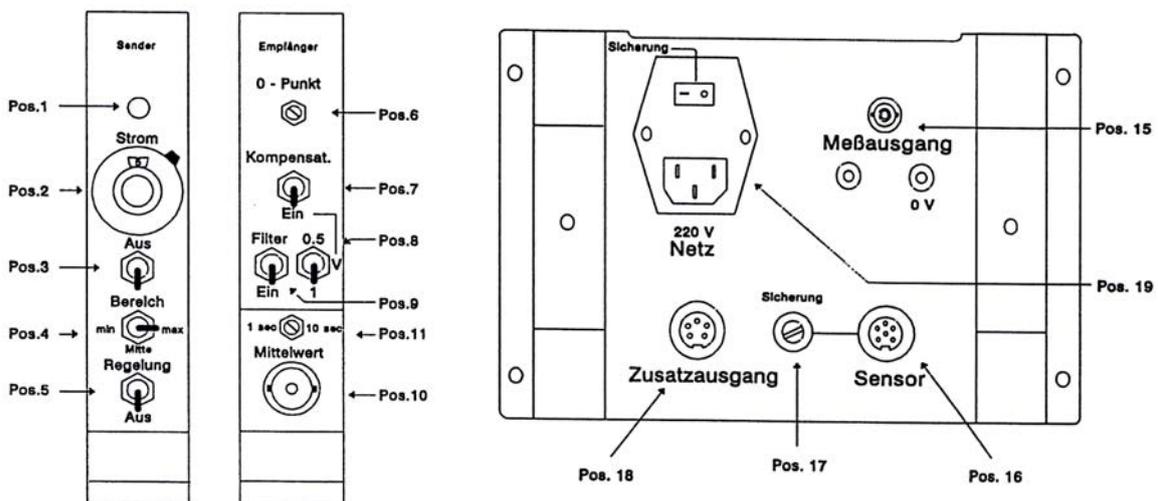


Abbildung 2.4: Skizze der Frontpartien der Platinen für die Sende/Empfänger-Diode (links) und der Rückansicht der SKG 5-Anzeige- und Steuereinheit (rechts).

Bevor mit der eigentlichen Messung begonnen werden kann, muss ein Nullabgleich erfolgen. Dieser ist notwendig, um Fehlmessungen ausschließen zu können. Der im Display angezeigte Spannungswert wird über eine Regelung des Stromes durch die Sende-Diode auf den Wert 0 mV kalibriert. Dieser Nullabgleich kann vorerst durch eine Grobregelung mit dem Bereichswahlschalter (Abb. 2.4, Pos. 4) durchgeführt werden. Mögliche Stellungen sind hier „min“, „Mitte“ und „max“. Mit dem 10-Gang-Potentiometer

(Abb. 2.4, Pos. 2) kann der Strom durch die Sende-Diode nach erfolgter Grobeinstellung so lange weiter geregelt werden, bis in der Displayanzeige eine Spannung von 0 mV angezeigt wird. Der erforderliche Nullabgleich ist dadurch beendet. Der Schalter „Regelung“ (Abb. 2.4, Pos. 5) ist für eine nachfolgende Stromregelung im Schaltkreis der Sende-Diode vorgesehen, aber derzeit noch nicht aktiv.

Die rechte Platine der Messeinheit ist für die Ansteuerung der Empfänger- bzw. Foto-Diode zuständig. Mit dem an der Frontplatte der Platine befindlichen Potentiometer kann der Nullpunkt des Empfängers eingestellt werden (Abb. 2.4, Pos. 6). Dabei müssen die Sende-Diode als auch die „Kompensation“ (Abb. 2.4, Pos. 7) auf „Aus“ geschaltet und dann das Potentiometer so lange betätigt werden, bis in der Anzeige des Steuergerätes der Wert 0 mV erscheint.

Bei ausgeschalteter Kompensation wird bei der empfangenen Lichtintensität $I = 0 \text{ W/m}^2$ der Spannungswert 0 mV angezeigt, bei $I = I_0 \text{ W/m}^3$ werden 1000 mV ausgegeben. Bei eingeschalteter Kompensation ist dies genau umgekehrt. Mit dem Schalter rechts unterhalb des Kompensationsschalters kann die maximale Messspannung auf 500 mV oder 1000 mV eingestellt werden. Der Schalter „Filter“ (Abb. 2.4, Pos. 9) ermöglicht einen 1000 Hz Tiefpass am Messausgang. Über die Sektion „Mittelwert“ auf der Frontplatte der Empfängerplatine (Abb. 2.4, Pos. 10, 11) besteht die Möglichkeit, den Messwert in gemittelter Form abzugreifen. Es besteht die Möglichkeit, das Mittel über Messintervalle von zehn Sekunden oder eine Sekunde bilden zu lassen. Der Einschub mit Digitalanzeige der Anzeige- und Steuereinheit ist rechts neben der Empfängerplatine untergebracht. Die Platine mit der Spannungsversorgung befindet sich wiederum rechts neben der Digitalanzeige (Abb. 2.2) [1], [2].

2.2.3 Kalibrierung

Die bei einer Staubkonzentrationsmessung erhaltenen Spannungswerte des SKG 5 müssen durch ein Kalibrierverfahren in Staubkonzentrationswerte umgerechnet werden. Hierzu wird eine Kalibrierkurve erstellt. Diese Kalibrierung erfolgt durch ein infrarot-durchlässiges Kalibriergefäß, welches auf einer Rührplattform steht und in den Strahlengang der SKG 5-Messeinheit gebracht wird (Abb. 2.5). Dazu werden 240 ml Ethanol (96 %) in das Kalibriergefäß gefüllt. Als nächstes muss die Kompensation (Abb. 2.4, Pos. 7) eingeschaltet und die Messeinheit des SKG 5 in der Halterung justiert werden. Voraussetzung hierbei ist, dass sowohl das Kalibriergefäß als auch die darin enthaltene Ethanollösung optimal durchstrahlt werden. Eine optimale Durchstrahlung ist bei der Konfiguration gegeben, bei der der angezeigte Spannungswert minimal wird. Mit dem Potentiometer erfolgt nun der Nullabgleich (Abb. 2.4, Pos. 2), im Display muss 0 V angezeigt werden. Der nächste Schritt ist, mit einer Präzisionslaborwaage Staubportionen von $2 \times 6 \text{ mg}$, $2 \times 24 \text{ mg}$ und 72 mg abzuwiegen, welche sukzessiv unter ständigem Rühren in das Ethanol gegeben werden. Auf diese Weise erhöht sich die Staubkonzentration im Kalibriergefäß. Es werden Konzentrationen von 0 g/m^3 über 25 g/m^3 , 50 g/m^3 , 100 g/m^3 , 200 g/m^3 , 300 g/m^3 bis 600 g/m^3 systematisch erzeugt. Der Rührer des Kalibriergefäßes wird dabei auf einen kleinen Wert gestellt, um zu vermeiden, dass die durch Rühren gebildete konische Flüssigkeitsoberfläche in den Strahlengang gerät, was zu erhöhten Messwerten führen würde. Das Ablesen der Werte an der Anzeige- und

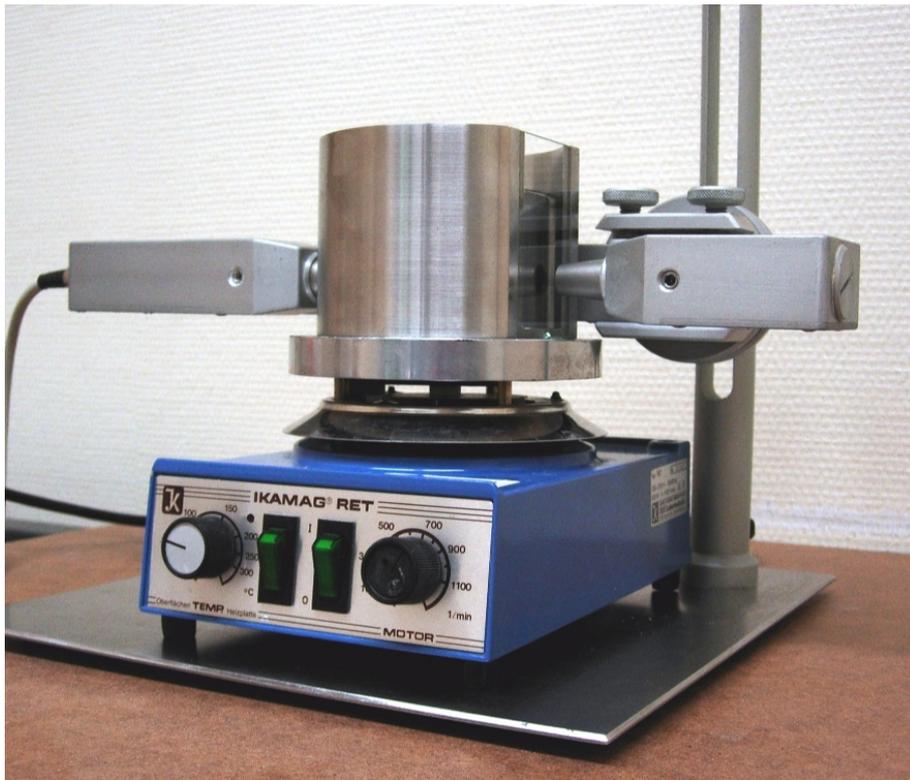


Abbildung 2.5: Vorrichtung zur Erfassung der Kalibrierkurve des SKG 5.

Steuereinheit des SKG 5 erfolgt nach jeder Zugabe der Staubportionen. Dieser Vorgang muss zügig verlaufen, da die Staubteilchen sedimentieren können. Für das Erstellen der Kalibrierkurve kann ein beliebiges Rechnerprogramm, welches Regressionsrechnungen durchführen kann, verwendet werden. Die Regressionsgleichung entspricht dabei in der Form dem Lambert Beer'schen Gesetz (2.1). In Spannung ausgedrückt und wegen der eingeschalteten Kompensation ist die Regressionsgleichung

$$U = -1000 \cdot e^{-\kappa \cdot l \cdot c} + 1000 \quad (2.4)$$

Das Programm muss also eine Funktion der Form (2.4) finden, welche die mit dem Kalibriergefäß gemessenen, zu einer bestimmten Staubkonzentration gehörigen Spannungswerte wiedergibt. Diese Aufgabe entspricht dem Auffinden des Absorptionskoeffizienten κ . Ist dies geschehen, muss in (2.3) oder (2.4) neben dem ermittelten κ die bei der Messung vor Ort eingestellte Breite des Messvolumens l eingesetzt werden, um die Umrechnung von Spannung in Staubkonzentration vornehmen zu können. Ein Beispiel für solch eine Kalibrierkurve ist in Abbildung 2.6 zu sehen. Für Stäube, die sich in Ethanol verändern¹, wurde ein alternatives Verfahren entwickelt, welches ohne den Einsatz von Flüssigkeiten auskommt [1], [2].

¹Bei manchen Stäuben quellen die Partikel in Ethanol oder lösen sich auf; ein Beispiel dafür ist Puderzucker.

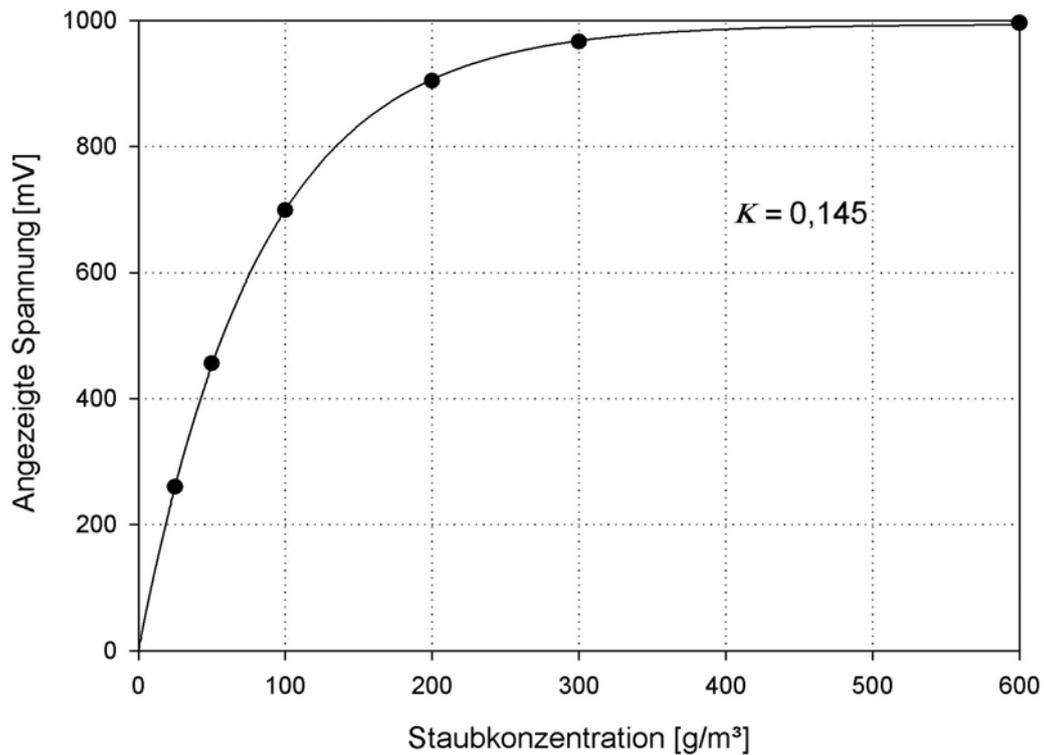


Abbildung 2.6: Kalibrierkurve des SKG 5 für Maisstärke.

2.3 Anpassen des SKG 5

Zur Lösung dieser Messaufgabe musste zunächst eine neue Messeinheit für das SKG 5 entwickelt werden, da die Standard-Messeinheit (Typ 7) zu groß ist und deren Optik wegen der zu erwartenden sehr hohen Staubkonzentrationen zu schnell verschmutzen würde.

Die Behebung der beschriebenen Probleme brachte die Verwendung miniaturisierter optischer Bauteile, ein Mehrkammersystem mit konisch zulaufenden Blenden und die

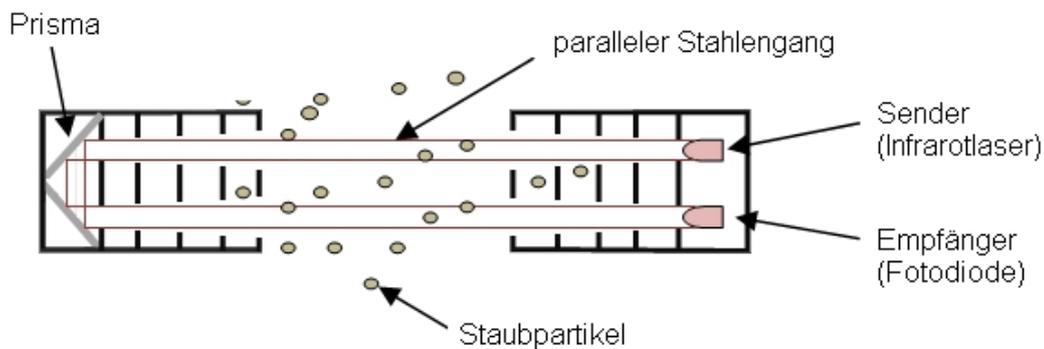


Abbildung 2.7: Schematisiertes Funktionsprinzip der neuen Messeinheit Typ 15. Ein Blendensystem schützt die Optik vor Verschmutzung. Durch Reflektion an einem Prisma durchläuft der Lichtstrahl das Messvolumen zweimal.

Umlenkung des Lichtstrahls um 180° , so dass das Messvolumen zweimal durchlaufen wird. Letztere Maßnahme ermöglicht die Halbierung der Messvolumenbreite und führt somit direkt zu einer Verkürzung der Baulänge der Messeinheit (Abbildungen 2.7 und 2.8). Die neue Messeinheit trägt die Bezeichnung Typ 15.

Für Messungen in extrem dichten oder turbulenten Staubwolken wurde ein Luftgegenstrom im Typ 15 implementiert (Abbildung 2.9). Über eine Luftpumpe kann in beide Kammern des Typs 15 Luft eingeblasen werden, welche durch die Blendenöffnungen entweicht und damit das Eindringen von Staub in die Kammern erheblich erschwert. Da die Kammern zum Messvolumen hin zunehmend größere Blendendurchmesser haben, verringert sich auch die Luftgeschwindigkeit in dieser Richtung. Dies verhindert größere Störungen der Staubwolke im Messvolumen. Luftvolumenströme bis ca. 100 ml/min beeinflussen die Staubkonzentrationsmesswerte vernachlässigbar gering.

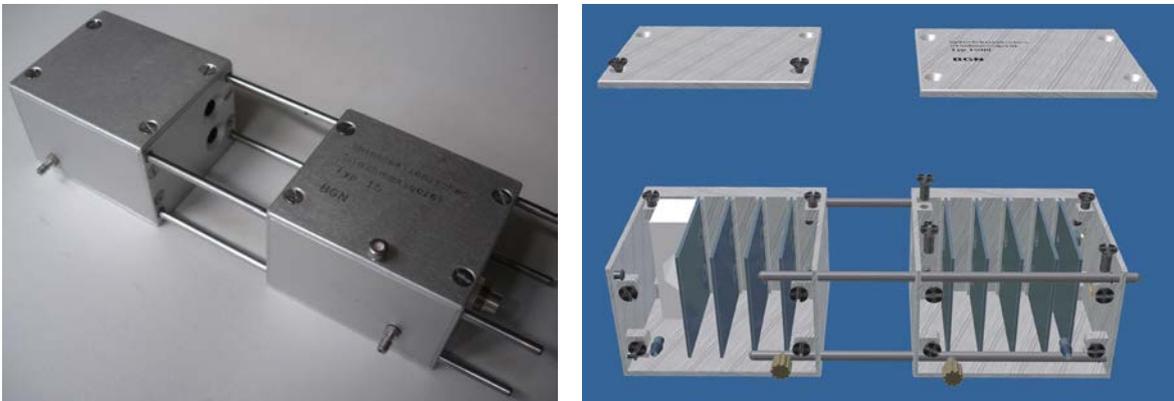


Abbildung 2.8: Messeinheit vom Typ 15 für das SKG 5 (links). Das rechte Bild zeigt den geöffneten Typ 15 in einer CAD-Zeichnung.

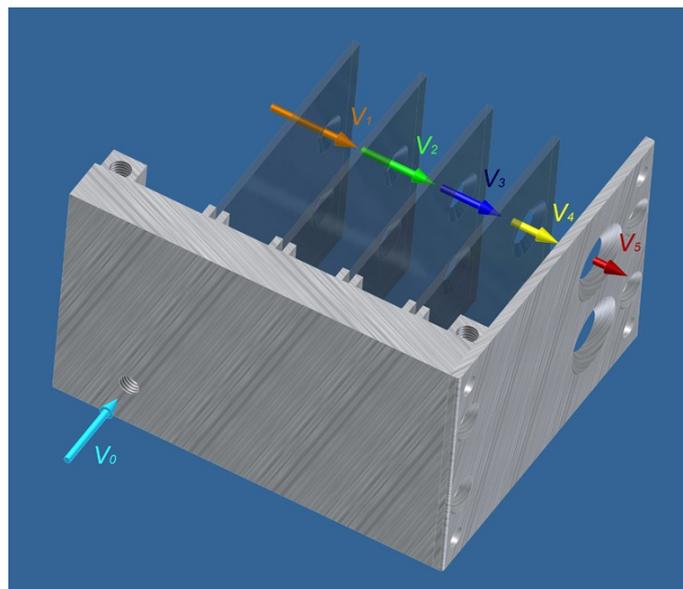


Abbildung 2.9: CAD-Zeichnung einer Kammer des Typs 15 mit skizziertem Luftgegenstrom.

Ist man auf höhere Luftvolumenströme angewiesen (wegen extremer Staubwolken), kann in vielen Fällen die Staubkonzentration dennoch durch Extrapolation bestimmt werden. Dazu wird die gemessene mittlere Staubkonzentration gegen den schrittweise veränderten Luftvolumenstrom durch die Kammern aufgetragen. Anschließend wird durch Regressionsrechnung eine passende Funktion durch die Staubkonzentrationsmesspunkte gelegt. Wo diese Funktion die Konzentrationsachse schneidet liegt ungefähr die wahre Staubkonzentration, die man messen würde, wenn man keinen Luftstrom eingesetzt hätte (Abbildung 2.10).

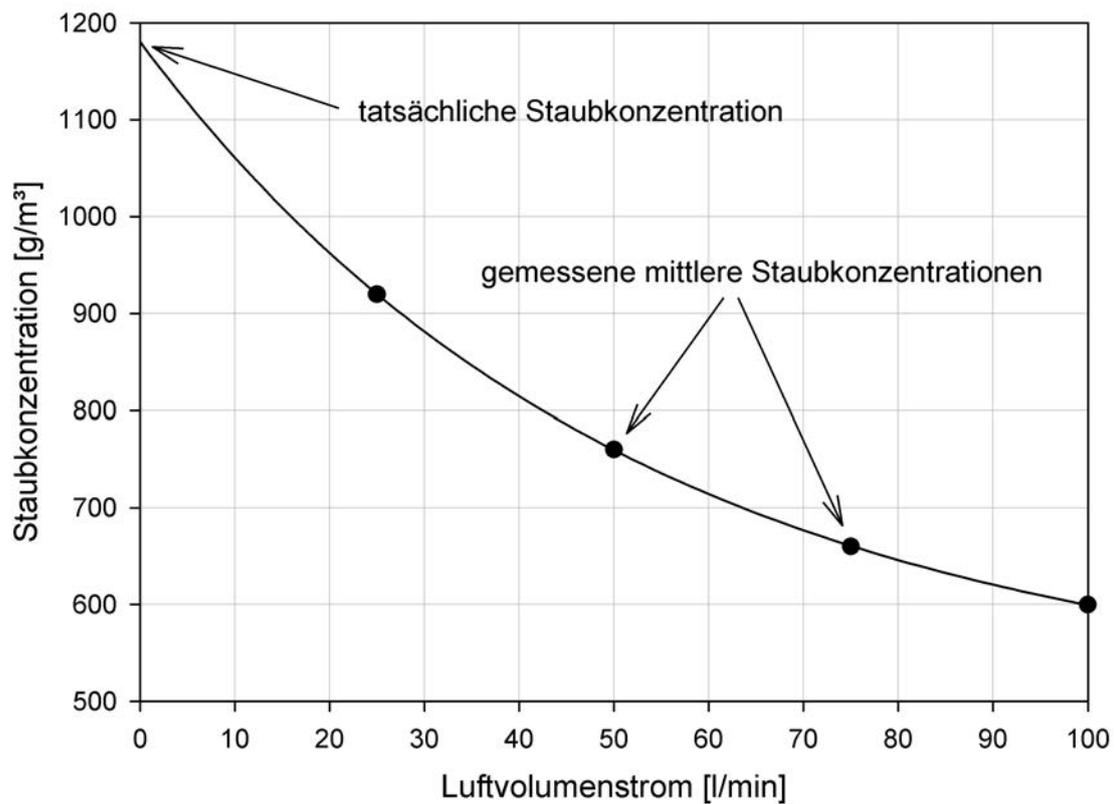


Abbildung 2.10: Ermittlung der wahren Staubkonzentration aus Konzentrationsmessungen bei verschiedenen Luftvolumenströmen.

Kapitel 3

Vorbereitung und Planung

3.1 Auswahl der Stäube

Da neben der Frage nach der Staubkonzentration auch von Interesse ist, wie die Konzentration von der Neigung der Stäube zur Wolkenbildung abhängt, wurden Stäube mit folgenden Eigenschaften für die Messungen gesucht:

1. Die Stäube sollten möglichst unterschiedlich stark stauben, sprich möglichst unterschiedliche Staubungszahlen besitzen.
2. Die Staubungszahlen der Stäube sollten bekannt sein.
3. Die Explosionsgrenzen der Stäube sollten bekannt sein.
4. Die Stäube sollten Preiswert in großen Mengen zu beschaffen sein.

Weil bei den Explosionsversuchen, welche die DEKRA EXAM GmbH im Vorfeld durchführte, Braunkohlenstaub verwendet wurde, war auch bei den Staubkonzentrationsmessungen die Verwendung dieses Staubes sinnvoll und naheliegend. Braunkohlenstaub erfüllt alle oben genannten Kriterien. Die DEKRA EXAM GmbH lieferte ausreichende Mengen des Braunkohlenstaubs für die Messungen. Da die Staubungszahl für diesen speziellen Kohlenstaub nicht genau bekannt war, wurde sie mit Hilfe der Staubungsneigungsapparatur der FSA gemäß der VDI Richtlinie 2263 Blatt 9 zu $S = 123,6$ bestimmt. Der Braunkohlenstaub ist damit extrem staubungsfähig und wurde in die höchste Staubungsgruppe 6 eingestuft.

Als weitere Stäube wurden Maisstärke mit einer mittleren Staubungszahl und Weizenmehl mit einer kleinen Staubungszahl ausgewählt. Da diese Stäube sehr häufig auf dem Versuchsfeld in Kappelrodeck für Explosionsversuche verwendet werden, sind sie in großen Mengen verfügbar sowie deren Explosionsgrenzen und Staubungszahlen bekannt.

In Tabelle 3.1 sind alle verwendeten Stäube mit ihren Eigenschaften, soweit bekannt, zusammengestellt.

Staub	UEG [g/m ³]	OEG [kg/m ³]	S	SG
Weizenmehl	60	5	0,6	1
Maisstärke	60	2 - 6	10,2	4
Braunkohlenstaub	30	14	123,6	6

Tabelle 3.1: Für die Staubkonzentrationsmessungen in den Mischern verwendeten Stäube mit ihren Kenndaten untere und obere Explosionsgrenze, Staubungszahl sowie Staubungsgruppe. Die angegebenen oberen Explosionsgrenzen sind mit einigen Unsicherheiten behaftet und entstammen der Literatur.

3.2 Umbau des Typs 15 und Halterungsaufbau

3.2.1 Umbau des Typs 15

Im Rahmen der Entwicklung des Typs 15 wurde dieser auch im 1m³-Behälter auf dem Versuchsfeld in Kappelrodeck getestet. Dabei wurde stoßartig ein Staub/Luft-Gemisch in den Behälter eingeblasen und die Entwicklung der Staubkonzentration im Behälter mit dem SKG 5 Typ 15 verfolgt. Bei diesen Tests zeigte sich, dass die vier Verbindungsstangen des Typs 15 (siehe Abbildung 2.8) keine ausreichende mechanische Stabilität gewährleisten. Es kam zu Schwankungen im Messsignal, da die optische Achse durch das unter hohem Druck eingeblasene Staub/Luft-Gemisch verändert wurde. Deshalb wurden die Verbindungsstangen entfernt. Eine ausreichende Stabilität der optischen Achse musste durch eine alternative Konstruktion erreicht werden.

3.2.2 Aufbau einer Halterung

Die geplante Halterung sollte gleichzeitig zwei Aufgaben erfüllen. Zum einen musste sie der optische Achse des Typs 15 ausreichende Stabilität bieten, zum anderen musste sie die Messeinheit sicher im Inneren der Mischer halten sowie die notwendigen Verbindungsleitungen zwischen Mess- und Steuereinheit des SKG 5 in ihrem Inneren führen. Beide Forderungen erfüllte die Konstruktion, die in Abbildung 3.1 dargestellt ist.

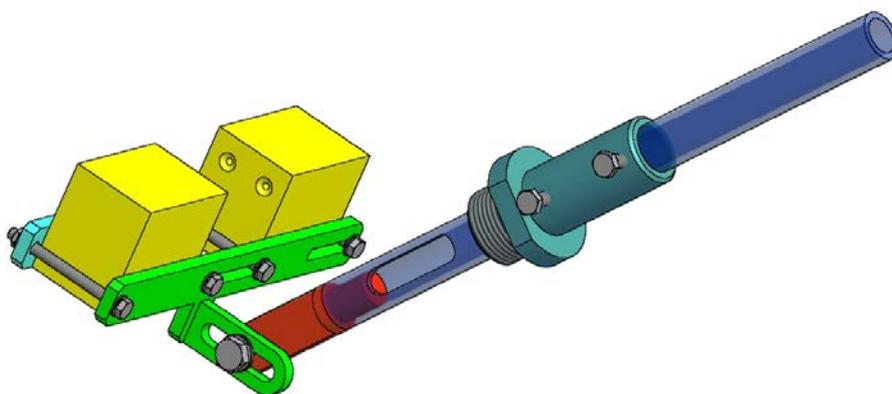


Abbildung 3.1: CAD-Zeichnung der Halterung für den Typ 15 des SKG 5.

Mittels zweier Schienen (grüne Teile in Abbildung 3.1) und vier Schraube wurden der Empfangs- und Sendeteil des Typs 15 stabil eingespannt. Mit Hilfe der Stange und der übergestülpten Gewindehülse konnte die Messeinheit bequem durch einen Stutzen in den Mischerwänden geführt und an der gewünschten Stelle positioniert werden.

3.3 Messprogramm

Die Staubkonzentrationsmessungen sollten im Inneren des Mixers an möglichst vielen unterschiedlichen Messorten durchgeführt werden und zwar für alle drei Stäube. Für jeden Messort und jede Staubart wurde mit den drei Befüllungsgraden $\Gamma = 25\%$, 50% und 70% gemessen. Dieses Messprogramm wiederum wurde für verschiedene Mischgeschwindigkeiten durchgeführt. Auf diese Art und Weise ergaben sich zahlreiche Staubkonzentrationsmessungen im Inneren des Mixers.

Kapitel 4

Messungen am Horizontal-Mischer

4.1 Beschreibung des Mixers

Für die geplanten Staubkonzentrationsmessungen stellte die Firma Lödige GmbH den in Abbildung 4.1 gezeigten Horizontal-Mischer zur Verfügung. Das Mischvolumen dieses Typs ist zylinderförmig und beträgt 300 l. In der langen Symmetrieachse des Zylindervolumens sitzt eine Welle, an der die vier Mischwerkzeuge befestigt sind. Die Welle wird von außen über zwei Antriebsräder und Keilriemen angetrieben (siehe auch Abbildung 4.2). Durch das Wechseln der beiden Antriebsräder können zwei verschiedene Mischgeschwindigkeiten, nämlich $v_U = 2,3 \text{ m/s}$ und $v_U = 4,6 \text{ m/s}$ eingestellt werden. Das entspricht den Rotationsfrequenzen $\nu = 74 \text{ U/min}$ und $\nu = 148 \text{ U/min}$. Diese Werte wurden durch mehrfaches Messen der Dauer für 10 Umdrehungen ermittelt.

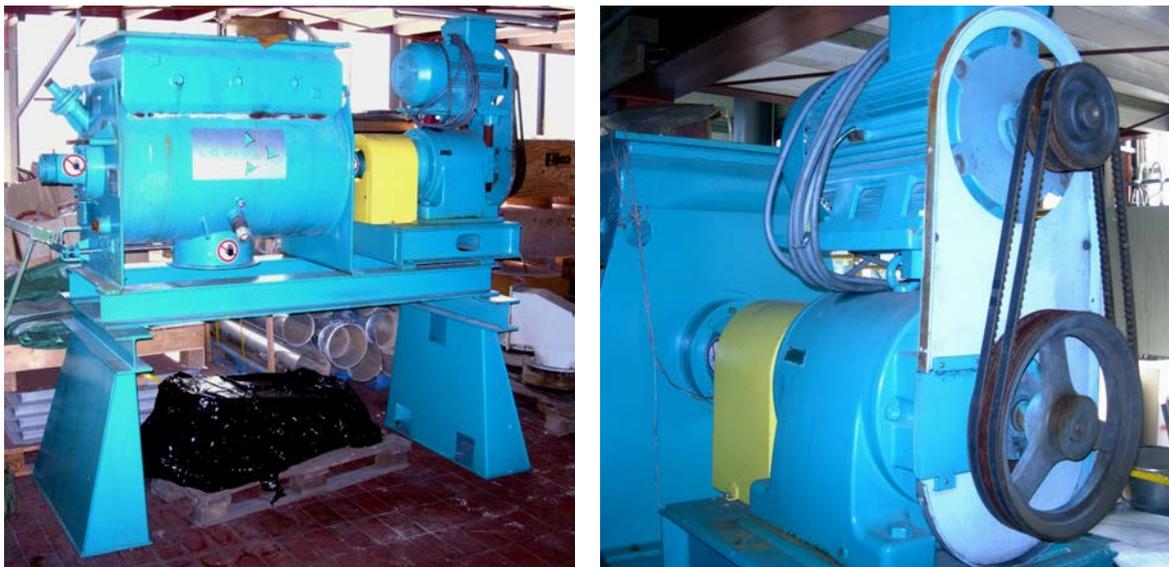


Abbildung 4.1: Der Mixer der Firma Lödige (links) sowie der Antrieb des Mixers über Räder und Keilriemen (rechts). Durch Wechsel der Antriebsräder lassen sich zwei verschiedene Mischgeschwindigkeiten einstellen.

Mit Hilfe des CAD-Programms Inventor wurde eine vermaßte Zeichnung der Mischkammer (Abbildung 4.2) erstellt, aus der alle wichtigen Eckdaten für die Staubkonzentrationsmessung abgeleitet werden konnten. Diese Daten sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. An den mit blauen Punkten markierten Orten konnte die Messeinheit Typ 15 platziert werden.

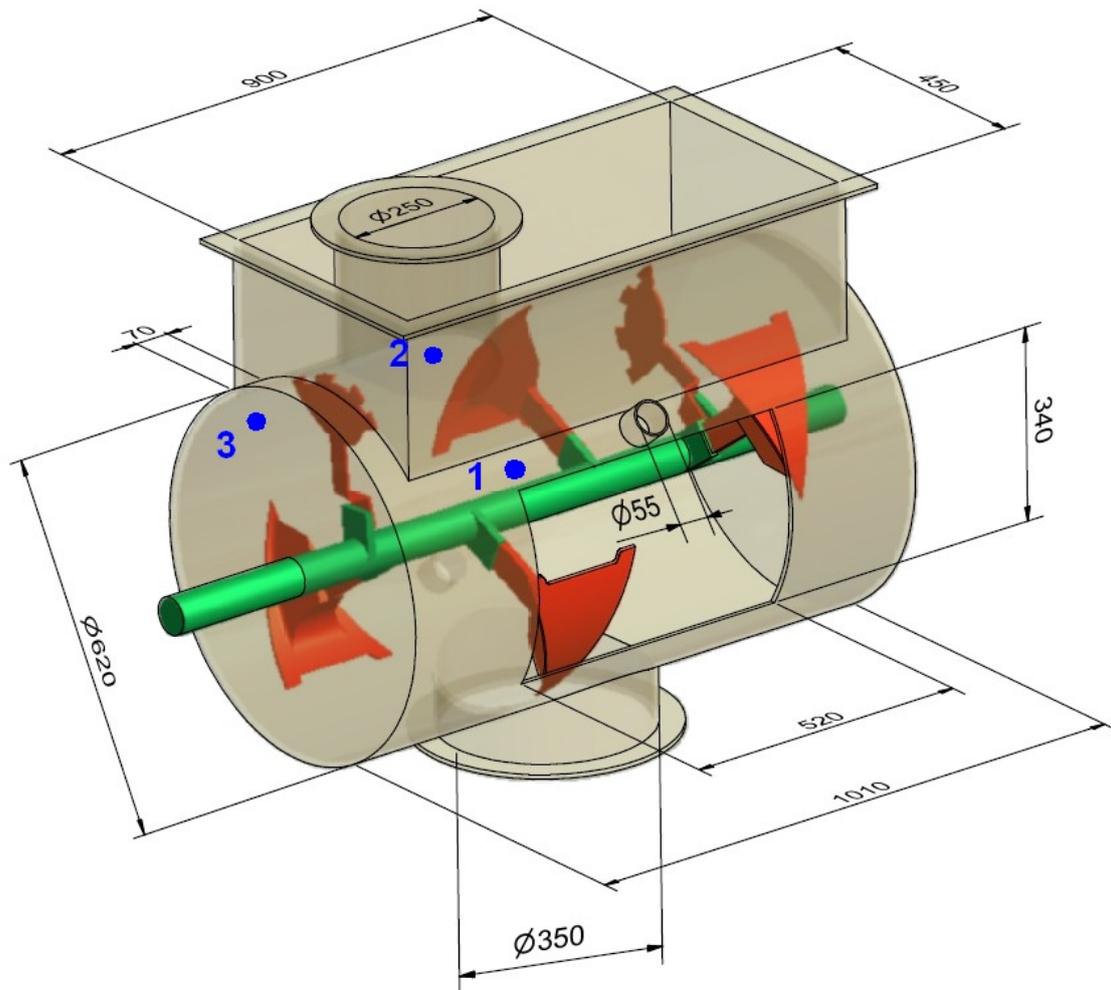


Abbildung 4.2: Vermaßte CAD-Zeichnung der für die Messungen relevanten Teile des Lödige-Mischers. Die blauen Punkte markieren die Messorte.

V_K [m ³]	V_W [m ³]	V_n [m ³]	L_W [m]
0,3	0,008	0,292	0,3

Tabelle 4.1: Wichtige Daten des Lödige-Mischers. Es sind V_K das Bruttovolumen der Mischkammer, V_W das Volumen der Welle und V_n die Differenz aus beiden, also das Nettovolumen der Mischkammer. L_W ist die Distanz zwischen der Mitte der Welle und dem äußeren Rand der Mischwerkzeuge.

4.2 Messorte

Durch die erzielte kompakte Bauweise des Typs 15 war es möglich, an drei verschiedenen Orten im Mischer Staubkonzentrationsmessungen durchzuführen. Einen Überblick über die drei Messorte kann man sich in Abbildung 4.2 verschaffen. Detaillierter sind die Messorte in den Abbildungen 4.3 und 4.4 dargestellt.

Der Messort 1 befindet sich rund 10cm oberhalb der Mitte der Mischerwelle, ist aber um circa 5cm horizontal zur Mischeröffnung hin versetzt (Abbildung 4.3).

Auf dem Mischer ist ein Rohr angeschweißt, welches aus dem Mischvolumen senkrecht nach oben führt. Da das Rohr einen Durchmesser von 25cm hat, ließ sich darin bequem die Messeinheit unterbringen. Der Messort 2 befindet sich innerhalb dieses Rohres etwa 10cm oberhalb der Mischvolumenbegrenzung (Abbildung 4.4, oben).

Um auch am seitlichen Rand des Mischervolumens messen zu können, wurde an der linken Stirnseite¹ des zylindrischen Mischvolumens eine Flansch angeschweißt, in dem der Typ 15 positioniert wurde. Der Messort 3 war damit 10cm unterhalb der oberen Mischvolumenbegrenzung und 2cm von der linken Zylinderstirnseite lokalisiert (Abbildung 4.4, unten).

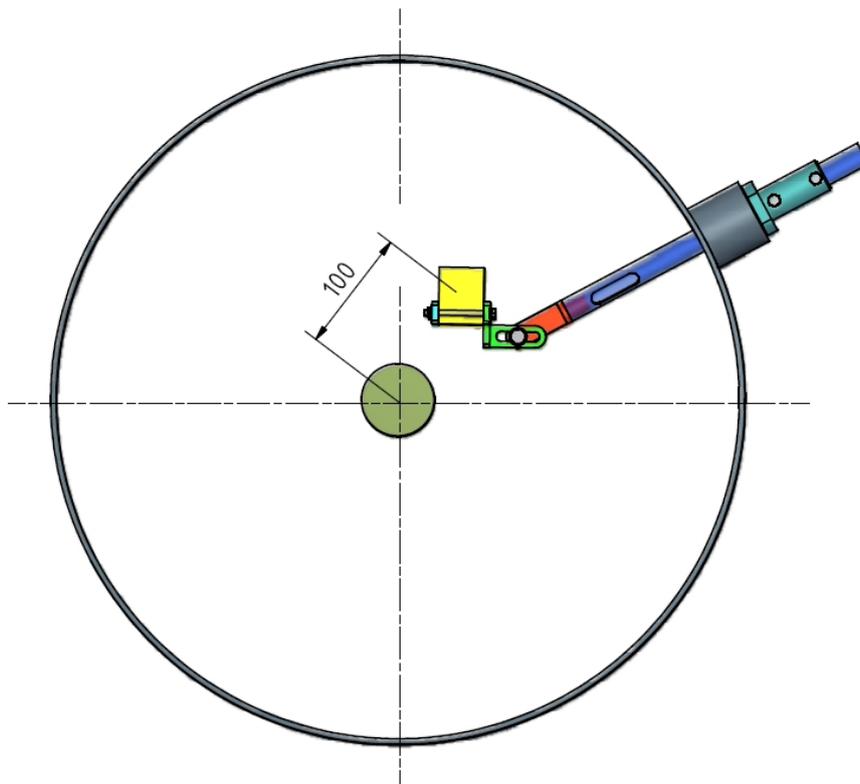


Abbildung 4.3: Messort 1 schematisiert dargestellt.

¹Gesehen von vorne, also der Seite, welche die Klappe zum Befüllen und Entleeren des Mixers enthält.

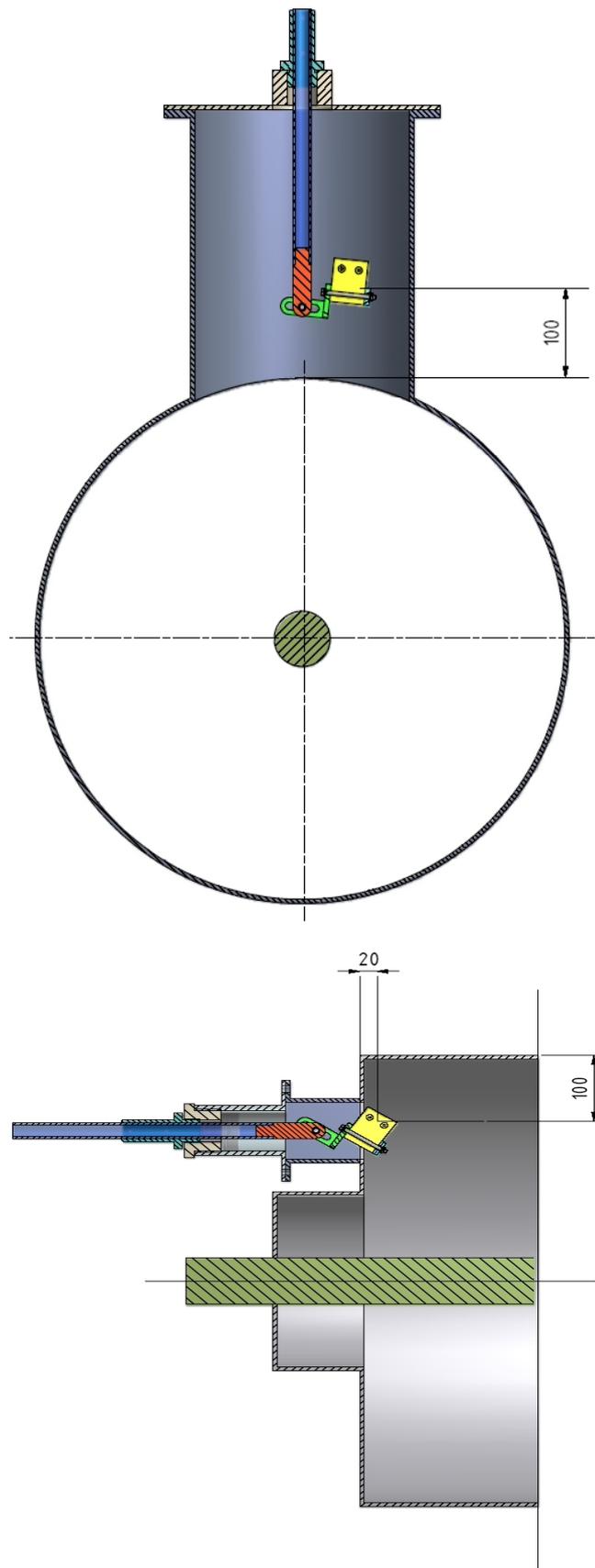


Abbildung 4.4: Messort 2 (oben) und Messort 3 (unten) schematisiert dargestellt.

4.3 Messaufbau

Die Messeinheit Typ 15 wurde mit Hilfe der in Abbildung 3.1 gezeigten Vorrichtung am gewünschten Ort im Mischervolumen platziert. Durch das Innere der Vorrichtung wurden die Kabel nach außen geführt und am Stromnetz bzw. an der Anzeige- und Steuereinheit des SKG 5 angeschlossen. Der Signalausgang der Anzeige- und Steuereinheit wurde mit dem 1. Kanal eines Daten-Loggers² verbunden. Dieser Kanal wurde entsprechend auf die Art (Spannung) und maximale Höhe des Signals eingestellt. Die auf einem Rechner installierte, zum Daten-Logger gehörige Software erlaubt die komfortable Darstellung, Bearbeitung und Speicherung der Messdaten. In Abbildung 4.5 ist der Messaufbau schematisiert in einem Blockbild dargestellt.

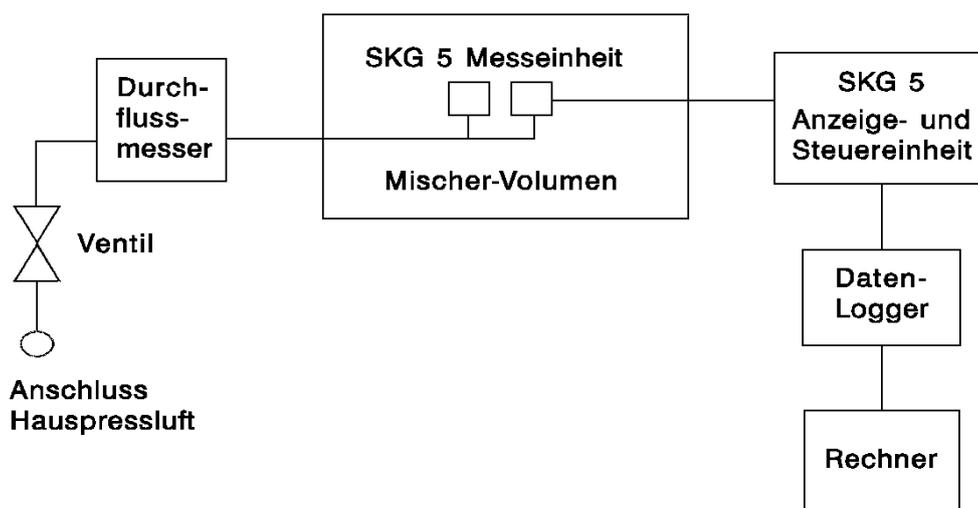


Abbildung 4.5: Schematisierter Messaufbau.

4.4 Durchführung der Messungen

Für jede Staubart wurde mit der Beladung $\Gamma = 25\%$ begonnen, was einem Füllvolumen von 73l entspricht. Der Staub wurde mit Hilfe eines 10l-Eimers und einem 1l-Messgefäß eingefüllt. Anschließend wurde die Datenerfassung mit einer Abtastfrequenz von 5 Hz gestartet und der Mischer für etwa 1 bis 2 Minuten in Betrieb genommen. Danach lief die Datenerfassung noch solange weiter, bis der Staubkonzentrationsmesswert nicht mehr weiter sank. Es folgte das Speichern der Messdaten sowie das Reinigen der Messeinheit. Letztgenannte Tätigkeit wurde im Prinzip nach jedem Messdurchgang notwendig. Nach Abschluss der Messungen mit $\Gamma = 25\%$ wurden weitere 73l der gerade verwendeten Staubart in den Mischer gefüllt ($\Gamma = 50\%$) und damit die beschriebene Prozedur für die drei Messorte wiederholt. Schließlich wurde mit $\Gamma = 70\%$ gemessen, was nochmals ein Zufüllen von 58l bedeutete. Da der Messort 1 bei 70% Befüllungsgrad von Staub bedeckt ist, konnte hier nur die Staubkonzentration an den Messorten 2 und 3 bestimmt werden.

²Almemo 2890-9 der Firma Ahlborn.

Nachdem die Messungen für alle drei Staubarten bei der Mischgeschwindigkeit $v_U = 2,3 \text{ m/s}$ durchgeführt waren, wurden die Antriebsräder am Mischer gewechselt und so die Mischgeschwindigkeit $v_U = 4,6 \text{ m/s}$ eingestellt (siehe Abschnitt 4.1). Bei dieser Geschwindigkeit wurde der oben beschriebene Messablauf komplett wiederholt.

Die beschriebenen Messungen entsprechen dem in Abschnitt 3.3 beschriebenen Messprogramm. Dieses ist detailliert in den Tabellen 4.2 und 4.3 wiedergegeben. Jede der Messung von 1 bis 48 wurde zwei- bis dreimal durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit zu prüfen. In den rechten beiden Spalten ist der am Typ 15 jeweils eingestellte Messabstand l aufgelistet sowie die Luftströmung \dot{V} durch die Messeinheit. Vor allem bei der Mischgeschwindigkeit $v_U = 4,6 \text{ m/s}$ konnten nur mit Luftgegenstrom brauchbare Messergebnisse erzielt werden.

Nr.	v_U [m/s]	Staub	Γ [%]	Messpunkt	l [mm]	\dot{V} [l/s]
1	2,3	Weizenmehl	25	1	50	0
2	2,3	Weizenmehl	25	2	50	0
3	2,3	Weizenmehl	25	3	50	0
4	2,3	Weizenmehl	50	1	19	1,38 - 2,3
5	2,3	Weizenmehl	50	2	50	0
6	2,3	Weizenmehl	50	3	50	0
7	2,3	Weizenmehl	70	2	50	0
8	2,3	Weizenmehl	70	3	50	0
9	2,3	Maisstärke	25	1	50	0
10	2,3	Maisstärke	25	2	50	0
11	2,3	Maisstärke	25	3	50	0
12	2,3	Maisstärke	50	1	50	0
13	2,3	Maisstärke	50	2	50	0
14	2,3	Maisstärke	50	3	50	0
15	2,3	Maisstärke	70	2	50	0
16	2,3	Maisstärke	70	3	21	0
17	2,3	Braunkohle	25	1	50	0
18	2,3	Braunkohle	25	2	50	0
19	2,3	Braunkohle	25	3	50	0
20	2,3	Braunkohle	50	1	19	1,38 - 2,3
21	2,3	Braunkohle	50	2	50	0
22	2,3	Braunkohle	50	3	50	0
23	2,3	Braunkohle	70	2	19	0
24	2,3	Braunkohle	70	3	19	0

Tabelle 4.2: Messreihe für die Mischgeschwindigkeit $v_U = 2,3 \text{ m/s}$. In der Tabelle ist weiterhin der am Typ 15 eingestellte Messabstand l sowie der eingestellte Luftvolumenstrom \dot{V} beschrieben (siehe hierzu Seite 10 und 11).

Nr.	v_U [m/s]	Staub	Γ [%]	Messpunkt	l [mm]	\dot{V} [l/s]
25	4,6	Weizenmehl	25	1	22	2,3
26	4,6	Weizenmehl	25	2	22	1,15 - 2,3
27	4,6	Weizenmehl	25	3	21	2,3
28	4,6	Weizenmehl	50	1	21	2,3
29	4,6	Weizenmehl	50	2	21	2,3
30	4,6	Weizenmehl	50	3	21	2,3
31	4,6	Weizenmehl	70	2	21	2,3
32	4,6	Weizenmehl	70	3	21	2,3
33	4,6	Maisstärke	25	1	21	2,3
34	4,6	Maisstärke	25	2	21	2,3
35	4,6	Maisstärke	25	3	18	2,3
36	4,6	Maisstärke	50	1	18	2,3
37	4,6	Maisstärke	50	2	18	2,3
38	4,6	Maisstärke	50	3	18	2,3
39	4,6	Maisstärke	70	2	18	2,3
40	4,6	Maisstärke	70	3	21	2,3
41	4,6	Braunkohle	25	1	39	2,3
42	4,6	Braunkohle	25	2	39	2,3
43	4,6	Braunkohle	25	3	19	2,3
44	4,6	Braunkohle	50	1	39	2,3
45	4,6	Braunkohle	50	2	23,5	0
46	4,6	Braunkohle	50	3	19	0
47	4,6	Braunkohle	70	2	19	0
48	4,6	Braunkohle	70	3	19	0

Tabelle 4.3: Messreihe für die Mischgeschwindigkeit $v_U = 4,6$ m/s. In der Tabelle ist weiterhin der am Typ 15 eingestellte Messabstand l sowie der eingestellte Luftvolumenstrom \dot{V} beschrieben (siehe hierzu Seite 10 und 11).

4.5 Messergebnisse und Auswertung

Zunächst zeigte sich, dass die für diese Anwendung entwickelte Messeinheit mit der Bezeichnung Typ 15 sehr gut funktionierte. Für jede Parameterkombination konnten brauchbare Spannungskurven mit dem SKG 5 gewonnen werden.

Der erste Schritt bei der Auswertung war die Erzeugung der Kalibrierkurven für die verwendeten Stäube. Diese sind im Anhang A dargestellt. Mit den aus den Kalibrierkurven abgeleiteten Absorptionskoeffizienten bzw. den Gleichungen (A.1) bis (A.3) wurden aus den Spannungskurven die gesuchten Staubkonzentrationskurven generiert. Diese finden sich vollständig in Anhang B.

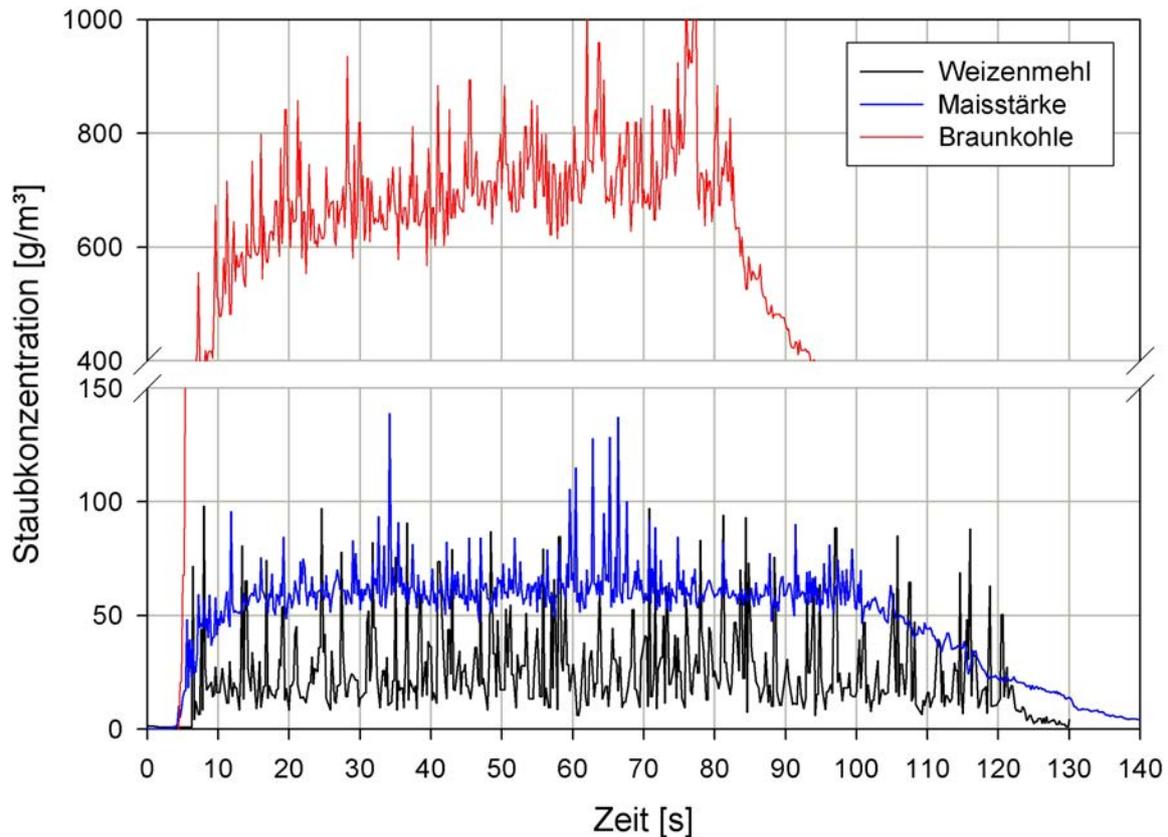


Abbildung 4.6: Staubkonzentrationsentwicklung (Weizenmehl, Maisstärke, Braunkohle) im Horizontal-Mischer am Messpunkt 1 ($\Gamma = 25\%$, $v_U = 2,3$ m/s).

In Abbildung 4.6 sieht man beispielhaft die Ergebnisse eines Messdurchgangs an Messposition 1 bei einem Befüllungsgrad von $\Gamma = 25\%$ und einer Mischgeschwindigkeit von $v_U = 2,3$ m/s. In der Grafik ist deutlich erkennbar, wie stark sich die Stäube in ihrer Fähigkeit zur Staubwolkenbildung unterscheiden, was sich in den unterschiedlichen Staubungszahlen S (siehe Tabelle 3.1) widerspiegelt. Aus dem Kurvenverlauf entnimmt man weiterhin, dass die Staubkonzentrationen im Inneren des Mixers im explosionsfähigen Bereich lagen (bei Weizenmehl zumindest temporär). Ein Blick auf die in Tabelle 3.1 aufgelisteten unteren Explosionsgrenzen (UEG) zeigt dies klar. Auch während der anderen Versuche mit $v_U = 2,3$ m/s war die Staubkonzentration im Inneren des Mixers meist im explosionsfähigen Bereich, wie man der Tabelle 4.4 bzw. den Kurven in Anhang B entnimmt. In Tabelle 4.4 sind die mittleren Staubkonzentrationen aller Versuche aufgelistet.

Bei den Versuchen mit einer Mischgeschwindigkeit von $v_U = 4,6$ m/s wurde soviel Staub im Inneren des Mixers aufgewirbelt, dass die obere Messgrenze des SKG 5 überschritten wurde. Bei dieser Mischgeschwindigkeit musste bei allen Messungen mit kräftigem Luftgegenstrom gearbeitet werden, um brauchbare Ergebnisse zu erhalten. Deshalb ist für $v_U = 4,6$ m/s bei fast allen Messungen nur die Angabe von Mindestkonzentrationen möglich. Die tatsächlichen Staubkonzentrationen sind höher. Auch bei $v_U = 4,6$ m/s waren die Staubkonzentrationen mit hoher Wahrscheinlichkeit im explosionsfähigen Bereich.



Abbildung 4.7: Messereinheit Typ 15 am Messpunkt 1 bei der Messung mit Maisstärke bei $\Gamma = 25\%$ und $v_U = 2,3$ m/s.

v_U [m/s]	Γ [%]	Messpunkt	c_W [g/m ³]	c_M [g/m ³]	c_B [g/m ³]
2,3	25	1	37,9	62,9	177,8
2,3	25	2	6,5	39,1	119,6
2,3	25	3	14,3	110,4	159,2
2,3	50	1	375,0	390,3	252,8
2,3	50	2	10,7	53,1	164,5
2,3	50	3	16,7	207,7	241,7
2,3	70	2	22,9	114,6	232,2
2,3	70	3	22,1	235,8	346,2
4,6	25	1	> 3.250	> 1.100	> 450
4,6	25	2	2.230	> 600	> 400
4,6	25	3	> 3.000	> 900	> 700
4,6	50	1	> 3.000	> 900	> 400
4,6	50	2	> 3.000	> 900	> 700
4,6	50	3	> 2.900	> 1.000	> 700
4,6	70	2	> 1.500	> 1.000	> 1.000
4,6	70	3	> 3.000	> 900	> 500

Tabelle 4.4: Gemessene mittlere Staubkonzentrationen c_W (Weizenmehl), c_M (Maisstärke) und c_B (Braunkohlenstaub).

4.6 Diskussion der Ergebnisse

Abschließend werden die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern untersucht. Im folgenden Abschnitt wird zunächst die Abhängigkeit zwischen Staubungszahl, Befüllungsgrad und der gemessenen Staubkonzentration beleuchtet.

4.6.1 Staubungszahl, Befüllungsgrad und Staubkonzentration beim langsamen Mischen

Von besonderem Interesse ist, wie die Staubungszahl und der Befüllungsgrad die Staubkonzentration an den verschiedenen Messorten beeinflussen. Deshalb wurde für jeden Messpunkt versucht, eine Funktion für die Staubkonzentration aufzustellen, deren Funktionswerte von den beiden Variablen Staubungszahl und Befüllungsgrad abhängen. Sehr gut gelang dies für die Messpunkte 2 und 3 für die Mischgeschwindigkeit $v_U = 2,3 \text{ m/s}$ (Abbildung 4.9). Für den Messpunkt 1 und die genannte Mischgeschwindigkeit gelang dies bedingt, da manche der Staubkonzentrationsmesswerte erheblichen Unsicherheiten unterliegen (Abbildung 4.8). Für die Mischgeschwindigkeit $v_U = 4,6 \text{ m/s}$ sind nur Untergrenzen für die Staubkonzentrationen vorhanden, weshalb keine sinnvollen Funktionen aufgestellt werden konnten.

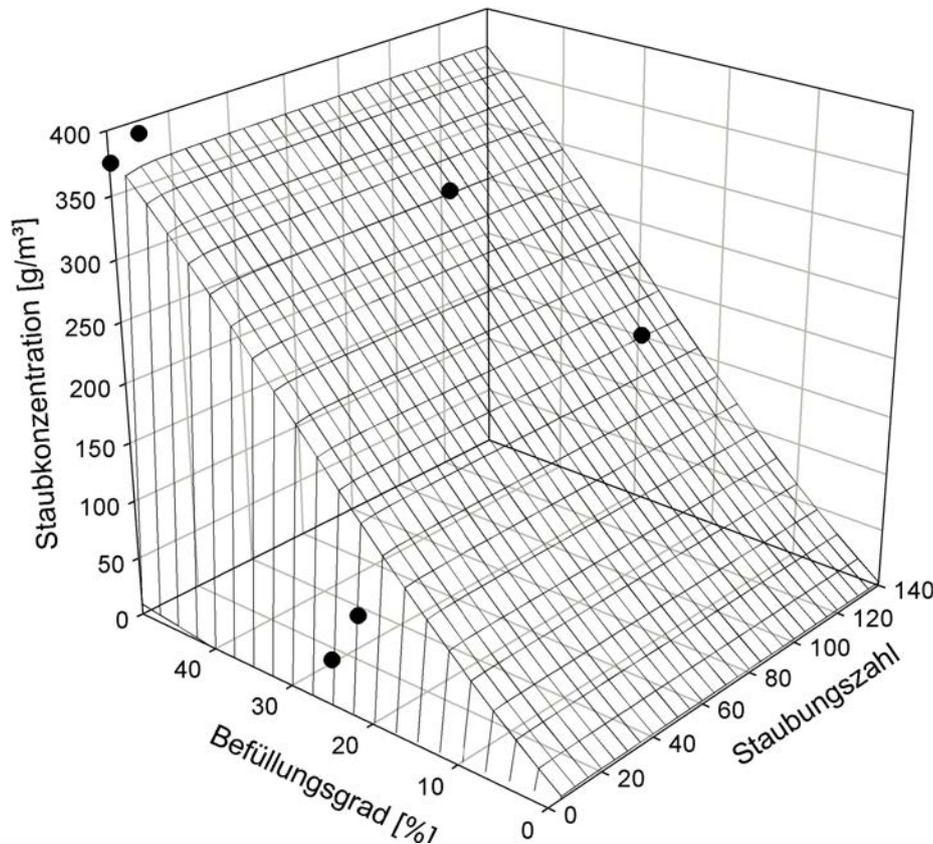


Abbildung 4.8: Staubkonzentration als Funktion von Staubungszahl (Staubart) und Befüllungsgrad für den Messpunkt 1 bei der Mischgeschwindigkeit $v_U = 2,3 \text{ m/s}$.

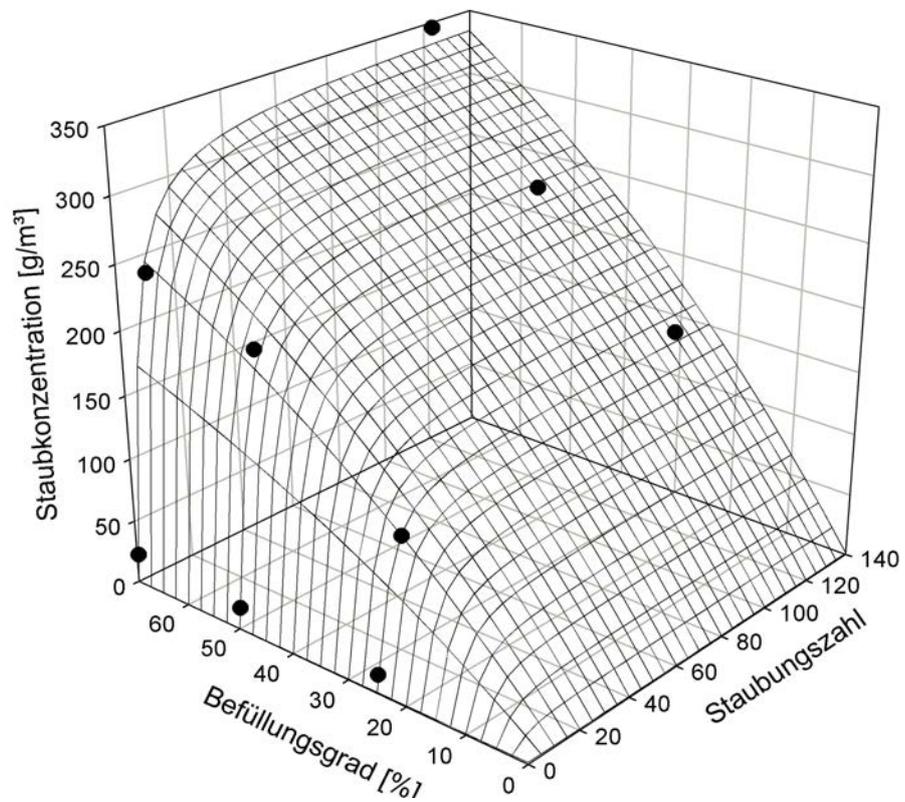
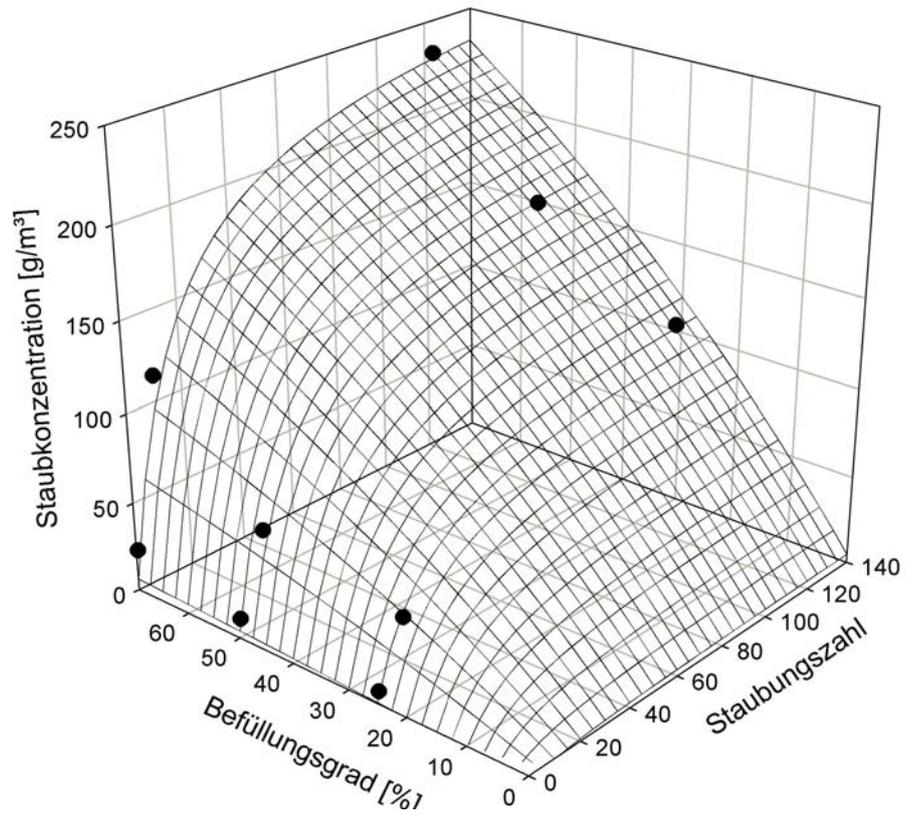


Abbildung 4.9: Staubkonzentration als Funktion von Staubungszahl (Staubart) und Befüllungsgrad für Messpunkt 2 (oben) und 3 (unten) bei $v_U = 2,3 \text{ m/s}$.

Die Abhängigkeit der Staubkonzentration c von Befüllungsgrad Γ und Staubungszahl S (Staubart) lässt sich für die langsame Mischgeschwindigkeit $v_U = 2, 3$ m/s befriedigend (Messpunkt 1) bis sehr gut (Messpunkte 2 und 3) mit der kumulativ-additiven Lorentz-Funktion

$$c = a + b \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{\arctan\left(\frac{\Gamma-c}{d}\right)}{\pi} \right) + e \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{\arctan\left(\frac{S-f}{g}\right)}{\pi} \right) + h \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{\arctan\left(\frac{\Gamma-c}{d}\right)}{\pi} \right) \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{\arctan\left(\frac{S-f}{g}\right)}{\pi} \right) \quad (4.1)$$

beschreiben. Die Koeffizienten und Korrelationskoeffizienten zu den in den Abbildungen 4.8 und 4.9 dargestellten Funktionen sind in Tabelle 4.5 aufgelistet.

M	a	b	c	d	e	f	g	h	R^2
1	242,8	-597,2	-0,0214	0,1325	-1.068,6	30,19	45,12	2.212,7	0,846
2	12.599	-16.161	-13,97	10,93	-15.698	-134,4	94,41	20.130	0,979
3	2.525,2	-5.817,8	1,088	4,946	-3.250,8	-93,53	79,27	7.493,9	0,995

Tabelle 4.5: Koeffizienten, die – eingesetzt in (4.1) – die in den Abbildungen 4.8 und 4.9 dargestellten Funktionsflächen liefern. In der rechten Spalte ist der jeweilige Korrelationskoeffizient aufgelistet. M steht als Abkürzung für Messpunkt.

Den Korrelationskoeffizienten in Tabelle 4.5 und den Grafiken in Abbildung 4.9 entnimmt man, dass sich die Staubkonzentration in Messpunkt 2 und 3 besonders gut mit (4.1) beschreiben lässt.

Man erkennt in den Grafiken, dass beim langsamen Mischen die Staubkonzentration stärker mit der Staubungszahl – also der Staubart – ansteigt als mit dem Befüllungsgrad. Offenbar gilt dies umso stärker, je kleiner die Distanz zwischen Mischerachse und Betrachtungsort oberhalb der Mischerachse ist. Man erkennt dies an der zunehmenden Steilheit der Flächen in positiver Richtung der Staubungszahl-Achse in Reihenfolge der Abbildungsaufzählung 4.8 (Messpunkt 1), 4.9, unten (Messpunkt 3) und 4.9, oben (Messpunkt 2). Besonders die Variation der Staubungszahl unterhalb von 10 (unterhalb Staubungsgruppe 4) wirkt sich gravierend auf die Staubkonzentration im Mischer aus. In abgeschwächter Form gilt dies für Staubungszahlen zwischen 20 und 40, also den Staubungsgruppen 4 und 5. Man muss daraus folgern, dass bei der Diskussion um den Explosionsschutz an Mischern die Betrachtung der Staubungszahl eine größere Rolle spielt als der Befüllungsgrad. Dies gilt zumindest für langsame Mischvorgänge.

4.6.2 Messort, Befüllungsgrad und Staubkonzentration beim langsamen Mischen

In diesem Abschnitt wird der Einfluss des Messortes auf die Staubkonzentrationsmesswerte untersucht. Eine dreidimensionale Darstellung war hierbei nicht von Vorteil, weshalb mit gewöhnlichen Diagrammen gearbeitet wurde. In den Abbildungen

4.10 und 4.11 ist die Staubkonzentration gegen die Distanz über der Mischerachse für alle drei Stäube und Befüllungsgrade aufgetragen. Die Analyse der Grafiken führt zunächst zu der Schlussfolgerung, dass die Staubkonzentration im Mischvolumen mit dem Befüllungsgrad wächst. Das war zu erwarten und wurde schon in Abschnitt 4.6.1 aus den Abbildungen 4.8 und 4.9 sowie aus Gleichung (4.1) abgeleitet. Diese Aussage gilt eingeschränkt für Stäube mit sehr kleiner Staubungszahl. Wie man den Kurven für Weizenmehl in den Abbildungen 4.10 und 4.11 entnimmt, ist die Staubkonzentration von Weizenmehl in den Messpunkt 3 und 2 nahezu unabhängig vom Befüllungsgrad. In der Regel sinkt die Staubkonzentration beim langsamen Mischen mit zunehmender Höhe über der Mischerachse, was ebenfalls zu erwarten war. Eine Ausnahme bildet die Maisstärke beim Befüllungsgrad $\Gamma = 25\%$ (Abbildung 4.10). Die Schwankungsbreite der gemessenen Staubkonzentration im Messpunkt 1 war bei diesem Befüllungsgrad bei der Maisstärke relativ groß. Der daraus abgeleitete Mittelwert ist dadurch mit entsprechend großen Unsicherheiten behaftet. Möglicherweise ist der vergleichsweise niedrige mittlere Staubkonzentrationsmesswert darauf zurück zu führen.

In Abbildung 4.12 ist die ungefähre mittlere Maisstärkekonzentration beim Befüllungsgrad $\Gamma = 50\%$ und der Mischgeschwindigkeit $v_U = 2,3\text{ m/s}$ in Form eines Farbkonturbildes dargestellt. Man erkennt dort die deutlich abnehmende Staubkonzentration mit zunehmender der Höhe. Die Staubkonzentration c nimmt nach dem $\exp(x)$ -Gesetz $c = 745,7 \cdot \exp(-0,0645 \cdot h)$ mit der Höhe h über der Mischerachse ab.

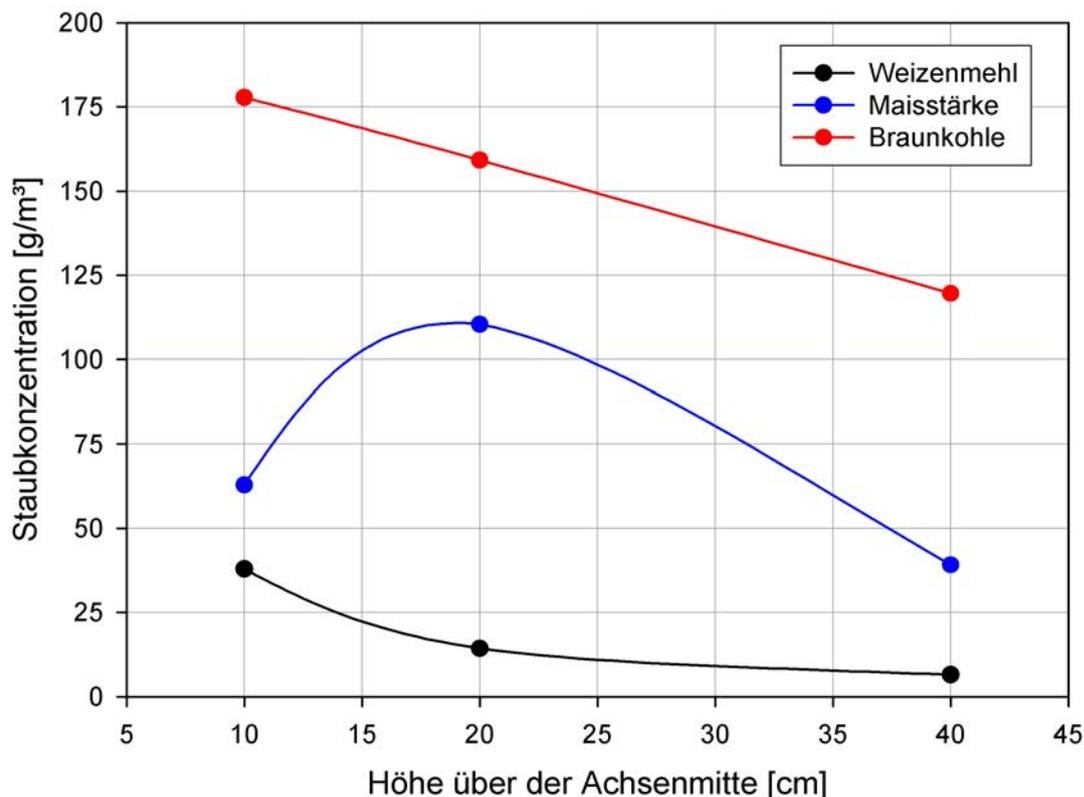


Abbildung 4.10: Staubkonzentration für jede Staubart (Staubungszahl) als Funktion vom Messort beim Befüllungsgrad $\Gamma = 25\%$. Die Mischgeschwindigkeit betrug $v_U = 2,3\text{ m/s}$.

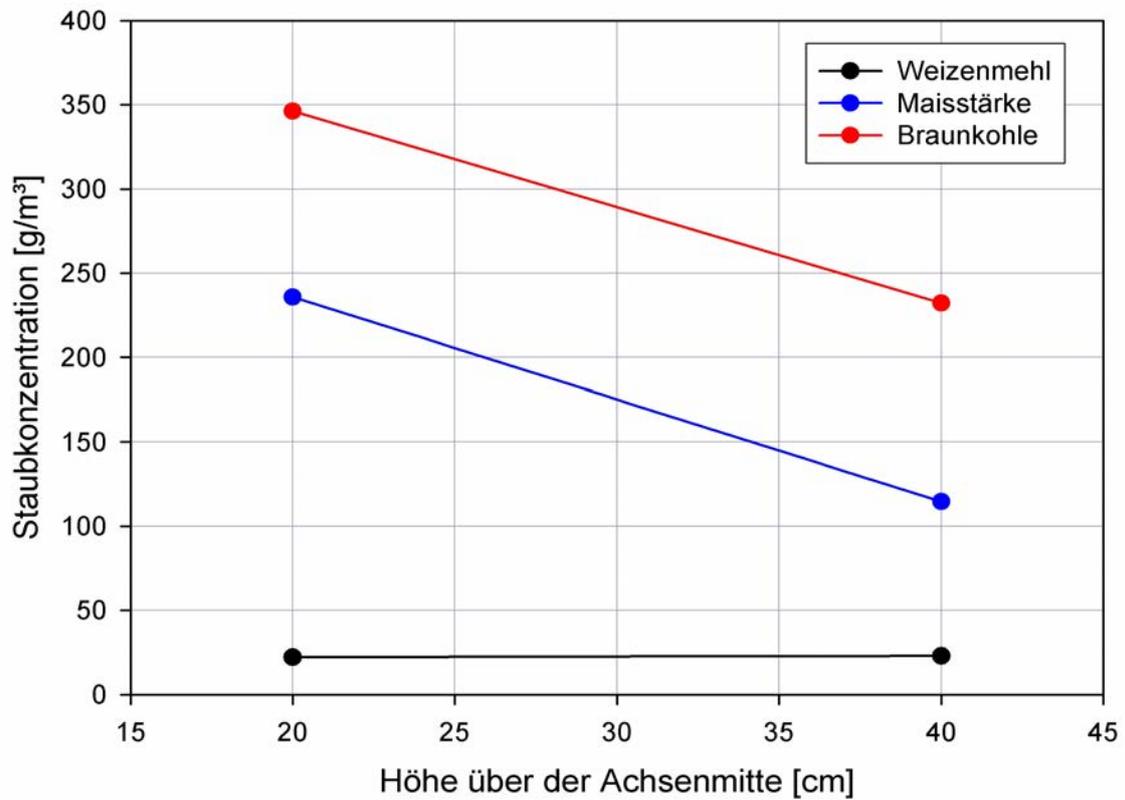
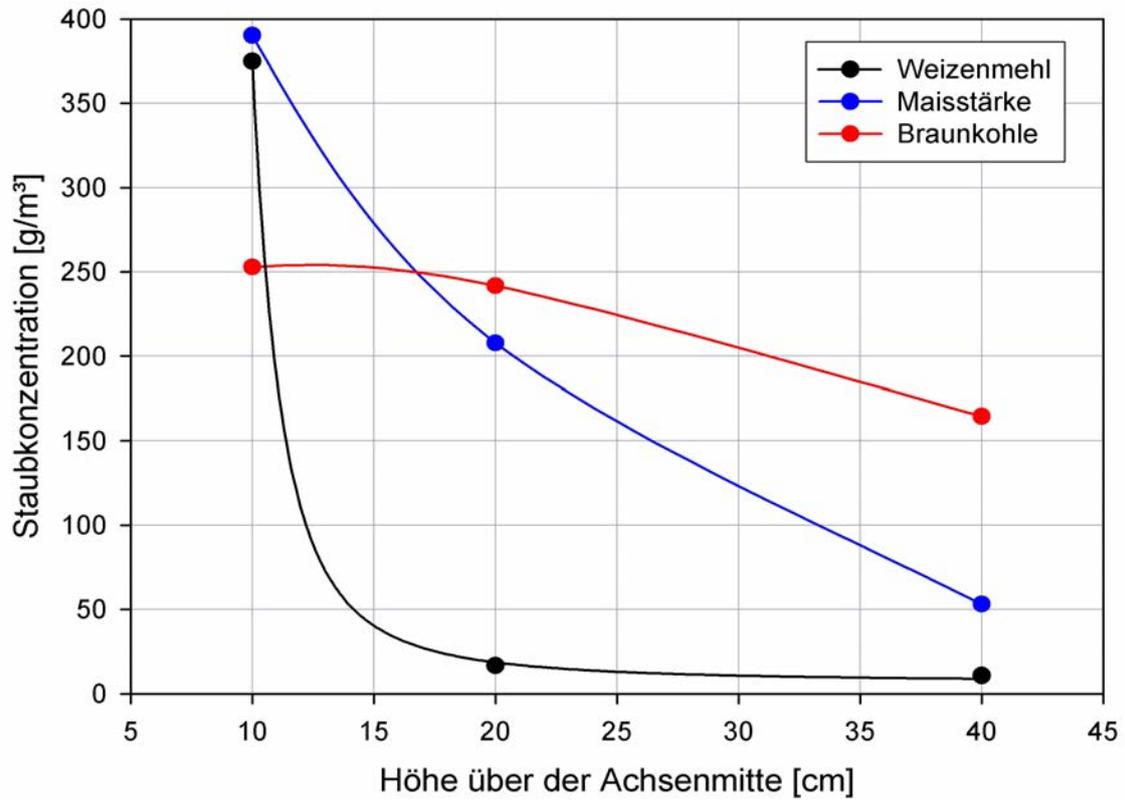


Abbildung 4.11: Staubkonzentration für jede Staubart (Staubungszahl) als Funktion vom Messort beim Befüllungsgrad $\Gamma = 50\%$ (oben) und $\Gamma = 70\%$ (unten). Die Mischgeschwindigkeit betrug $v_U = 2,3$ m/s.

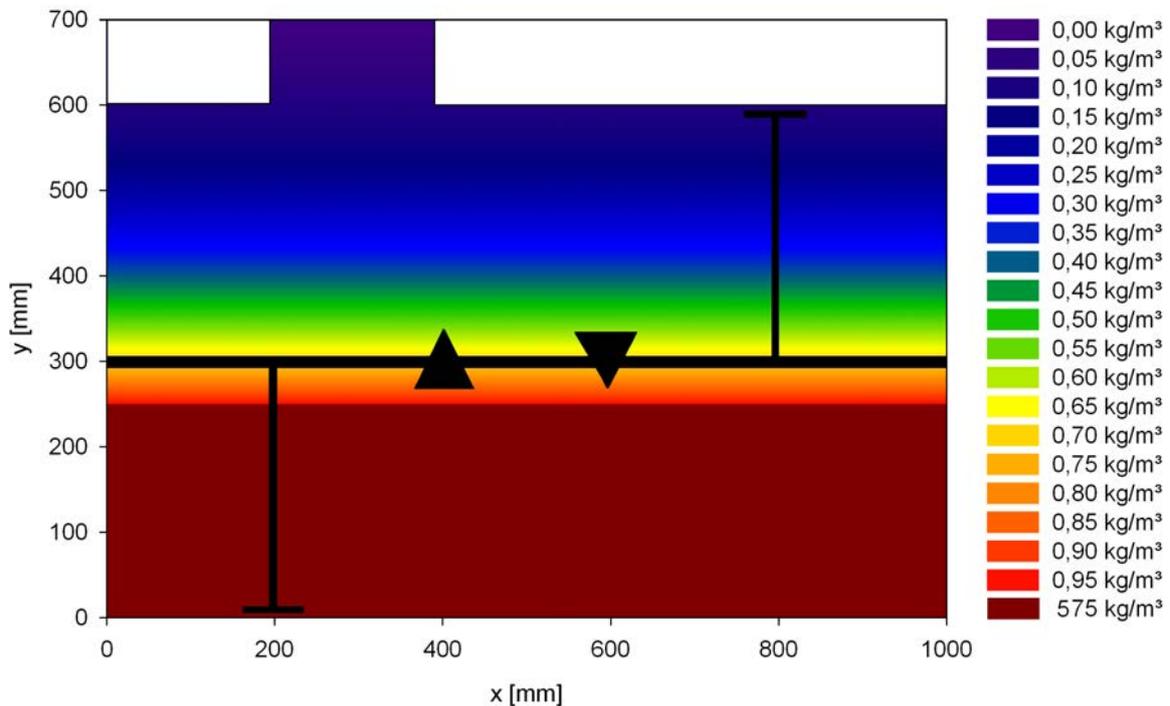


Abbildung 4.12: Farbkonturbild der mittleren Maisstärke-Staubkonzentration im Mischer für den Befüllungsgrad $\Gamma = 50\%$ und die Mischgeschwindigkeit $v_U = 2,3$ m/s.

4.6.3 Fazit

Bei den hier durchgeführten Staubkonzentrationsmessungen in einem Horizontal-Mischer wurden fast ausnahmslos Konzentrationen im explosionsfähigen Bereich identifiziert. Dies gilt für alle eingestellten Befüllungsgrade von $\Gamma = 25\%$, 50% und 70% . Eine Ausnahme bildete das Weizenmehl bei langsamer Mischgeschwindigkeit $v_U = 2,3$ m/s. Für diesen Staub mit seiner sehr kleinen Staubungszahl wurde die untere Explosionsgrenze nur lokal und/oder temporär überschritten. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass Stäube mit sehr kleiner Staubungszahl bei langsamem Mischen eher unkritisch sind.

Bei der höheren Mischgeschwindigkeit $v_U = 4,6$ m/s wurde die untere Explosionsgrenze generell deutlich überschritten.

Für die Staubwolkenbildung im Mischer sind die nachfolgend aufgelisteten Parameter wichtig, wobei in der Reihenfolge ihrer Nennung ihren Einfluss auf die Wolkenbildung widerspiegelt:

1. Mischgeschwindigkeit
2. Staubungszahl
3. Befüllungsgrad

Literaturverzeichnis

- [1] H. OTT: *Benutzerhandbuch Staubkonzentrationsmessgerät SKG 5*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V., 1992.
- [2] M. NICKLISCH: *Verbesserung des Staubkonzentrationsmessgerätes SKG 5*, Diplomarbeit, Fachhochschule Mannheim und Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V., 2005.
- [3] VDI: *Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren - Beurteilung - Schutzmaßnahmen, Bestimmung des Staubungsverhaltens von Schüttgütern*, VDI Richtlinie 2263 - Blatt 9, Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- [4] P. DYRBA: *Verkleinerung des Staubkonzentrationsmessgerätes SKG 5*, Diplomarbeit, Fachhochschule Heidelberg und Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin mbH, 2009.

Anhang A

Kalibrierung

Mit Gleichung (2.4) und dem Abstand $l = 0,0418$ m des Kalibriergefäßes ergaben sich die Absorptionskoeffizienten κ aus Tabelle A.1.

Staubart	Weizenmehl	Maisstärke	Braunkohle
κ [m ² /g]	0,04127	0,15275	0,16291

Tabelle A.1: Absorptionskoeffizienten zur Kalibrierung des SKG 5 Typ 15 für Weizenmehl, Maisstärke und Braunkohlenstaub.

Durch Umstellen der Formel (2.4) und einsetzen der Werte aus Tabelle A1 ergeben sich die Ausdrücke (A.1) bis (A.3) zur Berechnung der Staubkonzentration aus den gemessenen Spannungskurven. Der Faktor 2 im Nenner der Formeln kommt dadurch zustande, dass das Messvolumen zweimal vom Lichtstrahl durchlaufen wird.

$$\text{Weizenmehl : } c = \frac{\ln(1 - U)}{-0,04127 \cdot 2 \cdot l} \quad (\text{A.1})$$

$$\text{Maisstärke : } c = \frac{\ln(1 - U)}{-0,15275 \cdot 2 \cdot l} \quad (\text{A.2})$$

$$\text{Braunkohlenstaub : } c = \frac{\ln(1 - U)}{-0,16291 \cdot 2 \cdot l} \quad (\text{A.3})$$

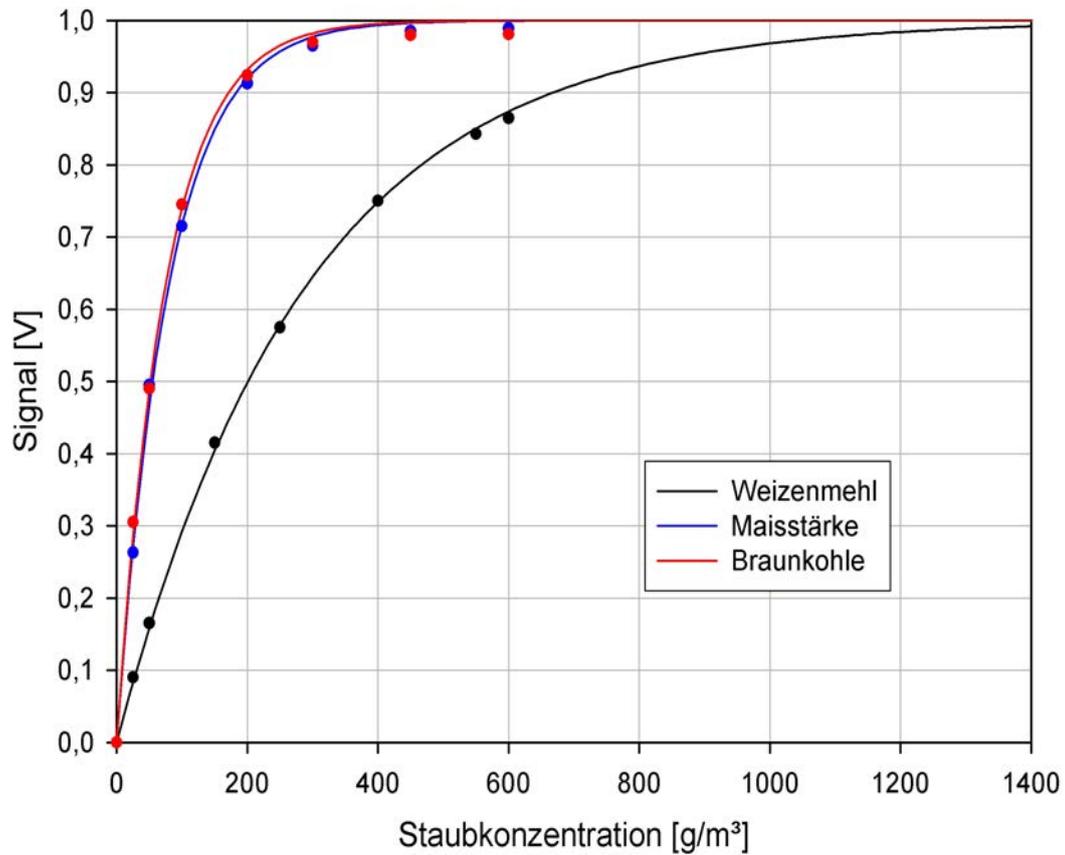


Abbildung A.1: Kalibrierkurven für Weizenmehl, Maisstärke und Braunkohle ermittelt mit dem SKG 5 Typ 15.

Weizenmehl		Maisstärke		Braunkohlenstaub	
c [g/m ³]	U [V]	c [g/m ³]	U [V]	c [g/m ³]	U [V]
0	0	0	0	0	0
25	0,090	25	0,263	25	0,305
50	0,165	50	0,495	50	0,490
100	0,415	100	0,715	100	0,745
200	0,575	200	0,913	200	0,924
300	0,750	300	0,965	300	0,970
450	0,843	450	0,985	450	0,980
600	0,865	600	0,989	600	0,981

Tabelle A.2: Ergebnisse der Kalibrierung des SKG 5 Typ 15.

Anhang B

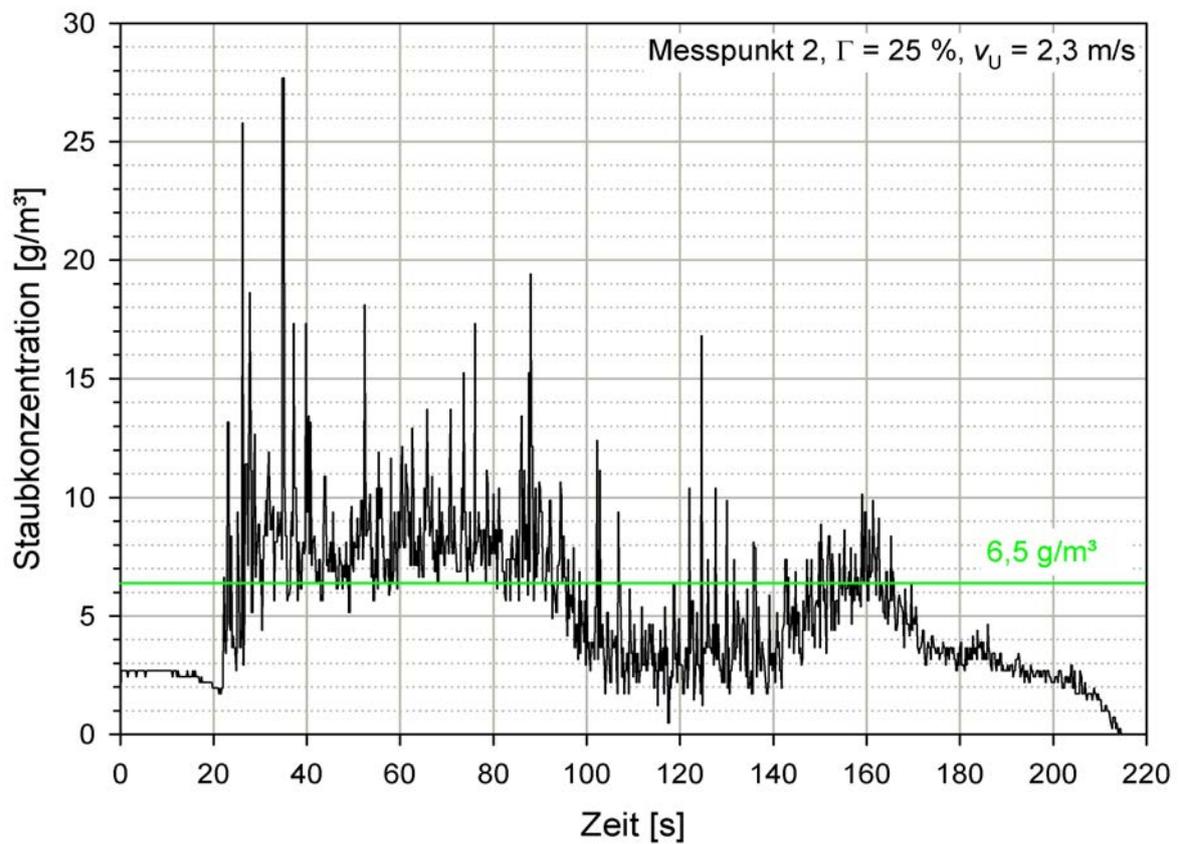
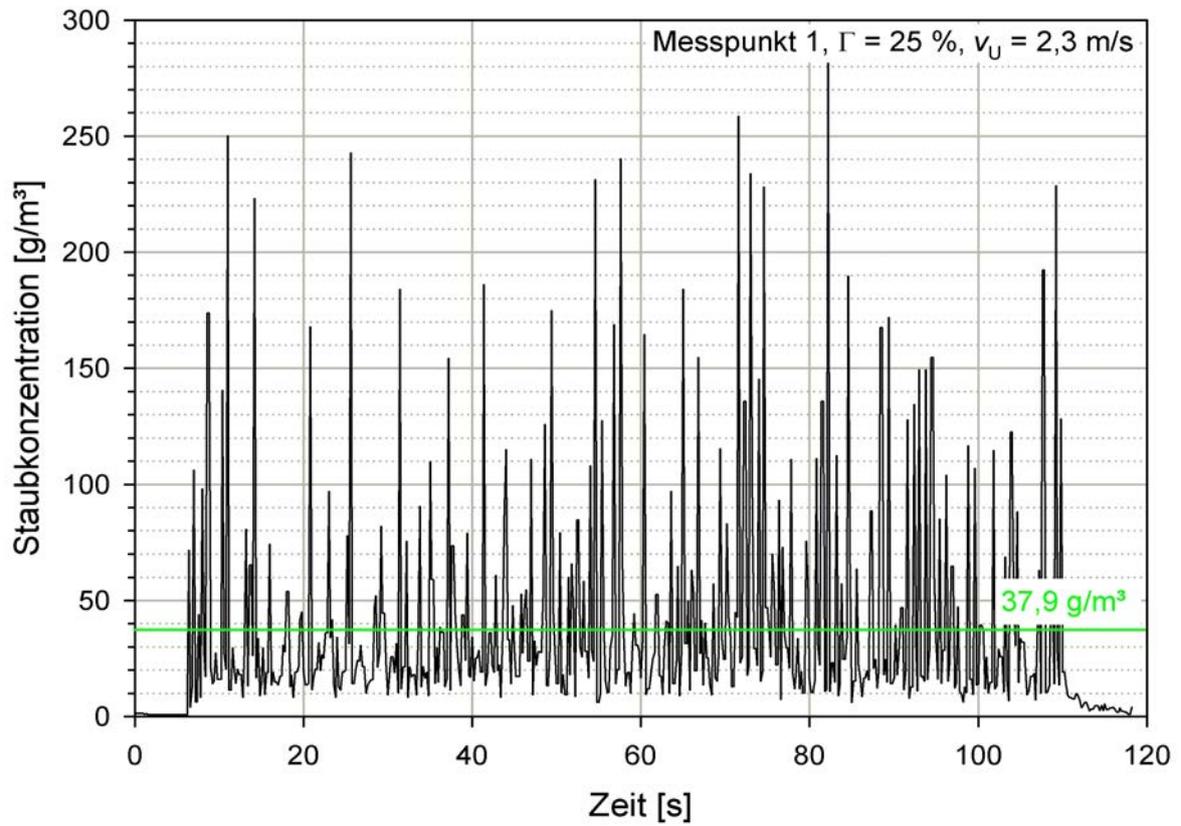
Messergebnisse grafisch dargestellt

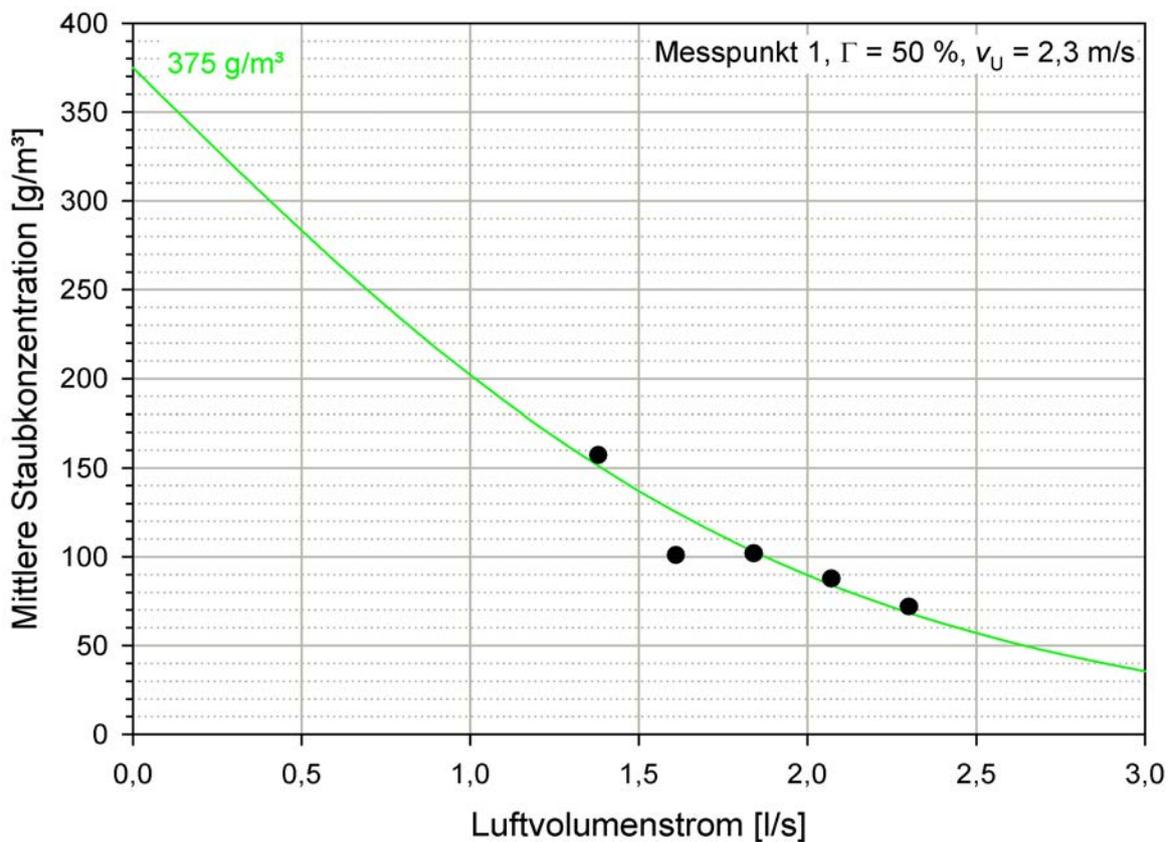
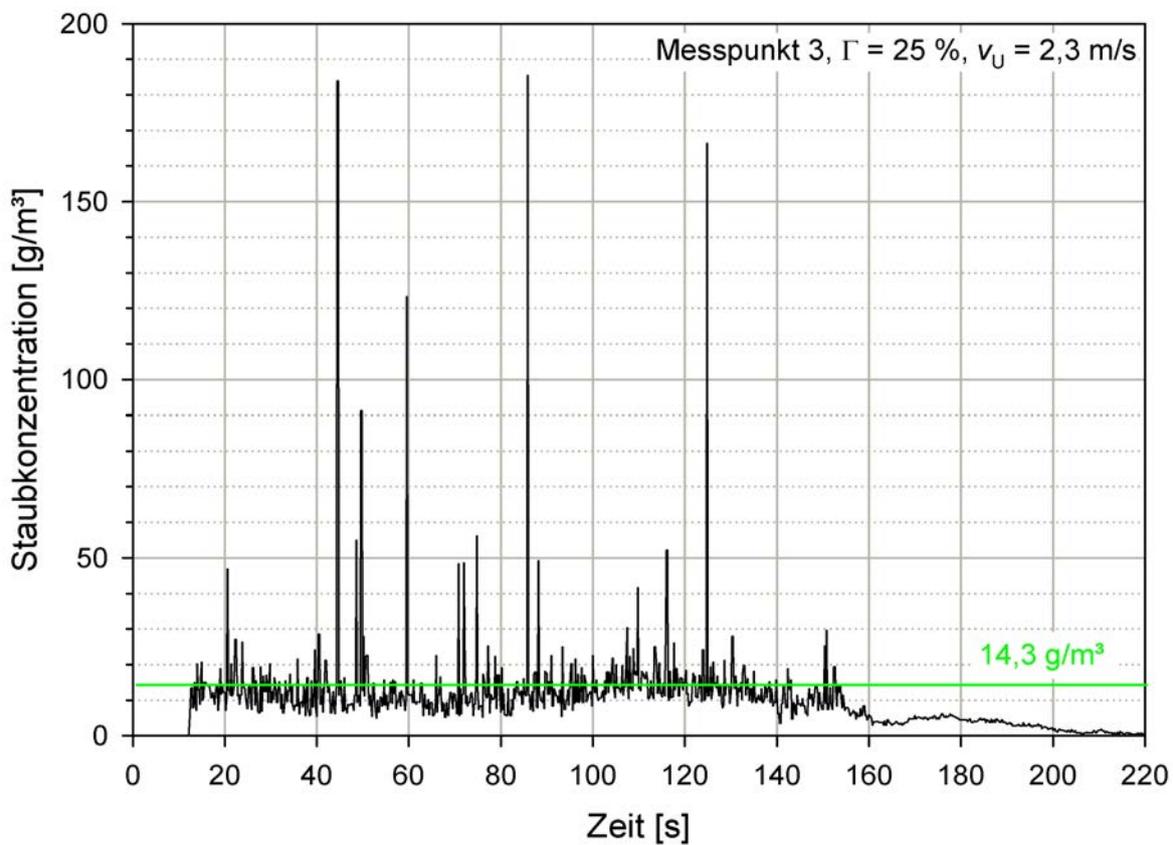
Von den zwei bis drei durchgeführten Messungen pro Parameterkombination ist im Folgenden jeweils ein besonders repräsentatives Messergebnis gezeigt. Auf die Darstellung aller Kurven wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

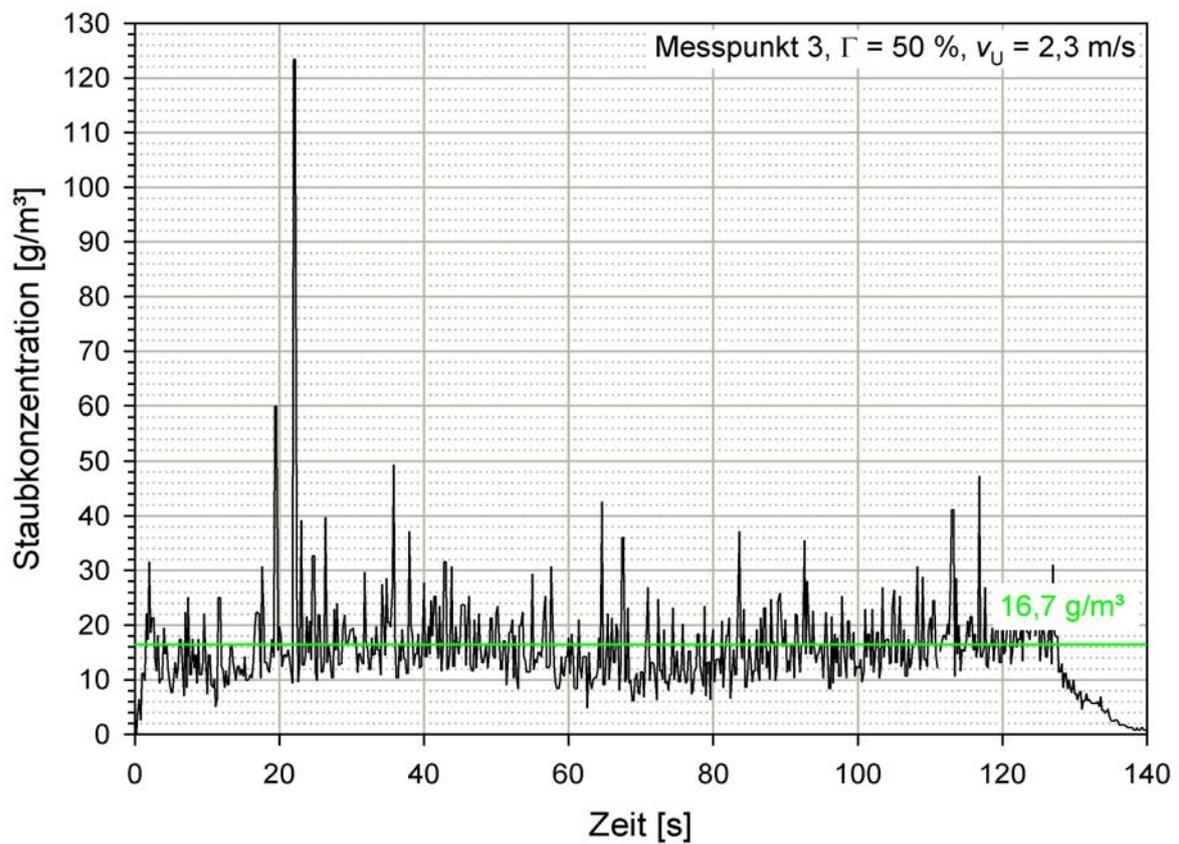
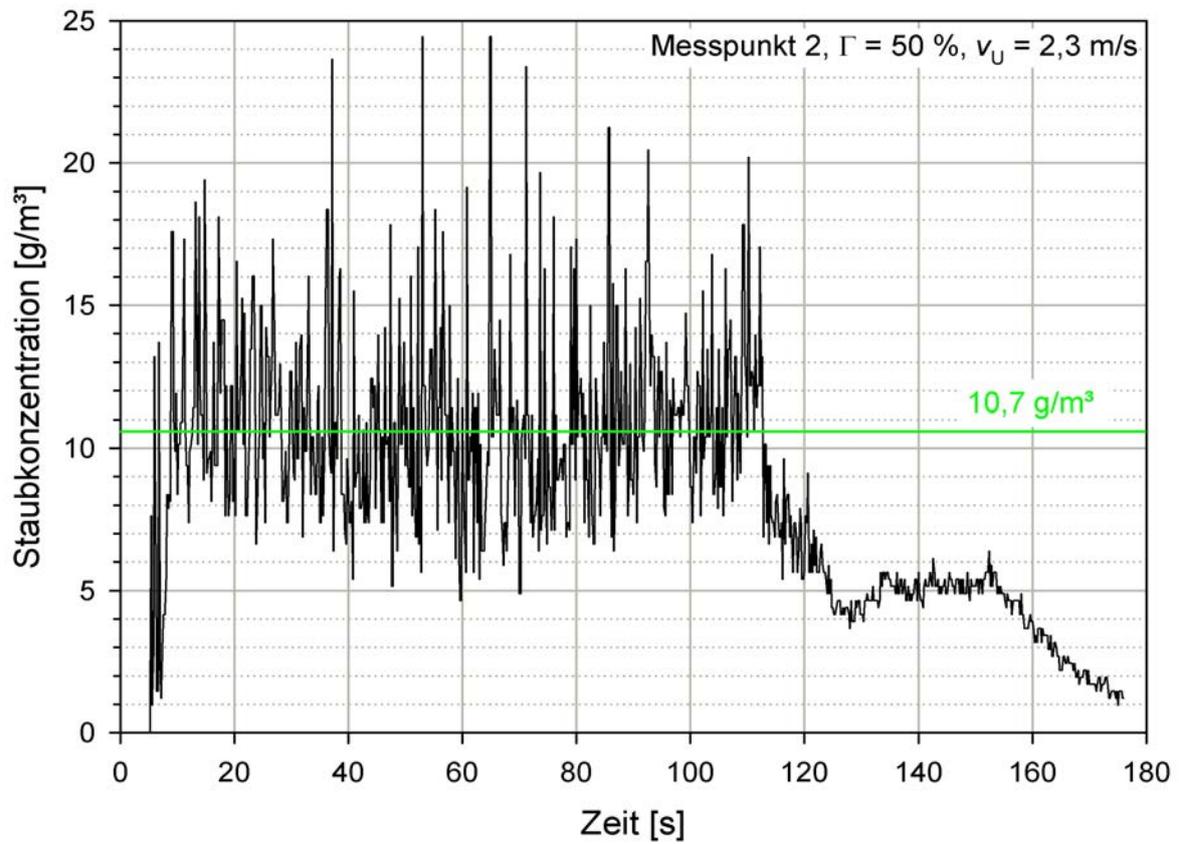
Für die Staubkonzentrationskurven gilt folgende Farbcodierung:

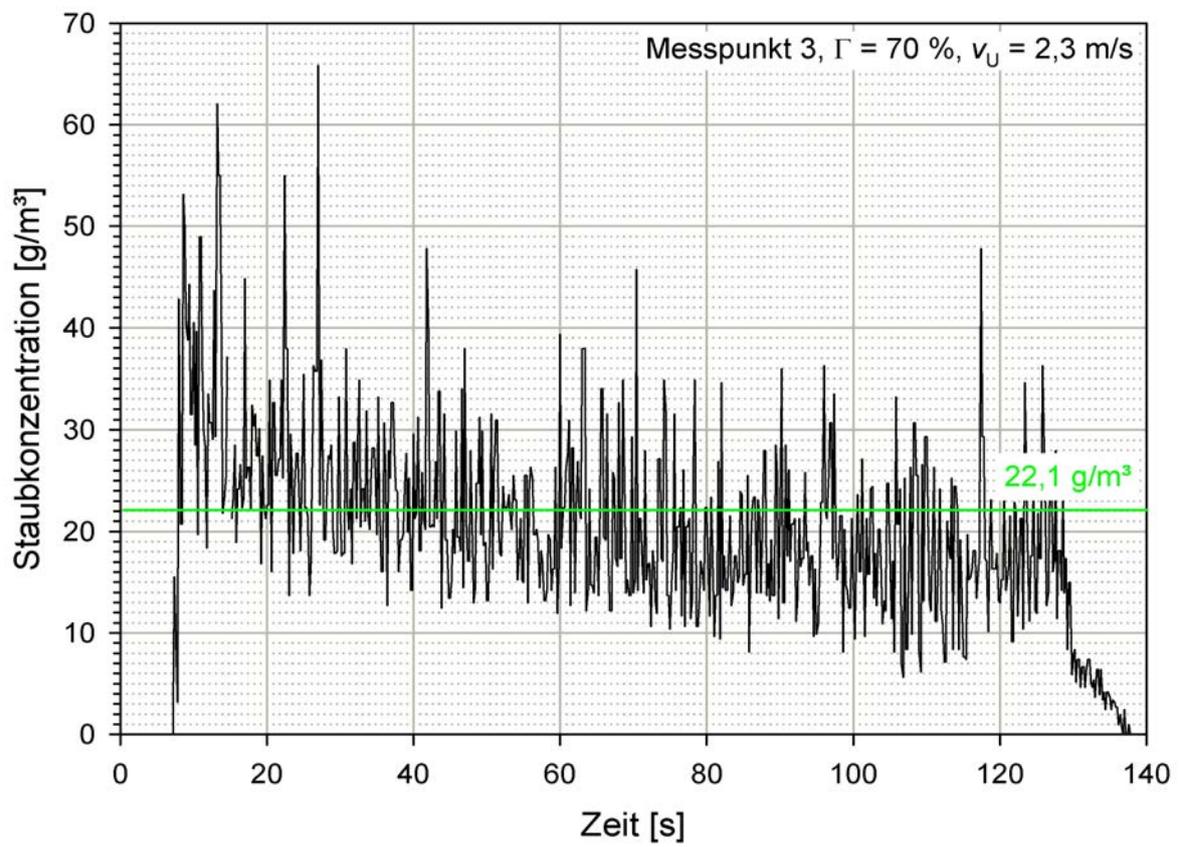
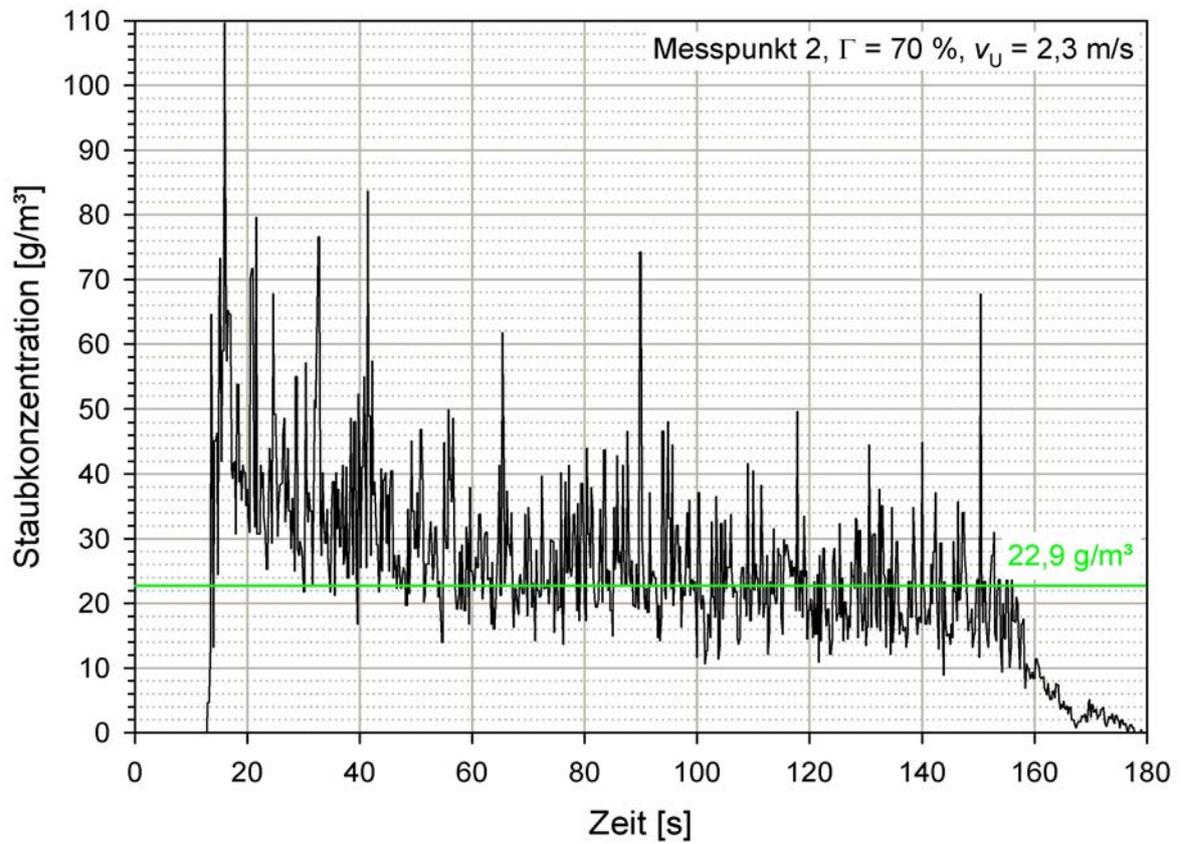
- Schwarz: Weizenmehl
- Blau: Maisstärke
- Rot: Braunkohlenstaub

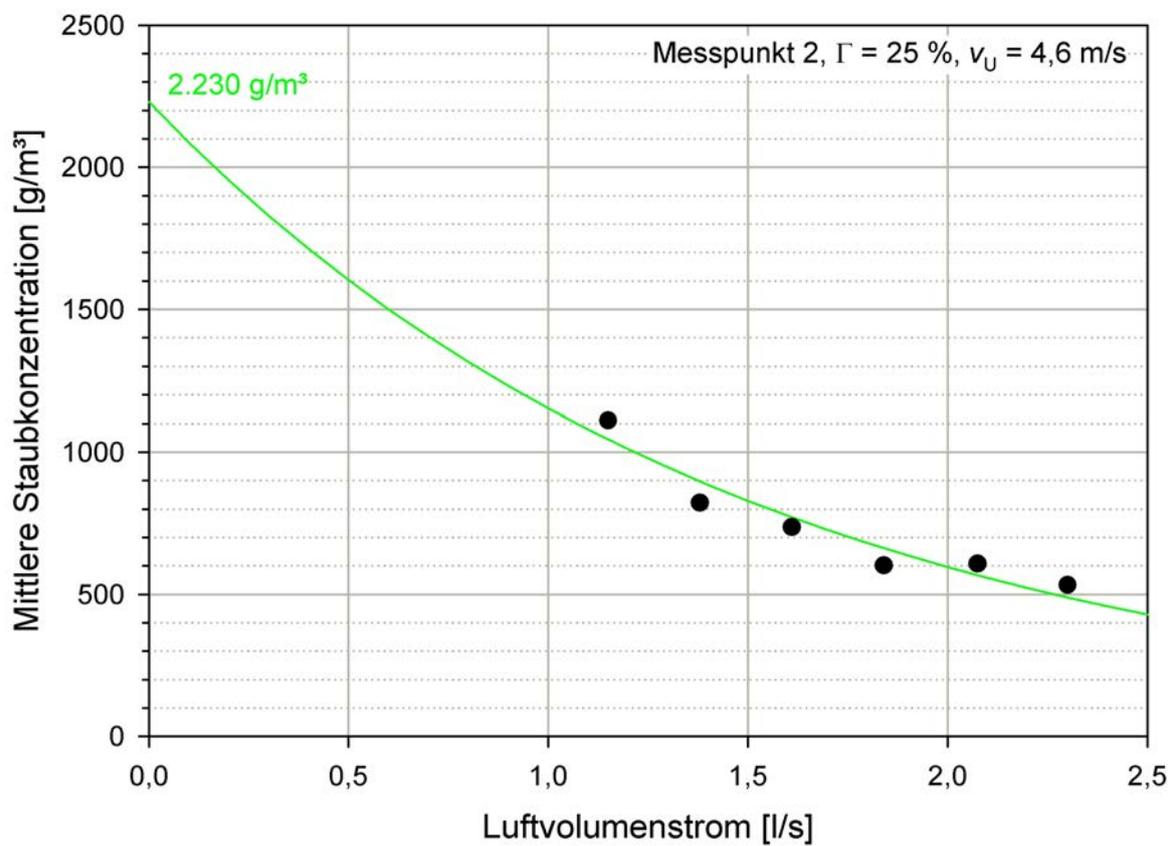
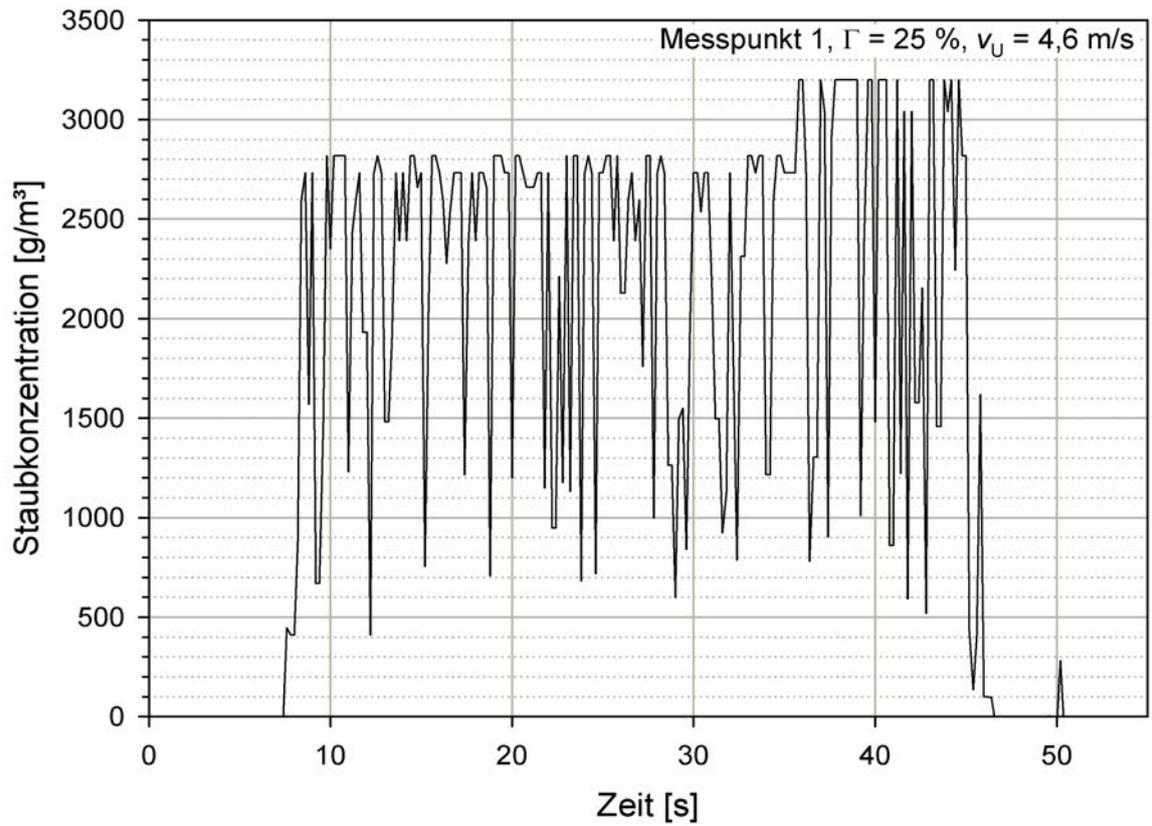
B.1 Weizenmehl

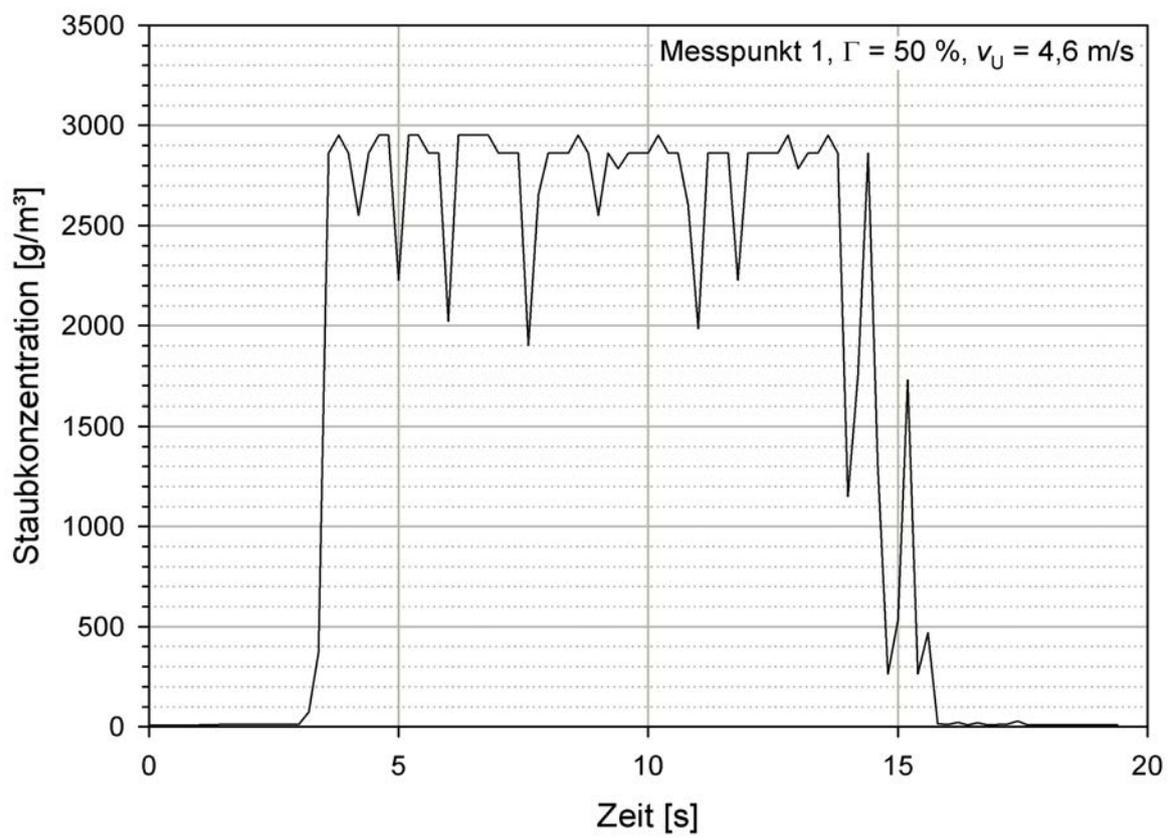
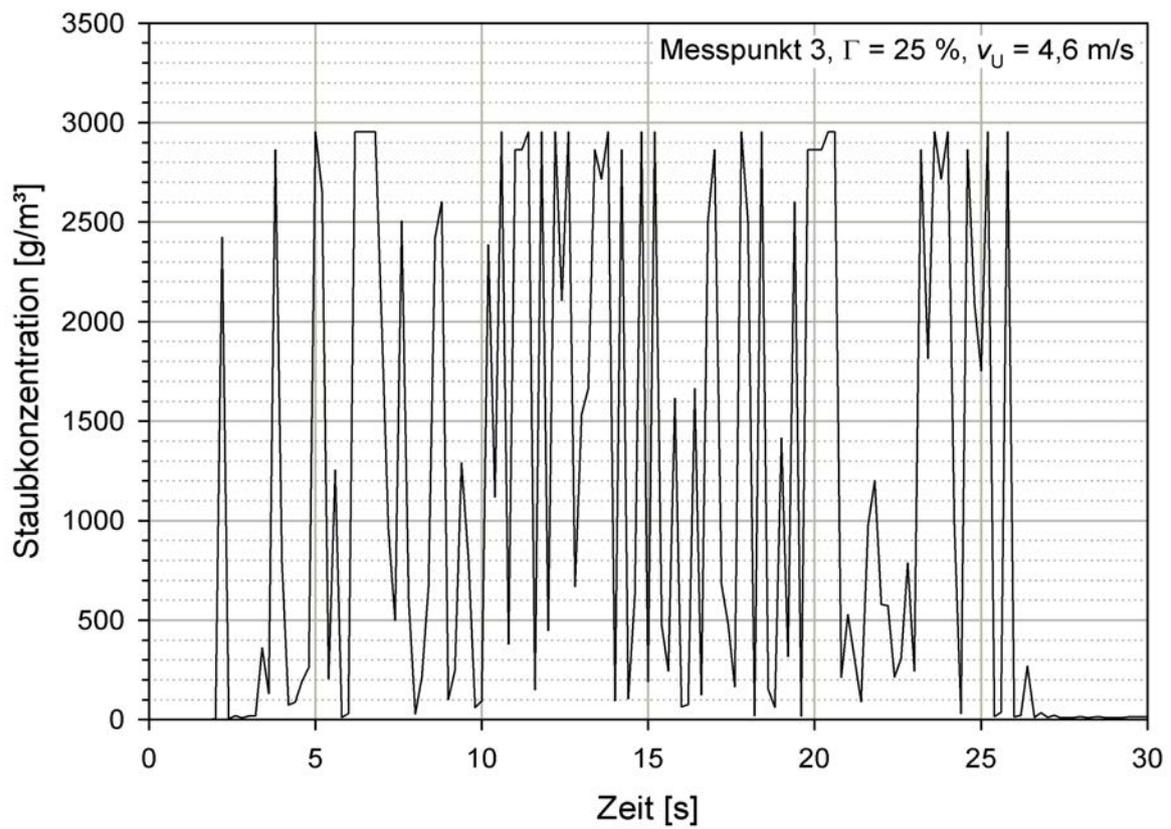


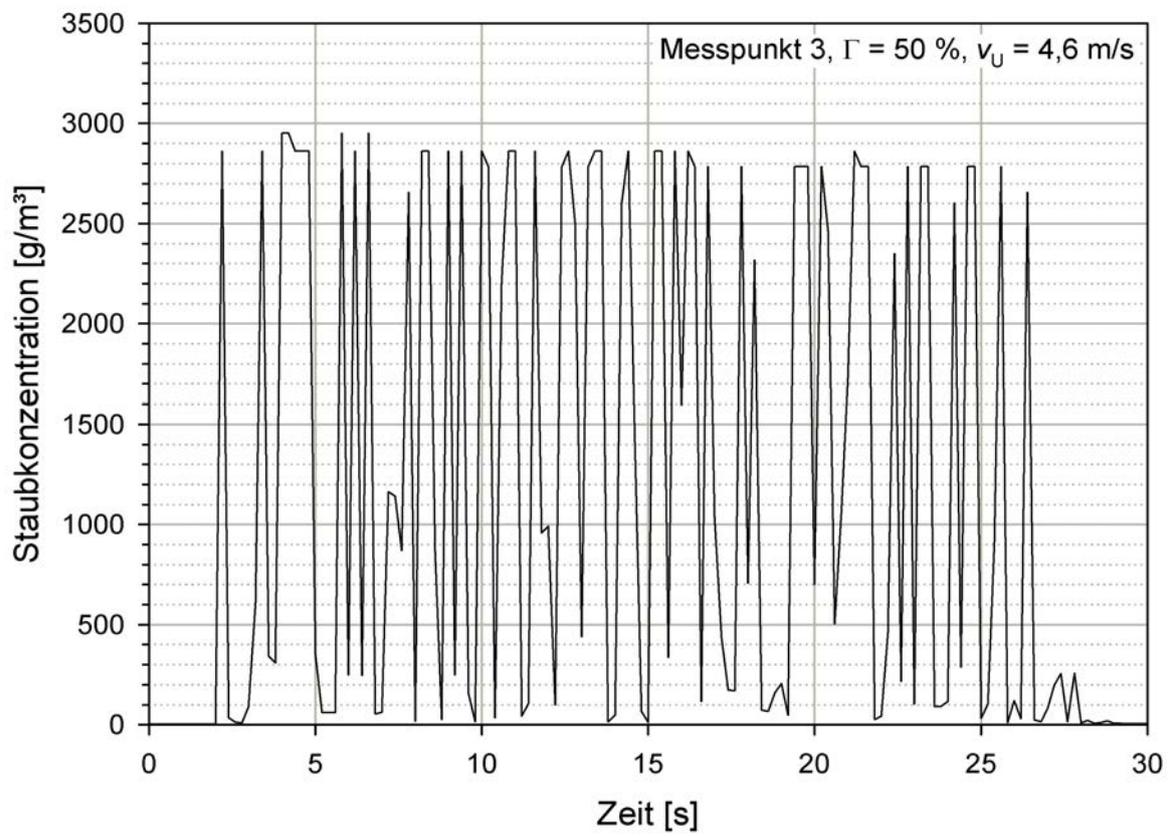
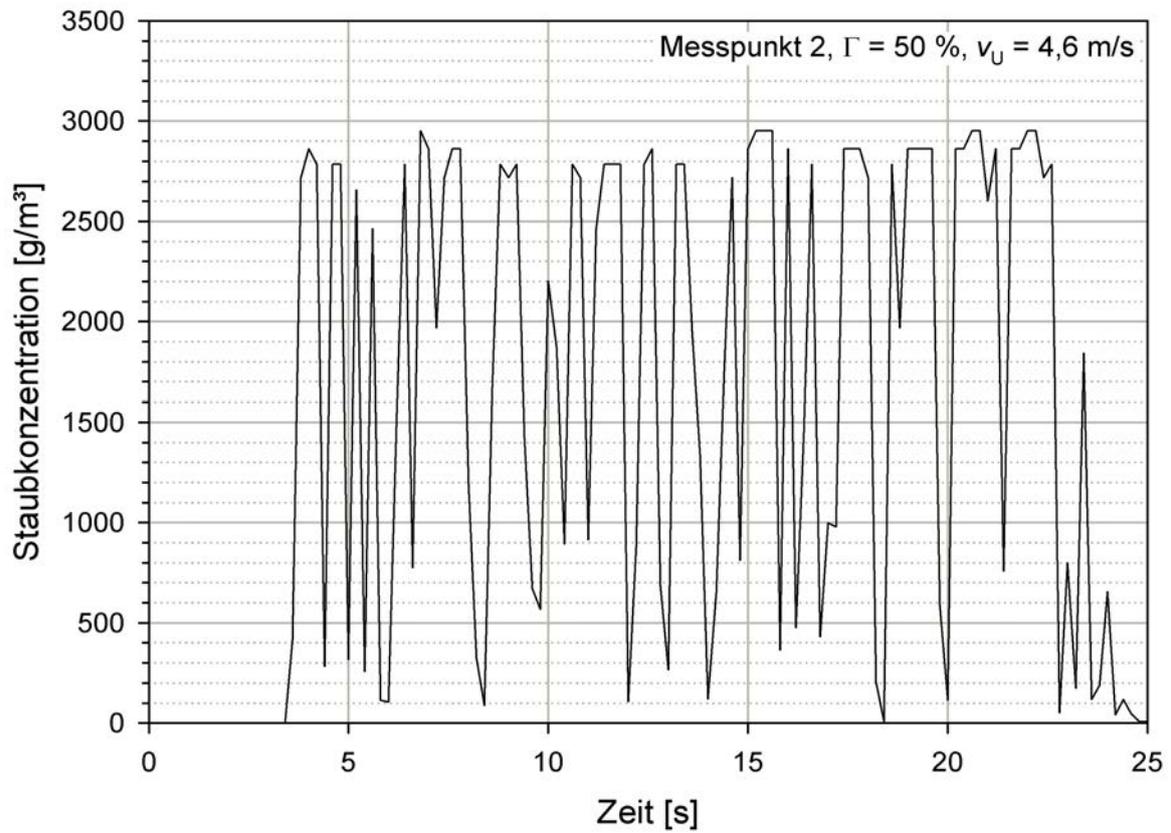


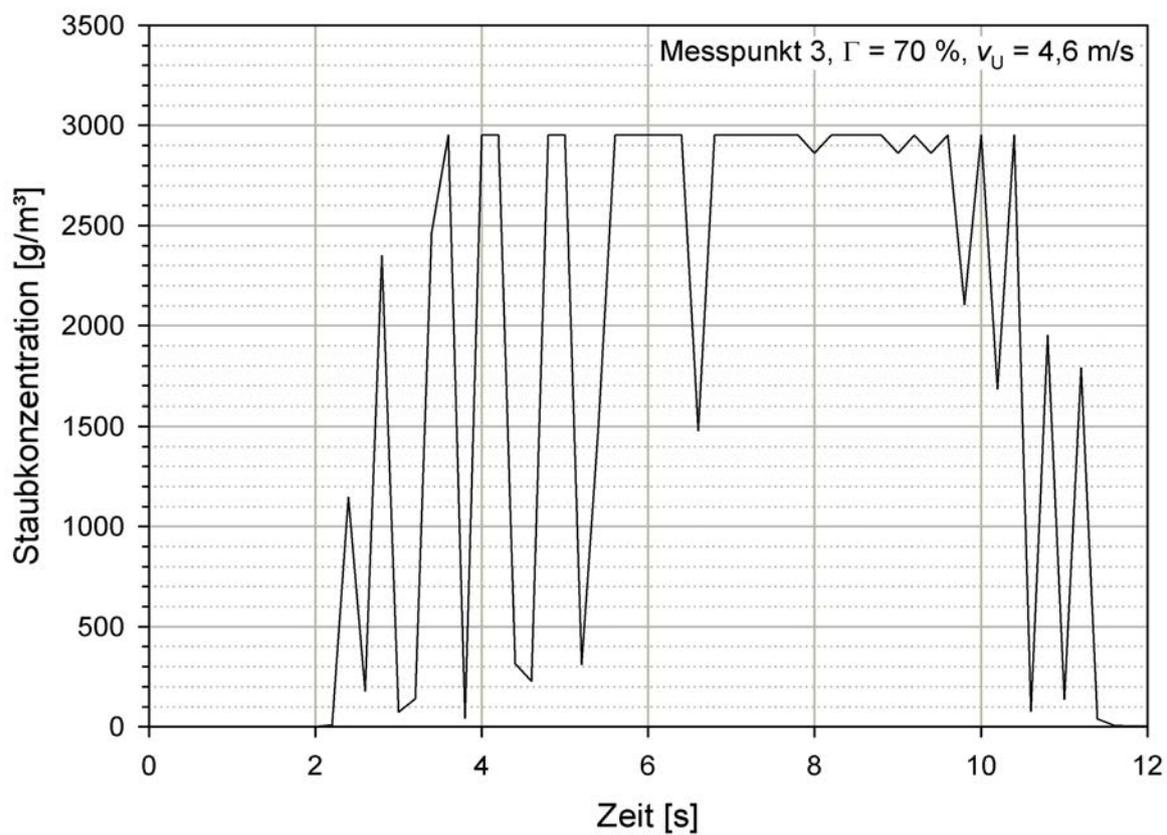
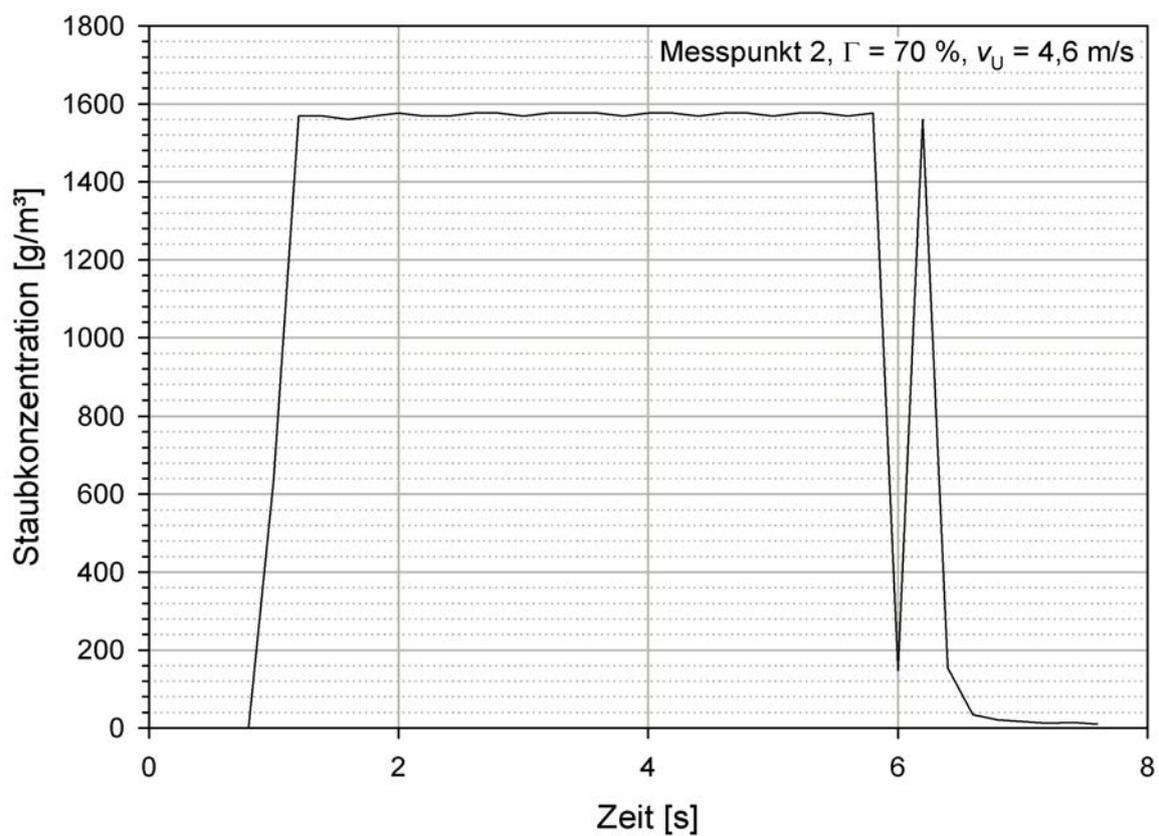




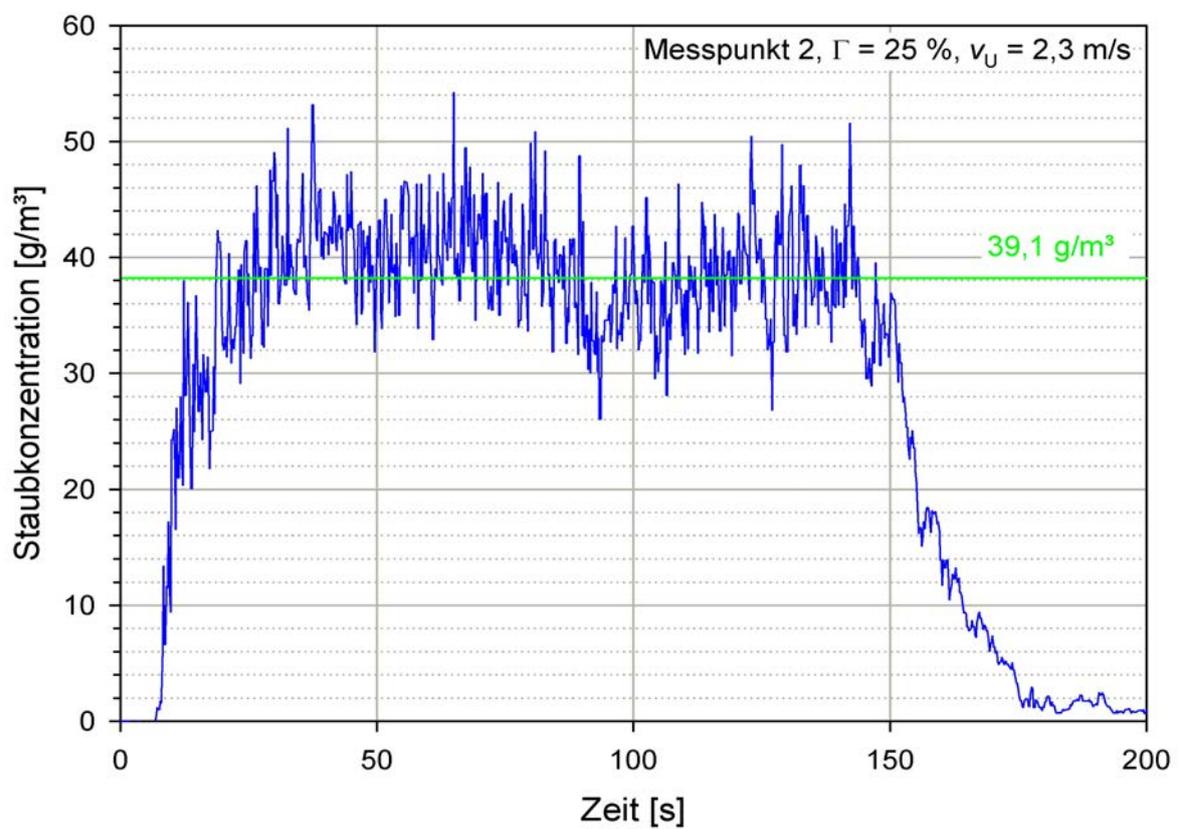
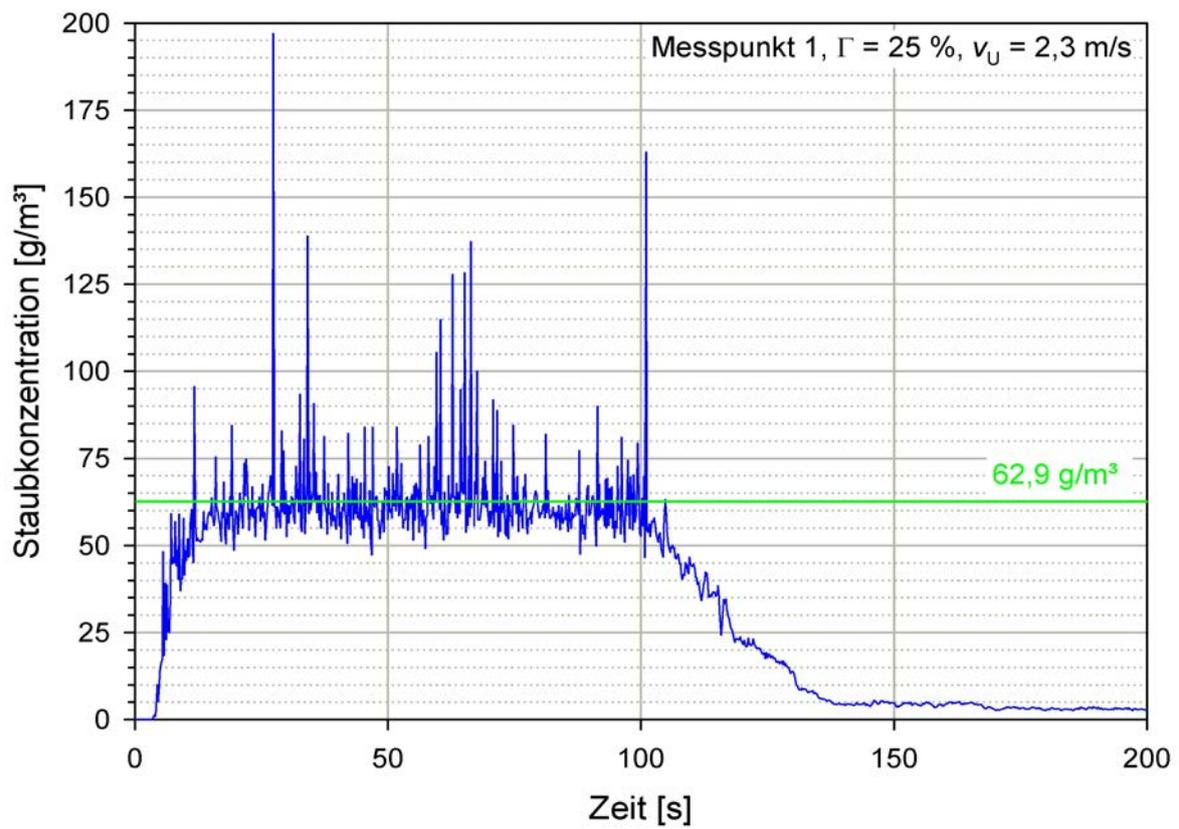


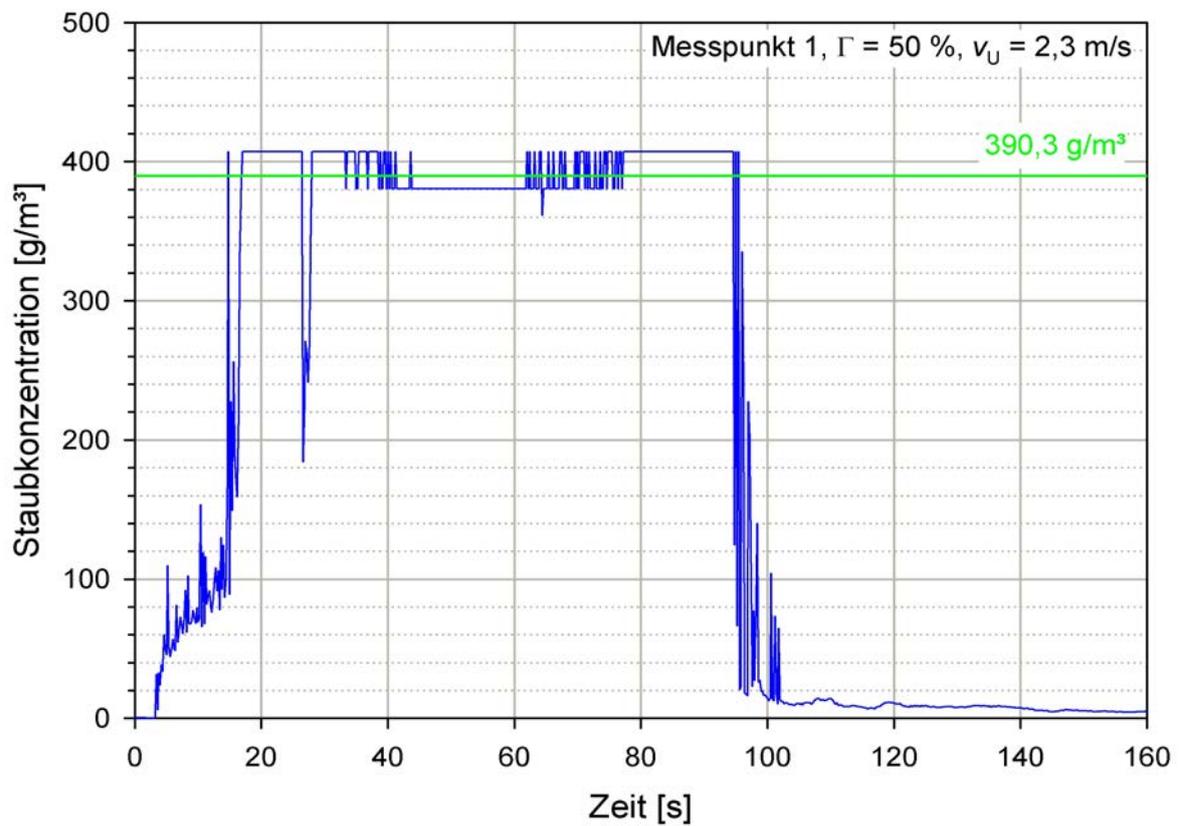
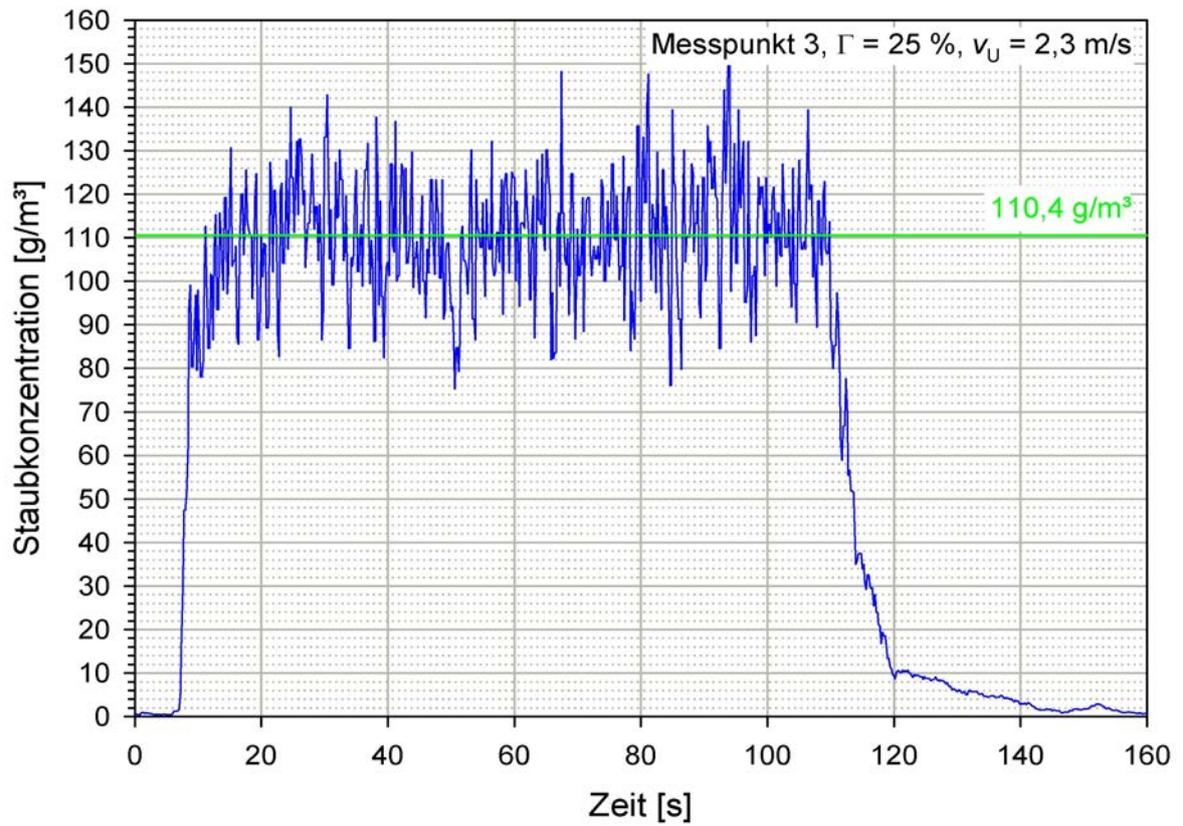


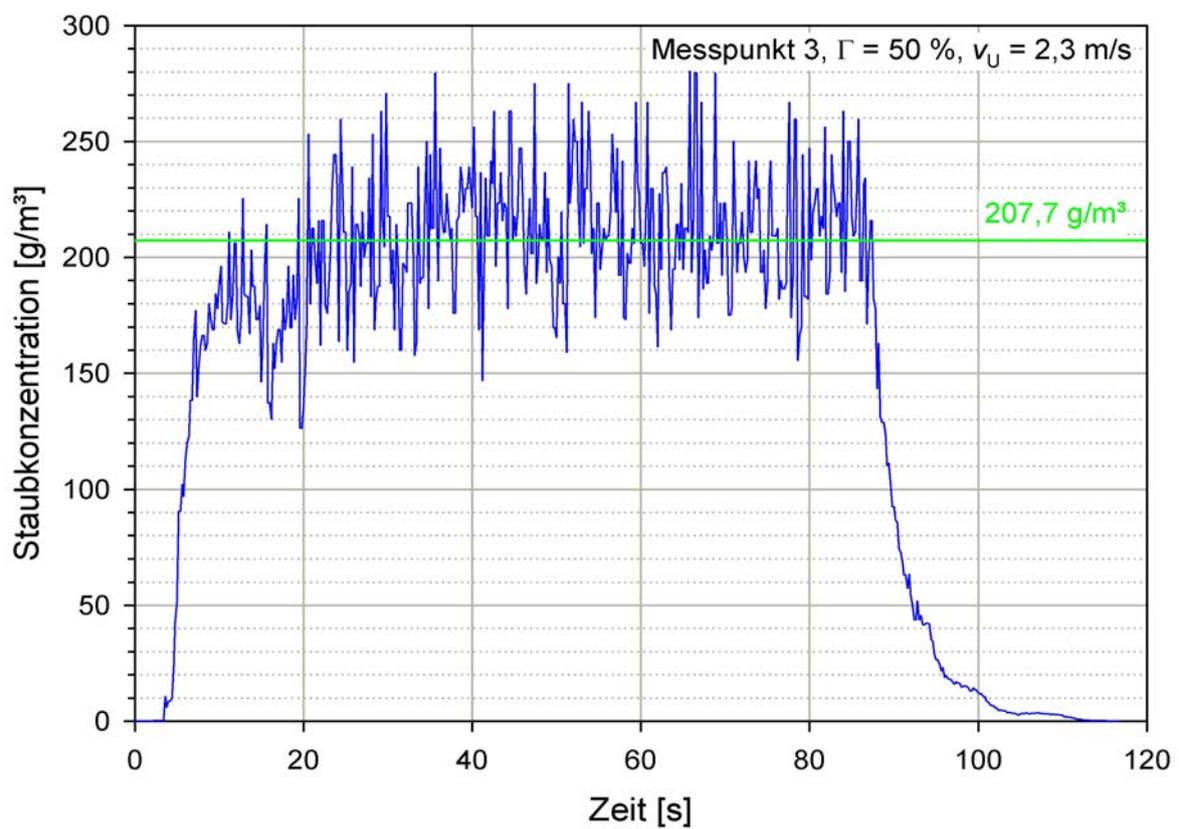
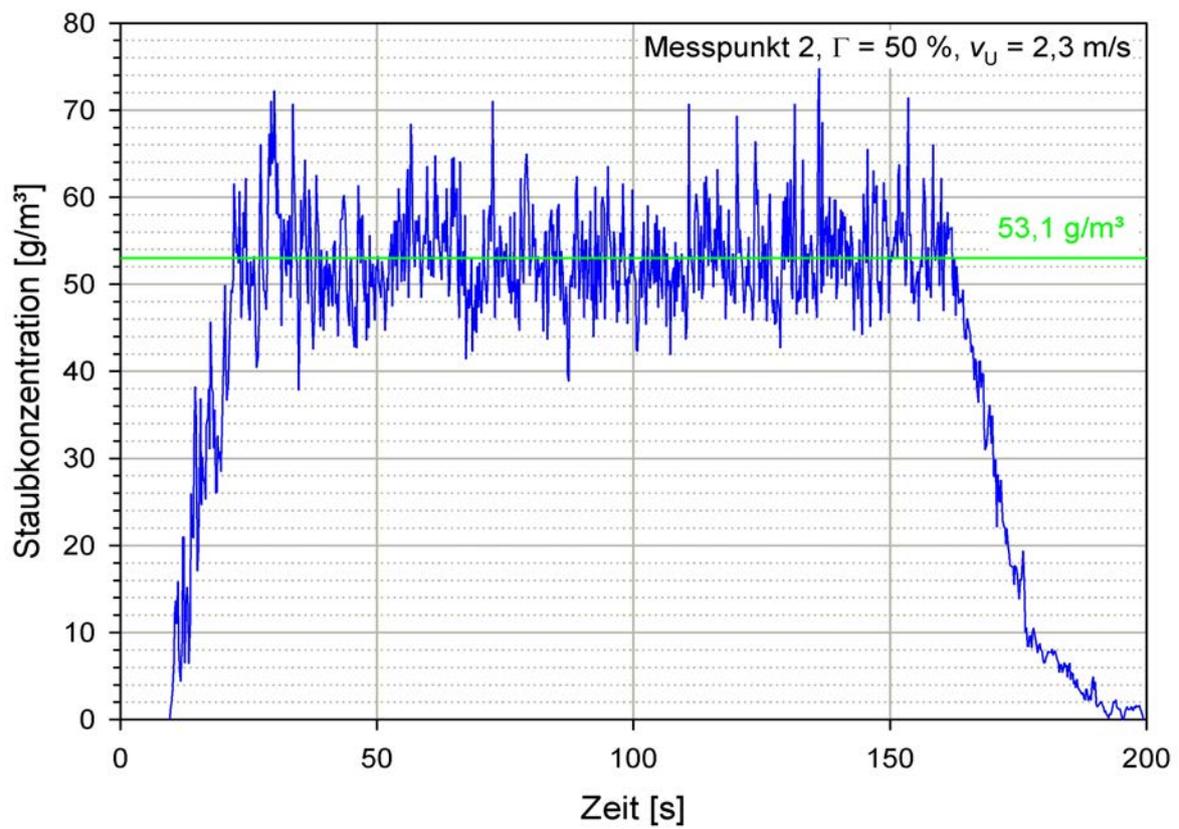


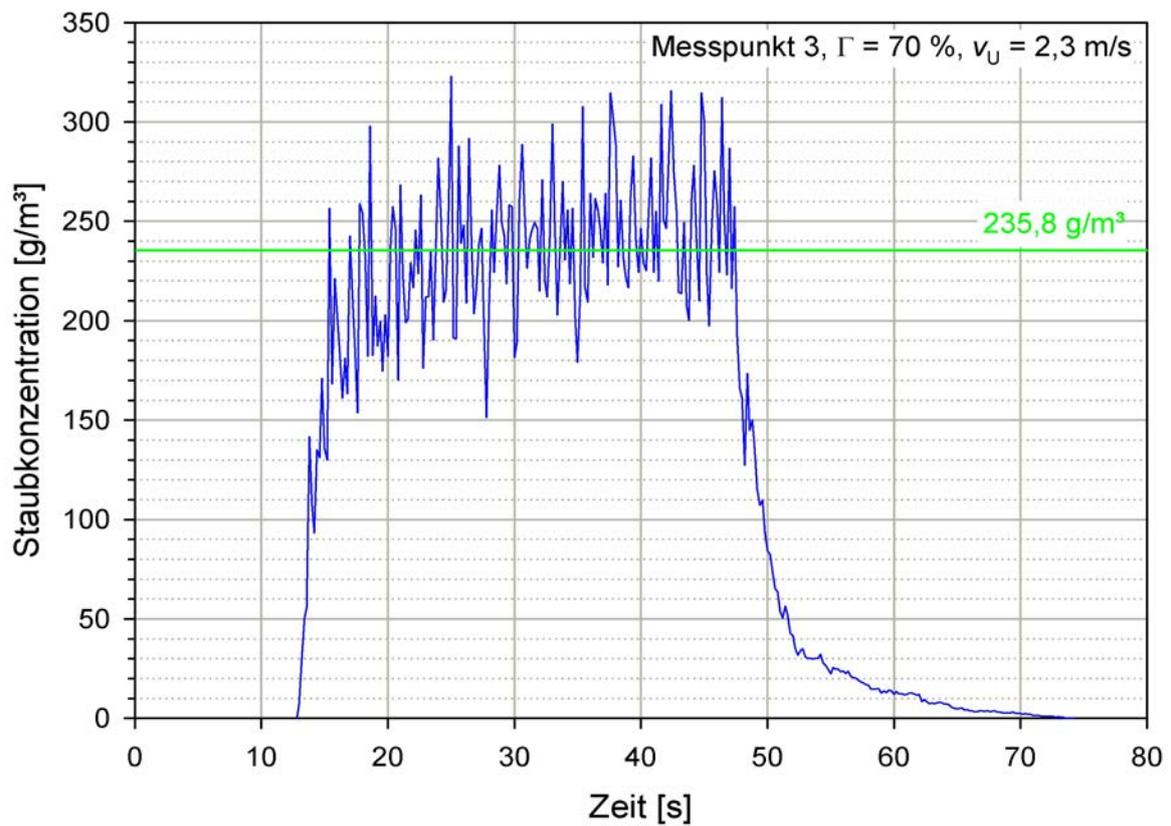
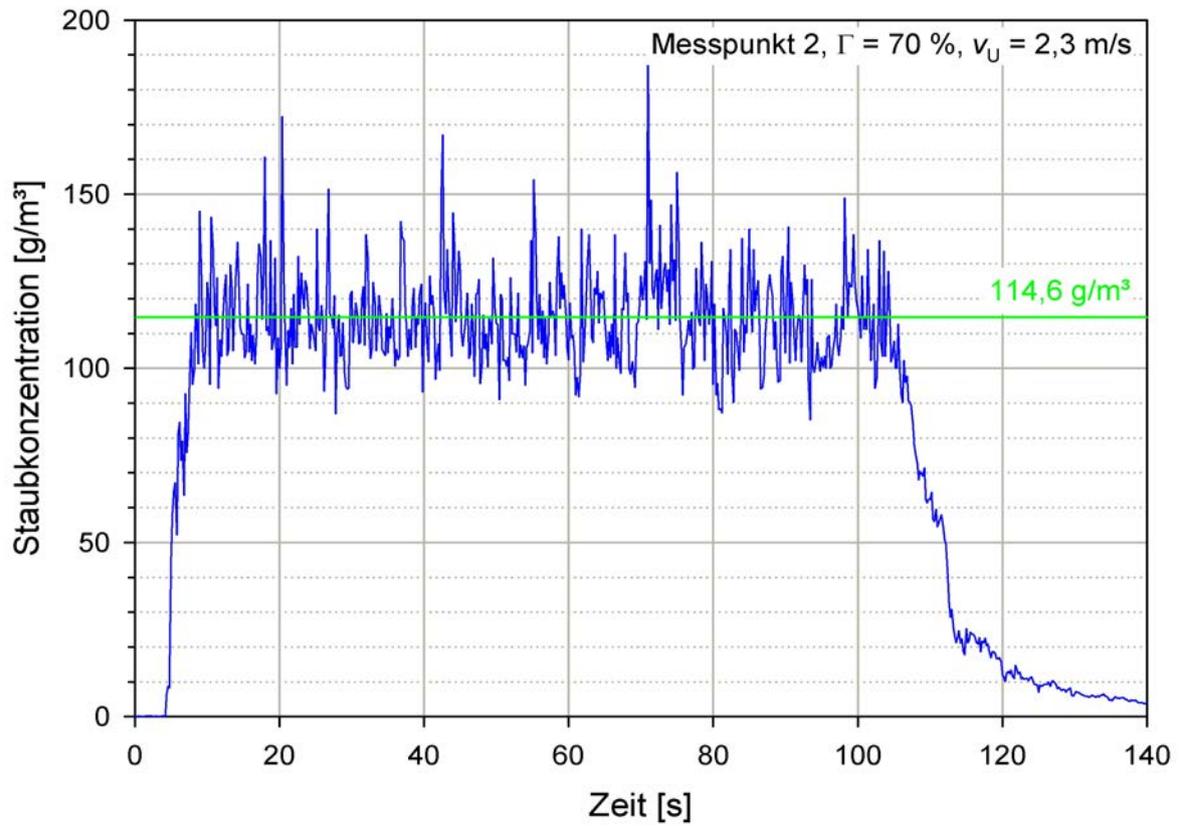


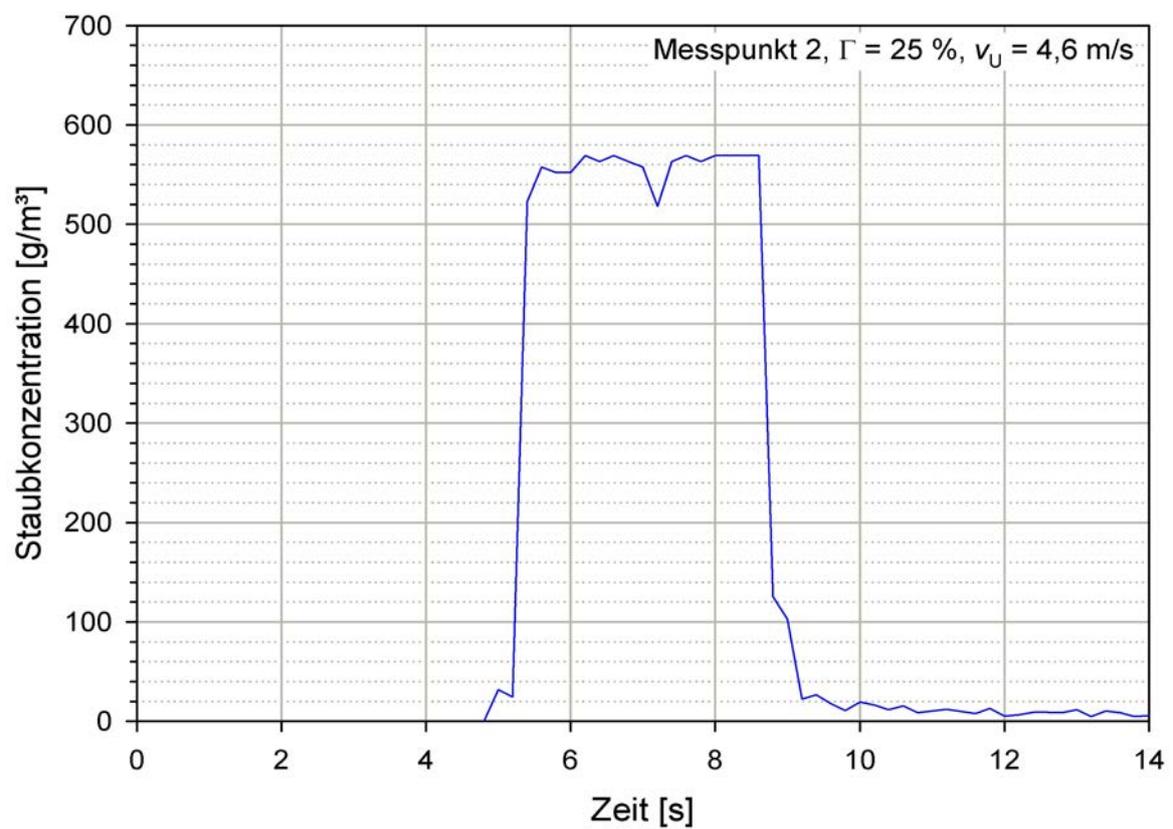
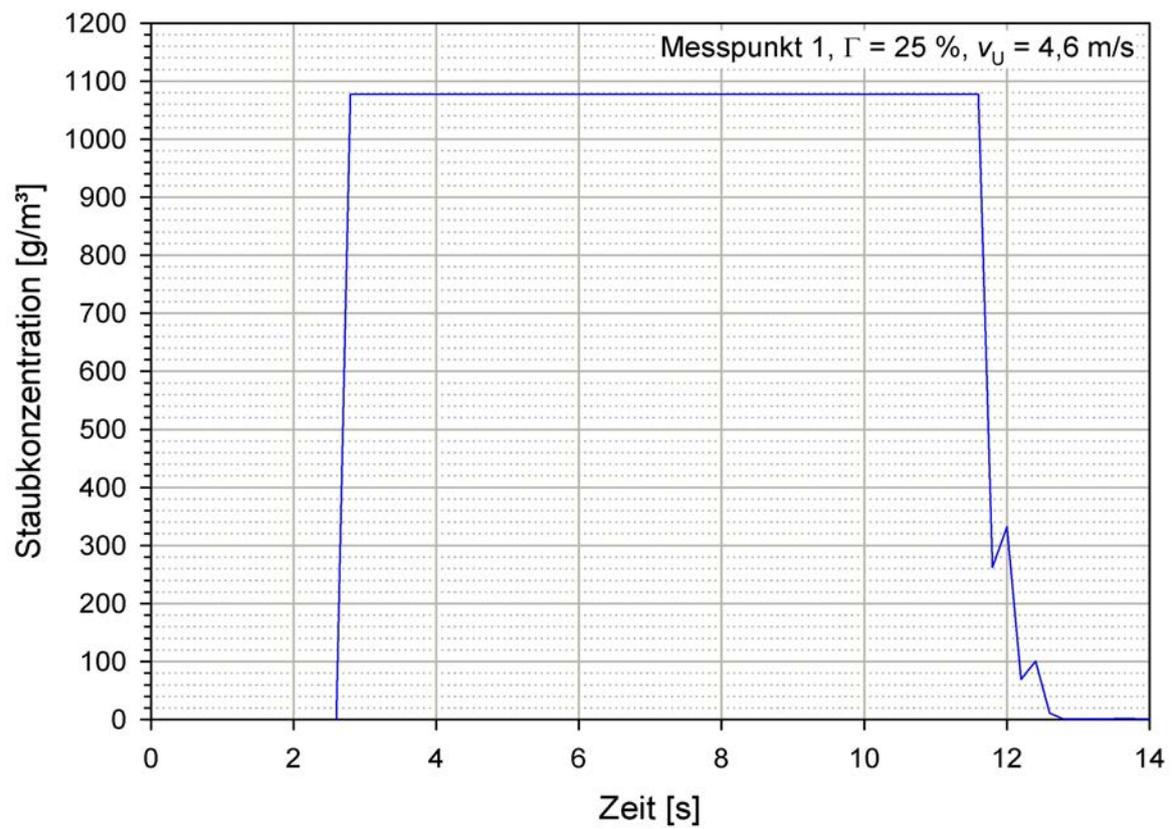
B.2 Maisstärke

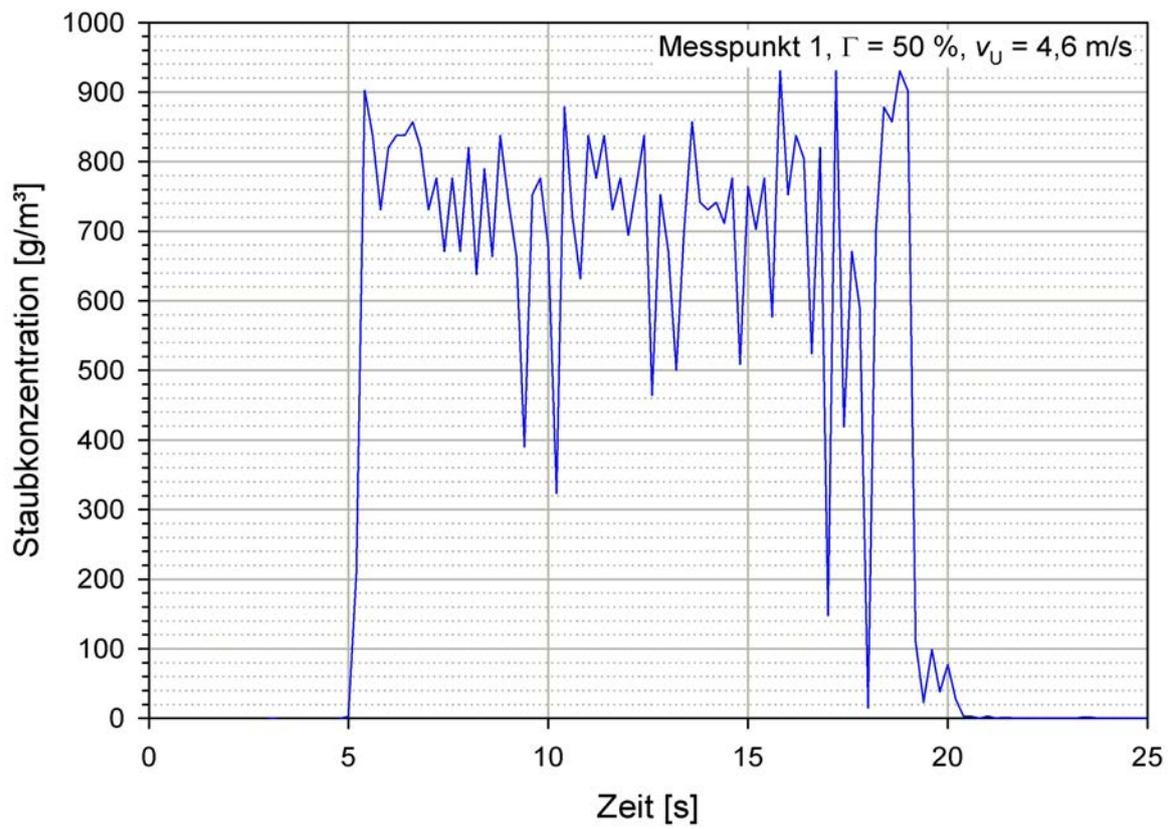
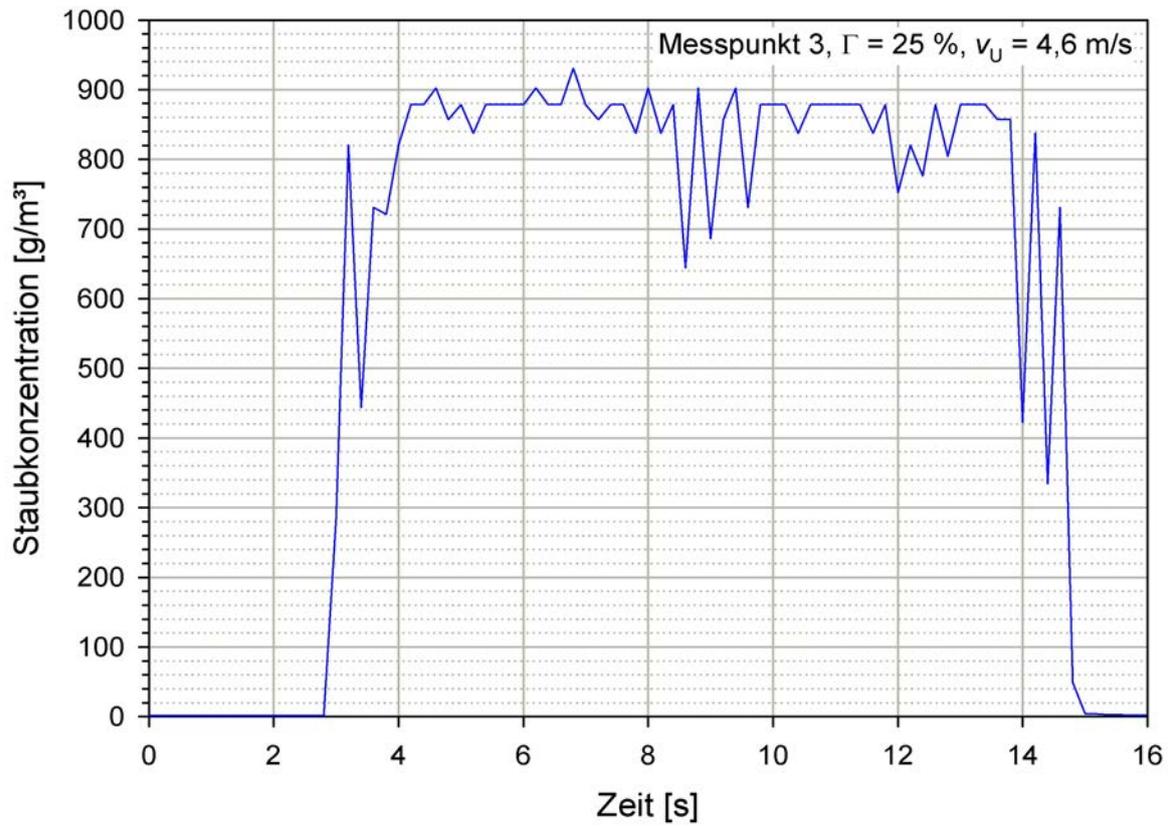


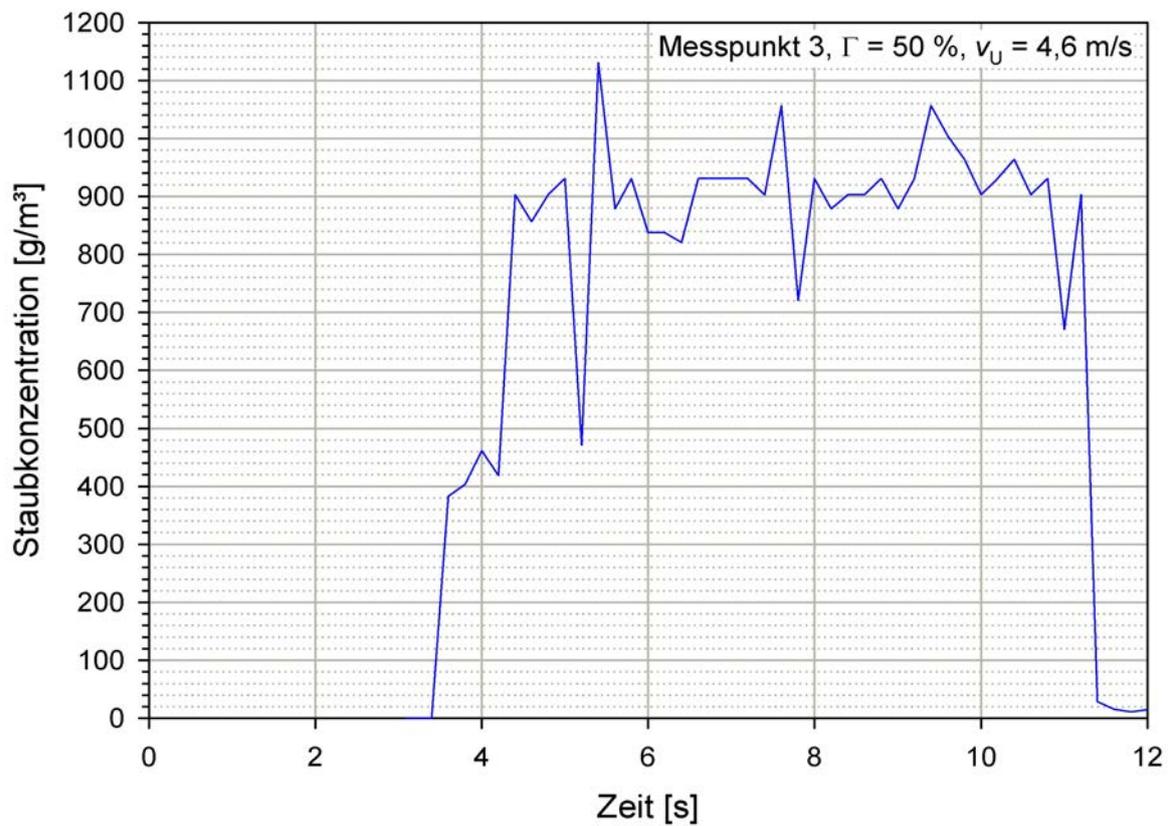
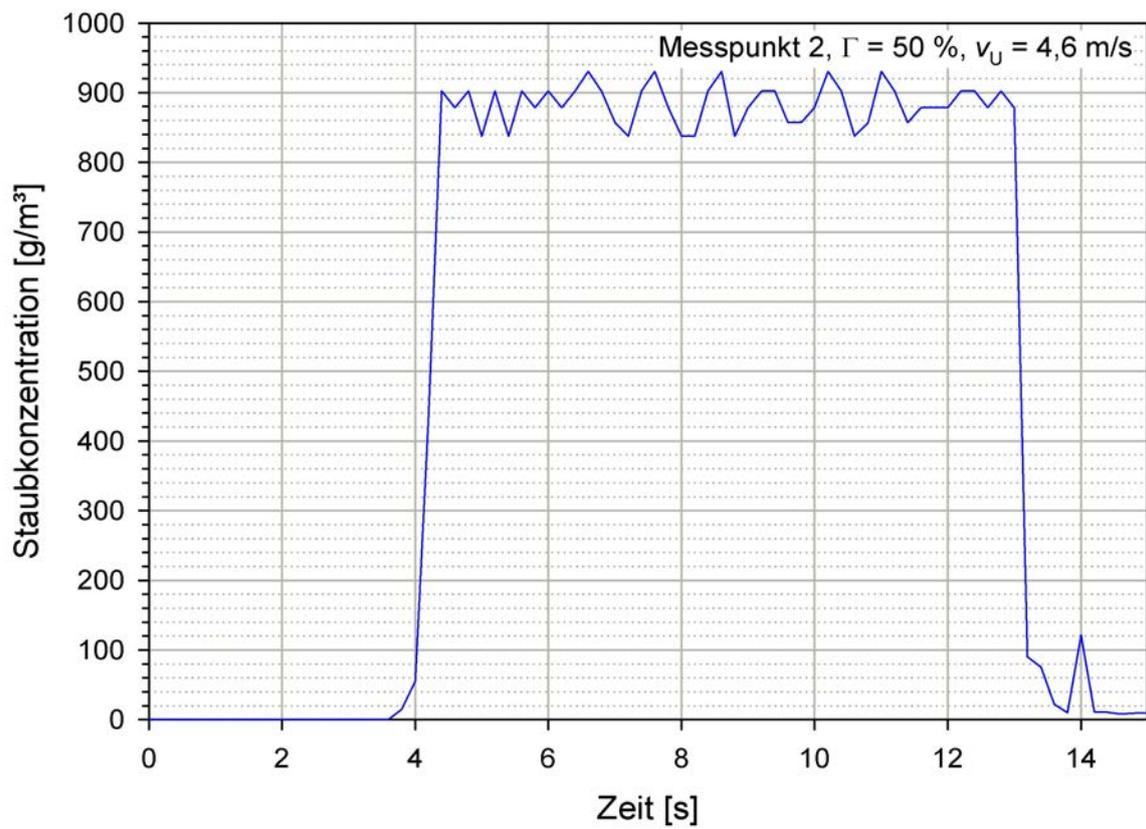


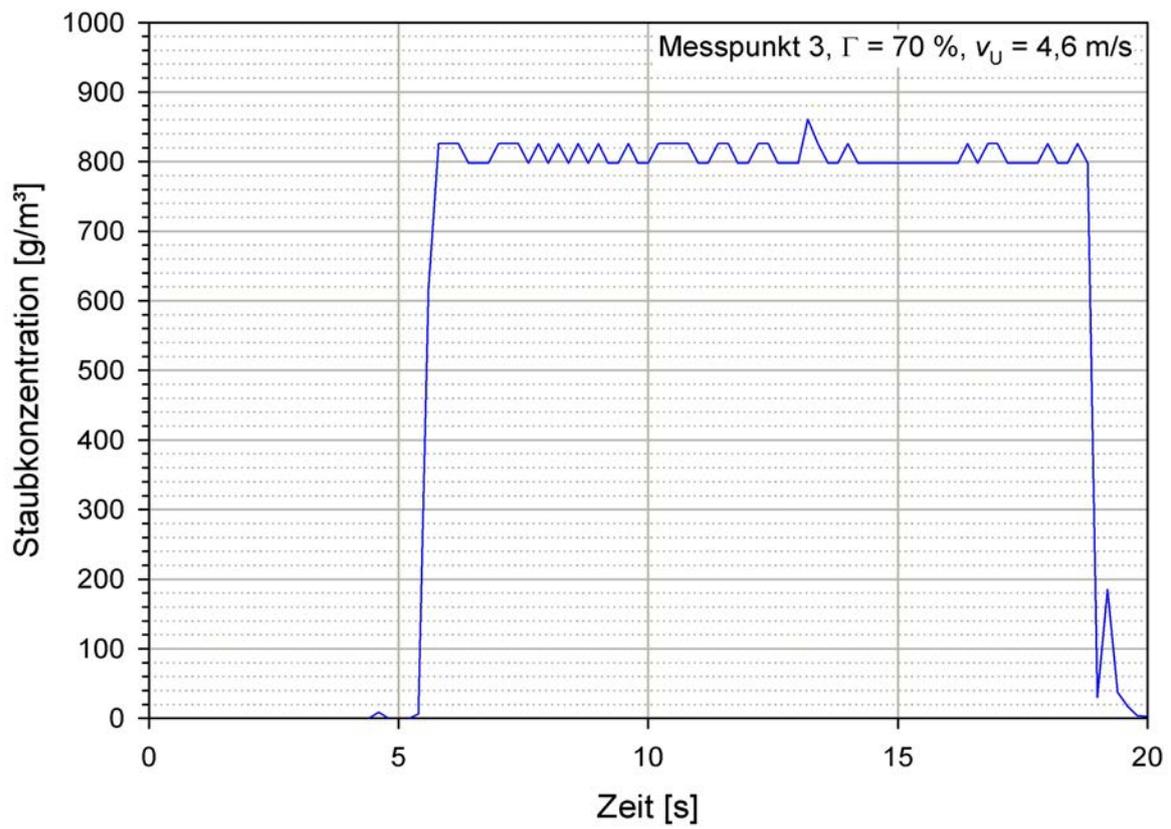
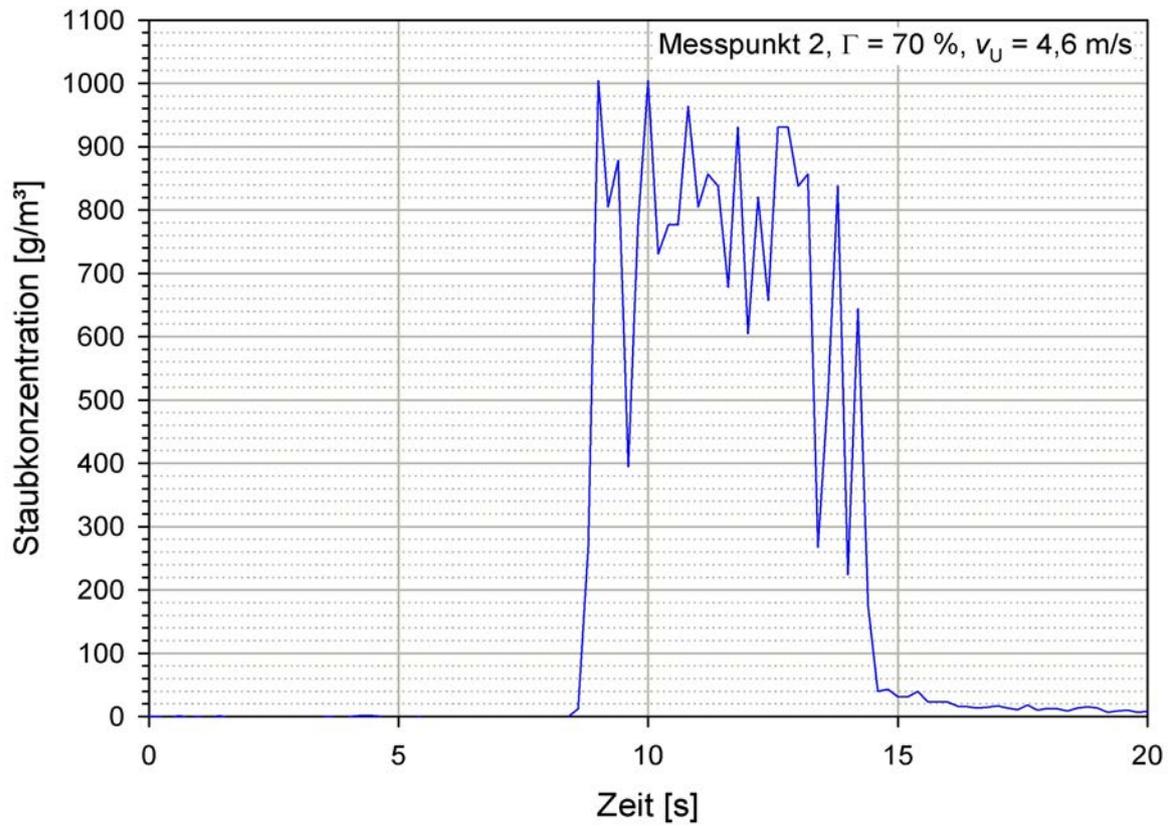












B.3 Braunkohlenstaub

