Technische Hochschule Wildau
Technical University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor

Technische Hochschule Wildau

Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften

Studiengang Maschinenbau (B. Eng.)

Thema (deutsch): Übersicht und Auswahl von Technologien zur Messung von Partikelmassenströmen in solaren Hochtemperaturreceivern

Thema (englisch): Overview and assessment of technologies for measuring particle mass flows in solar high temperature receivers

Autor/in:	Austin Franke
Seminargruppe:	M2/16
Betreuer/in:	Prof. Dr. rer. nat. Michael Herzog
Zweitgutachter/in:	Dr. Matti Lubkoll
Spätestmögliche Abgabe:	27.04.2021
Eingereicht am:	

Verlängerung des Bearbeitungszeitraumes

Auf Grund der Antragstellung des Studierenden wurde der Bearbeitungszeitraum für die Erstellung der Arbeit um 4 Wochen verlängert.

Das Abgabedatum nach Antragstellung ist der 27.04.2021.

Technische Hochschule Wildau
Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften

Bachelorarbeit

Antrag vom: 05.10.2020

Name:	Austin Franke	Matrikel-Nr.:	50034200
Studiengang:	Maschinenbau	Seminargruppe:	M2/16
		Beginn der Arbeit:	08.11.2020
Betreuende/r Hochschuldozent/in:	Prof. Dr. rer. nat. Michael Herzog	Abgabetermin:	30.03.2021
Zweitgutachter/in:	Dr. Matti Lubkoll		
		Fachliche Betreuungsperson des Themenstellers:	Matti Lubkoll
Themensteller (z.B. Betrieb, Institution, Behörde):	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)	Straße:	Pfaffenwaldring 38-40
		PLZ, Ort:	70569, Stuttgart

Kurzthema

Übersicht und Auswahl von Technologien zur Messung von Partikelmassenströmen in solaren Hochtemperaturreceivern

Kurzthema in Englisch

Overview and assessment of technologies for measuring particle mass flows in solar high temperature receivers

Zielstellung

Es soll ein Gerät entwickelt werden, mit dem der Massenstrom von Bauxitpartikeln gemessen werden kann. Dies soll bei der Berechnung des Wirkungsgrades sowie der Entwicklung eines Dosiersystems helfen.

Inhaltliche Anforderungen / Teilaufgaben

- Recherche zum Stand der Technik für die Massenstrommessung von fließfähigen Schüttgütern
- Aus der Recherche sollen potentielle Kandidaten für die konkrete Anwendung ausgewählt werden
- Die potentiellen Kandidaten sollen miteinander verglichen werden um daraus einen oder mehrere Favoriten zu wählen
- Die favorisierten Messverfahren sollen anschließend in einem Experiment untersucht werden. Dies soll dazu dienen die Realisierbarkeit der Messverfahren zu überprüfen
- Die Experimente sollen ausgewertet und mit den Ergebnisen eine Handlungsempfehlung für das weitere Vorgehen formuliert werden

Sprache der Arbeit

Deutsch

Konsultationen erfolgen nach Vereinbarung mit dem betreuenden Hochschullehrer.

Prof. Dr. rer. nat. Michael Herzog	Dr. Matti Lubkoll	Austin Franke	*genehmigt*
(Hochschuldozent/in)	(Zweitgutachter/in)	(Student/in)	(Prüfungsausschuss)

Eingang der Abschlussarbeit _____ Sperrvermerk ☐ Ja ☒ Nein

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Messgerät zu finden, mit dem ein Partikelmassenstrom am Einlass eines CentRec® -Receivers im Bereich von 0,3 kg/s - 3 kg/s bei Temperaturen von bis zu 400 °C gemessen werden kann. Nach einer Recherche zu möglichen Verfahren für die Massenstrommessung von Schüttgütern werden diese hinsichtlich der Anforderungen untersucht. Drei Verfahren: Messschurre, Differentialdosierwaage (DDW) und radiometrische Freifallmessung wurden als geeignet eingestuft. Die DDW wird anschließend in einem Experiment genauer untersucht. Dazu wird die Methode: Äuslitern aus einem Behälter" gewählt. Parallel zur DDW misst eine zweite, genauere Waage denselben Massenstrom, als Referenz.

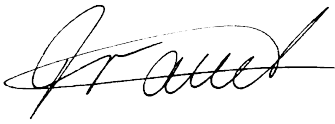
Die Ergebnisse haben gezeigt, dass eine Einzelmessung der DDW, bei einer Messdauer von ca. 60 s - 125 s keine ausreichende Genauigkeit aufweist. Die Abweichungen vom Referenzwert und die Standardunsicherheit sind teilweise höher als 3 %. Die DDW ist daher nicht für den Anforderungsfall geeignet. Der Einfluss der Vibration auf die Messergebnisse ist sehr unterschiedlich ausgefallen, weshalb keine Angaben zu einem bestimmten Zusammenhang gemacht werden können.

Abstract

The objective of this thesis is to find a device to measure a particle-mass-flow at the entrance of a CentRec® -Receiver at temperatures of up to 400 °C and mass-flows of 0,3 kg/s - 3 kg/s kg/s. After a research for possible methods for measuring the mass-flow of bulk solids they will be examined regarding the requirements. Three methods: measuring chute, radiometric free-fall-measuring and differential-dosing-scale (DDS) were classified as suitable. The DDS will be investigated in an experiment more detailed afterwards. Therefore the method: Gauging from a container has been chosen. Parallel a second, more precise scale measures the same mass flow as reference. The results show, that an individual measurement, with a measuring time of 60 s - 125 s, does not have a sufficient accuracy. The deviation from the reference-value and the standard uncertainty is sometimes higher than 3 %. For this reason, the DDS is not suitable for this case. The influence of the vibration on the measurement results has turned out very differently, why no specification on a certain connection can be made.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne jede unerlaubte Hilfe angefertigt und keine anderen als die erlaubten und angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie eigene Textbausteine keiner anderen Person zur Verfügung gestellt habe. Insbesondere habe ich wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommene Inhalte als solche kenntlich gemacht. Ich willige ein, dass meine Arbeit mittels einer Plagiatssoftware überprüft werden kann und dass zu diesem Zweck elektronische Kopien (in anonymisierter Version) gefertigt und gespeichert werden können. Mir ist bekannt, dass es sich bei der Abgabe eines Plagiats um ein schweres akademisches Fehlverhalten handelt und dass Täuschungen nach der für mich gültigen Studien- und Prüfungsordnung geahndet werden.

Unterschrift:  *Datum:* 12.03.2021

Formelzeichen

Formelzeichen

Zeichen	Bedeutung	Einheit
α	Trichterneigungswinkel	[°]
a	Halbweite der Unsicherheit	[%]
d	Blendendurchmesser	[mm]
dA	maximale Auflösung der Anzeige	[g]
d_P	Partikeldurchmesser	[mm]
f	Ausgangsgröße	[-]
G	resultierende Gewichtskraft	[N]
g	Erdbeschleunigung	[m/s^2]
k	Anpassungsfaktor Partikelform	[-]
k_θ	Anpassungsfaktor Trichterneigungswinkel	[-]
m	Masse	[kg]
$\dot{m}$	Massenstrom	[kg/s]
N	resultierende Zentripetalkraft	[N]
n	Anzahl der Messungen	[-]
P	Vertrauensniveau	[%]
$\dot{Q}_{th}$	thermische Eingangsleistung	[kW]
R	resultierende Reibungskraft	[N]
ρ_b	Schüttgutdichte	[kg/l]
s	experimentelle Standardabweichung	[-]
T	Temperatur	[°C]
t	Messdauer	[s]
tF	t-Faktor	[-]
u	Unsicherheit / Standardunsicherheit	[-]
u_c^2	kombinierte Varianz	[-]
u_c	kombinierte Unsicherheit	[-]
$u_c(\dot{m})$	kombinierte Unsicherheit der Massenstrommessung	$[kg/s]$
u_m	Unsicherheit der Gewichtsmessung	[kg]
u_t	Unsicherheit der Zeitmessung	[s]
$u(x_i)$	Unsicherheit der Eingangsgröße	[-]
$\dot{V}$	Volumenstrom	[m^3/s]
v	Freiheitsgrad	[-]
X	Angezeigter Messwert	$[kg]$
x_i	Eingangsgröße	[-]

Indizes und Abkürzungen

Zeichen	Bedeutung
0,1,2...	Aufzählung, chronologisch
allg.	allgemein
BHW	Behälterwaage
BG	Beutelgruppe
ca.	circa
CPU	central processing unit
CSP	Concentrating Solar Power
CSV	comma-seperated values
DDW	Differentialdosierwaage
DLR	Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt
FB	Förderband
GIW	Gain-In-Weight
GUM	Guide to the expression of uncertainty in measurement
i	Laufindex
korr	korrigiert
LIW	Loss-In-Weight
max	maximal
mess	gemessen
NREL	National Renewable Energy Labratory
Nr.	Nummer
OGW	oberer Grenzwert
PFW	Plattformwaage
RM	Rohrmaterial
UGW	unterer Grenzwert
VB	Vorratsbehälter
Wdh.	Wiederholungen

Abbildungsverzeichnis

1.1 CO2 Emissionen weltweit . . . 1
1.2 Installierte Kapazität CSP-Anlagen . . . 2
1.3 Aufbau Solarturmkraftwerk . . . 3
1.4 Solarthermisches Versuchskraftwerk Jülich . . . 4
1.5 Kollektorsysteme . . . 5
1.6 CSP Unterteilung nach Technologie . . . 5
1.7 Keramische Bauxit-Partikel . . . 7
1.8 Skizze eines Fallfil- und eines CentRec® -Receivers . . . 8

2.1 Seitenansicht CentRec®-Receiver . . . 12
2.2 Skizze einer Behälterdurchlaufwaage . . . 16
2.3 Skizze einer Differentialdosierwaage . . . 18
2.4 Darstellungen von zwei Prallplattenwaagen . . . 19
2.5 Skizze vom Aufbau einer Messschurre und Abbildung mit den wirkenden Kräften . . . 21
2.6 Schnittbild einer Rotorwaage . . . 22
2.7 Darstellung einer alten und einer modernen Bandwaage . . . 23
2.8 Skizzen von radiometrischen Bandwaagen . . . 25
2.9 Radiometrische Messung in einer Rohrleitung . . . 26
2.10 Darstellung einer optischen Bandwaage . . . 27
2.11 Zwei Skizzen von Mikrowellensensoren mit und ohne Materialstrom 28
2.12 Skizze Kapazitiver Sensor . . . 29

3.1 Aufbau des CentRec300-Teststands . . . 36
3.2 Wägezellen der Differentialdosierwaage . . . 36
3.3 Bilder vom CentRec300-Teststand . . . 37
3.4 Skizze des Trichterneigungswinkels und Darstellung der Blenden . . . 40
3.5 Messaufbau der DDW am CentRec300 . . . 40
3.6 Ishikawa-Diagramm für die Massenstrommessung . . . 41
3.7 Darstellung der Plattformwaage . . . 49

4.1 Aufbau der Ausliterversuche am Teststand . . . 54
4.2 Komponenten des experimentellen Aufbaus . . . 55
4.3 Darstellung des Leakings im Vorratsbehälter . . . 57

4.4 Diagramm: Leaking-Versuchen . . . 57
4.5 Darstellung der Gewichte für die Kalibrierversuche . . . 59
4.6 Diagramm: Messdaten der Kalibrierung . . . 61
4.7 Diagramm: Auswertung der Kalibrierung . . . 61

5.1 Diagramm: Erste Messung ohne Vibration mit 60 mm Blende . . . 65
5.2 Diagramm: Ergebnisse der Massenstrommessungen . . . 71
5.3 Diagramme: Vergleich der Ergebnisse der DDW mit den Ergebnissen der Referenzmessung, 30 mm und 46 mm BlendeBlende . . . 73
5.4 Diagramm: Vergleich der Ergebnisse der DDW mit den Ergebnissen der Referenzmessung, 60 mm Blende . . . 74
5.5 Diagramm: Abweichungen der Mittelwerte der Messergebnisse der DDW von denen der Referenzmessung . . . 75
5.6 Diagramm: Standardunsicherheit und berechnete Unsicherheit nach Blendendurchmesser . . . 77
5.7 Diagramme: Einfluss der Vibration auf das Ergebnis . . . 80
5.8 Diagramm theoretische Unsicherheit DDW der drei Massenströme nach Masse . . . 82

A.1 Technische Daten Bauxit-Partikel . . . 94
A.2 Technische Daten Wägezelle DDW . . . 95
A.3 Technische Daten Messverstärkers DDW . . . 96
A.4 Technische Daten Datenlogger DDW . . . 97
A.5 Technische Daten Datenlogger DDW . . . 98
A.6 Technische Daten Wägezelle PFW . . . 99
A.7 Technische Daten Gewichtsmessumformer PFW . . . 100
A.8 t-Verteilung . . . 101

Tabellenverzeichnis

2.1 Lastenheft mit den Anforderungen an ein Massenstrommessgerät . . 12
2.2 Technische Daten Behälterdurchlaufwaage 16
2.3 Technische Daten Behälter- und Differentialdosierwaage 18
2.4 Technische Daten Prallplattenwaagen 20
2.5 Technische Daten Messschurren 21
2.6 Technische Daten Rotorwaagen 22
2.7 Technische Daten Bandwaagen 24
2.8 Technische Daten radiometrischen Bandwaagen 25
2.9 Technische Daten radiometrische Freifallmessung 26
2.10 Technische Daten optischen Bandwaagen 28
2.11 Technische Daten Mikrowellensensoren 29
2.12 Technische Daten kapazitiver Sensoren 30
2.13 Vergleich von Massenstrommessverfahren 31

3.1 Bedeutung und Werte der Variablen aus Gleichung (3.2) 39
3.2 Berechnete und ausgewählte Blendendurchmesser für die gewünschten Massenströme 39
3.3 Komponenten DDW 41
3.4 Komponenten der Unsicherheit der Gewichtsmessung der DDW . . 44
3.5 Komponenten der Unsicherheit der Zeitmessung der DDW 45
3.6 Gesamtunsicherheiten für die Massenstrommessung mit der DDW . 48
3.7 Komponenten der Unsicherheit der Gewichtsmessung der PFW . . . 50
3.8 Gesamtunsicherheiten für die Massenstrommessung mit PFW . . . 53

4.1 Ergebnisse der Leaking-Versuche 58
4.2 Zusammensetzung der Partikelmenge im Vorratsbehälter 58
4.3 Referenzgewichte und Stützpunkte Kalibrierung 60
4.4 Ergebnisse der Kalibrierung 62
4.5 Ablaufplan für alle Versuche und deren Kennwerten 63

5.1 Start- und Endzeitpunkt der ausgewählten Messung 66
5.2 Berechnete Massenströme der ausgewählten Versuchsreihe 67
5.3 Mittelwert Dauer und Masse auslitern 67
5.4 Ergebnisse DDW und Standardabweichung 68

5.5 Bedeutung der Variablen aus Gleichung 5.2, 5.3 und den Erläuterungen zur Standardunsicherheit 69
5.6 Ergebnisse DDW und Standardunsicherheit 70
5.7 Ergebnisse PFW und Standardabweichung 70
5.8 Ergebnisse PFW und Standardunsicherheit 71
5.9 Mittelwerte der Messwerte beider Waagen sowie der OGW und UGW 74
5.10 Abweichung der Messwerte der DDW, von den Mittelwerten der Messwerte je Blende der PFW. 75
5.11 Mittelwerte der Standardunsicherheit nach Blendendurchmesser . . 76
5.12 Neu Berechnete Unsicherheiten 78

A.1 Anforderungen an ein Massenstrommessgerät von drei weiteren Anwendungsfällen 93

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung / Abstract i

Eidesstattliche Erklärung ii

Formelzeichen iii

Abbildungsverzeichnis v

Tabellenverzeichnis vii

Inhaltsverzeichnis viii

1 Einleitung 1

1.1 Solarthermische Kraftwerke . . . 2
1.2 Partikel-Receiver . . . 6
1.3 Problembeschreibung und Zielsetzung . . . 9
1.4 Aufbau der Arbeit . . . 10

2 Technologie-Recherche 11

2.1 Anforderungen . . . 11
2.2 Einteilung der Messverfahren . . . 13
2.3 Gravimetrische Messverfahren . . . 15
2.3.1 Messung des Gewichts durch Verwiegung in einem Behälter . 15
2.3.2 Messung einer zur Masse proportionalen Kraft . . . 18
2.3.3 Bandwaage . . . 23
2.3.4 Radiometrische Messverfahren . . . 24
2.4 Volumetrische Messverfahren . . . 27
2.5 Variantenvergleich . . . 30
2.6 Fazit der Technologie-Recherche . . . 34

3 Vorbereitungen für die experimentellen Untersuchungen 35

3.1 Aufbau des Teststands . . . 35
3.2 Messmethode . . . 38
3.3 Analyse des Messaufbaus . . . 40
3.4 Unsicherheitsanalyse Differentialdosierwaage . . . 42
3.4.1 Unsicherheit der Gewichtsmessung . . . 43

3.4.2 Unsicherheit der Zeitmessung . . . 45
3.4.3 Gesamtunsicherheit . . . 46
3.5 Referenzmessung . . . 48
3.6 Unsicherheitsanalyse Plattformwaage . . . 49
3.6.1 Unsicherheit der Gewichtsmessung . . . 50
3.6.2 Unsicherheit der Zeitmessung . . . 51
3.6.3 Gesamtunsicherheit . . . 51
3.7 Anfahren und Anhalten des Massenstroms . . . 53

4 Durchführung des Experimentes 54
4.1 Aufbau des Experimentes und Prozessbeschreibung . . . 54
4.2 Skalierung des Messverstärkers der Differentialdosierwaage . . . 56
4.3 Kalibrierung . . . 59
4.4 Ablaufplan . . . 62

5 Auswertung 65
5.1 Messergebnisse . . . 65
5.2 Analyse . . . 71
5.2.1 Vergleich mit der Referenzmessung . . . 72
5.2.2 Standardunsicherheit . . . 76
5.2.3 Einfluss der Vibration . . . 79
5.3 Fazit . . . 80

6 Zusammenfassung und Ausblick 84

Literaturverzeichnis 86

Anhang 92
A.1 Erweiterte Anforderungen an ein Massenstrommessgerät . . . 92
A.2 Technische Daten der Bauxit-Partikel . . . 94
A.3 Technische Daten für die Komponenten der Differentialdosierwaage 95
A.3.1 Technische Daten Wägezelle . . . 95
A.3.2 Technische Daten Messverstärker . . . 96
A.3.3 Technische Daten Datenlogger . . . 97
A.4 Technische Daten für die Komponenten der Plattformwaage . . . 99
A.4.1 Technische Daten Wägezelle . . . 99
A.4.2 Technische Daten Gewichtsmessumformer . . . 100
A.5 t-Verteilung . . . 101

1 Einleitung

Der Klimawandel und die zunehmende globale Erwärmung sind zwei der großen Herausforderungen der heutigen Zeit. 1997 wurden auf der dritten Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention in Kyoto (COP 3) erstmals verbindliche Ziele und Mechanismen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen festgelegt [1].

Nichtsdestotrotz stiegen die jährlichen CO_2-Emissionen weiter stark an, wie Abb. 1.1 zeigt.

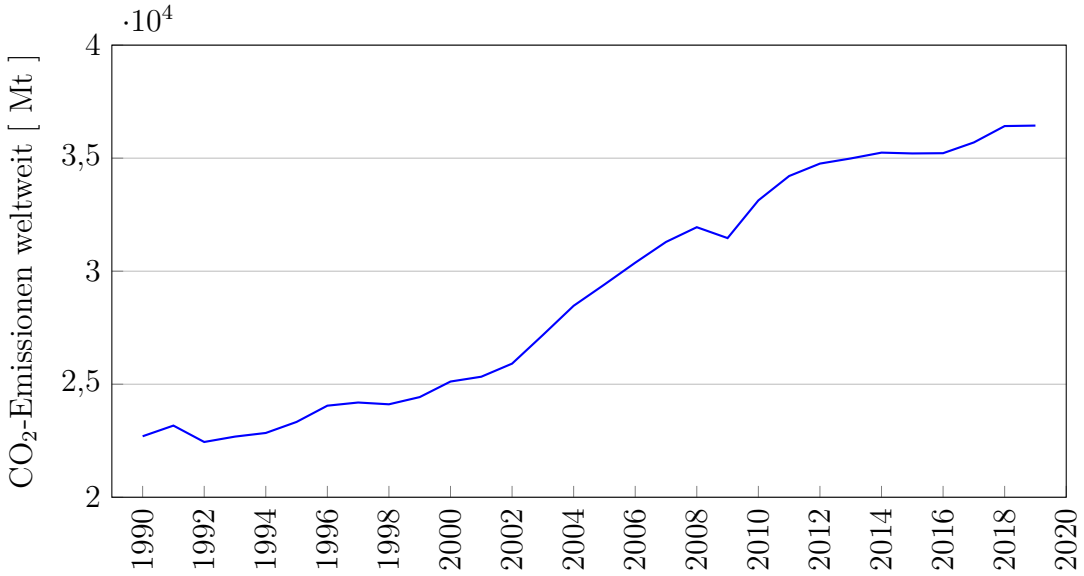


Abb. 1.1 – Jährliche CO_2-Emissionen weltweit im Zeitraum von 1990 bis 2019 (Stand 2020) [2]. Die Emissionen beziehen sich auf die Stromerzeugung mit Gas, Kohle, Öl, die Abfackelung mittels Gasfackeln sowie die Zement-Produktion. Die Daten für 2018 und 2019 sind vorläufig.

Auf der Pariser Klima-Konferenz im Jahr 2015 wurde ein Nachfolgevertrag vereinbart, in dem weitere Maßnahmen beschlossen wurden, um die Auswirkungen des Klimawandels zu begrenzen. Darunter auch das "1,5 °C Ziel". Dies besagt, dass die Erderwärmung nach Möglichkeit 1,5 °C nicht überschreiten soll (im Vergleich zm vorindustriellen Niveau) [3].

Die Transformation hin zu nachhaltigen und emissionsarmen Formen der Energiegewinnung spielt bei der Erreichung dieser Ziele eine wichtige Rolle. Ein vielversprechender Beitrag dafür ist die Nutzung von Solar-Energie in Form von solarthermischen-Anlagen.

Häufig wird mit Solarthermie die Erzeugung von Warmwasser mit Temperaturen von weniger als 100 °C verbunden. Eine andere Möglichkeit, die aus der Sonnenstrahlung gewonnene, thermische Energie zu nutzen, sind solarthermische Kraftwerke, auch Concentrating Solar Power (CSP) Systeme genannt. Derartige Kraftwerke erreichen Temperaturen im Niveau moderner Dampfturbinen von bis zu über 500 °C. Sie sind nicht nur in der Lage, elektrische Energie zu erzeugen, sondern können auch Wärme für industrielle Prozesse bereitstellen.

1.1 Solarthermische Kraftwerke

Angeregt durch bundes- und landesweite Steueranreize und verbindliche langfristige Stromabnahmeverträge wurden Mitte/Ende der 1980er Jahre die ersten kommerziellen CSP-Kraftwerke in Kalifornien in Betrieb genommen, wie in Abb. 1.2 zu sehen ist. Fallende Preise für fossile Brennstoffe in den darauffolgenden Jahren führten dazu, dass die Förderungen wieder abgebaut wurden [4].

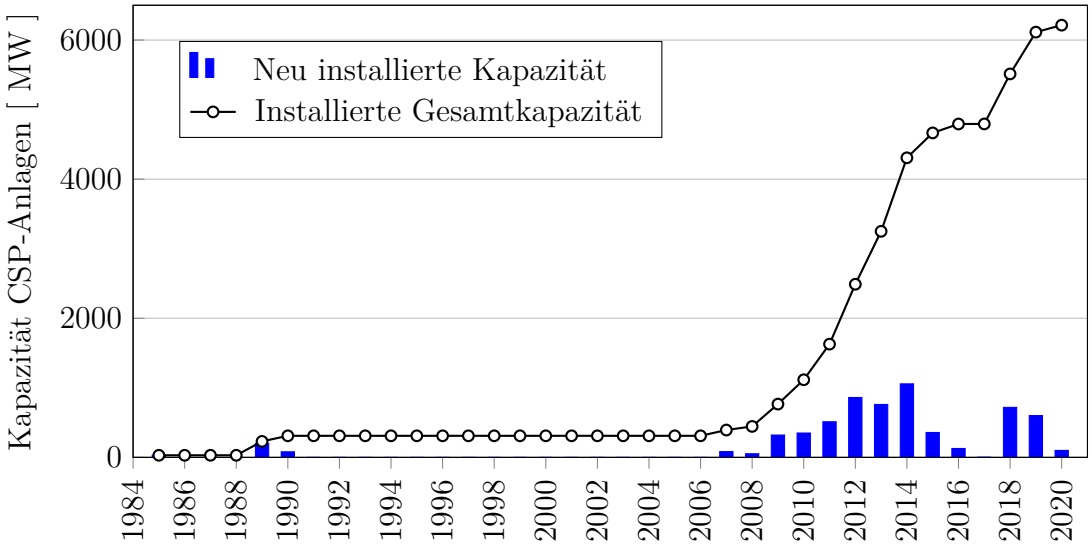


Abb. 1.2 – Jährliche und insgesamt installierte Netto-Kapazität von CSP-Anlagen weltweit im Zeitraum von 1985 bis 2020 (Stand 2020). In Anlehnung an [5], Daten entnommen aus [6].

Durch die 2004 in Spanien beschlossenen Förderungsmechanismen für erneuerbare Stromerzeugungstechnologien wurden dort ab 2007 wieder neue CSP-Anlagen gebaut und der Markt begann zu wachsen [7, 8, 5]. Abb. 1.2 zeigt, dass sich die Gesamtkapazität in den letzten zehn Jahren von 1116 MW (2010) auf 6214 MW (2020) erhöht hat. Anhand der Kapazität der in Bau (1521 MW) und in Planung (3714 MW) befindlichen Anlagen, in Abb. 1.6, ist zu sehen, dass der CSP-Markt weiter am Wachsen ist.

Ein CSP-Kraftwerk hat einen ähnlichen Aufbau wie ein herkömmliches Dampfkraftwerk. Der Hauptunterschied liegt darin, dass die Wärme durch gebündelte

Solarenergie erzeugt wird und nicht durch fossile Energieträger. Die Bündelung erfolgt durch ein Spiegelsystem, auch Kollektoren genannt.

Die verschiedenen Arten von solarthermischen Kraftwerken haben meist einen ähnlichen Aufbau. Daher wird stellvertretend für solarthermische Kraftwerke im Allgemeinen in Abb. 1.3 der Aufbau eines Solarturmkraftwerkes dargestellt.

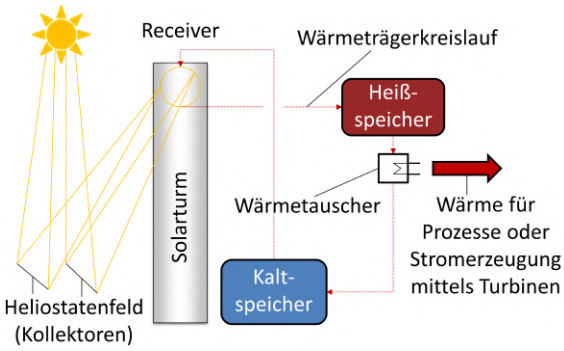


Abb. 1.3 – Schematischer Aufbau eines Solarturmkraftwerkes mit einem Wärmespeicher, angelehnt an: [9]

In allen solarthermischen Kraftwerken wird die Solarenergie (thermische Strahlung) von Kollektorsystemen gebündelt, um dann von einem oder mehreren Receivern absorbiert und in Wärme umgewandelt zu werden. Die Wärme wird dabei gleichzeitig auf ein Wärmeträgermedium übertragen.

Anschließend gelangt das Medium entweder direkt oder (falls vorhanden) über einen thermischen Speicher zu einem Wärmetauscher. Dieser transferiert die Wärme in einen Kraftwerksprozess. Die Wärme erzeugt dort Wasserdampf und treibt eine Turbine an. Diese ist mit einem Generator verbunden, der wiederum Strom erzeugt, analog zu einem Dampfkraftwerk.

Eine andere Möglichkeit ist die direkte Nutzung der Wärme. Hierbei transferiert der Wärmetauscher, die Wärme nicht in einen Kraftwerksprozess, sondern in einen Produktionsprozess, der Prozesswärme benötigt, meistens in Form von Heißluft. Nach dem Wärmetauscher gelangt das Wärmeträgermedium in einen Kaltspeicher. Von dort aus kann es bei Bedarf wieder zum Kollektor transportiert und erneut erhitzt werden.

Manche CSP-Anlagen verfügen außerdem über einen thermischen Speicher, welcher sich zwischen dem Kollektor und dem Wärmetauscher befindet. Die Möglichkeit der Speicherung der Energie in Form von Wärme bietet einen entscheidenden Vorteil gegenüber Photovoltaikanlagen und Windkraftanlagen, da die Speicherung von Wärme günstiger und somit ökonomischer als die Speicherung von Strom ist.

Die gespeicherte Wärme kann genutzt werden, um tageszeitliche oder wetterbedingte Schwankungen auszugleichen. Beispielsweise, wenn Wolken die Sonne verdecken oder bei Nacht. Dadurch ergeben sich weitere Möglichkeiten zur Nutzung von Solar-

energie. So kann die gespeicherte Wärme jederzeit in Strom umgewandelt werden und abendliche Peaks im Strombedarf abdecken oder auch 24/7 Energie für verschiedenste Anwendungen bereitstellen.

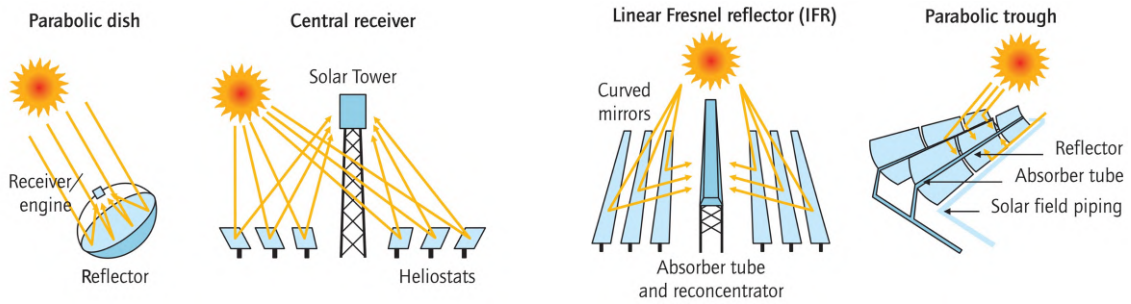
In der Familie der CSP-Kraftwerke gibt es zur Bündelung der Solarenergie vier verschiedene Arten von Kollektoren. Sie lassen sich in zwei Gruppen unterteilen:

- Punktfokussierende Systeme
- Linienfokussierende Systeme

Punktfokussierende Kollektoren können der Sonne zwei-achsig nachgeführt werden und fokussieren die Solarenergie auf einen Ein-Punkt-Receiver. Zu den punktfokussierenden Systemen gehören Heliostaten und Paraboloide-Spiegel. Letztere kommen in Solar-Dish-Kraftwerken zum Einsatz. Bei diesen Kraftwerken befindet sich der Receiver im Brennpunkt des Paraboloiden-Spiegels. Heliostaten werden für Solarturmkraftwerke genutzt. Solartürme sind von Heliostaten umgeben, welche das Sonnenlicht zum Receiver an der Turmspitze reflektieren. Abb. 1.4 zeigt ein Solarturmkraftwerk. Beide Systeme sind in Abb. 1.5 (a) dargestellt.

Abb. 1.4 – Luftaufnahme des Solarthermischen Versuchskraftwerks Jülich. Linker Rand: Solarturm; Bildmitte: Auf Turmspitze ausgerichtetes Heliostatenfeld [10]

Linienfokussiernde Systeme sind Fresnel-Spiegel sowie trogförmige Paraboloide-Spiegel. Sie werden in Fresnel-Kollektoranlagen respektive Parabolrinnen-Kraftwerken eingesetzt. Die Kollektoren können der Sonne einachsig nachgeführt werden und fokussieren die Solarenergie auf einen linearen Receiver. Die beiden Systeme sind in Abb. 1.5 (b) dargestellt.



(a) Punktfokussierende Systeme **(b)** Linienfokussierende Systeme

Abb. 1.5 – Darstellung der Kollektorsysteme für CSP-Kraftwerke, entnommen aus: [4]

Die verbreitetsten CSP-Analgen sind derzeit Parabolrinnen-Kraftwerke, wie in Abb. 1.6 zu sehen ist, und das sowohl bei den in Betrieb befindlichen als auch bei den in Bau befindlichen Anlagen. Fresnel-Kollektoranlagen spielen hingegen eine untergeordnete Rolle und werden kaum noch gebaut. Solar-Dish Kraftwerke haben kommerziell keine Relevanz.

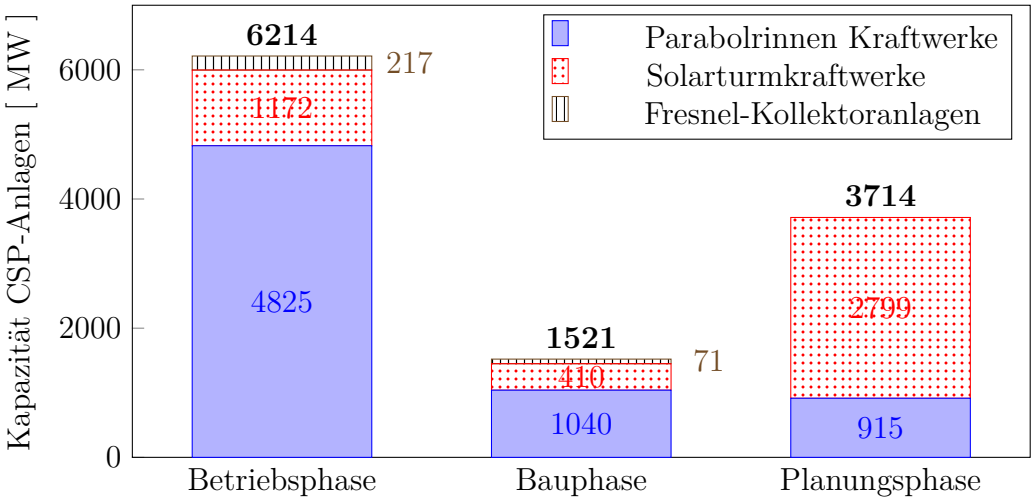


Abb. 1.6 – Einteilung der CSP-Kraftwerke nach Technologie und Entwicklungsphase (Stand 2020), Daten entnommen aus [6]

Der Anteil der Kapazität von Solarturmkraftwerken an aktuell installierten und in Bau befindlichen Anlagen ist mit rund 20 % deutlich geringer, als der der Parabolrinnenkraftwerke. Trotzdem stellen Solartürme einen wachsenden Trend im Bereich der CSP-Anlagen dar. Bereits 2016 wurden Solarturmkraftwerke vom National Renewable Energy Laboratory (NREL) aus den USA in einem Bericht als vielversprechendste Technologie beschrieben, um CSP-Anlagen wettbewerbsfähig gegenüber anderen Formen der Energiegewinnung zu machen [11]. Ihnen kommt daher eine immer größere Bedeutung im Bereich der CSP-Systeme und regenerativen Energien zu, was sich auch in Abb. 1.6 widerspiegelt. Momentan ist die Kapazi-

tät von geplanten Solarturmkraftwerken mehr als drei Mal so hoch, wie dioe von Parabolrinnen-Kraftwerken.

Stand der Technik sind Solarturmkraftwerke, die Flüssigsalz als Wärmeträgermedium verwenden. Die Leistung der Turbinen beträgt meist 50 MW bis 100 MW[1]. Die thermischen Speicher haben in der Regel eine Kapazität von 10 bis 15 Stunden [6, 11].

Das Wärmeträgermedium ist gleichzeitig auch das Speichermedium. Am häufigsten wird Solar Salt genutzt. Es besteht zu 60 % aus $NaNO_3$ und zu 40 % aus KNO_3 (nach Gewicht). Bei Temperaturen von unter 240 °C kristallisiert das Salz, bei Temperaturen von über 600 °C fängt das Salz an, instabil zu werden und es kommt zu erhöhter Korrosion an den Stahl-Komponenten. Um diese Risiken zu minimieren, wird das Salz meist bei Temperaturen zwischen 290 °C und 565 °C betrieben. Damit das Salz nicht kristallisiert, muss es nachts oder bei zu geringer Sonneneinstrahlung zusätzlich beheizt werden [12].

Die Risiken und Restriktionen, die mit der Nutzung von Salz als Wärmeträgermedium einhergehen, unterbinden weitere signifikante Reduktion der Stromgestehungskosten. Eine vielversprechende Alternative stellen Solartürme mit Partikel-Receivern dar.

1.2 Partikel-Receiver

Im Jahr 2011 wurden Partikel-Receiver als einer von drei Favoriten zur Erreichung des Sun-Shot-Goals von 0,05 $/kWh Stromgestehungskosten identifiziert und die Entwicklung dadurch weiter vorangetrieben [11, 13]. Diese Technologie nutzt feste Partikel als Wärmeträgermedium. Bereits seit den 1980er Jahren wird diese Technologie in den USA durch Sandia untersucht [14].

Derzeit wird auf keramische Bauxit-Partikel gesetzt. Diese sind in Abb. 1.7 dargestellt. Sie kommen aus dem Bereich der Frackingindustrie, wo sie "Proppants", also Stabilisatoren genannt werden. Dort verwendet man die Partikel, um durch das Fracking hervorgerufene Gesteinsrisse offenzuhalten. Dabei spielt deren Rundheit und Härte eine wichtige Rolle. Diese Eigenschaften sind auch für den Einsatz als Wärmeträgermedium vorteilhaft.

Die Partikel sind mit Durchmessern von 250 µm bis 1,8 mm kommerziell verfügbar. Sie sind sehr stabil und daher brauchbar für den Einsatz in Partikel-Receivern. Die Partikel sind nicht korrosiv, es ensteht wenig Abrieb/Abrasion und sie sind temperaturbeständig bis > 1000 °C. Da für das Fracking große Mengen an Proppants benötigt werden, sind diese im großen Stil und kostengünstig verfügbar. Das macht die Partikel zusätzlich interessant als Speichermedium. Darüber hinaus haben die

[1] elektrische Leistung

Abb. 1.7 – Keramische Bauxit-Partikel [15]

keramischen Partikel einen hohen gewichteten solaren Absorptionsgrad von > 90% [16].

Zum Herstellungsprozess der Partikel gibt es nur wenige Angaben. Eine Patentrecherche hat gezeigt, dass der allgemeine Fertigungsprozess folgende Schritte umfasst: Zunächst wird das Bauxit mit keramischen Zusatzkomponenten wie bspw. Feldspat oder Nephelinsyenit vermischt und gegebenenfalls noch ein Bindemittel hinzugegeben. Anschließend werden daraus "grüne" Partikel geformt. Nachdem diese ausreichend trocken sind, werden die Partikel bei ca. 1400 °C gesintert. Vorzugsweise in einem Drehrohrofen.[16] [17]

Die Partikel können ähnlich wie die Salzschmelze direkt als Speichermedium verwendet werden. Im Gegensatz zu Salzen können sie jedoch auf über 1000 °C erhitzt werden. Das Ziel ist es, die Partikel bei Temperaturen von ca. 1000 °C beim Verlassen des Receivers zu betreiben. Bei einer aktuellen Testkampagne mit einem Prototypen wurde bereits eine durchschnittliche Austrittstemperatur von 965 °C erzielt [14]. Mit den höheren Temperaturen ergeben sich signifikante Vorteile gegenüber Salzschmelzen als Wärmeträgermedium:

1. Die Kapazität des thermischen Speichers erhöht sich bei gleichbleibender Größe, da der Temperaturunterschied (ΔT) größer ist. Dadurch sinken die Speicherkosten.

2. Die Wärme kann für Hochtemperaturprozesse genutzt werden.

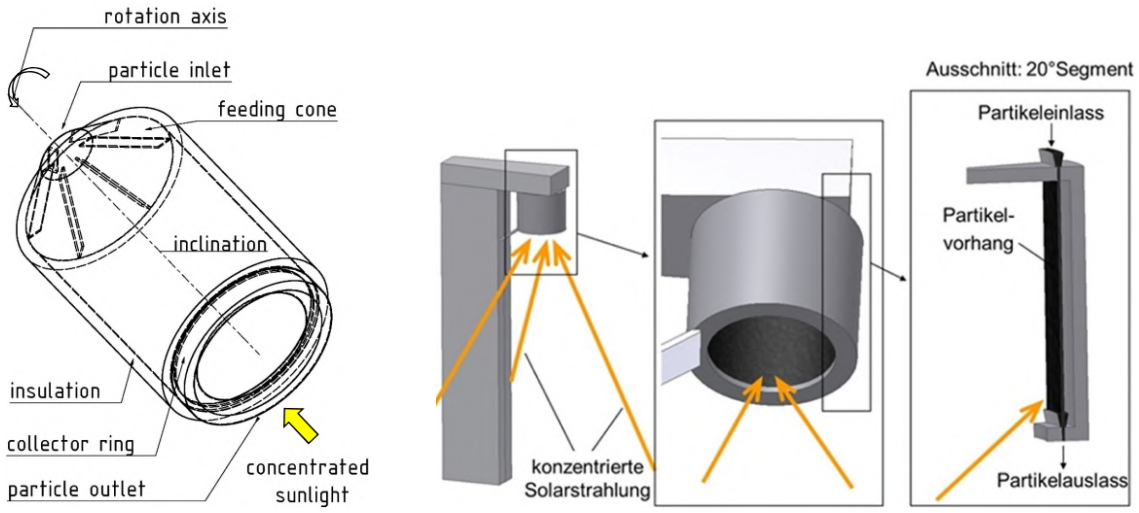
3. Es können effizientere Kraftwerksprozesse betrieben werden, welche höhere Temperaturen benötigen. Beispielsweise auf Basis von überkritischem CO_2 (sCO_2)[2].

[2] Überkritischer Kohlenstoffdioxid (supercritical carbon dioxide - sCO_2) wird im überkritischen CO_2-Brayton-Kreisprozess zur Stromerzeugung genutzt

Darüber hinaus sind Partikelsysteme weniger komplex und insgesamt günstiger als Salzsysteme. Ein Grund dafür ist, dass die Solarstrahlung direkt von den Partikeln absorbiert wird. Dadurch werden kaum Metallteile der Direkteinstrahlung ausgesetzt und der Anteil an hitzebeständigen und dementsprechend kostspieligen Metalllegierungen kann verringert werden.

Aktuell werden mehrere Ansätze von Partikel-Receivern erforscht. Die beiden vielversprechendsten Technologien sind Zentrifugal- und Fallfilm-Receiver.

Letztere sind Receiver, bei denen die Partikel frei im Receiver herunter fallen und dabei einen Partikel-Film bzw. Vorhang formen. Dieser Film wird von den Heliostaten fokussiert, wodurch sich die Partikel erhitzen. Anschließend werden die Partikel im unteren Teil des Receivers gesammelt und weitertransportiert, siehe Abb. 1.8b.



(a) Skizze vom Aufbau eines CentRec® -Receivers [14]

(b) Skizze vom Aufbau eines Fallfilm-Receivers in nach unten geöffneter Hohlraumgeometrie, entnommen aus: [18]

Abb. 1.8 – Skizze eines Fallfil- und eines CentRec® -Receivers

Der zweite Ansatz sind Zentrifugal-Receiver, auch CentRec® -Receiver genannt, siehe Abb. 1.8a. Diese vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelte und patentierte Receiverart besteht aus einem rotierenden Hohlzylinder. Am oberen Teil des Zylinders befindet sich der Partikeleinlass, von wo aus die Partikel in den Receiver gelangen. Dort werden sie beschleunigt und bilden einen optisch dichten, mehrere Partikelschichten dicken Film. Am unteren Teil des Zylinders befindet sich die Apertur des Receivers, von wo aus die konzentrierte Solarstrahlung eindringen und den Partikelfilm erwärmen kann. Dort ist auch ein Sammelring angebracht, welcher die Partikel auffängt und über einen Auslass weiterleitet.

Damit die Partikel nicht wie in einem Rohr durchrutschen, wird der Receiver in Rotation versetzt. Dabei entsteht eine Zentrifugalkraft, welche die Partikel nach außen drückt und die Abwärtsbewegung verlangsamt. CentRec® -Receiver können in verschiedenen Größen gebaut werden. Die unterschiedlichen Baugrößen werden

nach der maximalen, theoretisch möglichen, thermischen Eingangsleistung $\dot{Q}_{th\,\max}$ unterschieden. Aktuell werden, beispielsweise in [14], Prototypen mit $\dot{Q}_{th\,\max} = 500\,\text{kW}$ untersucht. Zur Unterscheidung der Baugrößen wird $\dot{Q}_{th\,\max}$ im Namen mit angegeben, sodass die Bezeichnung für diese Receiver "CentRec500" lautet.

1.3 Problembeschreibung und Zielsetzung

Im Betrieb werden Solarreceiver auf eine stabile Austrittstemperatur geregelt. Da die Direkteinstrahlungsenergie Schwankungen unterliegt, muss die Temperatur konstant überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden. Schwankungen entstehen beispielsweise durch die Ab- bzw. Zunahme der Direkteinstrahlung über den Tagesverlauf oder aufgrund von Wolken.

Um die Austrittstemperatur zu steuern, gibt es bei CentRec® -Receivern zwei Einstellmöglichkeiten:

1. Drehzahl des Receivers
2. Massenstrom der Partikel

Die Ziel-Austrittstemperatur wird beibehalten, indem der Partikelmassenstrom angepasst wird. Um einen stabilen Fluss und eine passende Verweildauer der Partikel im Receiver zu bewerkstelligen, wird die Receiverdrehzahl angepasst.

Bei einer Erhöhung der Receiverdrehzahl nimmt die Zentrifugalkraft zu, welche auf die Partikel wirkt. Dadurch kann deren Abwärtsbewegung verlangsamt und an den erforderlichen Massenstrom angepasst werden. Je höher der Partikelmassenstrom ist, desto dicker ist der Partikelfilm. Bei gleichbleibender Direkteinstrahlung würde sich somit die Austrittstemperatur verringern und vice versa. Um den Massenstrom exakt dosieren zu können, ist es notwendig, ihn genau zu messen.

Im Gegensatz zur Drehzahl ist der Massenstrom nicht ohne weiteres messbar. Für Schüttgut im allgemeinen, worunter auch die Bauxit-Partikel fallen, gibt es grundsätzlich eine Vielzahl von Messprinzipien. Da die Partikel jedoch am Receiver-Einlass eine Temperatur von bis zu 400 °C aufweisen, sind aktuell keine kommerziellen Systeme verfügbar, die bei diesen Temperaturen eine ausreichende Genauigkeit besitzen.

DLR-seitig wurden bereits mehrere Ansätze untersucht, um das Problem zu lösen. Beispielsweise Wägezellen oder ein Mikrowellensensor. Jedoch konnte kein Ansatz eine zufriedenstellende Qualität liefern. Interne Recherchen haben noch keine Technologie aufgezeigt, die bei hohen Temperaturen kostengünstig und robust eine ausreichende Messgenauigkeit gewährleistet [19].

Ziel dieser Arbeit ist es daher, ein Messprinzip zu finden, mit dem der Partikelstrom im CentRec® -Receiver bei Temperaturen von bis zu 400 °C gemessen werden

kann. Dafür sollen eine umfassende Übersicht zu möglichen Messverfahren erstellt und entsprechende Messgeräte anschließend experimentell untersucht und validiert werden.

Zusätzlich wird die Arbeit dadurch motiviert, dass eine Massenstrommessung dabei hilft, ein quantitatives, genaues Verständnis des Massenstroms aufzubauen und darüber der Wirkungsgrad des Systems berechnet werden kann. Dadurch lassen sich die Stromgestehungskosten abschätzen und ökonomische Betrachtungen von Solarturmkraftwerken mit Partikel-Receiver erstellen.

1.4 Aufbau der Arbeit

Um dieses Ziel zu erreichen, werden zunächst die Grundlagen der Mess-und Dosiertechnik von Schüttgut erläutert. Anschließend folgt eine Recherche zu den möglichen Technologien. Dabei sollen alle, im Rahmen der Recherche identifizierten, Messverfahren für Schüttgüter zusammengetragen werden, um einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik zu erhalten. Im nächsten Schritt wird überprüft, welche Verfahren sich auf den vorliegenden Anwendungsfall übertragen lassen. Die übertragbaren Technologien werden dann in einem Variantenvergleich gegenübergestellt.

Daraus ergibt sich die Bewertung der verbleibenden Möglichkeiten. Die bestbewerteten Technologien sollen anschließend in Experimenten untersucht werden, um deren Realisierbarkeit zu überprüfen und deren Genauigkeit zu validieren. Danach werden die Experimente ausgewertet. Hierbei soll der Fokus auf der Genauigkeit der Verfahren und der Kompatibilität mit CentRec® -Receivern liegen. Im letzten Schritt soll eine Empfehlung für das weitere Vorgehen erarbeitet, und ein Ausblick darauf gegeben werden, wie man die untersuchten Technologien einsetzen kann.

2 Technologie-Recherche

In diesem Kapitel werden zunächst die Anforderungen an ein Messverfahren für die Massenstrommessung in einem CentRec®-Receiver eines Solarturmkraftwerkes definiert. Auf der Basis einer Recherche werden dann Verfahren zur Massenstrommessung vorgestellt.

Für die Recherche werden zunächst interne Vorarbeiten [20] sowie das Internet genutzt, um einen Überblick über die Möglichkeiten der Massenstrommessung von Schüttgütern zu erhalten. Im Anschluss daran werden Gespräche mit herstellenden Betrieben geführt, um technische Informationen und Spezifikationen zu den Messverfahren zu erhalten. Dabei soll auch geprüft werden, ob das jeweilige Verfahren grundsätzlich für den Einsatz in einem CentRec®-Receiver genutzt werden kann. Außerdem wird eine Patentrecherche durchgeführt, um das grundlegende Prinzip der Messverfahren darzulegen und die Ergebnisse durch Rückführung auf die ursprünglichen Patente darzustellen.

Anschließend werden die Verfahren in einem Variantenvergleich gegenübergestellt, welcher als Basis für die Auswahl eines Favoriten dient. Das vielversprechendste Messverfahren soll danach experimentell untersucht werden.

Je nach Baugröße werden CentRec®-Receiver in unterschiedlichen Bereichen des Partikelmassenstroms betrieben. Je größer der Receiver ist, desto höher sind die Massenströme, die der Receiver benötigt, um die gewünschte Leistung zu erbringen. Prinzipiell wird eine technische Lösung für CentRec®-Receiver allgemein gesucht. Um konkrete Ziele abstecken und zielführende Gespräche mit Firmen führen zu können, wird der CentRec500 als detailliert zu untersuchendes System genutzt.

Der CentRec500 ist ein Receiver mit einer maximalen, theoretisch möglichen, thermischen Eingangsleistung von $\dot{Q}_{th\,\max} = 500\,\mathrm{kW}$. Die Größe der Apertur beträgt $1\,\mathrm{m}^2$. Er besitzt eine thermische Ausgangsleistung von 2,5 MW.

2.1 Anforderungen

Das Lastenheft dient dazu, die Anforderungen an das Messverfahren zu definieren, welches für die Massenstrommessung in einem CentRec®-Receiver eines Solarturmkraftwerkes benötigt wird. Mit den Anforderungen soll dann ein geeignetes System ausgewählt werden.

Es haben sich vier Anwendungsfälle herausgestellt, bei denen eine Massenstrommessung benötigt wird:

- Messung im Einlassbereich
- Messung im Auslassbereich
- Überprüfung des Massenstroms (An/Aus Messung) im Einlassbereich
- Überprüfung des Massenstroms (An/Aus Messung) im Auslassbereich

Der Einlass- und Auslassbereich eines CentRec-Receivers sind in Abb. 2.1 dargestellt. Der erste Anwendungsfall ist der für den Receiverbetrieb relevanteste (Kapitel 1.3). In der Folge sollen auch die anderen Fälle betrachtet werden, daher werden diese mit aufgezeigt und in der Technologie-Recherche ebenfalls betrachtet. Die Anforderungen an den ersten Anwendungsfall sind in der Tabelle 2.1 dargestellt. Die Anforderungen an die anderen drei Fälle sind in Anhang A.1 aufgeführt.

Tabelle 2.1 – Lastenheft: Darstellung der Anforderungen an ein Messgerät für die Massenstrommessung im Einlassbereich eines Zentrifugal-Receivers

Nr.	Anforderung	Quantifizierung
1. Gerät für die Massenstrommessung im Einlassbereich		
1.1	Messgenauigkeit	Unsicherheit $< 3{,}0\,\%$
1.2	Messbereich(CentRec500)	0,3 kg/s bis 3 kg/s
1.3	Messbereich(allg.)	$> 0{,}3$ kg/s
1.4	Einfluss der Schüttgutdichte auf Ergebnis	Möglichst gering
1.5	Verschleiß und Wartung	Möglichst gering
1.6.1	Temperaturbeständigkeit	bis 400 °C
1.6.2	Schutz vor Abrasion	hoch
1.6.3	Staubschutz	hoch

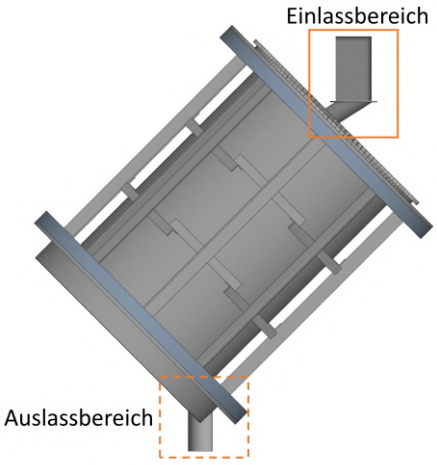


Abb. 2.1 – Seitenansicht eines CentRec®-Receivers mit markiertem Einlass- und Auslassbereich

Der Anwendungsfall 1 bezieht sich auf ein Gerät für die Massenstrommessung im Einlassbereich. Ziel dieser Messung ist es, korrekt dosieren zu können und Daten für die Bestimmung des Wirkungsgrades zu liefern. Um diese Aufgaben zu erledigen, muss die Messung mit einer Genauigkeit von $> 97\,\%$ erfolgen [21]. Mit dem Begriff Genauigkeit ist im folgenden die Präzision der Ergebnisse gemeint. Eine Genauigkeit von $> 97\,\%$ bedeutet, dass die Unsicherheit 3,0 % nicht überschreiten darf (Anforderung 1.1).

Vorabauslegungen haben gezeigt, dass die Partikel beim Eintritt in den Receiver meist Temperaturen zwischen 300 °C und 400 °C besitzen. Deshalb wurde die Anforderung an die Temperaturbeständigkeit (Anforderung 1.6.1) mit 400 °C angegeben.

Der minimale und maximale Massenstrom des CentRec500 liegt bei ca. 0,3 kg/s beziehungsweise 3 kg/s. Daher soll primär ein Messgerät für diesen Bereich gesucht werden (Anforderung 1.2). Eine weitere Anforderung in diesem Zusammenhang ist, dass das Messgerät auch für andere, größere Receiver eingesetzt werden soll, bei denen der Massenstrom entsprechend höher ist (Anforderung 1.3).

Durch die Reibung der Partikel aneinander sowie an Bauteilen verschleißen die Partikel. Dabei werden sie kleiner und es entsteht Staub. Hierbei verändert sich auch die Schüttgutdichte. Deshalb ist eine weitere Anforderung, dass der Einfluss der Schüttgutdichte auf das Messergebnis möglichst gering ist (Anforderung 1.4).

Die Wartung eines Solarreceivers ist schwieriger als bei konventionellen Anlagen, da sich der Receiver an einer Turmspitze befindet. Deshalb sollte der Verschleiß möglichst gering und das System wartungsarm sein (Anforderung 1.5).

Beim Einsatz in einem Solarreceiver ist das Messgerät insbesondere folgenden Einflüssen ausgesetzt:

- Wärme der Partikel
- Abrasion durch Partikel
- Staub durch den Verschleiß der Partikel

Es wird ein Messgerät benötigt, welches diesen Einflüssen gut standhalten kann (Anforderung 1.6.1-1.6.3).

2.2 Einteilung der Messverfahren

Im Folgenden werden die Messverfahren vorgestellt, die im Rahmen der Recherche gefunden wurden. Es wird nach bestem Wissen und Gewissen versucht, die Patente zu den jeweiligen Verfahren zurückzuverfolgen, es besteht jedoch kein Anspruch auf Vollständigkeit.

Außerdem werden alle bekannten technischen Kennwerte der Messverfahren angegeben, welche für die Anforderungen aus dem Lastenheft in Tabelle 2.1 relevant

sind. Dazu werden verschiedene herstellende Betriebe kontaktiert. Im persönlichen Gespräch mit dem technischen Personal, können benötigte Informationen zu den Messverfahren gewonnen werden.

Die technischen Informationen der herstellende Betriebe zeigen nicht unbedingt die theoretischen Grenzen der Verfahren auf. Der Fokus der Gespräche mit dem technischen Personal lag auf praktisch verfügbaren Produkten. Es ist daher möglich, dass alternative Anbieter nicht erkannt wurden und andere Kennwerte dort angeboten werden. Allerdings ist anzumerken, dass herstellende Betriebe beim Handling von Schüttgütern häufig keine Produkte von der Stange anbieten, sondern eigene Verfahren anwendungs- und schüttgutspezifisch ausführen. Daher ist davon auszugehen, dass durch Gespräche mit den herstellenden Betrieben ein gutes Verständnis der praktischen Limitierungen generiert wurde.

Die Massenstrommessung von Schüttgütern lässt sich grundsätzlich in gravimetrische und volumetrische Messverfahren unterteilen. Bei der gravimetrischen Messung wird die Masse (direkt) oder eine zur Masse proportionale Größe (indirekt) wie beispielsweise die Zentripetal-, oder Corioliskraft gemessen [22]. Daraus kann dann zusammen mit der Zeit der Massenstrom ermittelt werden. Gravimetrische Messverfahren sind im Allgemeinen genauer als volumetrische Messverfahren. Veränderungen der Schüttgutdichte haben meistens keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Genauigkeit der Messung.

Volumetrische Messverfahren kommen hauptsächlich in pneumatischen Förderanlagen oder für Fluide zum Einsatz. Es gibt jedoch drei Verfahren, die auch für die Schüttgutmessung genutzt werden: Mikrowellensensoren, magnetisch-induktive Durchflussmessgeräte und optische Bandwaagen.

Die volumetrische Messung beruht auf dem Zusammenhang zwischen Massenstrom, Volumenstrom und Dichte $\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho_b$. Dabei wird zunächst das Volumen pro Zeit am Messpunkt ermittelt, woraus sich der Volumenstrom $\dot{V}$ ergibt. Zusammen mit der Schüttgutdichte ρ_b kann dann der Massenstrom $\dot{m}$ berechnet werden. Wenn sich die Dichte des zu messenden Schüttgutes verändert, wird folglich das Messergebnis entsprechend ungenauer und das Messgerät muss erneut kalibriert werden [23].

In ihrem Aufbau sind volumetrische Messgeräte weniger kompliziert als gravimetrische Messgeräte. Magnetisch-induktive Durchflussmessgeräte und Mikrowellensensoren können darüber hinaus einfach in bestehende Rohrleitungen beziehungsweise optische Bandwaagen in bestehende Förderanlagen integriert werden, ohne den Produktfluss zu behindern.

2.3 Gravimetrische Messverfahren

Zur besseren Übersichtlichkeit sind die gravimetrischen Messverfahren in drei Gruppen unterteilt worden.

- Messung des Gewichts in einem Behälter
- Messung einer zur Masse proportionalen Kraft
- Messung mittels eines Förderbandes
- Radiometrische Messverfahren

2.3.1 Messung des Gewichts durch Verwiegung in einem Behälter

Diese Kategorie umfasst alle Messgeräte, die Schüttgüter kontinuierlich (Behälterwaage / Differentialdosierwaage) oder diskontinuierlich (Behälterdurchlaufwaage) in einem Behälter verwiegen. Für diese Art der Messung gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten: Das Gain-In-Weight- (GIW-) und das Loss-In-Weight- (LIW-) Prinzip. Beim LIW-Prinzip wird die Gewichtsabnahme eines Behälters sowie des sich darin befindlichen Schüttgutes gemessen. Aus zwei Gewichtswerten (m_1 und m_2) kann eine Differenz gebildet werden und mit dem Zeitintervall ($t_2 - t_1$) zwischen den beiden Gewichtswerten kann dann der Massenstrom, gemäß

$$\dot{m} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \tag{2.1}$$

ermittelt werden.

Beim GIW-Prinzip funktioniert die Berechnung des Massenstromes wie beim LIW-Prinzip, jedoch nimmt das Gewicht hierbei zu und nicht ab.

Behälterdurchlaufwaage

Das GIW-Prinzip kommt hauptsächlich bei Behälterdurchlaufwaagen zum Einsatz. Erste Hinweise auf diesen Waagen-Typ stammen aus dem Jahr 1903. Edward William Lindquist hatte damals ein Patent angemeldet, um die gleichmäßige Beschickung von Kupfer-Schmelzöfen zu verbessern [24]. Zu diesem Zeitpunkt gab es noch keine zufriedenstellenden Maschinen, um diese Aufgabe zu erledigen. Daher erfolgte die Beschickung von Hand. Dies war nicht nur teuer, sondern auch ungenau.

Lindquists Erfindung besteht im Wesentlichen aus einem Wiegebehälter mit Schieber, welcher auf Balken gelagert ist, die mit einer Waage verbunden sind. Außerdem gibt es einen Vorratsbehälter mit Zuführschacht zum Wiegebehälter. Der Vorratsbehälter ist ebenfalls mit einem Schieber verschlossen.

Der Schieber des Vorratsbehälters ist grundsätzlich geöffnet, und das Schüttgut gelangt aus dem Vorratsbehälter in den Wiegebehälter. Die mit dem Wiegebehälter verbundene Waage wird so eingestellt, dass sie bei einem bestimmten Gewicht ausbalanciert ist.

Sobald das Gewicht im Wiegebehälter erreicht ist, wird ein elektrischer Stromkreis geschlossen. Dadurch schließt der Schieber des Vorratsbehälters, und der des Wiegebehälters wird geöffnet. Das Material wird auf ein Förderband entleert. Anschließend beginnt der Ablauf von vorn [24].

Heutzutage werden Wägezellen zur Verwiegung verwendet, siehe Abb. 2.2 und der eben beschriebene Ablauf wiederholt sich ca. 400-mal pro Stunde. Zusätzlich wird das Gewicht des Wiegebehälters und des sich darin befindlichen Schüttgutes bei jedem Durchlauf gespeichert. Daraus lässt sich dann, wie in Gleichung (2.1) beschrieben, ein Massenstrom berechnen [25].

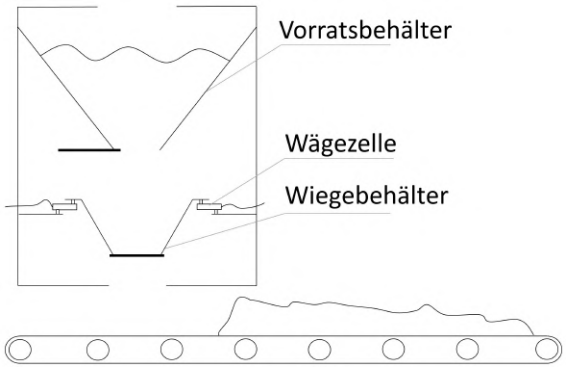


Abb. 2.2 – Skizze einer Behälterdurchlaufwaage

Die technischen Spezifikation des Messverfahrens sind in Tabelle 2.2 aufgeführt.

Tabelle 2.2 – Technische Daten von Behälterdurchlaufwaagen [25]

Anforderung	**Quantifizierung**
Messgenauigkeit	99,75 % bis 99,9 %
Messbereich (CentRec500)	abgedeckt
Messbereich (allg.)	abgedeckt
Einfluss ρ_b	gering
Verschleiß und Wartung	unbekannt
Temperaturbeständigkeit	eventuell bis 400 °C
Schutz vor Abrasion	unbekannt
Staubschutz	unbekannt

Um eine Behälterdurchlaufwaage vor Temperaturen von bis zu 400 °C zu schützen, wäre jedoch laut herstellendem Betrieb ein erheblicher konstruktiver Aufwand nötig. Dieser würde wiederum zu hohen Kosten führen. Es besteht laut Aussage eines herstellenden Betriebes trotzdem die Möglichkeit, dass es im Nachgang Probleme mit den Temperaturen gibt [25].

Behälter- und Differentialdosierwaagen

Behälterwaagen und Differentialdosierwaagen sind in ihrem Aufbau und in ihrer Funktionsweise sehr ähnlich. Beide bestehen aus einem Behälter, welcher verwogen wird und an dessen Auslauf ein Dosierorgan angebracht ist. Bei der Behälterwaage ist das Dosierorgan entkoppelt, beispielsweise über eine Manschette, und lässt keine Kraftübertragung zu. Es wird also nicht mitgewogen.

Bei Differentialdosierwaagen hingegen ist das Dosierorgan direkt mit dem Behälter verbunden. Dadurch wird das Dosierorgan und das darin befindliche Schüttgut mitgewogen. Dadurch kann der Prozess bis zur endgültigen Übergabe des Materials in den darauffolgenden Prozess überwacht werden. Das Dosierorgan wird mit überprüft. Deswegen ist diese Art von Waagen genauer als Behälterwaagen [26].

Bis auf diesen Unterschied sind der Aufbau und das Wirkprinzip der beiden Waagen identisch. Da die meisten Patente zu diesem Prinzip nur Differentialdosierwaagen beschreiben, wird im Folgenden der Aufbau und die Funktionsweise von Differenzialdosierwaagen stellvertretend für beide beschrieben.

Die beschriebene Art von Waagen ist schon seit längerer Zeit bekannt. Bereits im Jahr 1905 beschrieb Edward D. Carter in seinem Patent ein Gerät, mit dem ein Behälter kontinuierlich verwogen werden kann. Damit sollten Säcke automatisch mit einer bestimmten Menge an Getreide befüllt werden [27]. 1956 wurde in England ein Messgerät patentiert, das nach einem ähnlichen Prinzip arbeitet, jedoch zwei statt einem Behälter verwiegt. Dadurch kann ein Behälter zur Entnahme des Schüttgutes verwendet und der andere in dieser Zeit aufgefüllt werden, und vice versa. In diesem Patent wurde bereits ein Zählwerk beschrieben, um die Menge an Material zu bestimmen, welches den Behältern entnommen wurde [28].

Heutige Differentialdosierwaagen funktionieren ähnlich wie im Patent von Tony Kenneth Derrick Hindley aus dem Jahr 1978 beschrieben [29]. Sie bestehen aus einem Behälter, welchem kontinuierlich ein Produkt entnommen werden kann. Der Behälter wird von meist drei oder vier Wägezellen verwogen und besitzt am Auslass Austrags- beziehungsweise Dosierorgane, wie in Abb. 2.3 zu sehen ist. Per LIW-Prinzip berechnet sich der Massenstrom aus der Differenz von zwei Gewichtswerten und den jeweiligen Zeitintervallen.

Um eine kontinuierliche Entnahme zu gewährleisten, wird beim Erreichen eines kritischen Füllstandes oder in festgelegten Intervallen Material schnell und in großen Mengen (Chargen) nachgefüllt.

Obwohl dieser Nachfüllvorgang so kurz wie möglich gehalten wird, würde das Messergebnis während dieser Zeit verfälscht werden und dementsprechend auch das Dosierorgan falsch dosieren. Um dieses Problem zu beseitigen, schlägt Hindley [29] vor, den Wert für den Massenstrom, der kurz vor dem Nachfüllvorgang gemessen wurde, abzuspeichern. Dieser Wert wird anschließend während des Nachfüllvorgangs

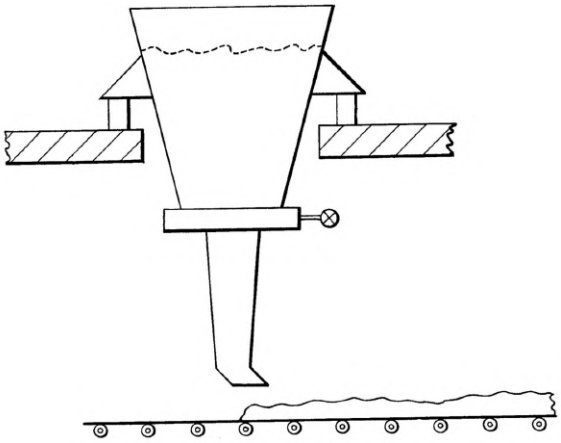


Abb. 2.3 – Skizze einer Differentialdosierwaage, inkl. Wägezellen und Förderband zum Abtransport des dosierten und gemessenen Materials [29]

als Ist-Wert und damit auch für die Dosierung verwendet. Sobald der Behälter befüllt ist wird der Massenstrom wieder aus den Werten der Wägezellen und den dazugehörigen Zeitintervallen berechnet.

Die technischen Spezifikation der beiden Messverfahren sind in Tabelle 2.3 aufgeführt.

Tabelle 2.3 – Technische Daten von Behälter- und Differentialdosierwaagen [30] [26]

Anforderung	**Quantifizierung**
Messgenauigkeit BHW	99,0 % bis 99,5 %
Messgenauigkeit DDW	99,5 %
Messbereich (CentRec500)	abgedeckt
Messbereich (allg.)	abgedeckt
Einfluss ρ_b	gering
Verschleiß und Wartung	unbekannt
Temperaturbeständigkeit	$> 400\,°C$
Schutz vor Abrasion	gut
Staubschutz	gut

BHW = Behälterwaage, DDW = Differentialdosierwaage

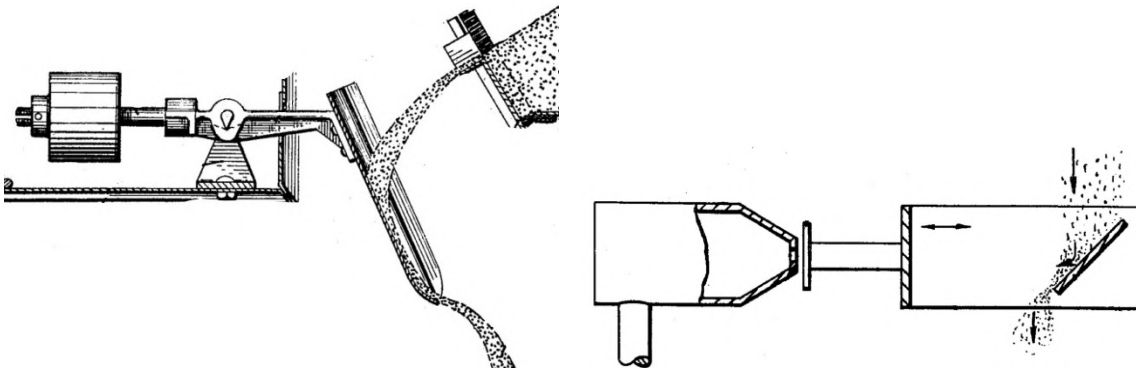
2.3.2 Messung einer zur Masse proportionalen Kraft

Diese Gruppe umfasst alle gravimetrischen Messgeräte, bei denen der Massenstrom über eine zur Masse proportionale Kraft gemessen wird. Das zu Grunde liegende Prinzip ist bei diesen Messverfahren dasselbe. Das Schüttgut übt auf unterschiedliche Arten eine Kraft auf einen Sensor aus. Diese wird gemessen und in eine dazu proportionale Masse umgerechnet. Zusammen mit der Zeit lässt sich daraus ein Massenstrom berechnen.

Prallplattenwaage

Das älteste Messverfahren dieser Kategorie ist eine Prallplattenwaage. Das Funktionsprinzip wurde das erste Mal von Clarance W. Carter in seinem Patent aus dem Jahr 1923 beschrieben [31].

Der Massenstrom eines Schüttgutes wird hierbei über die Aufprallkraft auf einer Prallplatte gemessen. Dazu wird der Materialfluss so gelenkt, dass er aus einer bestimmten Höhe im freien Fall auf eine schräg angebrachte Prallplatte trifft, siehe Abb. 2.4a. Die Kraft, die beim Aufprall entsteht, führt zu einer Auslenkung der Prallplatte. Da die Fallhöhe konstant ist, wird die Aufprallkraft durch den Massenstrom und die Schüttgutdichte bestimmt[31]. Die Aufprallkraft ist proportional zu beiden Einflussfaktoren. Somit lässt sich der Massenstrom aus der gemessenen Auslenkung bestimmen.



(a) Darstellung einer Prallplattenwaage in einem Dosiergerät [31]

(b) Darstellung einer Prallplattenwaage, wobei nur die horizontale Kraft gemessen wird[32]

Abb. 2.4 – Darstellungen von Prallplattenwaagen

In dem von Carter [31] beschriebenen Patent handelt es sich um ein Dosiergerät und die Auslenkung der Platte ist an einen Dosiermechanismus gekoppelt. In späteren Patenten und in heutigen Prallplattenwaagen wird ein Sensor verwendet welcher die Auslenkung misst und in ein nutzbares elektrisches Signal umwandelt.

Ein Problem der ersten Prallplattenwaagen besteht darin, dass Materialablagerungen auf der Prallplatte das Messergebnis beeinflussen und zu Ungenauigkeiten führen. Das Problem wurde durch das 1956 erschienene Patent von Lyndus E. Harper gelöst [32].

In seinem Entwurf wird nur die horizontale Komponente der Kraft gemessen, siehe Abb. 2.4b. Dadurch haben Ablagerungen von Schüttgut auf der Prallplatte, welche entsprechend der Gravitation nur in vertikaler Richtung wirken, keinen Einfluss auf das Messergebnis [32]. Dieses Prinzip hat sich schnell durchgesetzt und ist heute noch der Standard für Prallplattenwaagen. Die technischen Spezifikationen des Messverfahrens sind in Tabelle 2.4 aufgeführt.

Tabelle 2.4 – Technische Daten von Prallplattenwaagen [33]

Anforderung	Quantifizierung
Messgenauigkeit	98 % bis 99 %
Messbereich (CentRec500)	abgedeckt
Messbereich (allg.)	abgedeckt
Einfluss ρ_b	hoch
Verschleiß und Wartung	gering
Temperaturbeständigkeit	230 °C
Schutz vor Abrasion	gut
Staubschutz	unbekannt

Theoretisch sollte die Schüttgutdichte keinen Einfluss auf das Messergebnis haben. Praktisch führt eine Veränderung der Schüttgutdichte jedoch zu veränderter Reibung zwischen den Partikeln und der Prallplatte. Dadurch wird das Verhältnis zwischen Auslenkung des Sensors und Massenstrom beeinflusst und die Genauigkeit Systems reduziert sich [33].

Messschurre

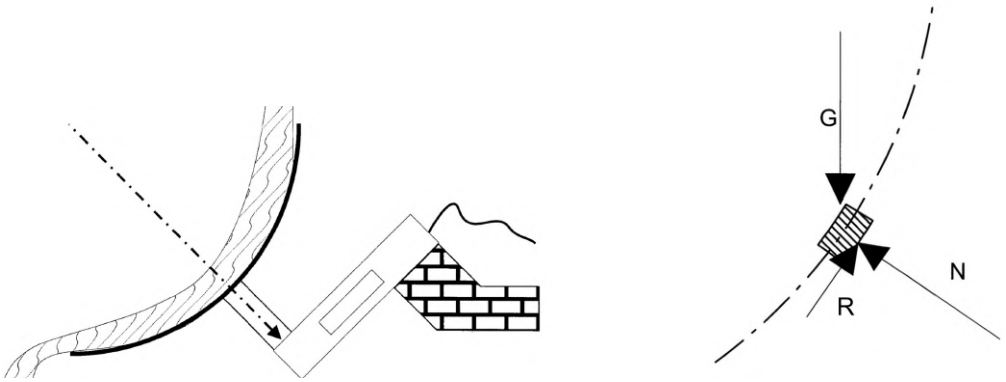
Ein weiterer Lösungsansatz ist das 1968 zum ersten Mal von Karl-Heinz Nebhuth beschriebene Prinzip einer Messschurre [34]. Um den Einfluss der Reibung zu reduzieren, wird anstelle einer Prallplatte eine kreisbogenförmige Oberfläche verwendet, die den Schüttgutstrom umlenkt. Diese wird Schurre oder Leitmittel genannt.

Bei einer Messschurre ist das Leitmittel über einem Kraftsensor gelagert, siehe Abb. 2.5a. Während des Messvorgangs wird der Massenstrom über das Leitmittel geführt. Beim Entlanggleiten wird das Schüttgut durch das Leitmittel in eine Kreisbewegung gelenkt und erfährt eine Zentripetalkraft. Dieser Kraft steht eine Reaktionskraft entgegen, welche vom Kraftsensor gemessen wird, die Zentrifugalkraft. Die Zentripetal- und entsprechend die Zentrifugalkraft sind proportional zur bewegten Masse [35].

Der Vorteil einer Messschurre gegenüber einer Prallplattenwaage besteht darin, dass der Einfluss der Reibungskraft auf das Messergebnis durch den Aufbau des Messgerätes kompensiert wird. Dadurch kann die Genauigkeit der Messung gesteigert werden.

Um das zu erreichen, wird das Leitmittel so gelagert, dass die resultierende Zentripetalkraft (N) in der Kraftmessrichtung des Sensors liegt, siehe Abb. 2.5a. Die resultierende Reibungskraft (R) hingegen liegt senkrecht zur Kraftmessrichtung und hat daher keinen Einfluss auf die Messung [35].

In der Praxis bedeutet das, dass Veränderungen in der Schüttgutdichte bis ca. 30 % lediglich einen geringen Einfluss auf das Messergebnis haben. Bei größeren Änderungen ist eine erneute Kalibrierung erforderlich [36].



(a) Darstellung einer Messschurre mit Leitmittel, Schüttgut und Kraftmesser. Der Pfeil stellt den Punkt des Leitmittels dar, an welchem die resultierende Zentripetalkraft vertikal auf den dahinterliegenden Kraftmesssensor trifft [35].

(b) Darstellung der Kräfte, die auf ein Element des Schüttgutes, welches sich auf dem Leitmittel befindet, wirken. G ist die resultierende Gewichtskraft, N die resultierende Zentripetalkraft und R die resultierende Reibungskraft [35]

Abb. 2.5 – Skizzen von Messschurren und die auftretenden Kräfte

Im Jahr 2008 wurde das Prinzip durch das Patent von Bernhard Penno und Frank Bickmann durch eine quantitative mathematische und mechanische Beschreibung des Aufbaus erweitert, wodurch die Genauigkeit des Verfahrens erhöht wurde [35]. Die technischen Spezifikationen des Messverfahrens sind in Tabelle 2.5 aufgeführt.

Tabelle 2.5 – Technische Daten von Messschurren [36], [33], [37]

Anforderung	**Quantifizierung**
Messgenauigkeit	98,0 % bis 99,5 %
Messbereich (CentRec500)	abgedeckt
Messbereich (allg.)	abgedeckt
Einfluss ρ_b	bis $\rho_b \pm 30$ % gering
Verschleiß und Wartung	gering
Temperaturbeständigkeit	> 400 °C
Schutz vor Abrasion	Gut
Staubschutz	unbekannt

Um eine konventionelle Messschurre vor den geforderten Temperaturen zu schützen, müssen die Wägezellen nach außen verlegt und alle produktberührenden Teile mit einem verschleiß- und temperaturbeständigen Material beschichtet werden. Dies dient auch dem Schutz vor Abrasionen. Der Verschleiß einer Messschurre ist dadurch ebenfalls geringer [36].

Rotorwaage

Das dritte Messverfahren, welches eine zur Masse proportionale Kraft misst, ist die Rotorwaage. Das erste Mal beschrieben wird das Prinzip im Patent von Hans Georg Faßbinder und Karl Brotzmann aus dem Jahr 1975 [38].

Die in Abb. 2.6 dargestellte Rotorwaage besteht aus einem Flügelrad, welches durch einen Motor angetrieben wird und den Bezugskörper darstellt. Das Schüttgut wird in axialer Nähe auf das Flügelrad aufgegeben und dann in radialer Richtung zu den Leitschaufeln des Flügelrades hin abtransportiert.

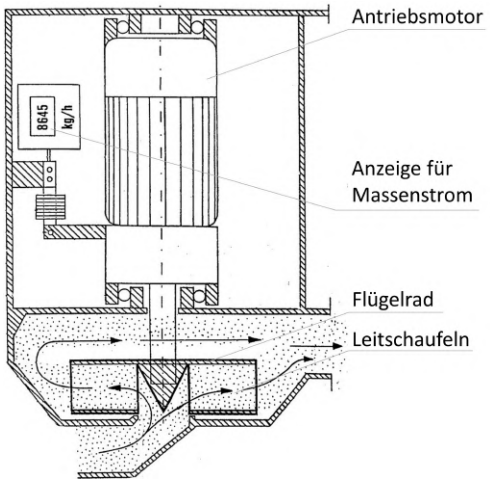


Abb. 2.6 – Schnittbild einer Rotorwaage [39]

Der Rotation wirkt eine Trägheitskraft entgegen: Die Corioliskraft. Diese wirkt auf die Teilchen des Schüttgutes. Die Corioliskraft ist proportional zur Masse der bewegten Teilchen und kann somit zur Bestimmung des Massenstroms genutzt werden [38].

Dazu wird der Antriebsmotor mit einer konstanten Drehzahl betrieben. Da sich das Drehmoment des Bezugskörpers (Flügelrad) entsprechend der Corioliskraft ändert, wirkt bei einem größeren Massenstrom auch eine größere Corioliskraft und damit Trägheit dem Antriebsdrehmoment des Motors entgegen. Diese Änderung lässt sich gut über die Leistungsaufnahme des Motors ermitteln und daraus der Massenstrom berechnen [38].

Die technischen Spezifikationen des Messverfahrens sind in Tabelle 2.6 aufgeführt.

Tabelle 2.6 – Technische Daten von Rotorwaagen [40]

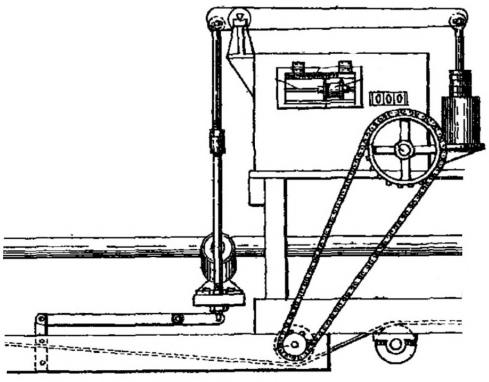
Anforderung	**Quantifizierung**
Messgenauigkeit	99,5 %
Messbereich (CentRec500)	abgedeckt
Messbereich (allg.)	abgedeckt
Einfluss ρ_b	gering
Verschleiß und Wartung	unbekannt
Temperaturbeständigkeit	150 °C
Schutz vor Abrasion	unbekannt
Staubschutz	unbekannt

2.3.3 Bandwaage

Bandwaagen messen die Menge eines Schüttgutes kontinuierlich, während des Transports auf einem Förderband. Dafür werden grundsätzlich zwei Größen benötigt: Das Gewicht des Materials am Messpunkt und die Geschwindigkeit des Materials auf dem Förderband. Aus diesen Werten kann dann der Massenstrom berechnet werden [41]. Die Geschwindigkeit wird heutzutage in der Regel über ein Messrad am Förderband, oder einen Drehgeber an einer Umlenktrommel ermittelt [37]. Das Gewicht wird über Wägezellen gemessen.

Erste Aufzeichnungen über Bandwaagen lassen sich bereits 1908 finden. In diesem Jahr hatte Herbert Lansing Merrick seinen Entwurf für eine Bandwaage patentieren lassen [42]. Da es zu dieser Zeit noch keine Wägezellen gab, wurde ein Teil des Förderbandes mit einem Wäge-Balken verbunden, um so das Gewicht des transportierten Materials zu ermitteln. Zur Auswertung und Aufsummierung des Gewichtes verwendet Merrick in seinem Entwurf einen mechanischen Integrator, siehe Abb. 2.7a. Dieser ist mit dem Förderband verbunden und bewegt sich dadurch proportional zur Geschwindigkeit des Förderbandes. Zusätzlich ist der Integrator mit dem Wägebalken verbunden. Die zeitliche Integration des Gewichtes ergibt die totale Durchsatzmenge bzw. das Gesamtgewicht des geförderten Materials [42].

Heutzutage werden zur Messung der Masse spezielle Wägerollen verwendet, welche auf einer Wägebrücke lagern, siehe Abb. 2.7b. Vor und hinter der Wägebrücke sind unabhängige Stützrollen fest im Bandgerüst angeordnet. Auf der Wägebrücke können eine oder mehrere Wägerollen angebracht sein [43]. Außerdem können in einem Förderband eine oder mehrere Wägeeinheiten verbaut werden. Die technischen Spezifikationen des Messverfahrens sind in Tabelle 2.7 aufgeführt.



(a) Darstellung einer Bandwaage mit mechanischem Integrator [42]

(b) Darstellung einer modernen Bandwaage mit Wägebrücke und Messrad [44]

Abb. 2.7 – Darstellungen von Bandwaagen

Die Temperaturbeständigkeit von Bandwaagen ist im Wesentlichen von dem verwendeten Transportband abhängig. Transportbänder aus Gummi sind zwar möglich, jedoch entsteht ein sehr hoher Verschleiß, da das Gummi kontinuierlich wegbrennt.

Tabelle 2.7 – Technische Daten von Bandwaagen [37], [45]

Anforderung	**Quantifizierung**
Messgenauigkeit	98 % bis 99 %
Messbereich (CentRec500)	abgedeckt
Messbereich (allg.)	abgedeckt
Einfluss ρ_b	gering
Verschleiß und Wartung	hoch
Temperaturbeständigkeit	von FB abhängig
Schutz vor Abrasion	unbekannt
Staubschutz	unbekannt

FB = Förderband

Die Bänder unterliegen damit hochfrequenten Wechselintervallen (zwei bis drei Monate), was einen hohen Wartungsaufwand bedeutet [46], [47], [48].

Mit einem Metallplattenband kann Schüttgut bei Temperaturen von über 600 °C problemlos transportiert werden. Sie werden beispielsweise in der Zement- oder Ziegelsteinproduktion eingesetzt. Allerdings eignen sich diese Bänder nur bedingt für den Einsatz in einer Bandwaage, da das Eigengewicht im Vergleich zum Gewicht des Schüttgutes verhältnismäßig hoch ist. Somit ist der Anteil des Metallplattenbandes an der Masse, die insgesamt verwogen wird, hoch. Dadurch sinkt wiederum die Genauigkeit der Verwiegung [49], [50].

2.3.4 Radiometrische Messverfahren

Zu den radiometrischen Messverfahren gehören:

- Radiometrische Bandwaage
- Radiometrische Freifallmessung

Die radiometrische Messung beruht auf dem Prinzip der Absorption radioaktiver Strahlung. Dabei werden Gamma-Strahlen von einer Strahlungsquelle ausgesendet und durchdringen das Schüttgut. Dadurch werden die Strahlen abgeschwächt. Je nach Materialdicke, Materialzusammensetzung und Materialdichte ist die Abschwächung unterschiedlich stark. Anschließend wird die abgeschwächte Strahlung von Detektoren gemessen und in ein Messsignal umgewandelt, welches proportional zur Schüttgutmasse ist [51]. Zusammen mit der Geschwindigkeit des Schüttgutes kann dann der Massenstrom berechnet werden.

Radiometrische Bandwaage

Da bei Bandwaagen Wägebrücken über Wägerollen in einem direkten Kontakt zum Transportband stehen, können Wägefehler aufgrund von Bandspannungseinflüssen

entstehen. Außerdem ist eine ständige Wartung der Anlage wegen der beweglichen Teile in einer Wägeeinheit unerlässlich [51]. Um diesen Problemen zu entgehen, wird bereits seit vielen Jahren die radiometrische Bandwaage in bestimmten Prozessen verwendet. Sie wird insbesondere unter schwierigen Bedingungen eingesetzt, in denen das Messgerät hohen Belastungen ausgesetzt wird, wie beispielsweise Staub oder extreme Temperaturen.

Radiometrische Bandwaagen bestehen, wie in Abb. 2.8 dargestellt, aus einer oder mehreren Strahlungsquellen, die sich über dem Förderband befinden und einem oder mehren Detektoren unterhalb des Förderbandes [51]. Die Geschwindigkeit des Förderbandes wird wie bei Bandwaagen über ein Messrad am Förderband oder einen Drehgeber an einer Umlenktrommel ermittelt. Die technischen Spezifikationen des Messverfahrens sind in Tabelle 2.8 aufgeführt.

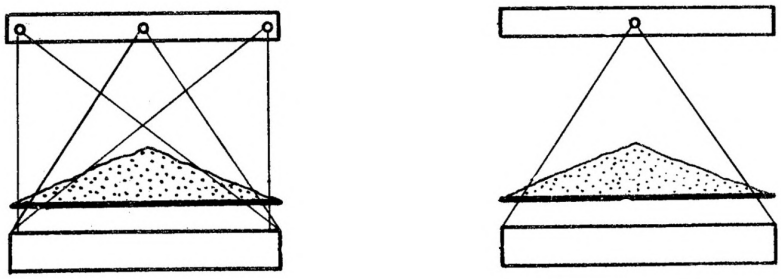


Abb. 2.8 – Darstellung einer radiometrischen Bandwaage mit einer (rechts) oder mehreren (links) Strahlungsquellen und je einem Detektor [51]

Tabelle 2.8 – Technische Daten von radiometrischen Bandwaagen [52]

Anforderung	**Quantifizierung**
Messgenauigkeit	98 % bis 99 %
Messbereich (CentRec500)	abgedeckt
Messbereich (allg.)	abgedeckt
Einfluss ρ_b	gering
Verschleiß und Wartung	von FB abhängig
Temperaturbeständigkeit	von FB abhängig
Schutz vor Abrasion	unbekannt
Staubschutz	gut

FB = Förderband

Die Temperaturbeständigkeit von Bandwaagen ist ebenfalls vom verwendeten Transportband abhängig. Die Aussagen zu einem Förderband aus Gummi sind aus Kapitel 2.3.3 übertragbar. Metallplattenbänder sind ebenfalls ungeeignet, da ein Metallplattenband aufgrund seiner hohen Masse eine große Menge an Gamma-Strahlung absorbiert. Je höher der Anteil an absorbierten Gamma-Strahlen vom Transportmedium ist, desto schwieriger ist es, den Anteil der Absorption des Schüttgutes zu ermitteln. Dadurch sinkt die Genauigkeit des Messgerätes [52].

Radiometrische Freifallmessung

Eine weitere Möglichkeit zur radiometrischen Messung ist die Messung in Rohrleitungen während des freien Falls. Abb. 2.9 zeigt eine Rohrleitung mit Material, die von einer Strahlungsquelle bestrahlt wird.

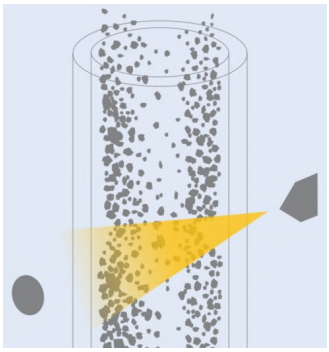


Abb. 2.9 – Darstellung einer radiometrischen Messung in einer Rohrleitung mit einer Strahlungsquelle und einem Detektor [53]

Entsprechend des Absorptionsprinzips wird auch hier die durch das Schüttgut abgeschwächte Strahlung gemessen und anschließend in ein Messsignal umgewandelt. [54] [52]. Die Geschwindigkeit kann dabei entweder mit einem anderen Messgerät parallel gemessen, oder einmalig für den Messpunkt berechnet/ermittelt und dann einkalibriert werden [52].

Die technischen Spezifikationen des Messverfahrens sind in Tabelle 2.9 aufgeführt. Um die Genauigkeit nicht durch den hohen Absorptionsgrad eines Metallrohres zu beeinflussen, sind laut Hersteller für den Messbereich Rohrstücke aus Glas oder Keramik zu bevorzugen. Die Temperaturbeständigkeit des Messverfahrens ist dann von der zulässigen Temperatur des Rohrstückes abhängig.

Tabelle 2.9 – Technische Daten des Verfahrens radiometrische Freifallmessung [52]

Anforderung	**Quantifizierung**
Messgenauigkeit	97 % bis 98 %
Messbereich (CentRec500)	abgedeckt
Messbereich (allg.)	abgedeckt
Einfluss ρ_b	gering
Verschleiß und Wartung	gering
Temperaturbeständigkeit	von RM abhängig
Schutz vor Abrasion	unbekannt
Staubschutz	unbekannt

RM = Rohrmaterial

2.4 Volumetrische Messverfahren

Die Gruppe der volumetrischen Messverfahren ist deutlich kleiner als die der gravimetrischen und umfasst drei Messverfahren:

- Optische Bandwaage
- Mikrowellensensor
- Kapazitiver Sensor

Optische Bandwaage

Ähnlich wie bei herkömmlichen oder radiometrischen Bandwaagen arbeitet auch eine optische Bandwaage mit einem Förderband. Jedoch wird hierbei nicht die Masse, sondern das Volumen gemessen. Diese Art der Bandwaage ist neu und kam erst ca. 2010 auf den Markt.

Abb. 2.10 zeigt eine optische Bandwaage, welche über einem Förderband angebracht ist. Sie besteht aus einer Halterung, in der sich ein elektro-optischer Sensor befindet. Dieser ist quer zur Bewegungsrichtung über dem Förderband positioniert und erfasst die Querschnittsfläche des Schüttguts. Parallel wird die Geschwindigkeit des Förderbandes gemessen. Aus diesen beiden Werten lässt sich nun der Volumenstrom berechnen und sofern das Schüttgewicht bekannt ist daraus dann der Massenstrom [55] [56].

Abb. 2.10 – Darstellung einer optischen Bandwaage [56]

Die optische Bandwaage hat gegenüber einer herkömmlichen Bandwaage ähnliche Vorteile wie eine radiometrische Bandwaage. Sie besitzt keine beweglichen Teile und hat keinen direkten Kontakt zum Förderband. Dadurch entstehen weniger Messfehler und das Messgerät muss seltener gewartet werden[56]. Die technischen Spezifikationen des Messverfahrens sind in Tabelle 2.10 aufgeführt.

Tabelle 2.10 – Technische Daten von optischen Bandwaagen [55]

Anforderung	Quantifizierung
Messgenauigkeit	99 %
Messbereich (CentRec500)	abgedeckt
Messbereich (allg.)	abgedeckt
Einfluss ρ_b	hoch
Verschleiß und Wartung	von FB abhängig
Temperaturbeständigkeit	von FB abhängig
Schutz vor Abrasion	unbekannt
Staubschutz	unbekannt

FB = Förderband

Mikrowellensensor

Das zugrunde liegende Prinzip von Mikrowellensensoren ist die Nutzung des Doppler-Effekts. Die Idee, diesen Effekt zur Messung von Massenströmen zu nutzen, stammt ursprünglich aus der Medizintechnik. Dort werden ähnliche Messgeräte mit Ultraschallwellen verwendet, um die Geschwindigkeit von Blut in Blutgefäßen zu messen [57, 58]. Aus diesem Messgerät wurde dann ein Sensor entwickelt, um die Geschwindigkeit von Flüssigkeiten in Rohrleitungen zu messen [59].

Im Jahr 1996 hat sich Kenneth L. Perdue den Entwurf eines Mikrowellensensor patentieren lassen, welcher den Massenfluss eines sich bewegenden Mediums messen kann [58]. Das Messgerät besteht aus einem Sendeempfänger, welcher elektromagnetische Wellen bekannter Frequenz (Mikrowellenbereich) in einen vom Medium durchströmten Bereich aussendet. Die Wellen werden vom Medium, welches sich durch den Messbereich bewegt, reflektiert und vom Sendeempfänger empfangen. Abb. 2.11 zeigt zwei Rohrleitungen mit einem Sendeempfänger.

(a) Rohrleitung ohne Materialstrom. Es werden keine Wellen reflektiert.

(b) Rohrleitung mit Materialstrom. Es kommt zur Reflektion der Wellen, zurück zum Sendeempfänger.

Abb. 2.11 – Zwei Skizzen von Mikrowellensensoren in einer Rohrleitung [58]

Der Empfänger kann einerseits die Verschiebung der Frequenz (Doppler-Verschiebung /- Effekt), gegenüber der Ausgangsfrequenz messen und darüber die Geschwindigkeit des Materials berechnen. Andererseits kann der Sendeempfänger die Menge der reflektierten elektromagnetischen Wellen messen, welche proportional zur Kon-

zentration des Mediums ist. Aus diesen beiden Größen kann dann in bekannter Weise der Massenstrom berechnet werden [58]. Die technischen Spezifikationen des Messverfahrens sind in Tabelle 2.11 aufgeführt.

Tabelle 2.11 – Technische Daten von Mikrowellensensoren [60]

Anforderung	**Quantifizierung**
Messgenauigkeit	90 % bis 95 %
Messbereich (CentRec500)	abgedeckt
Messbereich (allg.)	abgedeckt
Einfluss ρ_b	hoch
Verschleiß und Wartung	unbekannt
Temperaturbeständigkeit	$> 400\,°C$
Schutz vor Abrasion	unbekannt
Staubschutz	unbekannt

Kapazitiver Sensor

Ähnlich wie die vorherigen beiden Messverfahren arbeitet auch ein kapazitiver Sensor berührungsfrei. Die Funktionsweise von kapazitiven Sensoren wurde 1972 von Theo und Karl Fett patentiert [61].

Abb. 2.12 zeigt die Skizze eines kapazitiven Sensors. Hauptbestandteil dieser Sensoren ist ein Plattenkondensator, bestehend aus zwei metallischen Platten, die, in einem elektrisch und magnetisch nicht leitenden Rohr, gegenüberliegend angeordnet sind. Das Dielektrikum des Kondensators wird durch das strömende, zu messende Medium gebildet, an dem eine hohe, senkrecht zur Strömungsrichtung ausgerichtete, Spannung anliegt [61].

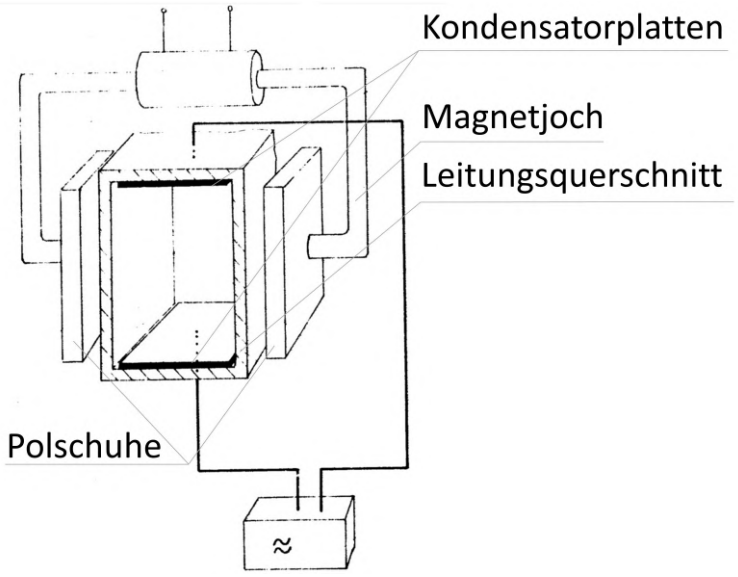


Abb. 2.12 – Skizze eines Kapazitiven Sensors [61]

Beim Durchströmen des Messbereiches wird das polarisierte Dielektrikum auf der gesamten Kondensatorbreite von einem senkrecht zur Strömungs- und Spannungsrichtung liegenden Magnetfeld durchsetzt. Der Kraftfluss des magnetischen Feldes wird über ein Magnetjoch mittels Polschuhen aufgenommen und ist ein lineares Maß für den Durchfluss. Aus dem Durchfluss kann dann wiederum der Massenfluss berechnet werden[61]. Die technischen Spezifikationen des Messverfahrens sind in Tabelle 2.12 aufgeführt.

Tabelle 2.12 – Technische Daten von kapazitiven Sensoren [62]

Anforderung	**Quantifizierung**
Messgenauigkeit	95 % bis 98 %
Messbereich (CentRec500)	abgedeckt
Messbereich (allg.)	abgedeckt
Einfluss ρ_b	hoch
Verschleiß und Wartung	unbekannt
Temperaturbeständigkeit	$> 400\,°C$
Schutz vor Abrasion	unbekannt
Staubschutz	unbekannt

2.5 Variantenvergleich

Die Messverfahren werden nun in einem Variantenvergleich gegenübergestellt. Das Ziel dieses Variantenvergleiches ist es, die Vor- und Nachteile der einzelnen Messverfahren aufzuzeigen, um dann ein geeignetes Verfahren auf der Basis einer objektiven Beurteilung auswählen zu können.

Die Bewertung der Kriterien sowie die Informationen zu den Messverfahren sind in der Tabelle 2.13 zu sehen. Die hinterlegte Farbe zu jedem Feld steht für die qualitative Bewertung des Kriteriums für das jeweilige Verfahren.

- grün = Anforderung erfüllt
- gelb = unklar
- rot = Anforderung nicht erfüllt

Da die Anforderungen

- Verschleiß und Wartung
- Schutz vor Abrasion
- Staubschutz

aus dem Lastenheft in Tabelle 2.1 meistens unbekannt und daher wenig aussagekräftig sind, werden sie nicht in Tabelle 2.13 aufgeführt.

Tabelle 2.13 – Vergleich der einzelnen Messverfahren. Bewertet wurden ausgewählte Kriterien aus dem Lastenheft. Die Daten stammen aus Gesprächen mit diversen Herstellern. Die fettgedruckten Messverfahren erfüllen alle Anforderungen.

	Messverfahren	Genauigkeit	Messbereich	Einfluss der ρ_b	Temperaturbeständigkeit
Gravimetrisch	**Behälterdurchlaufwaage**	99,75-99,9 %	abgedeckt	gering	eventuell bis 400 °C
	Behälterwaage	99-99,5 %	abgedeckt	gering	> 400 °C
	Differentialdosierwaage	99,5 %	abgedeckt	gering	> 400 °C
	Prallplattenwaage	98-99 %	abgedeckt	hoch	230 °C
	Messschurre	98-99,5 %	abgedeckt	Bis ± 30% gering	> 400 °C
	Rotorwaage	99,5 %	abgedeckt	gering	150 °C
	Bandwaage	98-99,5 %	abgedeckt	gering	Gummi FB (300-500 °C); Metallplattenband (>600 °C)
	Radiomet. Bandwaage	98-99 %	abgedeckt	gering	Gummi FB (300-500 °C); Metallplattenband (>600 °C)
	Radiomet. Freifall Messung	97-98 %	abgedeckt	gering	Durch Rohrmaterial begrenzt
Volumetrisch	Optische Bandwaage	99 %	abgedeckt	hoch	Gummi FB (300-500 °C); Metallplattenband (>600 °C)
	Mikrowellensensor	90-95 %	abgedeckt	hoch	> 400 °C
	Kapazitiver Sensor	95-98 %	abgedeckt	hoch	120 °C

grün = Anforderung erfüllt; gelb = unklar; rot = Anforderung nicht erfüllt;
ρ_b = Schüttgutdichte; FB = Förderband

Genauigkeit

Die Genauigkeit der Massenstrommessung soll $> 97\,\%$ sein. Bis auf den kapazitiven- sowie den Mikrowellensensor wird die Anforderung von allen Messgeräten erfüllt. Mikrowellen- und kapazitive Sensoren werden hauptsächlich für die Massenstrommessung in pneumatischen Leitungen eingesetzt. Sie lassen sich zwar auch für die Messung von Schüttgut verwenden, jedoch ist die Genauigkeit dann geringer [62, 60].

Messbereich

Der Messbereich eines Messverfahrens lässt sich meistens nicht ohne weiteres eindeutig bestimmen. Angaben dazu sind oft Schätzwerte und außerdem abhängig von dem jeweiligen Schüttgut und Einsatzort. Außerdem sind die meisten Messgeräte in vielen verschiedenen Konfigurationen und Größen verfügbar, wobei jeweils ein anderer Messbereich abgedeckt wird. In den Gesprächen hat sich herausgestellt, dass alle untersuchten Messverfahren den gewünschten Bereich von 0,3 kg/s bis 3 kg/s abdecken können und damit die Anforderung erfüllen.

Einfluss der Schüttgutdichte

Entsprechend der vorangestellten Erläuterung zur volumetrischen Massenstrommessung kann kein volumetrisches Verfahren die Anforderung an einen geringen Einfluss der Schüttgutdichte auf das Messergebnis erfüllen, da diese definitionsgemäß Bestandteil der Berechnung des Massenstromes ist und somit immer einen Einfluss hat bei diesen Verfahren.

Im Gegensatz dazu erfüllen bis auf zwei Ausnahmen alle gravimetrischen Messgeräte die Anforderung. Die Ausnahmen sind zum einen die Prallplatte, bei der die

Schüttgutdichte einen starken Einfluss auf das Messergebnis hat. Beeinflusst von der Schüttgutdichte, wenn auch nur gering, ist das Messergebnis einer Messschurre. Hierbei können Schwankungen in der Schüttgutdichte von bis zu 30 % auftreten, ohne dass die Messgenauigkeit beeinträchtigt wird [36].

Temperaturbeständigkeit

Der kritischste Punkt bei der Suche nach einem geeigneten Messverfahren für CentRec®-Receiver ist die Temperaturbeständigkeit des Messgerätes. Zwar ist die Massenstrommessung von Schüttgütern gut erforscht und weit verbreitet, jedoch gibt es nur sehr wenige Anwendungsfälle, bei denen Temperaturen <= 400 °C auftreten. Gerade einmal die Hälfte der Messverfahren erfüllt die Anforderung ohne Einschränkungen. Drei Messverfahren - Prallplattenwaage, Rotorwaage und kapazitive Sensoren - sind nicht geeignet. Bei weiteren drei Messverfahren: Bandwaage, radiometrische Bandwaage und optische Bandwaage ist die Temperaturbeständigkeit vom Material des Förderbandes abhängig, siehe Kapitel 2.3.3 und 2.3.4.

Anhand des Variantenvergleiches aus Tabelle 2.13 können die folgenden fünf Messverfahren ausgeschlossen werden, da sie die Anforderungen nicht vollständig erfüllen:

- Prallplattenwaage
- Rotorwaage
- Optische Bandwaage
- Kapazitiver Sensor
- Mikrowellensensor

Die übrigen sieben Verfahren, welche die Anforderungen erfüllen sind:

- Messschurre
- Behälterdurchlaufwaage
- Behälterwaage
- Differentialdosierwaage
- Bandwaage
- radiometrische Bandwaage
- radiometrische Freifall-Messung

Diese Messverfahren werden nun detailliert und qualitativ untersucht, um weitere Unterschiede herauszustellen und aus den verbleibenden Verfahren einen Favoriten wählen zu können, der dann experimentell untersucht werden kann.

Messschurre

Das Prinzip der Messschurre ist nicht komplex und das Messgerät relativ klein. Das Verfahren erfüllt alle Anforderungen. Durch die Beschichtung der produktberührenden Teile mit einem speziellen Material kann das Messgerät vor Verschleiß, Abrasion und Wärme geschützt werden [36].

Das Verfahren könnte geeignet sein.

Behälterdurchlaufwaage

Die Behälterdurchlaufwaage ist ein genaues Messverfahren und erfüllt ebenfalls alle Anforderungen. Ein Umbau, welcher die Temperaturbeständigkeit auf 400 °C erhöht ist jedoch mit hohen Kosten und möglicherweise Folge-Problemen verbunden [25].

Das Verfahren wird als ungeeignet eingestuft.

Behälter- und Differentialdosierwaage

Beide Messverfahren erfüllen alle Anforderungen. Die Verfahren könnten geeignet sein.

Bandwaage

Eine Bandwaage wird meistens dann zur Verwiegung von Schüttgut verwendet, wenn das Förderband sowieso als Transportmittel existiert oder geplant wird. Für den Fall eines Solarreceivers ist ein Förderband grundsätzlich ungeeignet. Förderbander brauchen verhältnismäßig viel Platz [45]. Auf der Turmspitze eines Solarturmkraftwerkes gibt es nur begrenzten Raum, der genutzt werden kann. Somit sind Anlagen, die weniger Platz zur Förderung und Messung des Schüttgutes benötigen, sinnvoller.

Ein weiteres Problem ist das Material des Förderbandes, siehe Kapitel 2.3.3. Der Wechsel eines Gummi-Bandes wäre ca. alle drei Monate notwendig. Metallplattenbänder hingegen haben ein derart hohes Eigengewicht, dass die Genauigkeit darunter leiden könnte. Darüber hinaus sind Bandwaagen im Allgemeinen teuer und schwer.

Das Verfahren wird als ungeeignet eingestuft.

Radiometrische Bandwaage

Die Probleme einer Bandwaage lassen sich auf radiometrische Bandwaagen übertragen. Das Verfahren wird als ungeeignet eingestuft.

Radiometrische-Freifallmessung

Das Prinzip der radiometrischen Messung ist grundsätzlich vielversprechend. Bei der radiometrischen Freifallmessung kann der Schüttgutstrom bei hohen Temperaturen mit einer ausreichenden Genauigkeit gemessen werden.

Ein Nachteil dieses Verfahrens ist der komplizierte Genehmigungsprozess. Da hierfür radioaktive Isotope verwendet werden, muss einerseits eine strahlenschutzbeauftragte Person ernannt werden, die einen dreitägigen Lehrgang absolvieren muss. Andererseits muss eine behördliche Erlaubnis eingeholt werden. Der Genehmigungsprozess dafür dauert in der Regel zwei Monate [52].

Für das aktuelle Projekt wäre dieses Verfahren zwar sehr interessant, der Genehmigungsprozess jedoch zu langwierig gewesen. Deshalb wird dieses Verfahren für eine weiterführende Untersuchung in dieser Arbeit als ungeeignet eingestuft.

Nichtsdestotrotz ist die radiometrische Freifallmessung ein vielversprechendes Verfahren, um insbesondere auslassseitig bei Temperaturen von bis zu 1000 °C messen zu können. Es sollte zukünftig genauer betrachtet werden.

2.6 Fazit der Technologie-Recherche

Die Untersuchung und Bewertung der vorgestellten Messverfahren hat ergeben, dass zwei Verfahren für die Massenstrommessung im Einlassbereich eines CentRec® -Receivers geeignet sein könnten und die Anforderungen erfüllen. Diese sind:

- Messschurre
- Behälter-/ Differentialdosierwaage

Der Aufbau einer Differentialdosierwaage ist systematisch bereits in vielen Anlagen vorhanden, da sich oft ein Vorratsbehälter mit Dosierorgan über dem CentRec-Receiver befindet, der für die Partikelzufuhr in den Receiver zuständig ist. Die Vorratsbehälter könnte man auf Wägezellen lagern und würde so bereits die Basis für eine Differentialdosierwaage erhalten. Ca. 90 % der Hardware, die für eine Differentialdosierwaage benötigt wird, ist in diesen Anlagen bereits vorhanden.

Daher wird die Differentialdosierwaage für die weiterführenden Untersuchungen ausgewählt. Eine solche Waage ist im CentRec300-Teststand in Stuttgart bereits verbaut und steht für Experimente zur Verfügung.

3 Vorbereitungen für die experimentellen Untersuchungen

Die im CentRec300-Teststand verwendete Differentialdosierwaage (DDW) hat bei bisherigen Experimenten keine zufriedenstellenden Ergebnisse geliefert. Jedoch wurden bisher weder die Ergebnisse, noch die DDW selbst ausführlich Untersucht. Da das Messverfahren theoretisch eine hohe Genauigkeit aufweist, soll die DDW nun genauer untersucht und folgende Fragen geklärt werden:

- Ist die DDW für die Massenstrommessung in einem CentRec® -Receiver geeignet?
- Wie hoch ist die Genauigkeit der DDW und liegt diese oberhalb der geforderten 97 %?
- Gibt es Probleme bei dem bestehenden Aufbau?
- Falls ja, was kann verbessert werden?

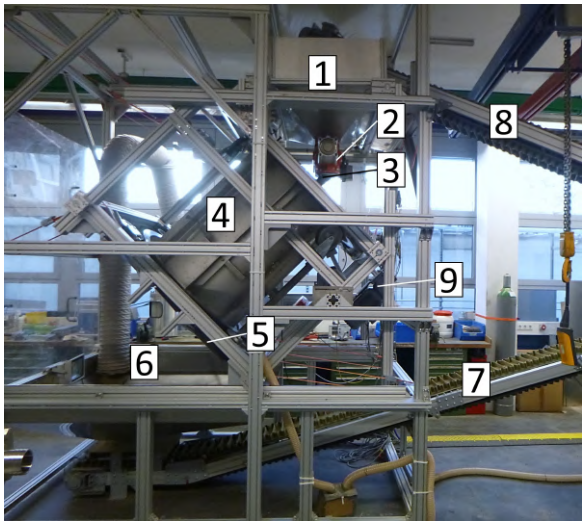
Das Ziel der experimentellen Untersuchungen ist es, diese Fragen zu beantworten. Außerdem sollen die dabei entstehenden Daten Grundlagen für ein Verständnis von Massenstrommessungen und der vorhandenen DDW schaffen.

Dazu wird im folgenden der aktuelle Messaufbau analysiert, erläutert und auf Problemstellen hin untersucht. Außerdem wird eine Messmethode erarbeitet mit der die DDW untersucht werden kann. Anschließend wird ein Plan für die experimentellen Untersuchungen vorgestellt.

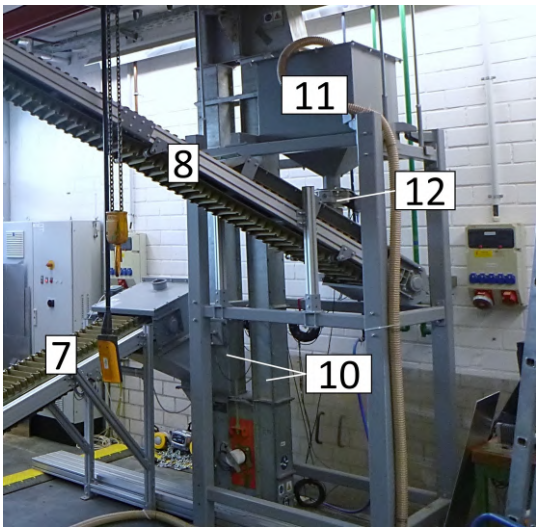
3.1 Aufbau des Teststands

Der Teststand wurde gebaut um den Realbetrieb eines CentRec-Receivers zu untersuchen und Simulationsergebnisse zu validieren. Dieser Teststand wurde für Tests mit kalten Partikeln (Kalt-Tests) ausgelegt. Der Teststand ist in den Abbildungen 3.1, 3.2 und 3.3 dargestellt. Die folgenden Erläuterungen beziehen sich auf diese Abbildungen.

Der Teststand umfasst einen drehbar gelagerten Receiver, sowie einen in sich geschlossenen Partikelkreislauf. Über dem Receiver befindet sich die DDW. Der



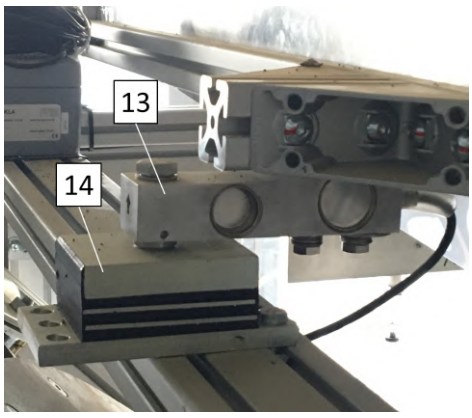
(a) Seitenansicht des CentRec300-Teststands. Zu sehen ist: 1 = Vorratsbehälter, 2 = Quetschventil, 3 = Zuführungsrohr, 4 = Receiver, 5 = Sammelring, 6 = Sammelbehälter, 7 = unteres Förderband, 8 = oberes Förderband, 9 = Antriebsmotor des Receivers.



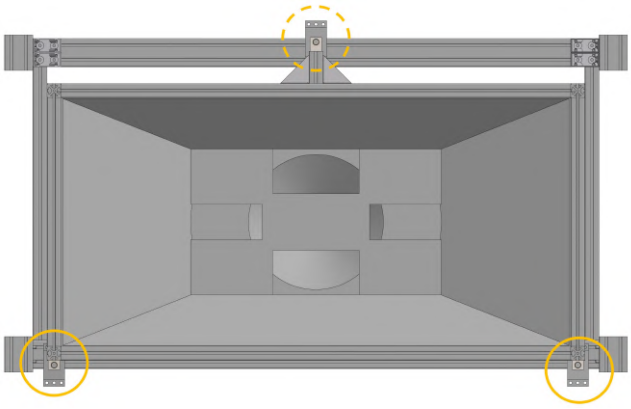
(b) Darstellung des Fördersystems. Zu sehen ist: 10 = Becherwerk, 11 = Pufferbehälter, 12 = zweites Quetschventil.

Abb. 3.1 – Aufbau des CentRec300-Teststands

Vorratsbehälter (1) der DDW ist auf drei Wägezellen (13) gelagert. Abb. 3.2a zeigt exemplarisch eine der drei Wägezellen. Diese sind wiederum jeweils auf einem Elastomerlager (14) befestigt und mit einem Gestell aus Item-Profilen verbunden. Über die Elastomerlager können Vibrationen gedämpft werden, welche beim Betrieb des Receivers entstehen und potentiell das Messergebnis beeinflussen könnten. Die Anordnung der Wägezellen ist in Abb. 3.2b dargestellt.

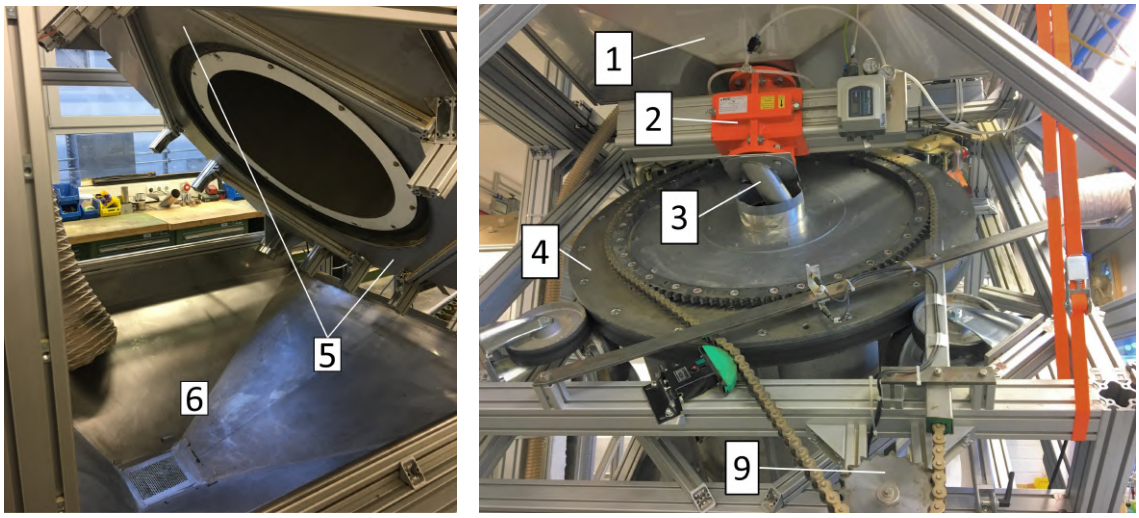


(a) Eine von drei Wägezellen auf denen der Vorratsbehälter gelagert wird. Unter jeder Wägezelle (1) befindet sich ein Elastomerlager (2) zur Kompensation der Vibrationen.



(b) Anordnung der Wägezellen. Die Positionen der Wägezellen sind eingekreist. Die Position der Wägezelle aus Abb. 3.2a ist mit einem gestrichelten Kreis markiert.

Abb. 3.2 – Wägezellen der Differentialdosierwaage



(a) Sammelring (5) des Receivers, der die aus dem Receiver kommenden Partikel auffängt und über einen Auslass in den Sammelbehälter (6) leitet

(b) Zu sehen ist der Auslass des Vorratsbehälters (1) mit daran abgeschlossenem Quetschventil (2) und Zuführungsrohr (3). Außerdem ist der Antrieb des Receivers zu erkennen. Die Kette liegt um das große Zahnrad des Receivers (4) und das kleine des Antriebs-Motors (9).

Abb. 3.3 – Bilder vom CentRec300-Teststand

Am Auslass des Vorratsbehälters befindet sich ein Quetschventil (2) welches das Dosierorgan darstellt. Das Ventil öffnet und schließt den Auslass über zwei pneumatische betriebene Kolben. Abb.3.3b zeigt die Rückansicht des Receivers mit Quetschventil und Auslass. Vom Quetschventil aus werden die Partikel von einem Zuführungsrohr (3) in den oberen Teil des Receivers (4) geleitet. Dort werden diese dann beschleunigt und bewegen sich langsam abwärts. Der Receiver ist auf mehreren Rollen gelagert und wird von einer Kette angetrieben. Diese ist über ein Zahnrad mit dem Antriebsmotor (9) verbunden, wie in Abb.3.3b zu sehen ist.

Nachdem die Partikel am unteren Teil des Receivers angelangt sind, werden sie von einem Sammelring (5) aufgefangen und gelangen, wie in Abb. 3.3a dargestellt, durch einen Auslass in den Sammelbehälter (6). Unter dem Auslass des Sammelbehälters befindet sich das untere Förderband (7). Dieses Transportiert die Partikel zu einem Becherwerk (10). Von dort aus werden sie in einen Pufferbehälter (11) gefördert. Unter dem Pufferbehälter befindet ich ein weiteres Quetschventil (12), welches die Partikel auf das obere Förderband (8) dosiert. Dieses transportiert die Partikel zurück in den Vorratsbehälter der DDW.

Die Partikel, die aktuell in dem Teststand verwendet werden tragen die Bezeichnung: SSintered Bauxite". Die Partikel sind vom Hersteller Saint-Gobain. Die Partikel haben einen gemittelten Durchmesser von 0,95 mm und ein Schüttgewicht von 2040 kg/l. Die Rundheit der Partikel und die Kugelform betragen 0,9 nach Krumbein und Sloss. Die Informationen wurden dem Datenblatt in Anhang A.2 entnommen.

3.2 Messmethode

Die gewählte Messmethode für die Untersuchung der DDW ist Auslitern aus dem Vorratsbehälter. Der austretende Massenstrom wird dabei mit der DDW gemessen. Zusätzlich wird eine Referenzmessung mit einer zweiten Waage durchgeführt, um die Ergebnisse der DDW überprüfen zu können. Dazu wird das Zuführungsrohr aus Abb. 3.3b um 180° gedreht, sodass die Partikel nicht in den Receiver, sondern davon weggeleitet werden. Die Partikel werden von einem Auffangbehälter gesammelt. Dieser wird von der zweiten Waage verwogen.

Beide Waagen messen die Masse in einem regelmäßigen Intervall und versehen die Werte mit einem Zeitstempel. Das Ziel ist es, eine bestimmte Masse an Partikeln aus dem Vorratsbehälter auszulitern und anschließend über einen Startzeitpunkt, t_S, mit einem Startgewicht, m_S, sowie einen Endzeitpunkt, t_E, mit einem Endgewicht, m_E, den Massenstrom, $\dot{m}$, zu berechnen:

$$\dot{m} = \frac{m_E - m_S}{t_E - t_S} \tag{3.1}$$

Die Messwerte beider Waagen lassen sich als CSV-Datei exportieren und daraus die jeweiligen Start- und Endzeitpunkte ermitteln. Aus den Messwerten der beiden Waagen wird jeweils der Massenstrom berechnet und anschließend verglichen. Durch den Vergleich sollen Abweichungen der Ergebnisse der DDW, von den Ergebnissen der Referenzmessung, ermittelt werden.

Es werden Blenden mit einem definierten Durchmesser genutzt, um einen bestimmten Massenstrom einzustellen. Da der Massenstrom vom Durchmesser der Blende abhängt, kann so eine hohe Reproduzierbarkeit und Stabilität des Partikelmassenstroms erlangt werden.

Um den geforderten Messbereich des CentRec500-Receivers von 0,3 kg/s bis 3 kg/s abzudecken, wurden folgende Massenströme zur experimentellen Untersuchung ausgewählt:

- 0,5 kg/s
- 1,5 kg/s
- 3 kg/s

Zur Bestimmung des Blendendurchmessers, der für den jeweiligen Massenstrom benötigt wird, wird folgende Formel, nach [63, 12.1.1] angewendet:

$$\dot{m} = 0,58 \cdot \rho_b \cdot \sqrt{g} \cdot (d - k \cdot d_P)^{2,5} \cdot k_\theta \tag{3.2}$$

Umgestellt nach dem Blendendurchmesser d ergibt sich:

$$d = \left(\frac{\dot{m}}{0,58 \cdot \rho_b \cdot \sqrt{g} \cdot k_\theta} \right)^{0,4} + k \cdot x \tag{3.3}$$

Die Bedeutung und Werte für die Variablen in Gleichung (3.2) sind in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Tabelle 3.1 – Bedeutung und Werte der Variablen aus Gleichung (3.2)

Variable	Beschreibung	Wert
$\dot{m}$	Massenstrom	0,5 kg/s, 1,5 kg/s, 3 kg/s
ρ_b	Schüttgutdichte	2040 kg/m^3
d	Blendendurchmesser	30 mm, 46 mm, 60 mm
k	Anpassungsfaktor Partikelform	1,6
d_P	Partikeldurchmesser	0,95 mm
k_θ	Anpassungsfaktor Trichterneigungswinkel	1

Die Schüttgutdichte und der Partikeldurchmesser lassen sich aus dem Datenblatt der im Teststand verwendeten Partikel ablesen. Der Anpassungsfaktor k bezieht sich auf die Partikelform. $k = 1,6$, für runde und, $k = 2,4$, für nicht runde Partikel [63, 12.1.1]. Die Partikel sind rund, aber keine ideale Sphäre (0,9 nach Krumbein und Sloss). Daher wird, $k = 2$, ausgewählt. Der Anpassungsfaktor für den Trichterneigungswinkel, welcher in Abb. 3.4a skizziert ist, beträgt bei einem Winkel $\geq 45° = 1$, was auf den verwendeten Vorratsbehälter zutrifft.

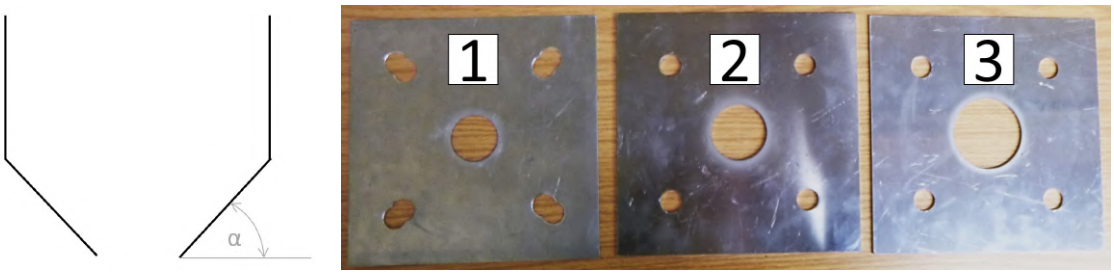
Die mit Formel 3.3 berechneten, sowie die gewählten Blendendurchmesser sind in Tabelle 3.2 notiert. Die Ergebnisse der Formel sind als Abschätzung zu betrachten. Aufgrund der vielen Faktoren, die einen Einfluss auf den Massenstrom haben, kann dieser nicht exakt berechnet werden. Die fertigen Blenden sind in Abb. 3.4b dargestellt.

Tabelle 3.2 – Die mit Gleichung (3.3) berechneten und ausgewählten Durchmesser für die Blenden.

Nr.	$\dot{m}$ [kg/s]	d_{ber} [mm]	d_{gew} [mm]
1	0,5	29,84	30
2	1,5	45,84	46
3	3	59,88	60

$\dot{m}$ = Massenstrom;
d_{ber} = berechneter Blendendurchmesser;
d_{gew} = gewählter Blendendurchmesser

Die Blenden werden zwischen Quetschventil und Zuführungsrohr an das Ventil angeflanscht. Der maximale Durchmesser der Blende ist limitiert durch den Lochkreis des Flansches. Der Durchmesser beträgt 300 mm. Abzüglich des Radius der



(a) Skizze des Trichterneigungswinkels α **(b)** Darstellung der, für das Experiment verwendeten Blenden. 1 = 30 mm, 2 = 46 mm und 3 = 60 mm

Abb. 3.4 – Skizze des Trichterneigungswinkels und Darstellung der Blenden

Bohrungen (9 mm) und einem Sicherheitsabstand zwischen Bohrung und Blende (5 mm) beträgt der maximale Durchmesser der Blende:

$$d_{\max} 300\,\text{mm} - 9\,\text{mm} - 5\,\text{mm} = 286\,\text{mm} \tag{3.4}$$

Dies entspricht nach Gleichung (3.3) einem Massenstrom von 159,29 kg/s.

3.3 Analyse des Messaufbaus

Die bei der DDW verwendeten Kraftmesser sind 3 Wägezellen mit einer Nennkraft von 500 kg. Die Nennkraft entspricht der maximalen Masse, die die Zelle mit den angegebenen Toleranzen messen kann. Insgesamt kann die DDW also ein Gewicht von 1500 kg inklusive des Eigengewichts von ca. 100 kg messen.

Jede Wägezelle gibt ein Signal im Bereich von 0,05 mV/V bis 2 mV/V, proportional zur Masse, mit der sie belastet wird aus. Die Signale werden anschließend von einem Messverstärker aufbereitet. Wie in Abb. 3.5 zu sehen ist, sind die Wägezellen einzeln an die Eingänge des Messverstärkers angeschlossen.

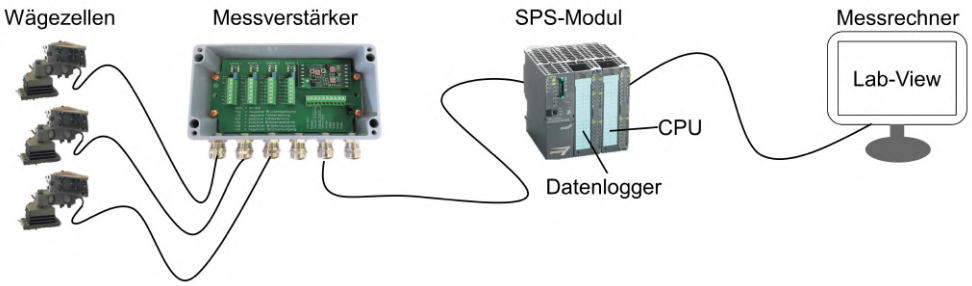


Abb. 3.5 – Messaufbau für die, im CentRec300 Teststand verbaute, DDW. Von den Wägezellen bis zum Messrechner. Die Bilder des Messverstärkers und des SPS-Moduls wurden entnommen aus: [64, 65]

Die Signale werden im Messverstärker parallel geschaltet und dadurch aufsummiert sowie anschließend verstärkt. Das Signal von 0,05 mV/V bis 2 mV/V wird dabei in

4 mA bis 20 mA umgewandelt. Dieses Signal kann nun weiter verarbeitet werden und wird zu einem SPS-Modul weitergeleitet.

Das Modul besteht aus einem Datenlogger und einer CPU. Der Datenlogger wird von einer CPU angesprochen, und wandelt das analoge Signal in ein digitales um. Anschließend wird das Signal per Ethernet an den Messrechner bzw. die Software LabView übermittelt. Dort befindet sich eine grafische Benutzeroberfläche zur Steuerung des Teststandes. Neben anderen Parametern lässt sich hier das Füllgewicht sowie der Massenstrom, der den Vorratsbehälter verlässt, einsehen. Die Bezeichnungen der einzelnen Komponenten befinden sich in Tabelle 3.3.

Tabelle 3.3 – Komponenten des Messaufbaus der DDW

Komponente	**Bezeichnung**
Wägezellen	ME-Messysteme: LCS-130, Nennlast: 500 kg
Messverstärker	ME-Messsysteme: GSV-15KL4
Datenlogger	Yaskawa: Analoges Eingabe-Modul 331-1KF01
CPU	Yaskawa: Programmierbare Step7 CPU 315-4NE23

Aus dem vorliegenden Messaufbau ergeben sich scheinbar keine Probleme. Deshalb soll dieser genauer untersucht werden. Dazu wird ein Ishikawa- bzw. Ursache-Wirkungs-Diagramm erstellt. Mit dieser Methode lassen sich Ursache-Wirkungs Zusammenhänge strukturiert darstellen und dadurch Kausalbeziehungen zwischen Fehlern und deren Ursache ermitteln [66]. Mit dem Diagramm in Abb. 3.6 sollen die Einflüsse auf die Massenstrommessung möglichst umfangreich dargestellt, und mögliche Fehlerursachen im Messaufbau aufgedeckt werden.

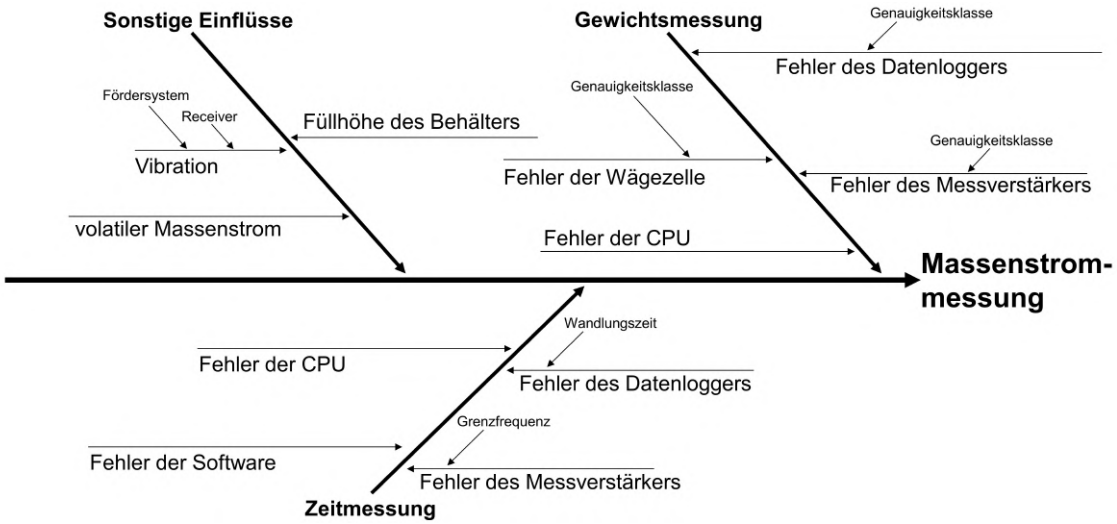


Abb. 3.6 – Darstellung eines Ishikawa-Diagramms, um die Problemursachen aufzuzeigen, die einen Einfluss auf die Massenstrommessung haben können

Die drei Haupt-Einflüsse sind:

- Gewichtsmessung
- Zeitmessung
- Sonstige Einflüsse

Eine Massenstrommessung bei einer DDW besteht im Grunde genommen aus Zeit- und Gewichtsmessungen. Aus den Werten, wird anschließend der Massenstrom, $\dot{m}$, berechnet:

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \tag{3.5}$$

Die Unsicherheiten, die bei der Messungen der Masse, m, und Zeit, t, auftreten, haben demnach einen Einfluss auf das Ergebnis der Massenstrommessung.

Die dritte Problemursache sind sonstige Einflüsse wie Vibration, ein volatiler, also nicht konstanter Massenstrom und die Füllhöhe des Behälters, sowie der davon abhängige Staudruck. Es wird vermutet, dass von den drei Untereinflüssen die Vibration die stärkste Auswirkung auf das Ergebnis haben könnte. Die anderen beiden werden vernachlässigt.

Um herauszufinden, ob die mit dem Ishikawa-Diagramm ermittelten Einflüsse eine signifikante Auswirkung auf die Massenstrommessung haben, müssen diese genauer untersucht werden. Zusätzlich zu den Eingangs formulierten Fragen soll deshalb auch die Frage:

- Hat die Vibration einen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis?

mit den experimentellen Untersuchungen geklärt werden.

3.4 Unsicherheitsanalyse Differentialdosierwaage

Um die Einflüsse der Gewichts- und Zeitmessung auf das Ergebnis der DDW vorab genauer zu untersuchen, wird eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt. Die Analyse soll Auskunft darüber geben, ob die DDW die geforderte Genauigkeit von 97 % theoretisch erreichen kann, und welche Unsicherheiten bei den Experimenten zu erwarten sind.

Das Vorgehen für die Unsicherheitsanalyse ist angelehnt an das Ermittlungsverfahren Typ B zur Ermittlung der Unsicherheit (DIN EN V 13005) nach dem "Guide to the expression of uncertainty in measurement" (GUM) [67]. Hierbei wird Unsicherheit über alle verfügbaren Informationen über mögliche Streuung der zu messenden physikalischen Größe abgeschätzt. Da diese Informationen aus den Datenblättern entnommen und bei Herstellenden angefragt werden können, ist das Ermittlungsverfahren Typ B anwendbar [68].

Die Gesamtunsicherheit einer Messung setzt sich meistens aus mehreren Einzelunsicherheiten zusammen. Um diesen Zusammenhang korrekt darzustellen muss zunächst ein Modell (mathematische Formel) erstellt werden. Für die zu analysierende Massenstrommessung setzt sich die Ausgangsgröße: Massenstrom, $\dot{m}$, zusammen aus den Eingangsgrößen: Gewicht der Partikel die ausgelitert wurden, Δm, und der Dauer des Ausliterns, Δt. Das daraus resultierende Modell für die Berechnung des Gesamtfehlers entspricht der Gleichung (3.5) zur Berechnung des Massenstroms.

Für die Ausgangsgröße, $\dot{m}$, soll nun die Gesamtunsicherheit berechnet werden. Dazu müssen die Eingangsgrößen, Δm, und, Δt, berücksichtigt werden. Da, $\dot{m}$, von mehr als einer Eingangsgröße abhängig ist, wird die Gesamtunsicherheit über die kombinierte Unsicherheit, u_c, berechnet:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i)} \tag{3.6}$$

Sie ist die positive Quadratwurzel der kombinierten Varianz, u_c^2, aus [67, 5.1.2]. Die einzelnen Anteile der Unsicherheit dürfen quadratisch addiert werden, da sie zufällig und unabhängig voneinander sind.

Die partiellen Ableitungen, $\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)$, auch Sensitivitätskoeffizienten genannt, geben an, wie stark die Ausgangsgröße, f, variiert bei einer Änderung der Eingangsgröße, x_i. Anschließend wird der Sensitivitätskoeffizient mit der Unsicherheit der jeweiligen Eingangsgröße, $u^2(x_i)$, multipliziert [67, 5.1.3].

Im folgenden werden die jeweiligen Komponenten der Unsicherheit für die Eingangsgrößen Zeit- und die Gewicht erläutert. Anschließend wird die Gesamtunsicherheit berechnet.

3.4.1 Unsicherheit der Gewichtsmessung

Die Unsicherheit der Gewichtsmessung, u_m, besteht entsprechend des Messaufbaus aus den, in Tabelle 3.4 aufgeführten Komponenten. Die Angaben zu den Unsicherheiten in den Datenblättern sind prozentual und beziehen sich immer auf den aktuellen Messwert. Dieser ist jedoch in einer Voruntersuchung nicht bekannt. Um die maximal mögliche Unsicherheit zu ermitteln, wird mit der maximal möglichen Belastung gerechnet.

Der CentRec300-Teststand für eine Partikelmasse von maximal 500 kg ausgelegt. Mit dem zusätzlichen Gewicht des Vorratsbehälters von ca. 100 kg erhält man eine maximale Belastung von 600 kg. Das entspricht einer maximalen Belastung von 200 kg pro Wägezelle.

Tabelle 3.4 – Komponenten der Unsicherheit der Gewichtsmessung der DDW

Komponente	Unsicherheitsfaktor	a	Quelle
$u_{m\,\mathrm{WZ}}$	Wägezelle	0,05 %	Anhang A.3.1
$u_{m\,\mathrm{MV}}$	Messverstärker	0,1 %	Anhang A.3.2
$u_{m\,\mathrm{DL}}$	Datenlogger	0,5 %	Anhang A.3.3
$u_{m\,\mathrm{CPU}}$	CPU	0	-

a = Halbweite der Unsicherheit

Für, $u_{m\,\mathrm{WZ}}$, und, $u_{m\,\mathrm{MV}}$, wurde die Genauigkeitsklasse als Unsicherheit gewählt. Laut Herstellendem umfasst dieser Wert alle Einflüsse wie Linearitätsabweichungen, Hysterese und Kriechen [69].

Es wird erwartet, dass die Dauer, Δt, des Auslitervorgangs gering ist und sich in einem Bereich von wenigen Minuten abspielt. Daher wird angenommen, dass die Temperatur sich während einer Messung nicht signifikant ändert. Der Einfluss der Temperatur auf die Unsicherheiten wird daher vernachlässigt.

Für, $u_{m\,\mathrm{DL}}$, wurde in Absprache mit dem Herstellenden die Gebrauchsfehlergrenze des Strombereiches gewählt. Die Unsicherheit der CPU, $u_{m\,\mathrm{CPU}}$, ließ sich nicht aus dem Datenblatt ermitteln. Daher wird diese Unsicherheit null gesetzt, wie in [67] beschrieben.

Jede Wägezelle erzeugt ein eigenes Signal, welches im Messverstärker aufsummiert und aufgearbeitet wird. Daher ist der Einfluss der Unsicherheit der Wägezelle, $u_{m\,\mathrm{WZ}}$, und der der Unsicherheit des Messverstärkers, $u_{m\,\mathrm{MV}}$, bei der Berechnung der Gesamtunsicherheit höher, als die Unsicherheit des Datenloggers, $u_{m\,\mathrm{DL}}$, und die Unsicherheit der CPU, $u_{m\,\mathrm{CPU}}$.

Um das berücksichtigen zu können, wird, u_m, getrennt berechnet. Die erste Komponente, $u_{m\,1}$, bezieht sich auf die Wägezellen und den Messverstärker:

$$u_{m\,1} = \sqrt{u_{m\,\mathrm{WZ}}^2 + u_{m\,\mathrm{MV}}^2} \tag{3.7}$$

Die zweite Komponente,$u_{m\,2}$, bezieht sich auf den Datenlogger und die CPU:

$$u_{m\,1} = \sqrt{u_{m\,\mathrm{DL}}^2 + u_{m\,\mathrm{CPU}}^2} \tag{3.8}$$

Da die Komponenten der Unsicherheiten zufällig und unabhängig voneinander sind, dürfen sie quadratisch addiert werden, [67].

Die Unsicherheiten liegen laut Angabe der Herstellenden innerhalb von spezifizierten Grenzen. Der angegebene Wert im Datenblatt steht dabei für die Halbweite des Intervalls, $\pm a$. Dies entspricht nach [67, 4.3.7] einer Rechteckverteilung.

In der Realität sind Messwerte meist Normal oder Gauß-Verteilt [67, 4.3.4] Diese Annahme kann auch für die vorliegende Messung gemacht werden. Man erhält die normalverteilte Unsicherheit der jeweiligen Eingangsgröße, $u(xi)$, durch:

$$u(xi) = \sqrt{\frac{a^2}{3}} \tag{3.9}$$

nach [67, 4.3.4]. Die Unsicherheit, $u_{m\,1}$, lässt sich dann durch einsetzen von Gleichung (3.9) in Gleichung (3.7) berechnen:

$$u_{m\,1} = \sqrt{\frac{(0{,}05\,\% \cdot 200\,\mathrm{kg})^2}{3} + \frac{(0{,}1\,\% \cdot 200\,\mathrm{kg})^2}{3}} = 0{,}129\,\mathrm{kg} \tag{3.10}$$

und, $u_{m\,2}$, kann durch Einsetzten von Gleichung (3.9) in Gleichung (3.7) berechnet werden:

$$u_{m\,2} = \sqrt{\frac{(0{,}5\,\% \cdot 600\,\mathrm{kg})^2}{3}} + 0 = 1{,}73\,\mathrm{kg} \tag{3.11}$$

3.4.2 Unsicherheit der Zeitmessung

Die Unsicherheit der Zeitmessung, u_t, besteht entsprechend des Messaufbaus aus den, in Tabelle 3.5 aufgeführten Komponenten. Der Wert für, $u_{t\,\mathrm{MV}}$, wurde beim Herstellenden angefragt und beträgt 100 ms [69].

Tabelle 3.5 – Komponenten der Unsicherheit der Zeitmessung der DDW

Variable	Unsicherheitsfaktor	a	Quelle
$u_{t\,\mathrm{MV}}$	Messverstärker	100 ms	Anhang A.3.2
$u_{t\,\mathrm{DL}}$	Datenlogger	122 ms	Anhang A.3.3
$u_{t\,\mathrm{CPU}}$	CPU	0	-

a = Halbweite laut Datenblatt

Die zeitliche Unsicherheit des Datenloggers, $u_{t\,\mathrm{DL}}$, entspricht der zweifachen Grundwandlungszeit des Datenloggers von 61 ms. Die Grundwandlungszeit ist die Zeit, die der Datenlogger benötigt, um ein analoges Signal in ein digitales umzuwandeln.

Laut herstellendem Betrieb sollte die Zeit verdoppelt werden [70]. Ursache dafür ist, dass der Datenlogger seine zwei Kanäle sequenziell abarbeitet, auch wenn nur ein Kanal aktiv genutzt wird. Dadurch kann es zu einem Datenstau kommen.

Die zeitliche Unsicherheit des Datenloggers, $u_{t\,\mathrm{CPU}}$, ließ sich nicht aus dem Datenblatt ermitteln. Daher wird diese null gesetzt, wie in [67] beschrieben.

Die Unsicherheit der Zeitmessung berechnet sich aus:

$$u_t = \sqrt{u_{t\,\mathrm{MV}}^2 + u_{t\,\mathrm{DL}}^2 + u_{t\,\mathrm{CPU}}^2} \tag{3.12}$$

Analog zu den Unsicherheiten der Gewichtsmessung, sind die Angaben zu denen der Zeitmessung ebenfalls Rechteck-verteilt. Um den Wert der Normalverteilung zu erhalten müssen auch alle u_t umgerechnet werden. Durch einsetzten von Gleichung (3.9) in Gleichung (3.12) erhält man:

$$u_t = \sqrt{\frac{0{,}1\,\mathrm{s}^2}{3} + \frac{0{,}122\,\mathrm{s}^2}{3} + 0} = 0{,}091\,\mathrm{s} \tag{3.13}$$

3.4.3 Gesamtunsicherheit

Zur Berechnung der Gesamtunsicherheit der Massenstrommessung, $u(\dot{m})$, müssen nun die jeweiligen Unsicherheiten und Sensitivitätskoeffizienten in Gleichung (3.6) eingesetzt werden. Daraus ergeben sich drei Terme. Der erste Term:

$$3 \cdot \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m_S}\right)^2 \cdot u_{m\,1}^2 + 3 \cdot \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m_E}\right)^2 \cdot u_{m\,1}^2 \tag{3.14}$$

steht für den Anteil der Unsicherheit der Wägezellen und des Messverstärkers an der Unsicherheit der Gewichtsmessung.

Bei der gewählten Messmethode wird mit einem Start- und Endzeitpunkt gearbeitet. Dementsprechend muss der Sensitivitätskoeffizient für die Änderung der Eingangsgröße Gewicht, $\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m}\right)$, und die Unsicherheit, $u_{m\,1}$, doppelt berücksichtigt werden. Einmal für die Masse zum Startzeitpunkt, m_S, und einmal für die Masse zum Endzeitpunkt, m_E. Dies gilt auch für den zweiten Term. Beide Punkte können als unabhängige Messung gewertet werden.

Da es drei Wägezellen gibt, mit drei eigenen Signalen und somit eine drei mal höhere Unsicherheit, müssen zusätzlich der Sensitivitätskoeffizient und die Unsicherheit um Faktor drei erhöht werden.

Term Nummer zwei:

$$\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m_S}\right)^2 \cdot u_{m\,2}^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m_E}\right)^2 \cdot u_{m\,2}^2 \tag{3.15}$$

bezieht sich auf den Anteil der Unsicherheit des Datenloggers und der CPU an der Unsicherheit der Gewichtsmessung. Der letzte Term:

$$\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial t_S}\right)^2 \cdot u_t^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial t_E}\right)^2 \cdot u_t^2 \tag{3.16}$$

steht für den Anteil der Unsicherheit bei der Zeiterfassung. Wie bei den ersten beiden Termen muss auch hier der Sensitivitätskoeffizient, $\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial t}\right)$, für die Änderung der Eingangsgröße Zeit und die Unsicherheit, u_t, doppelt berücksichtigt werden. Einmal

für den Startzeitpunkt, t_S, und einmal für den Endzeitpunkt, t_E. Zusammengefasst ergibt sich gemäß Gleichung (3.6):

$$u(\dot{m}) = \left(3 \cdot \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m_S}\right)^2 \cdot u_{m\,1}^2 + 3 \cdot \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m_E}\right)^2 \cdot u_{m\,1}^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m_S}\right)^2 \cdot u_{m\,2}^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m_E}\right)^2 \cdot u_{m\,2}^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial t_S}\right)^2 \cdot u_t^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial t_E}\right)^2 \cdot u_t^2\right)^{0,5} \tag{3.17}$$

Für die Berechnung der Gesamtunsicherheit ist es nicht relevant, ob es sich um einen Start- oder um einen Endzeitpunkt handelt, oder um Wägezelle eins oder drei handelt. Daher werden die Terme weitestgehend zusammengefasst:

$$u(\dot{m}) = \sqrt{6 \cdot \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m}\right)^2 \cdot u_{m\,1}^2 + 2 \cdot \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m}\right)^2 \cdot u_{m\,2}^2 + 2 \cdot \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial t}\right)^2 \cdot u_t^2} \tag{3.18}$$

Jetzt müssen die Sensitivitätskoeffizienten partiell abgeleitet werden:

$$u(\dot{m}) = \sqrt{6 \cdot \left(\frac{1}{\Delta t}\right)^2 \cdot u_{m_1}^2 + 2 \cdot \left(\frac{1}{\Delta t}\right)^2 \cdot u_{m_{Rest}}^2 + 2 \cdot \left(-\frac{\Delta m}{\Delta t^2}\right)^2 \cdot u_t^2} \tag{3.19}$$

, wobei

$$\Delta t = t_E - t_S \tag{3.20}$$

und

$$\Delta m = m_E - m_S \tag{3.21}$$

.

Die berechneten Werte für die Unsicherheiten können nun in die Gleichung 3.19 eingesetzt werden:

$$u(\dot{m}) = \sqrt{6 \cdot \left(\frac{1}{\Delta t}\right)^2 \cdot (0{,}129\,\mathrm{kg})^2 + 2 \cdot \left(\frac{1}{\Delta t}\right)^2 \cdot (1{,}73\,\mathrm{kg})^2 + 2 \cdot \left(-\frac{\Delta m}{\Delta t^2}\right)^2 \cdot (0{,}091\,\mathrm{s})^2} \tag{3.22}$$

Die einzigen Variablen sind nun die ausgeliterte Masse Δm und die Dauer des Auslitervorgangs Δt. Um zu sehen, welche Genauigkeiten bei dem geplanten Experiment erreichbar sind, soll die kombinierten Gesamtunsicherheit mit der maximal möglichen Dauer und Masse des Auslitervorgangs berechnet werden.

Es ist bereits bekannt, dass drei unterschiedliche, definierte Massenströme, $\dot{m}_i$, untersucht werden sollen. Es ist außerdem bekannt, dass eine Waage zur Referenz-

messung verwendet werden soll, welche eine Maximallast, $m_{\max}$, von 150 kg hat. Daraus ergibt sich dann, je nach Massenstrom die maximale Messzeit, $t_{\max}$, die ausgelitert werden kann:

$$\Delta t_{\max} = \frac{m_{\max}}{\dot{m}_i} \tag{3.23}$$

Die Gesamtunsicherheit für die Massenstrommessung mit der Differentialdosierwaage, $u_{\dot{m}}$, bei, $t_{\max}$, sind in Tabelle 3.6 dargestellt. Die Werte zeigen, dass die Gesamtunsicherheit bei der maximalen Dauer und Masse des Ausliterns deutlich unter dem geforderten Wert von 3 % liegt. außerdem ist zu sehen, dass die Unsicherheiten sehr nah beieinander liegen. Dies legt die Vermutung nah, dass die Unsicherheit hauptsächlich von der ausgeliterten Masse abhängig ist.

Tabelle 3.6 – Gesamtunsicherheiten für die Massenstrommessung mit der DDW

$\dot{m}$ [kg/s]	$\Delta t_{\max}$ [s]	$\Delta m_{\max}$ [kg]	$u(\dot{m})$ [kg/s]	[%]
0,5	300	150	0,00823	1,65
1,5	100	150	0,0247	1,65
3	50	150	0,0499	1,67

$\dot{m}$ = Massenstrom;
$\Delta t_{\max}$ = maximale Dauer des Auslitervorgangs;
$\Delta m_{\max}$ = maximal ausliterbare Masse;
$u(\dot{m})$ = Unsicherheit der Massenstrommessung

3.5 Referenzmessung

Die Referenzmessung dient dazu die Messwerte der DDW überprüfen zu können. Dazu wird der Massenstrom, der den Vorratsbehälter verlässt, in einen Auffangbehälter geleitet, siehe Kapitel 3.2, welcher von einer zweiten Waage verwogen wird. Die Messwerte dieser zweiten Wage dienen als Referenzmessung.

Damit die Referenzmessung als Vergleichsmessung genutzt werden kann, muss die Unsicherheit der zweiten Waage geringer sein als die der DDW. Ein Anhaltspunkt, für das Verhältnis der Unsicherheit der Referenzmessung, zu der Unsicherheit der zu überprüfenden Messung, stellt die "Goldenen Regel der Messtechnik" dar. Sie besagt, dass die Messunsicherheit 1/10 bis 1/5 der angegebenen Toleranz nicht überschreiten sollte [68, 4.3].

Die Unsicherheit der DDW soll $< 3\,\%$ sein. Die Messunsicherheit der Referenzmessung darf dann maximal 1/10 bis 1/5 dieses Grenzwertes betragen. Das entspricht einer Unsicherheit von 0,3 % bis 0,6 %. Damit eine Waage für die Referenzmessung geeignet ist, muss sie den Massenstrom mit einer Unsicherheit von weniger als 0,6 % messen können.

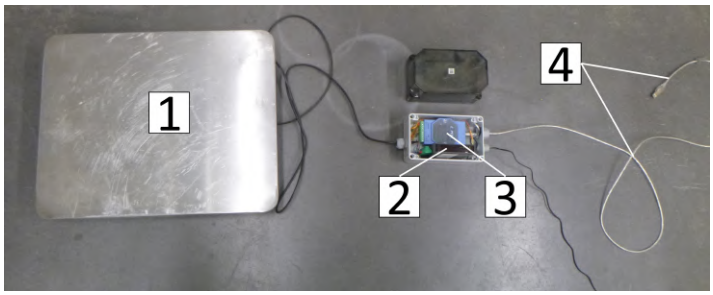
h 

Abb. 3.7 – Darstellung der, für die Referenzmessung verwendete Plattformwaage. 1=Plattform mit Wägezelle, 2 = Gewichtsmessumformer, 3 = RS485 zu USB Schnittelle, 4 = USB Kabel

Die Waage soll eine Maximallast von 150 kg haben. Bei steigender Maximallast einer Waage nimmt parallel auch die absolute Unsicherheit der Waage zu, da andere, nicht so fein auflösende Wägezellen verbaut werden müssen, die für größere Massen geeignet sind. Eine Maximallast von 150 kg ist ein guter Kompromiss zwischen Genauigkeit und hoher Maximallast.

Für die Refernzmessung wird die Plattformwaage IPS 150 kg (1), zu sehen in Abb. 3.7, und der Gewichtsmessumformer (GMU) WTB analog (2), der Firma Bosche Wägetechnik ausgewählt. Die Messwerte des WTB analog können über eine RS485 zu USB Schnittelle (3) per USB-Kabel (4) an einen Laptop übertragen werden, wo diese dann in einer Excel-Tabelle gespeichert werden. Die Gewichtswerte werden hierbei ebenfalls mit einem Zeitstempel versehen. Aus der Messwerten kann analog zu den Messdaten der DDW ein Start- und Endzeitpunkt gewählt werden.

Die Plattformwaage (PFW) wurde ausgewählt, da sie an einen dynamischen Messumformer angeschlossen werden kann, der die Werte nahzu ohne Zeitverzögerung an einen PC senden kann. Der Wert für die Verzögerung wird von dem herstellenden Betrieb auf 80 ms geschätzt [71]. Damit ist die Unsicherheit der Zeitmessung gering. Vergleichbare Waagen hatten entweder deutlich höhere Unsicherheiten für die Messung der Zeit, oder es konnten gar keine Angaben gemacht werden.

3.6 Unsicherheitsanalyse Plattformwaage

Wie bei der DDW muss auch für die PFW, welche als Referenzmessung dienen soll eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt werden. Damit kann abgeschätzt werden, ob die geforderte Genauigkeit der Referenzmessung von 0,6 % theoretisch erreicht werden kann.

Die Unsicherheitsanalyse für die Plattformwaage ist der, der DDW ähnlich. Das gewählte Vorgehen ist, aus den in Kapitel 3.4 beschriebenen Gründen, Ermittlungsverfahren Typ B zur Ermittlung der Unsicherheit (DIN EN V 13005) nach GUM. Da die PFW ebenfalls einen Massenstrom misst, kann der Unsicherheitsanalyse dasselbe Modell, welches bereits für die Analyse der DDW genutzt wurde, aus Gleichung (3.5)

zugrunde gelegt werden. Da dieses Modell zwei Eingangsgrößen beinhaltet muss die Gesamtunsicherheit wieder über die kombinierte Unsicherheit aus Gleichung (3.6) berechnet werden.

Im folgenden werden die jeweiligen Komponenten der Unsicherheit für die Eingangsgrößen Zeit- und die Gewicht erläutert. Anschließend wird die Gesamtunsicherheit berechnet.

3.6.1 Unsicherheit der Gewichtsmessung

Die Unsicherheit der Gewichtsmessung, u_m, besteht entsprechend des Messaufbaus aus den, in Tabelle 3.7 aufgeführten Komponenten. Die Angaben zu den Unsicherheiten der Wägezelle und des Gewichtsmessumformers in den Datenblättern sind prozentual und beziehen sich auf den aktuellen Messwert. Dieser ist jedoch in einer Voruntersuchung nicht bekannt. Deshalb wird mit der maximal möglichen Belastung gerechnet. dies entspricht einer Masse von 150 kg.

Tabelle 3.7 – Komponenten der Unsicherheit der Gewichtsmessung der PFW

Komponente	Unsicherheitsfaktor	a	Quelle
$u_{m\,\mathrm{WZ}}$	Wägezelle	0,02 %	Anhang A.4.1
$u_{m\,\mathrm{GMU}}$	Gewichtsmessumformer	0,01 %	Anhang A.4.2
$u_{m\,\mathrm{A}}$	Auflösung	10 g	Anhang A.4.2

a = Halbweite laut Datenblatt

Für, $u_{m_{\mathrm{WZ}}}$, wurde der im Datenblatt angegebene Gesamtfehler gewählt. Die Unsicherheit des GMU, $u_{m_{\mathrm{GMU}}}$, entspricht der, in der Betriebsanleitung angegebenen Linearität.

Es wird erwartet, dass die Dauer, Δt, des Auslitervorgangs gering ist und sich in einem Bereich von wenigen Minuten abspielt. Daher wird angenommen, dass die Temperatur sich während einer Messung nicht signifikant ändert. Der Einfluss der Temperatur auf die Unsicherheiten wird daher vernachlässigt

$u_{m_{\mathrm{A}}}$ ergibt sich aus der Auflösung der Anzeige. Der GMU hat eine maximale Auflösung von $dA = 20\,\mathrm{g}$. Das bedeutet, dass es ein Intervall von Eingangssignalen gibt, bei denen der selbe Wert ausgegeben wird. Diese Unsicherheit der Auflösung der Anzeige, $u_{m_{\mathrm{A}}}$, muss auch berücksichtigt werden. Der Wert des Signals, welcher eine gegebene Anzeige X erzeugt, liegt mit gleicher Wahrscheinlichkeit irgendwo im Intervall $X - dA/2$ bis $X + dA/2$. Damit handelt es sich um eine Rechteck-Verteilung [67, F.2.2.1].

Die Unsicherheit der Gewichtsmessung berechnet sich aus:

$$u_m = \sqrt{u_{m_{\mathrm{WZ}}}^2 + u_{m_{\mathrm{GMU}}}^2 + u_{m_{\mathrm{A}}}^2} \tag{3.24}$$

Da die Komponenten der Unsicherheiten zufällig und unabhängig voneinander sind, dürfen sie quadratisch addiert werden [67]. Die Unsicherheiten $u_{m_{WZ}}$ und $u_{m_{GMU}}$ liegen ebenfalls innerhalb von spezifizierten Grenzen und sind somit auch Rechteck-verteilt. Analog zur DDW sind auch die Unsicherheiten bei der PFW in der Realität Normalverteilt und müssen umgerechnet werden. Durch einsetzten von Gleichung (3.9) in Gleichung (3.24) erhält man

$$u_m = \sqrt{\frac{(0{,}02\,\% \cdot 150\,\mathrm{kg})^2}{3} + \frac{(0{,}01\,\% \cdot 150\,\mathrm{kg})^2}{3} + \frac{(0{,}01\,\mathrm{kg})^2}{3}} = 0{,}0202\,\mathrm{kg} \tag{3.25}$$

3.6.2 Unsicherheit der Zeitmessung

Die Unsicherheit der Zeitmessung, u_t, besteht entsprechend des Messaufbaus aus der Wandlungszeit des Gewichtsmessumformers,

$$u_t = u_{t_{\mathrm{GMU}}} \tag{3.26}$$

die dieser braucht, um das analoge Signal in ein digitales umzuwandeln. Andere Unsicherheiten müssen nicht betrachtet werden. Der Wert für die Unsicherheit des Gewichtsmessumformers bei der Zeitmessung, $u_{t_{\mathrm{GMU}}}$, wurde vom herstellenden Betrieb konservativ auf 80 ms geschätzt.

Analog zu den anderen Unsicherheiten ist, $u_{t_{\mathrm{GMU}}}$, Rechteck-verteilt und muss umgerechnet werden in eine Normalverteilung. Durch einsetzten von Gleichung (3.9) in Gleichung (3.26) erhält man

$$u_t = \frac{0{,}08\,\mathrm{s}}{\sqrt{3}} = 0{,}0461\,\mathrm{s} \tag{3.27}$$

3.6.3 Gesamtunsicherheit

Zur Berechnung der Gesamtunsicherheit der Massenstrommessung, $u(\dot{m})$, müssen nun die jeweiligen Unsicherheiten und Sensitivitätskoeffizienten der PFW in Gleichung (3.6) eingesetzt werden. Daraus ergeben sich zwei Terme. Der erste Term

$$\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m_S}\right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m_E}\right)^2 \cdot u_m^2 \tag{3.28}$$

steht für die Anteil der Unsicherheit bei der Gewichtsmessung. Wie bei der DDW wird mit einem Start- und Endzeitpunkt gearbeitet. Dementsprechend muss der Sensitivitätskoeffizient für die Änderung der Eingangsgröße Gewicht, $\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m}\right)$, und die Unsicherheit, u_m, doppelt berücksichtigt werden. Einmal für die Masse zum Startzeitpunkt, m_S, und einmal für die Masse zum Endzeitpunkt, m_E. Beide Punkte können als unabhängige Messung gewertet werden.

Der zweite Term

$$\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial t_S}\right)^2 \cdot u_t^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial t_E}\right)^2 \cdot u_t^2 \tag{3.29}$$

bezieht sich auf den Anteil der Unsicherheit bei der Zeiterfassung. Analog zum ersten Term, muss auch hier der Sensitivitätskoeffizient, $\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial t}\right)$, für die Änderung der Eingangsgröße Zeit und die Unsicherheit, u_t, doppelt berücksichtigt werden. Einmal für den Startzeitpunkt, t_S, und einmal für den Endzeitpunkt, t_E. Zusammengefasst ergibt sich gemäß Gleichung (3.6)

$$u(\dot{m}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m_S}\right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m_E}\right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial t_S}\right)^2 \cdot u_t^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial t_E}\right)^2 \cdot u_t^2} \tag{3.30}$$

Für die Berechnung der Gesamtunsicherheit ist es nicht relevant, ob es sich um einen Start- oder um einen Endzeitpunkt handelt. Daher können die Terme anschließend zusammengefasst werden

$$u(\dot{m}) = \sqrt{2 \cdot \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m}\right)^2 \cdot u_m^2 + 2 \cdot \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial t}\right)^2 \cdot u_t^2} \tag{3.31}$$

Jetzt müssen die Sensitivitätskoeffizienten partiell abgeleitet werden:

$$u(\dot{m}) = \sqrt{2 \cdot \left(\frac{1}{\Delta t}\right)^2 \cdot u_m^2 + 2 \cdot \left(-\frac{\Delta m}{\Delta t^2}\right)^2 \cdot u_t^2} \tag{3.32}$$

, wobei

$$\Delta t = t_E - t_S \tag{3.33}$$

und

$$\Delta m = m_E - m_S \tag{3.34}$$

. Die berechneten Werte für die Unsicherheiten könne jetzt in die Gleichung 3.32 eingesetzt werden:

$$u(\dot{m}) = \sqrt{2 \cdot \left(\frac{1}{\Delta t}\right)^2 \cdot (0{,}0202\,\mathrm{kg})^2 + 2 \cdot \left(-\frac{\Delta m}{\Delta t^2}\right)^2 \cdot (0{,}0461\,\mathrm{s})^2} \tag{3.35}$$

Die einzigen Variablen sind nun die ausgeliterte Masse, Δm, und die Dauer des Auslitervorgangs, Δt. Da die PFW eine Referenzmessung für die Messung mit der

DDW ist, entsprechen die Dauer und Masse des Auslitervorgangs den Werten für die Messung mit der DDW. Somit können diese Werte aus Kapitel 3.4.3 übernommen werden.

Die Gesamtunsicherheit für die Referenzmessung des Massenstroms mit der Plattformwaage, $u_{\dot{m}}$, bei, $t_{\max}$, sind in Tabelle 3.6 dargestellt. Die Werte zeigen, dass die Gesamtunsicherheit der PFW bei, $t_{\max}$, und unterschiedlichen Massenströmen, deutlich unterhalb der Grenze von 0,6 % liegen. Damit ist die PFW als Messgerät für die Referenzmessung gemäß der Goldenen Regel der Messtechnik geeignet.

Tabelle 3.8 – Gesamtunsicherheiten für die Massenstrommessung mit PFW

$\dot{m}$ [kg/s]	$\Delta t_{\max}$ [s]	$\Delta m_{\max}$ [kg]	$u(\dot{m})$ [kg/s]	[%]
0,5	300	150	0,000145	0,03
1,5	100	150	0,00102	0,07
3	50	150	0,00396	0,13

$\dot{m}$ = Massenstrom;
$\Delta t_{\max}$ = maximale Dauer des Auslitervorgangs;
$\Delta m_{\max}$ = maximal ausliterbare Masse;
$u(\dot{m})$ = Unsicherheit der Massenstrommessung

3.7 Anfahren und Anhalten des Massenstroms

Vorversuche haben gezeigt, dass der Massenstrom beim öffnen des Quetschventils nicht sofort einen stabilen Wert einnimmt. Nach dem öffnen des Ventils steigt der Massenstrom über einen kurzen Zeitraum an, bis er den Wert erreicht, den die Blende zulässt. Dieses Verhalten wird Anfahreffekt genannt.

Der Grund dafür ist nicht zu 100 % bekannt, es gibt jedoch mehrere Anhaltspunkte. Einerseits, öffnet das Quetschventil nicht sofort, sondern besitzt eine gewisse Trägheit. Andererseits werden die Partikel mit einem Schlauch in den Auffangbehälter geleitet, welcher von der Plattformwaage verwogen wird. Dadurch entsteht auch eine Trägheit.

Dasselbe geschieht vice versa beim schließen des Quetschventils. Der Massenstrom stoppt nicht sofort, sondern nimmt über einen kurzen Zeitraum ab, bis er null wird. Dieses Verhalten wird Anhalte-Effekt genannt.

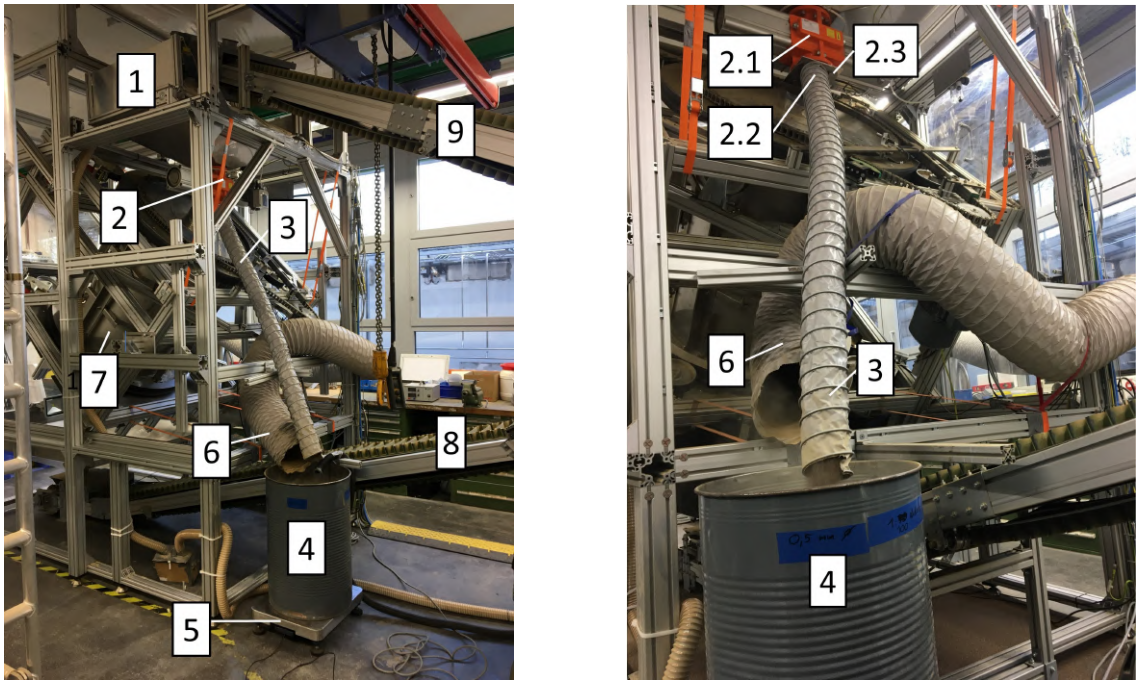
Da diese beiden Effekte die Messung beeinflussen und unsicher machen würden müssen sie aus der Messung herausgehalten werden. Dazu sollen in den Datenreihen, welche von der DDW, als auch der Plattformwaage geliefert werden, jeweils am Anfang und am Ende der Messungen Werte abgeschnitten werden. Anschließend werden nur noch Werte zu sehen sein, die weder vom Anfahr- noch vom Anhalt-Effekt beeinflusst sind. Wie viele Sekunden von den Messungen abgeschnitten werden soll wird je nach Massenstrom beim Auswerten der Daten entschieden.

4 Durchführung des Experimentes

In diesem Kapitel wird Durchführung des Experimentes erläutert. Dazu wird zunächst der Aufbau des Experimentes und der Prozess des Ausliterns beschrieben. Anschließend werden die Schritte beschrieben, die zur Inbetriebnahme der DDW und der PFW erforderlich sind. Außerdem wird der Ablauf der Versuche dargestellt.

4.1 Aufbau des Experimentes und Prozessbeschreibung

Der Massenstrom, der den Vorratsbehälter verlässt, wird über die DDW gemessen. Zusätzlich wird der selbe Massenstrom mit der PFW in einem Auffangbehälter gemessen. Der Aufbau des Experimentes ist in in Abb.: 4.1 zu sehen.



(a) **(b)**

Abb. 4.1 – Die Partikel gelangen aus dem Vorratsbehälter (1), durch das Quetschventil (2.1), die Blende (2.3) und das Zuführungsrohr (2.2) in den Schlauch (3). Dieser führt in den Auffangbehälter (4), welcher von der PFW (5) verwogen wird. Vibrationen können über den Receiver (7) und die beiden Förderbänder (8 und 9) erzeugt werden. Um die Staubentwicklung zu minimieren wird ein Absaugrohr (6) verwendet.

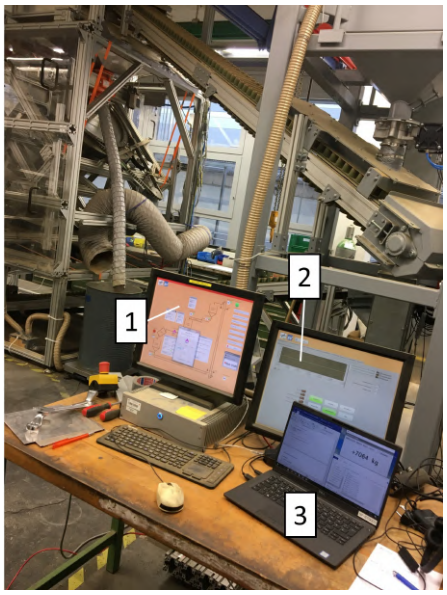
Um die Partikel vom Vorratsbehälter (1) in den Auffangbehälter (4) zu leiten wird ein Schlauch (3) verwendet. Dieser ist mit einer Manschette am Zuführungsrohr (2.3) hinter dem Auslass des Quetschventils angebracht und führt in den Auffangbehälter. Das Zuführungsrohr ist normalerweise um 180° gedreht und leitet die Partikel in den Receiver (7). Da dies nicht gewünscht ist, wird das Zuführungsrohr vom Receiver weggedreht, sodass ein Schlauch angebracht werden kann. Hinter dem Schlauch, welcher in den Auffangbehälter führt, ist das Absaugrohr (6) einer Filteranlage angebracht, um entstehenden Staub einzusaugen.

Bei dem Auffangbehälter handelt es sich um ein Stahlfass, welches ein Fassungsvermögen von ca. 110 l hat was einer Partikelmasse von ca. 220 kg entspricht. Das Fass steht auf der Plattformwaage, wo es verwogen wird und hat ein Eigengewicht von ca. 5 kg. Da die Waage eine Maximallast von 150 kg hat, darf das Fass nur mit maximal 145 kg Partikeln befüllt werden.

Nach dem Auslitern müssen die Partikel jeweils vor dem nächsten Versuch in den Sammelbehälter des Fördersystems gegeben werden. Von dort aus gelangen die Partikel auf das untere Förderband welches die Partikel zurück in den Vorratsbehälter transportiert. Dieser Vorgang wird über eine LabView-Oberfläche des Messrechners gesteuert, siehe Abb. 4.2b.

Die Plattformwaage ist mit dem Gewichtsmessumformer verbunden, der in Abb. 4.2a zu sehen ist. Über eine RS485 Schnittstelle werden die Messwerte an einen Laptop weitergeleitet, der neben den Messrechner aufgebaut ist, siehe Abb. 4.2b.

(a) Abbildung des Gewichtsmessumformers (rechts) und RS485-Schnittstelle (links, blau) im Gehäuse ohne Abdeckung



(b) Abbildung des Messrechners mit der LabView Oberfläche (1) zum bedienen des Teststandes, der Messdatenübersicht (2) und des Laptops (3) mit dem die Daten der PFW geloggt werden

Abb. 4.2 – Komponenten des experimentellen Aufbaus

Vor der Durchführung der Versuche muss zunächst die Plattformwaage vorbereitet und der Messverstärker skaliert werden. Damit die Plattformwaage die angegebene Genauigkeit erbringt muss diese aufgewärmt und nivelliert werden. Beim Aufwärmvorgang schaltet man die Waage mindestens zwei Stunden vor dem Beginn der Versuche ein und stellt diese an den Ort der Messung.

Zur Nivellierung wird eine Wasserwaage verwendet, welche man an verschiedenen Stellen auf die Plattform der Waage legt. Mit den Höhenverstellbaren Füßen der Waage gleicht man nun eine möglicherweise nicht horizontale Lage des Bodens am Ort der Messung aus. Der Vorgang wird wiederholt, bis die Wasserwaage in jeder Position eine horizontale Lage der Plattform anzeigt.

4.2 Skalierung des Messverstärkers der Differentialdosierwaage

Die Skalierung des Messverstärkers der DDW ist erforderlich, um das Signal welches dieser ausgibt, einzustellen.

Dazu entleert man den Vorratsbehälter zunächst vollständig. Im Messverstärker wird nun eingestellt, dass bei diesem Wert der Wägezellen (Wert für den Behälter ohne Inhalt), der Messverstärker sein minimales Signal von 4 mA ausgibt. Anschließend befüllt man den Vorratsbehälter mit der maximal benötigten Menge an Partikeln. Im Messverstärker wird dann eingestellt, dass bei diesem Wert der Wägezellen (für den Behälter mit maximalem Inhalt), der Messverstärker sein maximales Signal von 20 mA ausgibt.

Die Menge der Partikel, welche für die Ausliter-Versuche mindestens erforderlich sind, beträgt 145 kg. Das entspricht der Maximallast der Waage von 150 kg abzüglich des Eigengewichts des Auffangbehälters (5 kg). Zusätzlich muss jedoch beachtet werden, dass der Vorratsbehälter nicht vollständig entleert werden kann.

Grenzfüllstand

Beim unterschreiten eines bestimmten Grenzfüllstandes wird der Massenstrom sehr schnell kleiner und anschließend null. Der Grund hierfür ist, dass die Reibung zwischen den Partikeln im Behälter aufgrund des geringen Winkels des Schüttkegels so groß wird, dass diese sich nicht mehr bewegen. Dadurch wird der Auslass des Vorratsbehälters nicht mehr mit Partikeln bedeckt und der Partikelstrom stoppt. Dieses Phänomen ist in Abb. 4.3 dargestellt.

Um den Punkt zu bestimmen, an dem das Leaking auftritt werden 3 Versuche durchgeführt. Dabei wird der Vorratsbehälter mit ca. 350 kg Partikeln befüllt und anschließend entleert, bis das Leaking auftritt. Das Diagramm 4.4 zeigt den zeitlichen Verlauf des Füllstandes bis zum eintreten des Leakings.

(a) Beginnendes leaking **(b)** Vollständiges leaking

Abb. 4.3 – Abbildung der Partikel im Vorratsbehälter während es zum Leaking kommt. In der Mitte des Bildes ist der Auslass des Vorratsbehälters zu sehen

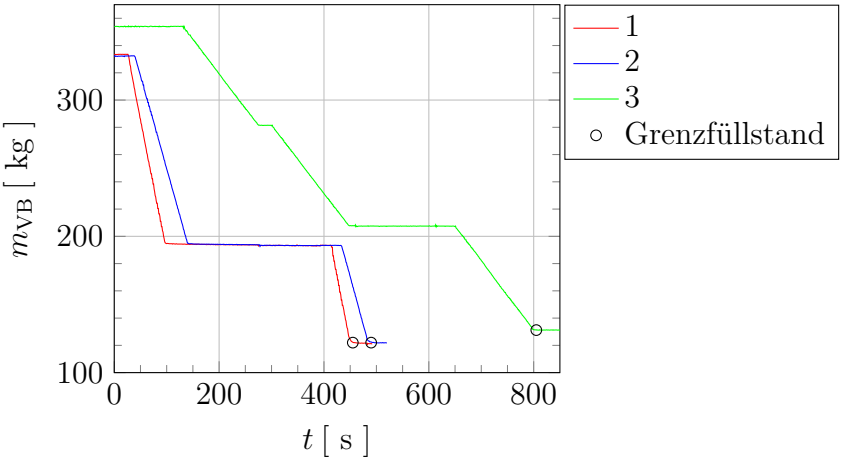


Abb. 4.4 – Darstellung der Versuche zum Grenzfüllstand in einem m-t Diagramm. Das Erreichen des Grenzfüllstandes ist mit einem Kreis markiert. m_{VB}, ist die Masse im Vorratsbehälter.

Die Partikel werden im Auffangbehälter gesammelt wie in Kapitel 4.1 beschrieben. Dieser wird nach ca. 150 kg entleert. Dies ist im Diagramm bei einem Füllstand von ca. 200 kg zu sehen. Beim dritten Versuch wurde der Massenstrom zusätzlich bei ca. 275 kg kurzzeitig unterbrochen.

Das Erreichen des Grenzfüllstandes ist mit einem Kreis markiert. Für jeden der drei Versuche wurde eine andere Blende genutzt. Dies ist auch im Diagramm am Anstieg der Graphen zu erkennen, welcher proportional zum Massenstrom ist. Je größer der Blendendurchmesser ist, desto größer ist der Massenstrom und desto steiler der Anstieg.

Die Grenzfüllstände, bei denen der Massenstrom null wird, sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Die Grenzfüllstände für die 60 mm und 46 mm Blende sind ähnlich. Der Wert für die 30 mm unterscheidet sich um ca. 10 kg von den anderen beiden.

Es wird vermutet, dass der Grund hierfür der geringere Massenstrom ist, den die 30 mm Blende gegenüber den anderen beiden zulässt. Dadurch könnte der Schüttkegel

Tabelle 4.1 – Ergebnisse der Leaking-Versuche

Versuch	Blende	Füllstand
1	60 mm	121,88 kg
2	46 mm	121,53 kg
3	30 mm	131,08 kg
Mittelwert		124,83 kg

der Partikel eine andere Form besitzen und bereits früher zum Leaking führen, da weniger Masse nachrutscht.

Zur Befüllung des Vorratsbehälters wird das verbaute Fördersystem verwendet, welches die Partikel immer ähnlich in den Vorratsbehälter abwirft. Daher wird für jeden Befüllvorgang ein ähnlicher Schüttkegel und damit auch ein ähnlicher Grenzfüllstand erwartet.

Der Grenzfüllstand der 30 mm Blende mit 131,08 kg gilt konservativ für alle drei Blenden als unterer Grenzwert. Auf diesen Wert wird eine Sicherheit von 30 kg aufgeschlagen. Dies ergibt ein Gewicht von rund 160 kg.

Skalierung des maximalen Ausgangssignals

Hinzu kommt die Menge an Partikeln, die maximal ausgelitert werden kann: 145 kg. Somit sind insgesamt mindestens 305 kg Partikel im Vorratsbehälter nötig um auslitern zu können.

Während der Versuche wird das Fördersystem des Receivers genutzt. Dieses verfügt über einen Pufferspeicher sowie einen Sammelbehälter, welche Partikel beinhalten. Daher wurde konservativ um 100 kg mehr skaliert. Damit liegt die maximal benötigte Menge an Partikeln bei 405 kg. Eine Auflistung der einzelnen Mengen ist in Tabelle 4.2 zu finden.

Tabelle 4.2 – Zusammensetzung der maximalen Menge an Partikeln im Vorratsbehälter

Name	**Gewicht** [kg]	**Gesamtgewicht** [kg]
Grenzfüllstand	≈130	130
Sicherheit	30	160
Ausliterbare Menge an Partikeln	145	305
Puffer Fördersystem	100	405

Nachdem der Vorratsbehälter bereits geleert und das Nullsignal auf 4 mA skaliert wurde, kann nun der Behälter mit den 405 kg befüllt werden. Dazu wird ein Eimer verwendet, welcher mit Partikeln befüllt und dann auf der PFW verwogen wird, bevor die Partikel in den Vorratsbehälter gefüllt werden. Das Gewicht des Eimers, abzüglich des Eigengewichtes wird dann notiert. Der Vorgang wird so lange durchgeführt, bis

das gewünschte Gewicht erreicht ist. Das Gewicht mit dem der Messverstärker skaliert wird beträgt 410,42 kg.

4.3 Kalibrierung

Um das Gesamtsystem zu kalibrieren werden definierte Referenzgewichte in den leeren Vorratsbehälter gelegt. Um die Kalibriergenauigkeit zu erhöhen, kommen 16 Referenzgewichte zum Einsatz. Diese werden nach und nach in den Behälter gelegt. Die jeweilige Masse der Referenzgewichte und die jeweiligen Gewichtswerte, die die DDW anzeigt, bilden Stützpunkte. Aus diesen kann dann eine Kalibriergerade gebildet werden.

Die Referenzgewichte bestehen aus den Bauxit-Partikeln, die entweder in kleinen Fässern oder in Plastik-Beuteln eingepackt wurden. Abb. 4.5a zeigt eines der Fässer sowie mehrere Beutel, die mit Partikeln befüllt sind. Durch das verpacken der Partikel ist sichergestellt, dass die Menge an Partikeln und damit die Masse gleich bleibt und reproduzierbar ist. Die Fässer und Plastikbeutel wurden als Verpackung gewählt, da sich so auf einfache Weise viele Referenzgewichte herstellen lassen.

Zur Herstellung der Fass-Gewichte werden verschließbare Fässer mit der gewünschten Menge an Partikeln befüllt. Dabei sollte das Gewicht 30 kg nicht überschreiten, da die Fässer händisch transportiert werden.

(a) Oben rechts: Fass-Gewicht, unten: eine Gruppe von Beutel-Gewichten

(b) Beutel Gewicht während der Herstellung

Abb. 4.5 – Definierte Gewichte für die Kalibrierung. Links sind fertige Gewichte zu sehen, rechts ein einzelner Beutel, welcher anschließend mit einem Kabelbinder verschlossen wird

Das Gewicht eines Beutels alleine ist gering und daher kein geeignetes Intervall zwischen zwei Stützpunkten. Deshalb werden die 37 Beutel in neun Gruppen zu je vier bis fünf Beuteln eingeteilt und nummeriert. Die Beutel werden in den festgelegten

Gruppen verwogen und später gruppenweise, anhand der Nummerierung, in den Vorratsbehälter gelegt.

Um einen aussagekräftigen Mittelwert bilden zu können, werden die Referenzgewichte je drei mal verwogen, bevor mit der eigentlichen Kalibrierung begonnen wird. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

Tabelle 4.3 – Ergebnisse der Verwiegung der Referenzgewichte und daraus resultierenden Stützpunkt für die Kalibrierung der Differentialdosierwaage

Stützpunkt		**Verwiegung** [kg]			**Mittelwert**	**Gewicht kumuliert**
Nr.	**Name**	**1.**	**2.**	**3.**	[kg]	[kg]
1	Fass 1	29,72	29,72	29,72	29,72	29,72
2	Fass 2	24,66	24,66	24,66	24,66	54,38
3	Fass 3	26,1	26,1	26,1	26,1	80,48
4	Fass 4	24,5	24,5	24,5	24,5	104,98
5	Fass 5	19,82	19,82	19,82	19,82	124,8
6	Fass 6	24,62	24,62	24,62	24,62	149,42
7	Fass 7	25,78	25,78	25,78	25,78	175,2
8	BG 1	21,22	21,22	21,22	21,22	196,42
9	BG 2	21,04	21,04	21,04	21,04	217,46
10	BG 3	19,62	19,62	19,62	19,62	237,08
11	BG 4	19,98	19,98	19,98	19,98	257,06
12	BG 5	21,22	21,24	21,22	21,23	278,29
13	BG 6	21,84	21,84	21,84	21,84	300,13
14	BG 7	19,62	19,62	19,62	19,62	319,75
15	BG 8	20,7	20,7	20,7	20,7	340,45
16	BG 9	13,03	13,03	13,03	13,03	353,48

BG = Beutelgruppe

Nachdem die Masse der Referenzgewichte ermittelt wurde, werden diese nun in den Vorratsbehälter gelegt. Nach jedem Hineinlegen eines Fasses oder einer Gruppe Beutel in den Vorratsbehälter, wird eine Pause bis zum nächsten Gewicht gemacht. Dadurch lassen sich die unterschiedlichen Stützpunkte in den Messdaten besser erkennen. Nachdem alle Referenzgewichte im Vorratsbehälter liegen, werden sie wieder herausgenommen. Der Versuch wird ebenfalls drei mal wiederholt, die Reihenfolge der Gewichte bleibt dabei die selbe.

Auswertung

Die Messdaten der DDW für die Kalibrierversuche sind in Abb. 4.6 für jeden Versuch graphisch dargestellt. Die Stützpunkte lassen sich gut an den Plateaus, welche durch die Pausen entstanden sind, erkennen.

Für jedes Plateau, also jeden Stützpunkt, wird der Gewichtswert notiert, den die DDW ausgibt. Anschließend wird für jeden Stützpunkt ein Mittelwert aus den drei Messwerten gebildet. Die Ergebnisse der Versuche und die jeweiligen Mittelwerte

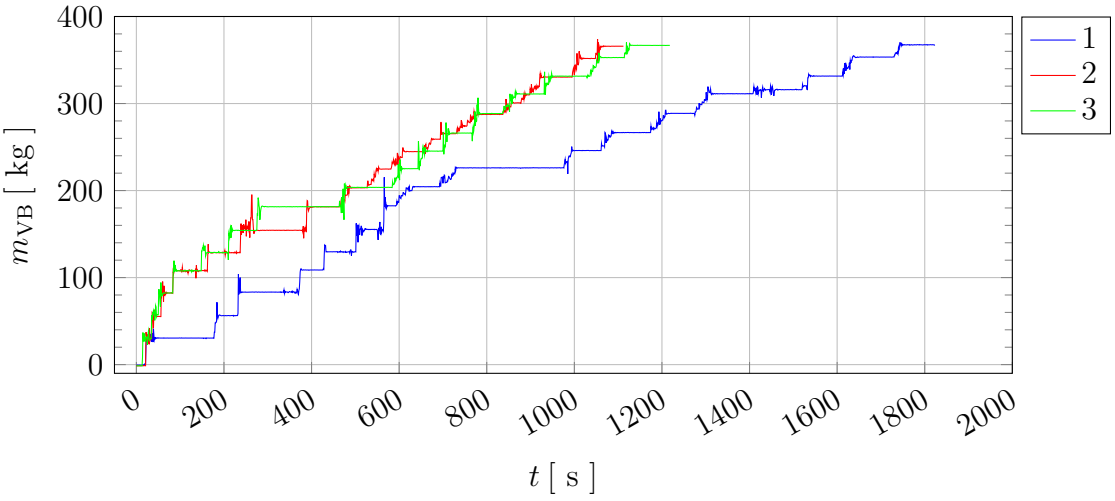


Abb. 4.6 – Messdaten der DDW der Kalibrierung. m_{VB}, ist die Masse im Vorratsbehälter.

sind in Tabelle 4.4 zu sehen. Die Gewichtswerte der Referenzgewichte sowie die der DDW werden in das Diagramm in Abb. 4.7 eingetragen.

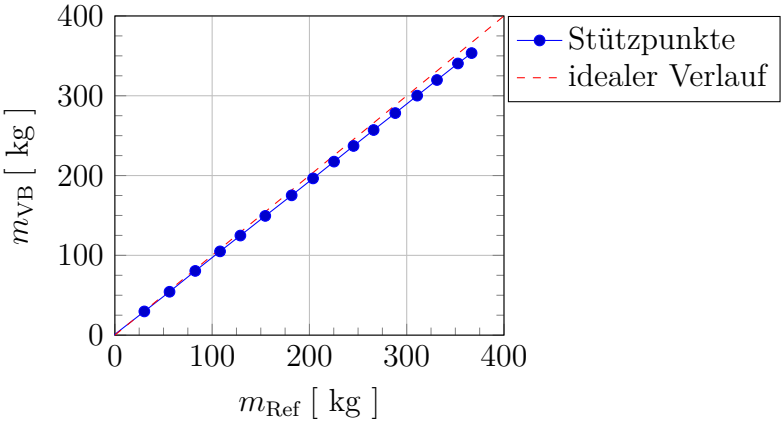


Abb. 4.7 – Graphische Darstellung der Stützpunkte. Das Gewicht im Vorratsbehälter, m_{VB}, ist über die Masse der Referenzgewichte, m_{Ref}, aufgetragen. Zusätzlich wird die ideale Position der Stützpunkte bei einer perfekt kalibrierten Waage dargestellt.

Der Graph zeigt einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen den beiden Daten. Die Punkte im Diagramm sind jeweils ein Stützpunkt. In Excel wird auf Basis der Stützpunkte eine Kalibrierfunktion gebildet:

$$m_{\mathrm{korr}} = 0,9631 \cdot m_{\mathrm{mess}} + 0{,}6225\,\mathrm{kg} \tag{4.1}$$

Der von der DDW gemessene Wert, m_{mess}, wird mittels Gleichung (4.1) korrigiert und man erhält, m_{korr}. Die, um die Ungenauigkeit der Gewichtsmessung korrigierte Masse im Vorratsbehälter

Tabelle 4.4 – Ergebnisse aus den drei Versuchen der Kalibrierung. Die Gewichtswerte aus den Spalten Versuche und Mittelwert sind Daten der DDW. Das Gewicht im Vorratsbehälter, m_{VB}, ist über die Zeit, t, aufgetragen.

Stützpunkt	**Versuch** [kg]			**Mittelwert**	**Referenzgewicht**
	1.	2.	3.	[kg]	[kg]
0	-0,556	-1,31	-1,346	-1,071	0
1	30,522	30,209	30,127	30,286	29,72
2	56,282	55,32	56,984	56,195	54,38
3	83,319	82,339	82,303	82,654	80,48
4	108,726	107,802	107,826	108,118	104,98
5	129,572	128,678	128,828	129,026	124,8
6	155,31	154,337	154,179	154,609	149,42
7	182,478	181,305	181,433	181,739	175,2
8	204,417	203,153	203,641	203,737	196,42
9	226,079	224,69	225,151	225,307	217,46
10	245,98	244,728	245,313	245,340	237,08
11	266,619	265,327	266,056	266,001	257,06
12	288,707	287,517	288,479	288,234	278,29
13	311,245	310,061	310,986	310,764	300,13
14	331,548	330,379	331,445	331,124	319,75
15	353,394	351,775	352,806	352,658	340,45
16	367,474	365,856	366,809	366,713	353,48

Bei einer idealen Waage, welche in der Lage wäre immer den wahren (in der Realität unbekannten) Gewichtswert anzuzeigen, müsste die Kalibriergerade eine Steigung von 1 besitzen und durch den Punkt (0,0) verlaufen. Die Gleichung (4.1) entspricht dem nicht.

Die Steigung der Geraden ist etwas geringer als 1. Das bedeutet, dass von der DDW angezeigte Gewicht höher ist, als das tatsächliche Gewicht. Diese Ungenauigkeit nimmt mit steigendem Gewicht zu, außerdem ist eine Nullpunktverschiebung um 0,6225 kg zu erkennen.

Die zu niedrige Steigung und die Nullpunktverschiebung der Kalibrierfunktion deuten auf eine systematischen Fehler hin. Die Messwerte der Experimente müssen mittels der Kalibrierfunktion aus Gleichung (4.1) korrigiert werden, um diesen Fehler aus den Messungen zu entfernen.

4.4 Ablaufplan

Die Genauigkeit und der Einfluss von Vibrationen auf das Messergebnis der DDW bei verschiedenen Massenströmen, soll untersucht werden. Die Versuche werden jeweils drei mal durchgeführt, was dazu dient Ausreißer in den Messwerten zu entdecken und einen verlässlichen Mittelwert zu bilden. Der Ablaufplan für die Versuche ist in Tabelle 4.5 dargestellt.

Tabelle 4.5 – Ablaufplan für alle Versuche und deren Kennwerten. Die Unsicherheit wird nach Gleichung (3.22) berechnet.

Nr.	**Wdh.**	$\dot{m}$ [kg/s]	d [mm]	Δm [kg]	Δt [s]	$u(\dot{m})_{\text{DDW theo}}$ [%]
Ohne Vibration						
1	3	0,5	30	72,5	15	3,41
2	3	1,5	46	145	105	1,71
3	3	3	60	145	75	1,72
Vibration durch Rotation des Receivers						
1	3	0,5	30	72,5	150	3,41
2	3	1,5	46	145	105	1,71
3	3	3	60	145	75	1,72
Vibration durch Aktivierung des Fördersystems						
1	3	0,5	30	72,5	150	3,41
2	3	1,5	46	145	105	1,71
3	3	3	60	145	75	1,72
Vibration durch Rotation des Receivers und Aktivierung des Fördersystems						
1	3	0,5	30	72,5	150	3,41
2	3	1,5	46	145	105	1,71
3	3	3	60	145	75	1,72

Wdh. = Wiederholungen; $\dot{m}$ = Massenstrom; d = Blendendurchmesser;
Δm = ausgeliterte Menge; Δt = Dauer des Ausliterns;
$u_{\text{DDW}}(\dot{m})$ = Unsicherheit der Massenstrommessung der DDW

Im ersten Schritt wird mit jeder Blende, ohne Vibrationen, je drei mal ausgelitert. Die Versuche dienen dazu, einen Referenzwert zu den Versuchen mit Vibrationen zu bilden. Im zweiten Schritt werden dieselben Versuche unter dem Einfluss von verschiedenen Vibrationen wiederholt. Folgende Vibrationsarten werden untersucht:

- Vibration durch Rotation des Receivers
- Vibration durch Aktivierung des Fördersystems
- Vibration durch Aktivierung des Fördersystem und Rotation des Receiver

Hiermit soll untersucht werden, ob und wie sich welche Art der Vibration auf die Messergebnisse der Massenstrommessung auswirkt.

Die Vibration des Receivers wird durch Rotation bei einer Drehzahl von 60 U/min erzeugt. Die Vibration des Fördersystems wird durch beide Förderbänder, sowie das Becherwerk erzeugt, welche während der Versuche angeschaltet werden.

Die Masse die ausgelitert werden soll wurde so gewählt, dass die theoretische Unsicherheit der Massenstrommessung mit der DDW, $u_{\text{DDW}}(\dot{m})$, ungefähr halb so groß (1,5 %) ist wie im Lastenheft als zulässig angegeben (3 %). Für die Blenden

46 mm und 60 mm wurde die Belastungsgrenze der Waage als auszuliternde Masse gewählt. Für die 30 mm Blende nur 72,5 kg.

Die theoretische Unsicherheit für die Versuche mit der 30 mm Blende bei der gewählten auszuliternden Masse (72,5 kg) liegt bei 3,41 %. Dies entspricht nicht den gewünschten 1,5 % und liegt daran, dass die Masse zu klein gewählt wurde.

Aufgrund eines Fehlers in den Berechnungen wurde angenommen, dass es bei der 30 mm Blende ausreichend ist 72,5 kg auszulitern, um die gewünschte Genauigkeit (1,5 %) zu erreichen. Dieser Fehler wurde erst nach der Durchführung der Experimente bemerkt und kann daher nicht mehr korrigiert werden. Da die 3,41 % noch nah dem geforderten Grenzwert von 3 % liegt, werden die geplanten Versuche mit der 30 mm Blende weiterhin als sinnvoll und verwertbar betrachtet.

5 Auswertung

Um die Messdaten auszuwerten wird zunächst gezeigt, wie diese aufgearbeitet werden. Danach werden die Messergebnisse analysiert. Dazu werden im ersten Schritt die Ergebnisse der DDW mit den Ergebnissen der PFW verglichen. Anschließend werden die Standardunsicherheiten der Messwerte betrachtet. Außerdem wird untersucht, wie signifikant der Einfluss der Vibration auf das Messergebnis ist.

Die Ergebnisse der Analyse werden danach in einem Fazit zusammengefasst und es werden die eingangs gestellten Forschungsfragen beantwortet.

5.1 Messergebnisse

Zur Auswertung der Daten müssen diese zunächst aufgearbeitet werden. Um das Vorgehen bei der Aufarbeitung der Daten zu veranschaulichen, wird im Folgenden eine Messung als Beispiel ausgewertet. Die ausgewählte Messung stammt aus der Versuchsreihe ohne Vibrationen mit einem Blendendurchmesser von 60 mm, siehe Tabelle 4.5. Es wurde die erste Messung dieser Versuchsreihe ausgewählt. Der Verlauf der Messung ist in Abb. 5.1 graphisch dargestellt.

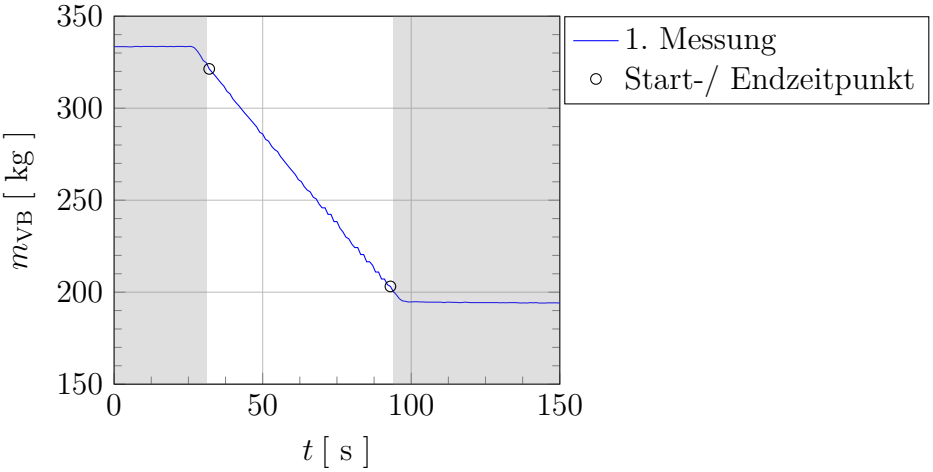


Abb. 5.1 – Verlauf einer Messung ohne Vibration mit 60 mm Blendendurchmesser. Dargestellt ist die Masse im Vorratsbehälter, m_{VB}, über die Zeit, t. Die im Nachhinein abgeschnittenen Bereiche sind ausgegraut.

Wie in Kapitel 3.7 bereits beschrieben, kommt es beim Öffnen und Schließen des Quetschventils zu einem Anfahr- und Anhalte-Effekt. Diese sollen die Messung

nicht beeinflussen. Deshalb wird der Startpunkt für die Auswertung so gewählt, dass zwischen der ersten Gewichtsveränderung, welche der Öffnung des Quetschventils entspricht und dem Startpunkt, der für die Auswertung genutzt wird, ein bestimmter zeitlicher Abstand liegt. Dasselbe wird vice versa auf den Endpunkt angewandt.

Beim Auswerten der Daten hat sich gezeigt, dass dieser Abstand am einfachsten über das Gewicht definierbar und anwendbar ist. Für die unterschiedlichen Massenströme der Blenden wurden jeweils andere Abstände gewählt. Für die 30 mm Blende wurde ein Abstand von ca. 7 kg und für die 46 mm und 60 mm Blende ein Abstand von ca. 12 kg gewählt. Diese Werte basieren auf Erfahrungen, die bei der Auswertung gemacht wurden.

In der Abb. 5.1 sind die abgeschnittenen Bereiche ausgegraut. Start- und Endpunkt für die ausgewählte Messung sind jeweils mit einem Kreis markiert. Die ausgewählten Punkte sind in Tabelle 5.1 notiert. Die gemessene Masse zum jeweiligen Zeitpunkt muss nun noch mit der Kalibrierfunktion (4.1) korrigiert werden. Die korrigierte Masse ist ebenfalls in Tabelle 5.1 eingetragen.

Tabelle 5.1 – Start- und Endzeitpunkt der ausgewählten Messung und die Angabe der gemessenen sowie der korrigierten Masse. Die Korrektur wurde mit der Kalibrierfunktion durchgeführt.

	Zeitpunkt [s]	$\boldsymbol{m_{\text{mess}}}$ [kg]	$\boldsymbol{m_{\text{korr}}}$ [kg]
Startpunkt	34,067	321,562	310,319
Endpunkt	95,067	202,921	196,056

m_{mess} = Vom Messgerät angezeigte Masse;
m_{korr} = korrigierter Messwert der Masse

Dieses Vorgehen wird für jede Messung durchgeführt. Aus den jeweiligen Messpunkten kann anschließend der Massenstrom nach Gleichung (3.1) berechnet werden.

$$\dot{m} = \frac{m_{\text{E}} - m_{\text{S}}}{t_{\text{E}} - t_{\text{S}}} = \frac{|196{,}056\,\text{kg} - 310{,}319\,\text{kg}|}{95{,}067\,\text{s} - 34{,}067\,\text{s}} = 1{,}873\,\text{kg/s} \tag{5.1}$$

Für, t_{S}, und, t_{E}, wird der Start- beziehungsweise Endzeitpunkt eingesetzt. Für, m_{S}, und, m_{E}, wird die korrigierte Masse zum Startpunkt und die korrigierte Masse zum Endpunkt respektive eingesetzt.

Aus dem Massenstrom für die ausgewählte Messung sowie den berechneten Massenströmen der anderen beiden Messungen der ausgewählten Versuchsreihe wird dann ein Mittelwert gebildet und als Massenstrom für die Versuchsreihe angegeben. Die Werte sind in Tabelle 5.2 notiert.

Tabelle 5.2 – Berechnete Massenströme der Versuchsreihe ohne Vibration und mit einem Blendendurchmesser von 60 mm

	$\dot{m}$ [kg/s]
Erste Messung	1,873
Zweite Messung	1,866
Dritte Messung	1,891
Mittelwert	1,877

$\dot{m}$ = Massenstrom

Dauer und Masse des Auslitervorgangs

Aufgrund der Limitierung der PFW können bis zu 145 kg ausgelitert werden, siehe Kapitel 4.1. Da jedoch jeweils am Anfang und am Ende etwas von den Messwerten abgeschnitten wird, verringert sich die Dauer und damit auch die Masse, welche zur Berechnung des Massenstroms genutzt wird.

Für jede Blende sind die Dauer und Masse der Messungen, sowie die Größe des abgeschnittenen Bereiches ähnlich. Daher können Mittelwerte für jedes Messgerät (DDW und PFW) und jeden Blendendurchmesser gebildet werden. Die Mittelwerte sind in Tabelle 5.3 notiert.

Tabelle 5.3 – Mittelwert der Dauer des Auslitervorgangs und der ausgeliterten Masse nach Blendendurchmesser für die DDW und die PFW

d	$\overline{\Delta t}$ [s]		$\overline{\Delta m}$ [kg]	
[mm]	**DDW**	**PFW**	**DDW**	**PFW**
30	124,84	128,05	59,5	61
46	87,98	89,56	117,02	120,69
60	58,58	61,28	111,16	119,12

d = Blendendurchmesser;
$\overline{\Delta t}$ = Mittelwert fü die Dauer des Auslitervorgangs;
$\overline{\Delta m}$ = Mittelwert für die ausgeliterte Masse

Wie aus Masse und Dauer der Messungen in der Tabelle zu erkennen ist, wurden bei den Messwerten der DDW mehr Werte abgeschnitten. Dies hat zwei Gründe. Einerseits beträgt die zeitliche Auflösung der Daten der DDW 1 s. Bei der PFW sind es ca. 100 ms. Dadurch ist es schwieriger, in den Daten der DDW den Zeitpunkt zu finden, ab dem der Anfahr- und Anhalteffekt keinen Einfluss mehr hat. Es wurde eher zu viel als zu wenig abgeschnitten.

Der zweite Grund betrifft doppelte Messwerte. Es gab in den Messdaten der DDW häufig Bereiche, in denen bei zwei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten derselbe Gewichtswert angezeigt wurde. Bei der PFW war dieses Verhalten nicht zu zu beobachten. Deshalb wird davon ausgegangen, dass es ein technisches oder softwareseitiges Problem der DDW ist. Die Ursache hierfür ist nicht bekannt.

Um verlässliche Ergebnisse für den Massenstrom zu erhalten, wurde immer versucht einen Wert zu suchen, welcher nicht doppelt vorkommt. Dadurch musste bei manchen Versuchen mehr abgeschnitten werden als geplant.

Standardabweichung und Standardunsicherheit

Aus den Messergebnissen lässt sich neben dem Massenstrom auch die experimentelle Standardabweichung, s, berechnen.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2} \tag{5.2}$$

Sie beschreibt das Streuverhalten der Einzelwerte um den Mittelwert der Messungen herum [67, 4.2.2]. Die Bedeutung der Variablen sind in Tabelle 5.5 notiert.

Im Folgenden wird der Mittelwert von drei Massenstrommessungen eines Versuches zur Vereinfachung als Ergebnis oder Messwert und nicht mehr als Mittelwert der Messungen bezeichnet. Die Ergebnisse für die Massenströme aller Versuchsreihen, sowie deren Standardabweichungen sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst.

Tabelle 5.4 – Ergebnisse und Standardabweichungen aus den Messungen mit der DDW

Vibration	d [mm]	$\dot{m}$ [kg/s]	s [kg/s]	[%]	$\overline{s}$ [%]
ohne Vibration	30	0,486	0,0043	0,89	0,96
	46	1,333	0,0176	1,32	
	60	1,877	0,0125	0,67	
Förderband	30	0,473	0,0049	1,03	0,8
	46	1,332	0,0048	0,36	
	60	1,915	0,0193	1,01	
Receiver	30	0,478	0,0050	1,04	0,79
	46	1,336	0,0081	0,60	
	60	1,915	0,0136	0,71	
Receiver und Förderband	30	0,469	0,0020	0,42	0,52
	46	1,319	0,0116	0,88	
	60	1,883	0,0049	0,26	

d = Blendendurchmesser; $\dot{m}$ = Massenstrom;
s = Standardabweichung

Die experimentelle Standardabweichung selbst hat für die Auswertung eines Experimentes keine hohe Aussagekraft. Interessanter ist der mittlere Fehler des Mittelwertes. Diese Größe wird Standardunsicherheit, u, genannt.

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot tF \tag{5.3}$$

Sie charakterisiert den Bereich der Werte, die der Messgröße durch die Messung vernünftigerweise zugeordnet werden können. Bei der Abwesenheit von systematischen Fehlern befindet sich in diesem Bereich der wahre (unbekannte) Wert mit einem gewissen Vertrauensniveau, P [68] . Die Bedeutung der Variablen sind in Tabelle 5.5 notiert.

Tabelle 5.5 – Bedeutung der Variablen aus Gleichung 5.2, 5.3 und den Erläuterungen zur Standardunsicherheit

Variable	**Beschreibung**	**Einheit**
s	experimentelle Standardabweichung	[kg/s]
u	Standardunsicherheit	[kg/s]
x_i	Wert der Einzelmessung	[kg]
$\overline{x}$	Mittelwert der Einzelmessungen	[kg]
n	Anzahl der Messungen	[-]
tF	t-Faktor	[-]
v	Freiheitsgrad	[-]
P	Vertrauensniveau	[%]

Der t-Faktor, tF, wird in Abhängigkeit vom Freiheitsgrad und des gewünschten Vertrauensniveaus, P, aus der Tabelle mit den Werten für die t-Verteilung in Anhang A.5 ausgewählt. Der Freiheitsgrad, v,

$$v = n - 1 \tag{5.4}$$

entspricht der Anzahl der Messungen minus eins. Für die durchgeführten Experimente mit je drei Versuchen ist der Freiheitsgrad:

$$v = 3 - 1 = 2 \tag{5.5}$$

Das Vertrauensniveau, P, besagt, mit welcher Wahrscheinlichkeit der wahre (unbekannte) Wert im Intervall, $[\overline{x} - u_x, \overline{x} + u_x]$, um den Mittelwert $\overline{x}$ liegt. Es kann je nach Bedarf gewählt werden. Für die Berechnung der Standardunsicherheit dieser Messergebnisse wird $P = 95{,}45\,\%$ gewählt.

Mit dem gewählten Vertrauensniveau und dem Freiheitsgrad kann nun der t-Faktor aus der Tabelle im Anhang A.5 ausgewählt werden. Er entspricht, tF, $= 4{,}3$. Damit lässt sich die Standardunsicherheit berechnen. Die Werte sind in Tabelle 5.6 zu finden.

Hierbei ist zu beachten, dass die Unsicherheit und die Standardunsicherheit der Massenstrommessung von der Dauer des Auslitervorgangs und der ausgeliterten Masse abhängt. Je größer die ausgeliterte Masse und die Dauer des Auslitervorgangs ist, desto kleiner wird die Unsicherheit beziehungsweise Standardunsicherheit. Dieser Zusammenhang ergibt sich aus Gleichung (3.19) und (3.32) zur Berechnung der

Unsicherheit der Massenstrommessung mit der DDW und PFW, respektive. Die berechneten Standardabweichungen und -unsicherheiten beziehen sich also immer auf Masse und Dauer der Versuche aus Tabelle 5.3.

Tabelle 5.6 – Ergebnisse und Standardunsicherheiten aus den Messungen mit der DDW

Vibration	d [mm]	$\dot{m}$ [kg/s]	u (P=95,45 %) [kg/s]	[%]	$\overline{u}$ [%]
ohne Vibration	30	0,486	0,0108	2,21	2,38
	46	1,333	0,0437	3,28	
	60	1,877	0,0310	1,65	
Förderband	30	0,473	0,0121	2,56	1,98
	46	1,332	0,0119	0,89	
	60	1,915	0,0479	2,5	
Receiver	30	0,478	0,0124	2,59	1,95
	46	1,336	0,0200	1,5	
	60	1,915	0,0337	1,76	
Receiver und Förderband	30	0,469	0,0049	1,05	1,3
	46	1,319	0,0288	2,18	
	60	1,883	0,0123	0,65	

d = Blendendurchmesser; $\dot{m}$ = Massenstrom;
u = Standardunsicherheit

Die Messdaten der Plattformwaage wurden analog zum Vorgehen bei der DDW aufgearbeitet. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 5.7 und 5.8 dargestellt.

Tabelle 5.7 – Ergebnisse und Standardabweichungen aus den Messungen mit der PFW

Vibration	d [mm]	$\dot{m}$ [kg/s]	s [kg/s]	[%]	$\overline{s}$ [%]
ohne Vibration	30	0,478	0,00235	0,49	0,29
	46	1,363	0,00344	0,25	
	60	1,948	0,00215	0,11	
Förderband	30	0,476	0,00191	0,4	0,19
	46	1,343	0,00161	0,12	
	60	1,943	0,00098	0,05	
Receiver	30	0,477	0,00099	0,21	0,16
	46	1,342	0,00245	0,18	
	60	1,942	0,00168	0,09	
Receiver und Förderband	30	0,475	0,00164	0,35	0,23
	46	1,341	0,00236	0,18	
	60	1,943	0,00307	0,16	

d = Blendendurchmesser; $\dot{m}$ = Massenstrom;
s = Standardabweichung

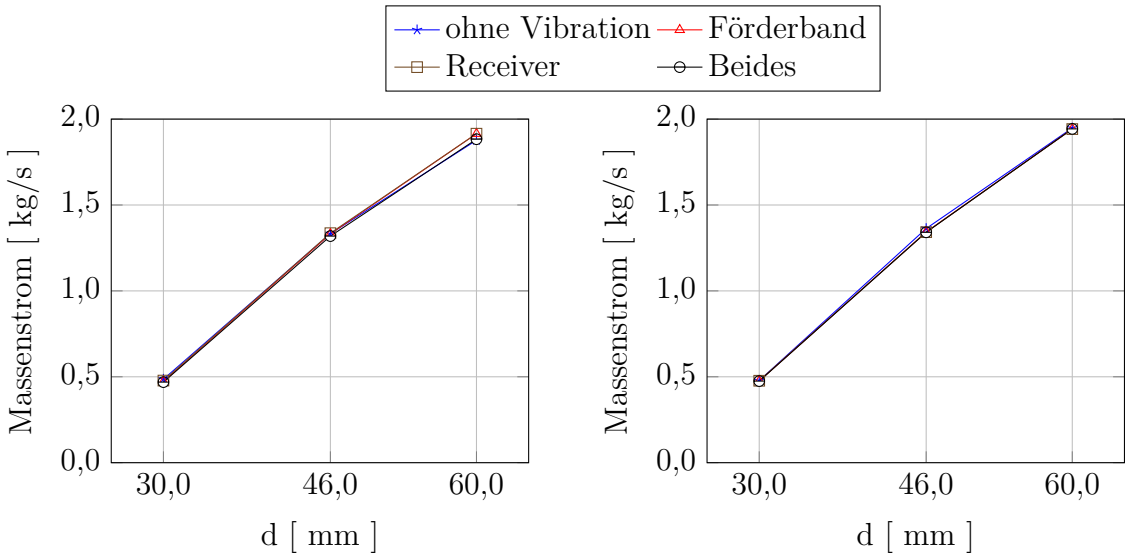
Tabelle 5.8 – Ergebnisse und Standardunsicherheiten aus den Messungen mit der PFW

Vibration	d [mm]	$\dot{m}$ [kg/s]	u (P=95,45 %) [kg/s]	[%]	$\overline{u}$ [%]
ohne Vibration	30	0,478	0,00584	1,22	0,71
	46	1,363	0,00853	0,63	
	60	1,948	0,00535	0,27	
Förderband	30	0,476	0,00475	1	0,47
	46	1,343	0,00401	0,30	
	60	1,943	0,00243	0,12	
Receiver	30	0,477	0,00247	0,52	0,39
	46	1,342	0,00607	0,45	
	60	1,942	0,00416	0,21	
Receiver und Förderband	30	0,475	0,00408	0,86	0,56
	46	1,341	0,00585	0,44	
	60	1,943	0,00763	0,39	

d = Blendendurchmesser; $\dot{m}$ = Massenstrom;
u = Standardunsicherheit

5.2 Analyse

Die Diagramme in Abb. 5.2 zeigen die Messergebnisse für die Massenstrommessung aufgeteilt nach Blendendurchmesser und Art der Vibration für beide Messgeräte. Die Diagramme zeigen, dass eine gute Reproduzierbarkeit gegeben ist.



(a) DDW **(b)** PFW

Abb. 5.2 – Ergebnisse der Massenstrommessung aufgeteilt nach Blendendurchmesser und Vibrationsart. Links für die Messungen mit der DDW und rechts für die Messungen mit der PFW.

Es hat sich gezeigt, dass der Massenstrom, welcher den Vorratsbehälter verlässt, nicht dem in Kapitel 3.2 berechneten Wert entspricht. Bei der 46 mm Blende ist der reale Massenstrom mit ca. 1,347 kg/s um 0,153 kg/s kleiner als die erwarteten 1,5 kg/s. Bei der 60 mm Blende ist der reale Massenstrom mit ca. 1,944 kg/s sogar um 1,056 kg/s kleiner als die erwarteten 3 kg/s.

Es wird vermutet, dass der Grund für die Abweichung das Auslassrohr ist, welches über einen Flansch mit dem Quetschventil verbunden ist. Dieses ist um 45° angewinkelt und lenkt den Massenstrom um. Ab einem bestimmten Massenstrom kann es an dieser Stelle zu erhöhter Reibung kommen, wodurch der Massenstrom geringer ist als die Blende theoretisch zulässt.

Es ist außerdem zu sehen, dass die Messwerte der Plattformwaage näher beieinander liegen, als die Messwerte der DDW. Dies war zu erwarten, da die theoretische Unsicherheit der PFW geringer ist, als die der DDW und die Messwerte dadurch weniger streuen.

5.2.1 Vergleich mit der Referenzmessung

Die Referenzmessung wurde durchgeführt, um die Messergebnisse der DDW überprüfen zu können. Die PFW besitzt eine deutlich höhere Genauigkeit als die DDW, weshalb die Messwerte als Referenzwert genutzt werden können.

Abb. 5.3 und Abb. 5.4 zeigen für jeden Blendendurchmesser ein Diagramm, in dem die Messwerte beider Waagen für die jeweilige Blende sowie die dazugehörigen Standardunsicherheiten als Fehlerbalken aufgetragen sind.

Die Messwerte sind unterteilt nach Art der Vibration. Außerdem sind in jedem Diagramm die Mittelwerte der Massenströme der DDW ($\overline{\dot{m}_{i\,\mathrm{DDW}}}$) und der PFW ($\overline{\dot{m}_{i\,\mathrm{PFW}}}$) für den jeweiligen Blendendurchmesser eingezeichnet. Die Mittelwerte sind außerdem in Tabelle 5.9 notiert.

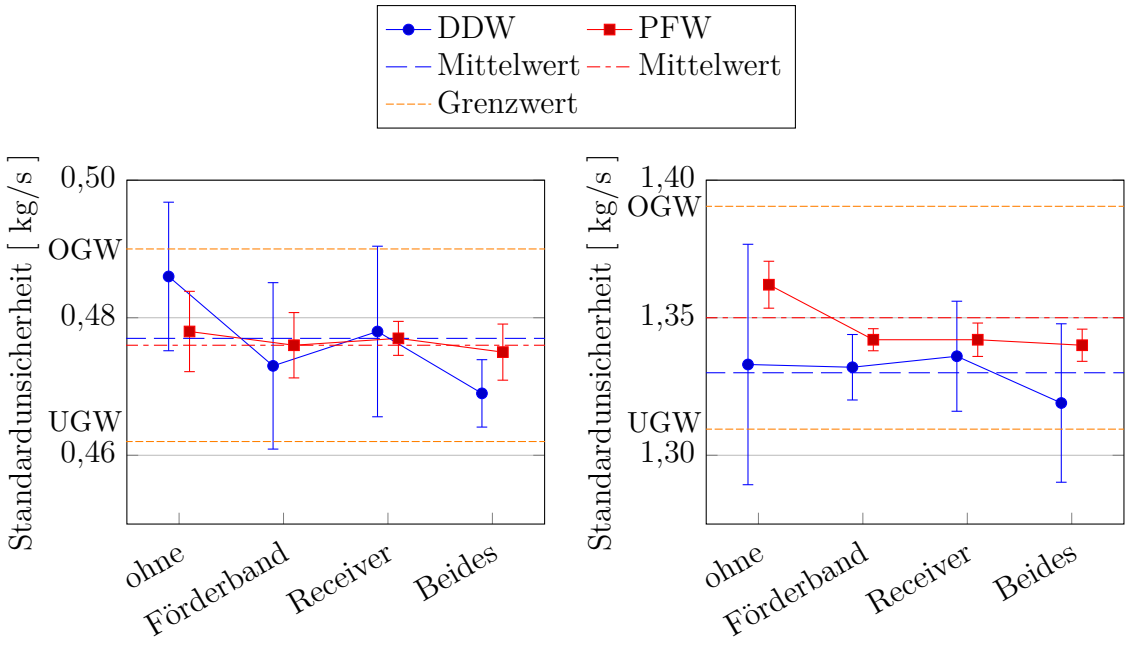
Anhand von $\overline{\dot{m}_{i\,\mathrm{PFW}}}$, und der geforderten Unsicherheit von $< 3\,\%$ wird für jeden Massenstrom ein oberer (OGW) und untere Grenzwert (UGW) gebildet.

$$OGW_i = \overline{\dot{m}_{i\,\mathrm{PFW}}} + \overline{\dot{m}_{i\,\mathrm{PFW}}} \cdot 0,03 \tag{5.6}$$

$$UGW_i = \overline{\dot{m}_{i\,\mathrm{PFW}}} - \overline{\dot{m}_{i\,\mathrm{PFW}}} \cdot 0,03 \tag{5.7}$$

Die oberen und unteren Grenzwerte sind in Tabelle 5.9 zusammengefasst.

Diese Grenzwerte sind ebenfalls in den Diagrammen eingezeichnet. Ein überschreiten der Grenzwerte bedeutet, dass der jeweilige Messwert die Anforderungen an die



(a) Blendendurchmesser: 30 mm **(b)** Blendendurchmesser: 46 mm

Abb. 5.3 – Vergleich der Ergebnisse der Massenstrommessungen zwischen der DDW und der PFW für die Blendendurchmesser 30 mm und 46 mm aufgeteilt nach Vibrationsart. OGW = oberer Grenzwert, UGW = unterer Grenzwert.

Genauigkeit nicht erfüllt hat. Zusätzlich wird die Abweichung, $\Delta\dot{m}_i$, der Messwerte der DDW, $\dot{m}_{i\,\mathrm{DDW}}$, vom Mittelwert der PFW, $\overline{\dot{m}_{i\,\mathrm{PFW}}}$, berechnet:

$$\Delta\dot{m}_i = \dot{m}_{i\,\mathrm{DDW}} - \overline{\dot{m}_{i\,\mathrm{PFW}}} \tag{5.8}$$

Die Abweichungen sind in Tabelle 5.10 dargestellt. Die relative Abweichung bezieht sich auf, $\overline{\dot{m}_{i\,\mathrm{PFW}}}$.

Aus den Diagrammen in Abb. 5.3 und 5.4 lässt sich erkennen, dass die meisten Messwerte innerhalb der Grenzwerte liegen. Zwei Messwerte der DDW überschreiten die Grenze von 3 % Abweichung gegenüber, $\overline{\dot{m}_{i\,\mathrm{PFW}}}$. Die beiden Werte wurden bei den Versuchen mit der 60 mm Blende gemessen, einmal ohne Vibration mit einer Abweichung von 3,51 %. Derandere Wert wurde bei dem Versuch mit der Vibration durch Förderband und Receiver mit einer Abweichung von 3,14 % gemessen. Der Mittelwert aller Abweichungen beträgt 1,62 %, wie in Tabelle 5.10 zu sehen ist.

Dieser Wert indiziert, dass die DDW bei einer entsprechenden Messdauer und mehrfacher Wiederholung der Einzelmessungen eine ausreichende Genauigkeit aufweist.

Jedoch kommt es, wie gerade geschildert, stellenweise zu größeren Abweichungen. In Abb. 5.3 und 5.4 ist zu sehen, dass Einzelwerte in mehren Fällen außerhalb der Grenzen liegen. Insbesondere die Fehlerbalken überschreiten die Grenzwerte

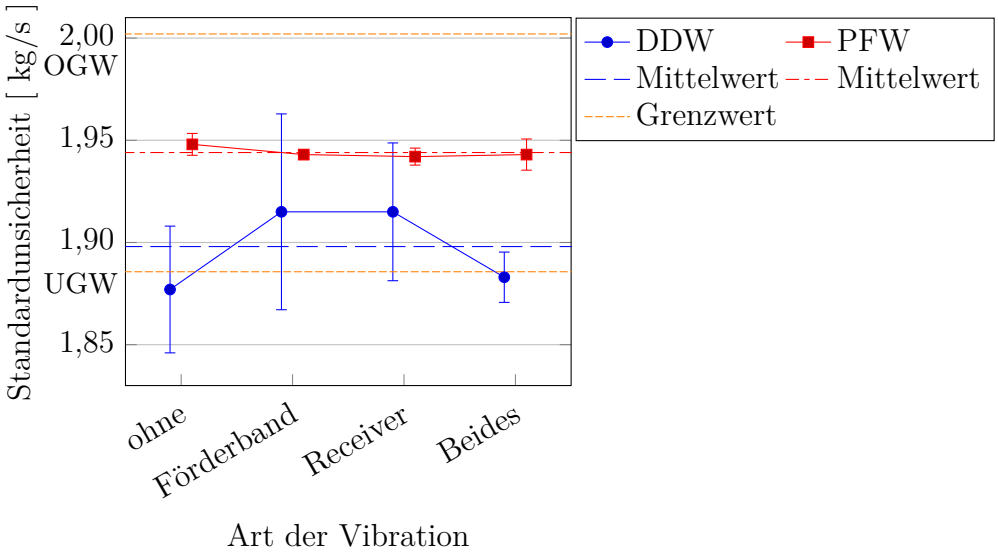


Abb. 5.4 – Vergleich der Ergebnisse der Massenstrommessungen zwischen der DDW und der PFW für den Blendendurchmesser 60 mm aufgeteilt nach Vibrationsart. OGW = oberer Grenzwert, UGW = unterer Grenzwert.

Tabelle 5.9 – Mittelwerte der Messwerte je Blende für PFW und DDW und der obere (OGW) und untere (UGW) Grenzwert für die Abweichungen der Messwerte der DDW von der Referenzmessung

Blende [mm]	$\overline{\dot{m}_{i\,\mathbf{PFW}}}$ [kg/s]	$\overline{\dot{m}_{i\,\mathbf{DDW}}}$ [kg/s]	**OGW** [kg/s]	**UGW** [kg/s]
30	0,4764	0,4766	0,4907	0,4621
46	1,3472	1,3300	1.3905	1.3095
60	1,9439	1,8976	2,002	1.885

$\overline{\dot{m}_{i\,\mathrm{PFW}}}$ = Mittelwert der Messungen der PFW
$\overline{\dot{m}_{i\,\mathrm{DDW}}}$ = Mittelwert der Messungen der DDW

oft. Dies bedeutet, dass die DDW zwar im Mittel ausreichend genau misst, eine Einzelmessung jedoch einer zu hohen Unsicherheit unterliegt und deshalb, ohne mehrfache Wiederholung, nicht aussagekräftig ist.

Wenn man die drei Diagramme vergleicht, ist zu sehen, dass, $\overline{\dot{m}_{i\,\mathrm{DDW}}}$, mit zunehmendem Blendendurchmesser einen größeren Abstand zu, $\overline{\dot{m}_{i\,\mathrm{PFW}}}$, einnimmt. In Abb. 5.5 sind diese Abweichungen in einem Diagramm dargestellt.

Der in Abb. 5.5 erkennbare Trend spiegelt sich auch in Tabelle 5.10 wieder. Bei zehn von zwölf Messwerten ist, $\Delta\dot{m}_i$, kleiner als null. Dieser Trend deutet auf einen systematischen Fehler der DDW hin. Der von der DDW gemessene Massenstrom ist systematisch kleiner als der der Referenzmessung.

Eine mögliche Ursache könnte die Kalibrierfunktion sein, welche zur Korrektur der Messwerte verwendet wurde. Um dies zu überprüfen müsste die Funktion angepasst oder die Versuche zur Kalibrierung wiederholt werden. Generell lässt sich sagen, dass

eine Messung immer um systematische Fehler, sofern bekannt, korrigiert werden muss [67, 4.2].

Tabelle 5.10 – Abweichung der Messwerte der DDW, von den Mittelwerten der Messwerte je Blende der PFW.

Vibration	d [mm]	$\Delta\dot{m}_i$ [kg/s]	|[%]|
ohne Vibration	30	0,0100	2,05
	46	-0,0143	1,07
	60	-0,0670	3,57
Förderband	30	-0,0032	0,67
	46	-0,0147	1,11
	60	-0,0285	1,49
Receiver	30	0,0012	0,24
	46	-0,0113	0,85
	60	-0,0292	1,53
Receiver und Förderband	30	-0,0072	1,53
	46	-0,0282	2,14
	60	-0,0605	3,14
Mittelwert der Abweichungen			1,62

d = Blendendurchmesser;
$\Delta\dot{m}_i$ = Abweichung nach Gleichung (5.8)

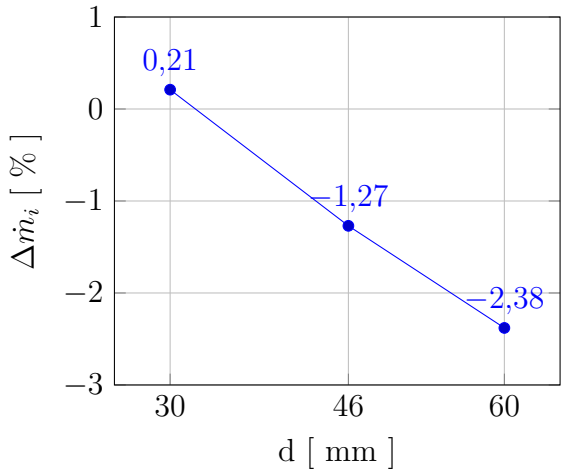


Abb. 5.5 – Abweichung des Mittelwertes der Messwerte der DDW vom Mittelwert der Messwerte der PFW, $\Delta\dot{m}_i$, unterteilt nach Blendendurchmesser

5.2.2 Standardunsicherheit

Neben dem Massenstrom selbst, ist vor allem die Standardunsicherheit für die Auswertung der Experimente interessant, da diese Größe den Bereich der Werte charakterisiert, die der Messgröße durch die Messung vernünftigerweise zugeordnet werden können. Bei einer Abwesenheit von systematischen Fehlern gibt diese Größe ebenfalls Auskunft über die Genauigkeit der Waagen.

Im Folgenden ist mit der Standardunsicherheit immer der prozentuale Wert gemeint. Der absolute Wert lässt sich schlecht einordnen und hat keine hohe Aussagekraft. Zunächst werden die Standardunsicherheiten der DDW aus Tabelle 5.6 betrachtet.

Die Werte für die DDW liegen im Bereich von 0,65 % bis 3,28 %, wobei die Grenze von 3 % einmal überschritten wird. Im Durchschnitt liegt der Wert bei 1,9 % und demnach innerhalb der spezifizierten Grenze.

Die PFW dient in dem Experiment als Referenzmessung und muss daher genauer messen als die DDW, siehe Kapitel 3.5. Der Grenzwert für die Unsicherheit liegt bei 0,6 %.

Die Werte für die Standardunsicherheiten der PFW aus Tabelle 5.8 liegen zwischen 0,21 % und 1,22 %. Drei Werte liegen über 0,6 %. Der Mittelwert beträgt 0,53 %. Er liegt zwar innerhalb der spezifizierten Grenze, jedoch nahe dem Grenzwert.

Anschließend wird für jeden Blendendurchmesser ein Mittelwert der Standardunsicherheiten aus allen Versuchen mit der jeweiligen Blende (mit und ohne Vibration) gebildet und in Tabelle 5.11 notiert. Damit sollen die Unsicherheiten der jeweiligen Massenströme miteinander verglichen werden.

Tabelle 5.11 – Mittelwert der Standardunsicherheiten der PFW und DDW für jeden Blendendurchmesser

$\boldsymbol{d}$ [mm]	$\boldsymbol{u_{\mathrm{DDW}}}$ [kg/s]	[%]	$\boldsymbol{u_{\mathrm{PFW}}}$ [kg/s]	[%]
30	0,0100	2,1	0,00429	0,9
40	0,0261	1,96	0,00612	0,45
60	0,0312	1,64	0,00489	0,25

d = Blendendurchmesser;
u_{DDW} = Unsicherheit der DDW;
u_{PFW} = Unsicherheit der PFW

Die Mittelwerte sind in Abb. 5.6 grafisch dargestellt. Zusätzlich sind die Grenzwerte der Unsicherheit für beide Waagen eingetragen.

Es ist zu erkennen, dass der Mittelwert der Standardunsicherheit der PFW bei den Versuchen mit einem Blendendurchmesser von 30 mm hoch ist und über dem Grenzwert liegt. Die anderen beiden Mittelwerte für die 46 mm und 60 mm Blende liegen wieder innerhalb des Grenzwertes von 0,6 %.

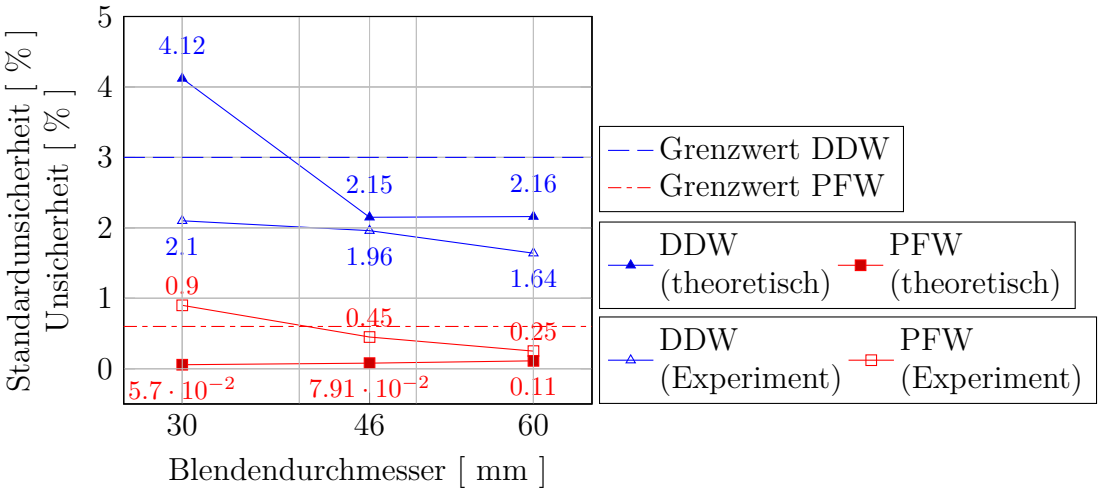


Abb. 5.6 – Mittelwert der experimentellen Standardunsicherheit nach Blendendurchmesser für die DDW und die PFW, sowie die theoretischen Unsicherheiten für beide Waagen nach Blendendurchmesser.

Für die DDW sind die Differenzen zwischen den Mittelwerten der Standardunsicherheiten gleichmäßiger verteilt.

Die Differenzen zwischen den Standardunsicherheiten unterscheiden sich. Da die Differenzen jedoch keinem Schema folgen, wird vermutet, dass es sich um zufällige Abweichungen handelt. Um diese Frage besser beantworten zu können, müssten weitere Versuche mit einer größeren Anzahl an Blenden und Versuchen durchgeführt werden.

Vergleich mit der theoretischen Unsicherheit

Neben der Standardabweichung, welche aus den Ergebnissen des Experimentes ermittelt werden konnte, ist in Abb. 5.6 zum Vergleich die berechnete theoretische Unsicherheit aufgetragen. Diese gibt einen Wert an, in dessen Nähe sich die experimentell ermittelte Standardunsicherheit theoretisch befinden sollte.

Die in Kapitel 3.4 und 3.5 berechneten Werte beziehen sich auf die maximal mögliche Masse von 145 kg für das auslitern und sind daher nur bedingt mit den Standardunsicherheiten der Messergebnisse vergleichbar. Zur Berechnung der aktualisierten theoretischen Unsicherheiten werden die Gleichungen (3.22) für die DDW und (3.35) für die PFW genutzt.

Die aktualisierten theoretischen Unsicherheiten werden mit den Werten aus Tabelle 5.12 neu berechnet. Diese Werte sind an die realen Massen und Zeiten der Auslitervorgänge aus Tabelle 5.3 angelehnt. Die Werte aus der Tabelle werden nicht exakt übernommen, da es sonst schwierig ist, eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Blenden und den Waagen zu gewährleisten.

Bei der DDW ist die Standardabweichung immer niedriger als die theoretische Unsicherheit. Dies bedeutet, dass die DDW genauer gemessen hat, als erwartet.

Tabelle 5.12 – Theoretische Unsicherheiten und die dafür genutzten Werte: Dauer des Auslitervorgangs und ausgeliterte Masse.

d [mm]	Δt [s]	Δm [kg]	u_{DDW} [kg/s]	[%]	u_{PFW} [kg/s]	[%]
30	125	60	0,0197	4,12	0,000274	0,0570
40	85	115	0,0291	2,15	0,00107	0,0791
60	60	115	0,0419	2,16	0,00217	0,112

d = Blendendurchmesser;
Δt = Dauer des Auslitervorgangs;
Δm = ausgeliterte Menge;
u_{DDW} = Unsicherheit der DDW;
u_{PFW} = Unsicherheit der PFW

Umgekehrt verhält es sich bei der PFW. Hier liegen die Standardabweichungen teils deutlich über den theoretische Unsicherheiten.

Die theoretische Unsicherheit für die DDW bei einer 30 mm Blende ist deutlich höher als die anderen berechneten Unsicherheiten der DDW. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei den Versuchen mit der 30 mm Blende nur maximal 72,5 kg statt 145 kg ausgelitert wurden. Wie in Kapitel 4.4 beschrieben, kam es infolge eines Fehlers in den Berechnungen zu der Annahme, dass 72,5 kg für die 30 mm Blende ausreichend seien, um eine, den anderen Blenden ähnliche, Genauigkeit zu erreichen.

Trotz einer theoretisch hohen Unsicherheit hat das Experiment gezeigt, dass die Standardabweichung der DDW bei den Versuchen mit der 30 mm Blende fast um die Hälfte kleiner ist, als der theoretische Wert und innerhalb des Grenzwertes von 3 % liegt.

Für die anderen beiden theoretische Unsicherheiten der DDW ist zu sehen, dass diese annähernd gleich sind. Daraus lässt sich schließen, dass die Unsicherheit bei verschiedenen Massenströmen theoretisch gleich bleibt, sofern die ausgeliterte Masse konstant ist. Die für die PFW berechneten theoretischen Unsicherheiten steigen bei konstanter Masse und zunehmenden Massenstrom.

Interessanterweise widersprechen die experimentell ermittelten Standardunsicherheiten den Berechnungen. In Abb. 5.6 ist zu sehen, dass sich die Standardunsicherheit bei beiden Waagen mit zunehmendem Massenstrom und konstanter Masse verringert. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass sich die Genauigkeit erhöht.

Dass die Berechnungen nicht mit den experimentell ermittelten Werten übereinstimmen kann mehrere Gründe haben. Eine Vermutung ist, dass im Modell zur Berechnung der Unsicherheit bestimmte Einflussfaktoren als zu hoch oder zu niedrig angenommen wurden, wodurch der berechnete Wert Fehler aufweist. Darüber hinaus könnte auch das Modell selbst fehlerhaft sein und zu unrichtigen Ergebnissen führen.

Eine andere mögliche Erklärung für die Abweichung könnten Effekte sein, die sich auf das Messergebnis auswirken und einen konstanten Wert haben. Dadurch könnte

die Auswirkung bei geringen Massenströmen höher sein und bei zunehmend größerem Massenstrom an Einfluss verlieren. Dies würde den im Diagramm erkennbaren Trend der Standardabweichung erklären.

Da bei beiden Waagen ein ähnlicher Trend zu erkennen ist, liegt die Vermutung nahe, dass die Ursache an einer Stelle liegt, wo ein Einfluss auf beide Messungen möglich ist, unabhängig vom verwendeten Messgerät. So könnten beispielsweise Hindernisse im Vorratsbehälter oder im Auslass die Messwerte beeinflussen.

Ferner könnte es auch ein elektronisches oder softwareseitiges Problem sein, welches sich auf die Standardunsicherheit auswirkt. Dies ist aber recht unwahrscheinlich, da in diesem Fall in beiden Waagen ein Problem bestehen müsste.

5.2.3 Einfluss der Vibration

Das Diagramm in Abb. 5.7a zeigt den Mittelwert der Standardunsicherheit für jede der vier Vibrationsarten. Es sind die Standardunsicherheiten der DDW und der PFW eingezeichnet.

Bei den Standardunsicherheiten der DDW ist ein Abwärtstrend zu erkennen. Bei den Versuchen mit Vibrationen durch nur eine Quelle ist die Standardunsicherheit geringer als bei den Versuchen ohne Vibration. Bei der Nutzung beider Vibrationsquellen wird die Standardabweichung noch einmal geringer im Vergleich zu den anderen Werten.

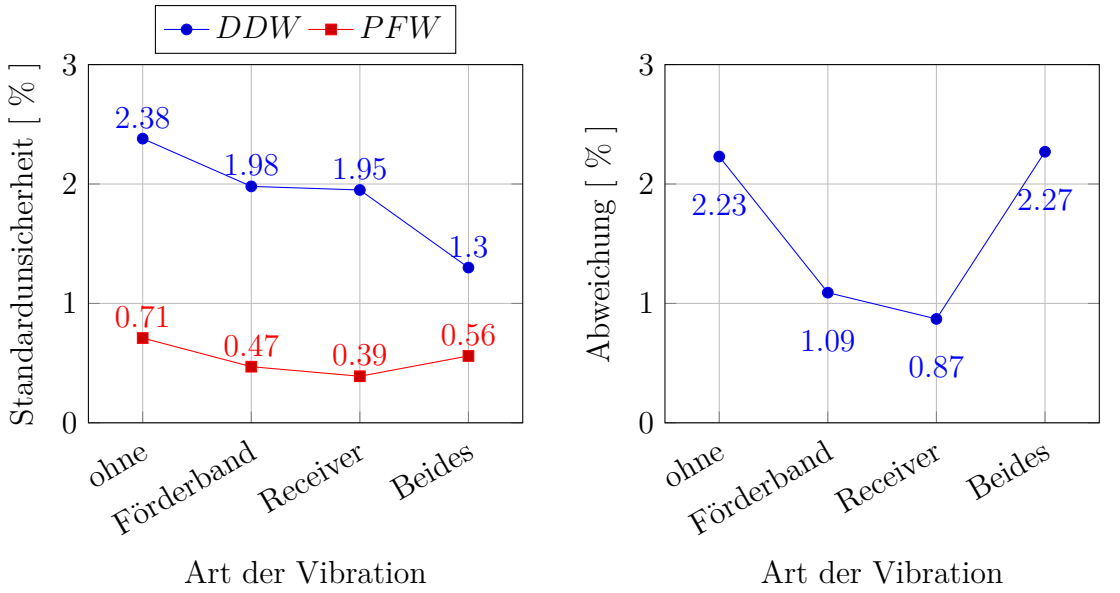
Bei den Versuchen mit der PFW sind die Standardunsicherheiten ebenfalls geringer, wenn Vibration vorhanden ist. Die Unterschiede sind jedoch nicht so ausgeprägt wie bei der DDW. Außerdem sind die Standardunsicherheiten der PFW am geringsten, wenn die Vibration nur von einer Quelle erzeugt wird, Förderband oder Receiver.

Der, insbesondere bei den Versuchen mit der DDW erkennbare, Abwärtstrend deutet auf eine Verringerung der Standardunsicherheit und damit eine Verbesserung bei zunehmender Vibration hin. Eine mögliche Erklärung ist, dass der Auslauf der Partikel durch die Vibration gleichmäßiger wird und dadurch die Standardunsicherheit abnimmt.

Das zweite Diagramm in Abb. 5.7b, zeigt die Mittelwerte der Abweichungen der Messwerte der DDW von der Referenzmessung. Die Unterteilung erfolgt ebenfalls nach Vibrationsart. Für die Mittelwerte der Abweichung ist, im Gegensatz zu den Werten der Standardabweichungen, kein eindeutiger Trend erkennbar.

Bei den Versuchen ohne Vibration und mit beiden Vibrationsquellen sind die Abweichungen mehr als doppelt so hoch wie bei den anderen beiden Versuchen mit nur einer Vibrationsquelle.

Das könnte darauf hindeuten, dass die Vibration mit nur einer Vibrationsquelle einen Effekt hat, welcher die Abweichungen verringert, wohingegen die Vibration durch zwei Vibrationsquellen die Abweichungen sogar leicht erhöht.



(a) Mittelwert der Standardunsicherheit

(b) Mittelwert der Abweichungen von der Referenzmessung

Abb. 5.7 – Mittelwert der Standardabweichung und Mittelwert der Abweichungen der Messwerte der DDW vom Messwert der Referenzmessung unterteilt nach Art der Vibration

Die vorliegenden Messergebnisse zeigen, dass die Vibration wahrscheinlich einen Einfluss auf das Messergebnis hat. Jedoch ist es schwierig zu sagen, was der Einfluss konkret bewirkt. Dazu wären weitere Daten nötig. Um die Vermutungen genauer zu untersuchen, könnte man, zusätzlich zu weiteren Versuchen, die Frequenz der jeweiligen Vibrationsart messen, um daraus dann Rückschlüsse auf den Einfluss der Vibration zu ziehen.

Eine genauere weiterführende Untersuchung des Einflusses der Vibration ist noch aus einem anderen Grund sinnvoll: Der Trend aus dem Diagramm in Abb. 5.7a wird nicht in dem Diagramm in Abb. 5.7b bestätigt.

5.3 Fazit

Die Fragen, die mit den experimentellen Untersuchungen geklärt werden sollten, sind:

- Ist die DDW für die Massenstrommessung in einem CentRec Hochtemperatur Solarreceiver geeignet?
- Wie hoch ist die Genauigkeit der DDW und liegt diese oberhalb der geforderten 97 %?
- Gibt es Probleme bei dem bestehenden Aufbau?
- Falls ja, was kann verbessert werden?

- Hat die Vibration einen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis?

Die Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst um die Fragen anschließend zu beantworten. Zunächst werden die für die ersten beiden Fragen relevanten Ergebnisse betrachtet.

Eignung und Genauigkeit der DDW

Die Untersuchung der Abweichungen der Messergebnisse der DDW von denen der Referenzmessung hat gezeigt, dass die DDW im Mittel ausreichend genau misst. Die Einzelwerte weichen jedoch teilweise um mehr als 3 % von der Referenzmessung ab. Des Weiteren hat der Vergleich der Abweichungen bei verschieden Massenströmen einen Trend gezeigt. Mit zunehmendem Massenstrom steigt die Abweichung. Dies deutet auf einen systematischen Fehler hin und muss genauer untersucht werden.

Im zweiten Schritt wurde die experimentell ermittelte Standardunsicherheit der Messwerte betrachtet. Hierbei konnte festgestellt werden, dass die Standardunsicherheit der DDW kleiner, und die der PFW größer als der theoretische Wert ist. Daraus lässt sich schließen, dass die Modelle, welche zur Berechnung genutzt wurden, möglicherweise Fehler haben. Die Modelle sollten daher überarbeitet werden.

Bei der Analyse der Standardunsicherheit ließ sich ebenfalls ein Trend erkennen. Die Standardunsicherheit hat sich bei steigendem Massenstrom verringert. Wie bereits angedeutet, widerspricht dies den theoretischen Unsicherheiten. Die Ursache könnte erneut ein Fehler in dem Modell sein, welches zur Berechnung genutzt wurde. Es könnte aber auch Effekte geben, welche bei kleinen Massenströmen einen größeren Einfluss auf die Standardunsicherheit haben als bei großen und dadurch den Trend erzeugen.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die untersuchte DDW mit der untersuchten ausgeliterten Masse aktuell nur bedingt als Messgerät für die Massenstrommessung in einem CentRec® -Receiver unter den genannten Anforderungen an die Genauigkeit geeinigt ist. Einerseits besteht vermutlich eine systematische Abweichung, welche korrigiert werden muss. Andererseits streuen die Werte teilweise mehr als die geforderten 3 %, wie die Standardunsicherheit zeigt. Damit ist die Waage bei einer Einzelmessung zu ungenau.

Die Mittelwerte, welche aus zwölf Einzelmessungen gebildet wurden, haben eine ausreichende Genauigkeit gezeigt. Dementsprechend ist bei einer hohen Anzahl an Wiederholungen die Genauigkeit ausreichend. Jedoch ist dass nicht immer umsetzbar für praktische Anwendungen.

Abb. 5.8 zeigt die theoretische Unsicherheit der DDW, u_{DDW}, für die drei Massenströme nach ausgeliterter Masse, Δm, im Bereich von 0 kg bis 200 kg. Zusätzlich sind die geforderte Unsicherheit, u_{gef}, und die Massen, die im Experiment ausgelitert wurden (Tabelle 5.12), eingetragen. Das Diagramm zeigt, dass die theoretische Unsi-

cherheit den geforderten Wert von 3 % bei einer ausgeliterten Masse von ca. 82 kg unterschreitet.

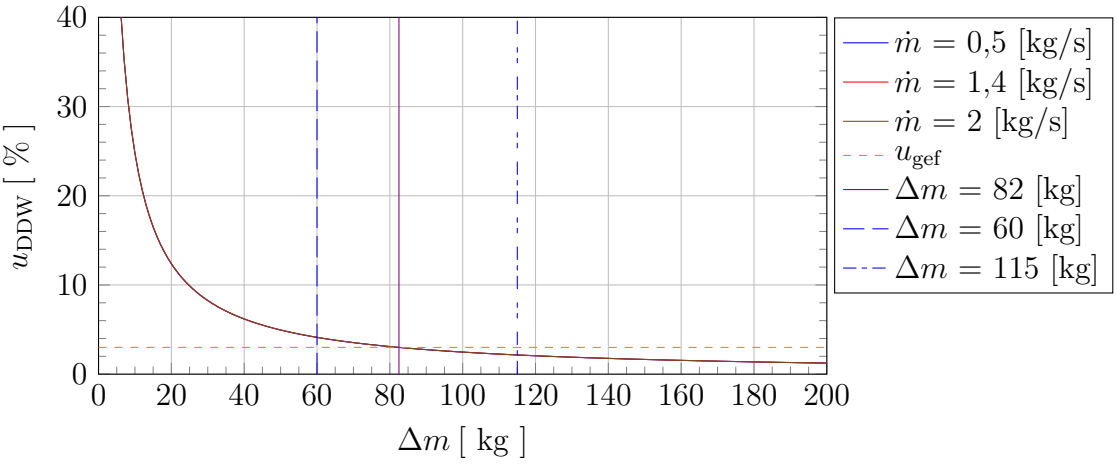


Abb. 5.8 – Theoretische Unsicherheit, u_{DDW}, der drei Massenströme nach ausgeliterter Masse, Δm, im Bereich von 0 kg bis 200 kg für die DDW nach Gleichung (3.22). Außerdem sind die geforderte Unsicherheit, u_{gef}, und die Massen, die im Experiment ausgelitert wurden (Tabelle 5.12), eingetragen. Bei der 30 mm Blende wurde eine Masse von, $\Delta m = 60$ kg ausgelitert. Bei der 46 mm und der 60 mm Blende eine Masse von, $\Delta m = 60$ kg.

Bei der 30 mm Blende wurde eine Masse von, $\Delta m = 60$ kg ausgelitert. Bei der 46 mm und der 60 mm Blende eine Masse von, $\Delta m = 60$ kg.

Das Diagramm zeigt, dass die Unsicherheit bei einer geringen ausgeliterten Masse und somit auch geringen Messzeit hoch ist. Bei größeren Massen ab Δm ca. 60 kg hat eine Veränderung der ausgeliterten Menge nur noch einen geringen Einfluss auf die Unsicherheit.

Beim Einsatz dieses Messverfahrens im Realbetrieb sollte dieses Verhalten berücksichtigt werden, um eine vernünftige auszuliternde Masse und daraus resultierende Messdauer auszuwählen.

Die Experimente haben zwar gezeigt, dass die experimentell ermittelten Standardunsicherheiten nicht mit den theoretischen Werten übereinstimmen, jedoch sollten die Standardunsicherheiten ein ähnliches Verhalten wie die theoretische Unsicherheit in Abb. 5.8 aufweisen.

Einfluss der Vibration

Die Standardunsicherheit der DDW hat sich bei den Versuchen mit Vibration verringert. Am geringsten war sie bei der Verwendung von zwei Vibrationsquellen. Möglicherweise ist der Partikelfluss aufgrund der Vibration gleichmäßiger, was zu einer Verringerung der Standardunsicherheit führt.

Für die Abweichung der Messwerte der DDW von der Referenzmessung war kein Trend hinsichtlich der verschiedenen Vibrationsarten erkennbar. Jedoch war die

Abweichung bei Versuchen mit nur einer Vibrationsquelle deutlich geringer als bei jenen ohne oder mit zwei Vibrationsquellen.

Abschließend lässt sich zur Vibration sagen, dass diese einen signifikanten Einfluss hat. Jedoch hat sich dieser, anders als erwartet, offenbar positiv auf die Ergebnisse ausgewirkt. Wie sich der Zusammenhang zwischen Vibration und Genauigkeit exakt verhält, konnte mit den vorliegenden Versuchen aber noch nicht eindeutig geklärt werden und muss weiter untersucht werden.

Verbesserungsvorschläge

Die DDW ist in der aktuellen Konfiguration nur bedingt für die Massenstrommessung in einem CentRec® -Receiver geeignet. Da eine DDW grundsätzlich das Potential hat, sehr genau zu messen besteht die Möglichkeit, dass durch weiterführende Untersuchungen, die Korrektur systematischer Abweichungen und die Eliminierung von Fehlerquellen möglich wird und die DDW dann mit einer höheren und ausreichenden Genauigkeit messen kann.

Folgende Fehlerquellen sollten genauer untersucht werden und könnten zur Verbesserung der Genauigkeit beitragen: Hinsichtlich der Gewichtsmessung ist die Unsicherheit des Datenloggers die höchste, siehe Tabelle 3.4. Ein Austausch gegen einen Datenlogger mit einer geringeren Unsicherheit könnte das Messergebnis verbessern.

Des weiteren hat sich in Gesprächen mit dem Hersteller des Messverstärkers herausgestellt, dass eine Parallelschaltung der Signale vor der Verstärkung, wie es aktuell der Fall ist, sich möglicherweise nachteilig auf das Messergebnis auswirkt. Eine separate Verstärkung der Signale könnte somit ebenfalls zu einer Verbesserung der Ergebnisse führen.

Am Anfang des Kapitels wurde die Doppelung von Messwerten angesprochen. Es sind bisher keine Ursachen für dieses Verhalten bekannt. Jedoch ist es wichtig dieses Phänomen weiter zu untersuchen, da hier eine potentiell große Unsicherheit vorhanden sein kann.

Außerdem ist während der Durchführung der Experimente aufgefallen, dass die Partikel durch das Förderband außer mittig in den Vorratsbehälter abgeworfen werden. Dadurch werden die Wägezellen nicht gleichmäßig belastet. Dies kann wiederum zu einem unrichtigen Ergebnis führen. Eigentlich müsste ein solcher Fehler über die Kalibrierfunktion korrigiert worden sein, jedoch indiziert eine anderere systematische Abweichung, siehe Kapitel 5.3, dass diese Funktion fehlerhaft sein kann.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Motivation für diese Arbeit bestand darin, ein geeignetes Messgerät zu finden mit dem der Massenstrom von ca. 1 mm großen Bauxit-Partikeln am Einlass eines CentRec® -Receivers gemessen werden kann. Dieses Messgerät soll dazu dienen, den Partikelstrom korrekt zu dosieren, um einen gleichmäßigen Partikelfilm bei unterschiedlichen Drehzahlen des Receivers zu gewährleisten und so die Auslasstemperatur der Partikel für unterschiedliche Einstrahlungsverhältnisse zu regeln.

Da die Partikel am Einlass eine Temperatur von über 300 °C aufweisen können, gab es bisher keine zufriedenstellende Lösung für die Messung des Massenstroms.

Um das Problem genauer zu untersuchen, wurde zunächst eine Recherche zu den Möglichkeiten einer Massenstrommessung durchgeführt. Anschließend wurde die DDW als Favorit aus den möglichen Messverfahren ausgewählt. Eine DDW ist systematisch bereits im Aufbau vieler Anlagen vorhanden und die Hardware zu 90 % verfügbar. Außerdem ist eine DDW eine vielversprechende Messmethode und erfüllt alle Anforderungen, die an das Messgerät gestellt wurden.

Zur Untersuchung des Messgerätes wurde ein Experiment konzipiert, welches am CentRec300-Teststand durchgeführt werden konnte. An diesem Teststand ist eine DDW bereits vorhanden. Bei bisherigen Versuchen konnten keine zufriedenstellenden Ergebnisse mit der DDW erzielt werden. Mit dem Experiment sollte einerseits die Genauigkeit der DDW untersucht werden, um eine Aussage treffen zu können ob diese ausreichend ist. Andererseits sollte der Einfluss der Vibration von Receiver und Förderband auf die Genauigkeit der Messungen untersucht werden.

Dazu wurden Versuche durchgeführt, bei denen mit unterschiedlichen Massenströmen, definiert durch Blenden und unterschiedlichen Vibrationsquellen, ausgelitert wurde. Zusätzlich wurde der Auffangbehälter mit einer PFW verwogen und so ein Referenzwert gemessen mit dem die Werte der DDW anschließend verglichen werden konnten.

Anschließend wurden die Messergebnisse analysiert und diskutiert. Die Auswertung hat ergeben, dass die DDW in der aktuellen Konfiguration keine ausreichende Genauigkeit besitzt und die Messwerte stark streuen. Es konnte aber auch festgestellt werden, dass ein Mittelwert des Massenstroms aus mindestens zwölf Einzelmessungen die Anforderungen an die Genauigkeit erfüllt. Dies ist in der Praxis jedoch nur bedingt umsetzbar. Darüber hinaus wurde ein vermutlich systematischer Fehler der DDW entdeckt, welcher bei steigendem Massenstrom zunimmt.

Es konnte ein Einfluss von Vibrationen auf die Messgenauigkeit festgestellt werden. Beim Auftreten von Vibrationen erhöhte sich die Genauigkeit, jedoch ist der Zusammenhang nicht eindeutig und bedarf weiterer Untersuchungen.

Eine DDW misst grundsätzlich mit einer hohen Genauigkeit. Daher könnten Änderungen im Messaufbau und die Eliminierung von systematischen Abweichungen und anderen Fehlerquellen zu einer Steigerung der Genauigkeit führen und die DDW damit als Massenstrommessgerät eines CentRec® -Receivers genutzt werden.

Um dies zu erreichen müssten bestimmte Komponenten im Messaufbau ausgetauscht und die Messungen wiederholt werden. Außerdem sollten Untersuchungen zu dem vermutlich systematischen Fehler durchgeführt werden, um entweder seine Ursache zu beseitigen oder den Messwert korrigieren zu können.

Falls dadurch die Genauigkeit nicht ausreichend gesteigert werden kann, müssten weitere Untersuchungen mit mehr Versuchsreihen und einer größeren Anzahl an Wiederholungen durchgeführt werden, um noch unbekannte potentielle Fehlerquellen aufzudecken, welche einen Einfluss auf das Messergebnis haben.

Für den Fall, dass die Genauigkeit der DDW nicht, oder nur mit großem Aufwand ausreichend gesteigert werden kann, gibt es noch die Möglichkeit, das Messgerät zur Kalibrierung von Dosiergeräten einzusetzen. Wie bereits erwähnt, steigt die Genauigkeit der DDW mit der Anzahl an Versuchen. Man könnte ein Dosiergerät beispielsweise einmal täglich oder in anderen Intervallen, kalibrieren.

Der Variantenvergleich hat gezeigt, dass es noch zwei weitere Messverfahren gibt, welche für die Massenstrommessung in einem CentRec® -Receiver in Frage kommen, diese sind:

- Messschurre
- Radiometrische Freifallmessung

Falls die DDW, insbesondere für die kontinuierliche Messung während des Betriebs, ungeeignet sein sollte, könnten diese beiden Verfahren eine vielversprechende Alternative sein. Beide Verfahren erfüllen ebenso alle Anforderungen und lassen sich einfach in eine bestehende Anlage integrieren. Mit der radiometrischen Freifallmessung könnte man gegebenfalls sogar am Auslass des Receivers messen, wo die Partikel Temperaturen von über 1000 °C aufweisen, auch wenn hier einige zusätzlichen Hürden (Genehmigungsprozesse und Schulungen) genommen werden müssten.

Literaturverzeichnis

[1] United Nations: Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. In: *United Nations Treaty Collection* Chapter XXVII 7. a - verabschiedet am 11.12.1997, inkraftgetreten am 12.02.2005, ratifiziert von 192 Ländern (Stand 08.02.2020) (1997). https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXVII-7-a&chapter=27&clang=_en#1

[2] Friedlingstein et al.: Global Carbon Budget 2020. In: *Earth System Science Data* 12 (2020), Nr. 4. https://essd.copernicus.org/articles/12/3269/2020/

[3] United Nations: Paris Agreement. In: *United Nations Treaty Collection* Chapter XXVII 7. d - verabschiedet am 12.12.2015, inkraftgetreten am 04.11.2016, ratifiziert von 190 Ländern (Stand 08.02.2020) (2015). https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en

[4] International Energy Agency (IEA): Technology Roadmap - Solar Photovoltaic Energy. Version: 2010. https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-solar-photovoltaic-energy-2010. 2010. – Forschungsbericht

[5] Telsnig, Thomas: *Standortabhängige Analyse und Bewertung solarthermischer Kraftwerke am Beispiel Südafrikas*. Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart, 2015. ISSN 0938–1228. – Dissertation

[6] Solar Power and Chemical Energy Systems (SolarPACES) ; National Renewable Energy Laboratory: Data on concentrating solar power (CSP) projects. (2020). https://solarpaces.nrel.gov/. – [Online; Abgerufen am: 08.12.2020]

[7] *Royal Decree 436/2004*. https://www.iea.org/policies/4198-special-regime-for-the-production-of-electricity-from-res-royal-decree-4362004. Version: 2004. – [Online; Abgerufen am: 11.03.2020]

[8] del Río González, Pablo: Ten years of renewable electricity policies in Spain: An analysis of successive feed-in tariff reforms. In: *Energy Policy* 36 (2008), Nr. 8. http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.03.025. – DOI https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.03.025. – ISSN 0301–4215

[9] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: *Aufbau eines Solarturmkraftwerks*. https://www.dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-10715/18623_read-43361/. Version: 2020. – [Online; Abgerufen am: 11.09.2020]

[10] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: *Luftaufnahme des Solarthermischen Versuchskraftwerks Jülich des DLR.* https://www.dlr.de/sf/Portaldata/73/Resources/images/juelich/Solarturm-Juelich-Luftbild_Highres.jpg. Version: 2020. – [Online; Abgerufen am: 11.09.2020]

[11] Mehos, M. ; Turchi, C. ; Vidal, J. ; Wagner, M. ; Ma, Z. ; Ho, C. ; Kolb, W. ; Andraka, C. ; Kruizenga, A.: Concentrating Solar Power Gen3 Demonstration Roadmap / National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2017. – Forschungsbericht

[12] Heller, Lukas: Literature Review on Heat Transfer Fluids and Thermal Energy Storage Systems in CSP Plants / Solar Thermal Energy Research Group, Stellenbosch University. 2013. – Forschungsbericht

[13] Solar Energy Technologies Office: The Sun Shot 2030 Goals. (2017). https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/09/f79/SunShot%202030%20White%20Paper.pdf. – Whitepaper

[14] Ebert, Miriam ; Amsbeck, Lars ; Rheinländer, Jens ; Schlögl-Knothe, Bärbel ; Schmitz, Stefan ; Sibum, Marcel ; Uhlig, Ralf ; Buck, Reiner ; Richter, Christoph: Operational experience of a centrifugal particle receiver prototype. In: *AIP Conference Proceedings* Bd. 2126, 2019

[15] Buck, Reiner ; Giuliano, Stefano: Solar tower system temperature range optimization for reduced LCOE. In: *AIP Conference Proceedings* Bd. 2126, 2019

[16] Siegel, N. ; Gross, M. ; Ho, C. ; Phan, T. ; Yuan, J.: Physical Properties of Solid Particle Thermal Energy Storage Media for Concentrating Solar Power Applications. In: *Energy Procedia* Bd. 49, 2014. – Proceedings of the SolarPACES 2013 International Conference

[17] Weyand, J. D.: *Ceramic Grinding Media.* U.S. Patent 3 486 706, Feb. 10, 1967

[18] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: *Direkt absorbierende Receiver.* https://www.dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-10695/18601_read-43763/. Version: 2021. – [Online; Abgerufen am: 10.02.2021]

[19] Frantz, Cathy: *PEGASUS Uncertainty analysis for CentRec receiver tests.* 2020. – Interner Bericht des DLR

[20] Gobereit, Birgit: *Bericht über Massenstrommessverfahren.* 2019. – Interner Bericht des DLR

[21] Ebert, Miriram: *Pers. Gespräch.* 2020. – 15.09.2020

[22] Schwedes, Jörg ; Schulze, Dietmar: *Lagern von Schüttgütern: Abschnitt 9.4.* John Wiley and Sons, Ltd, 2002. – 1208–1233 S. http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1002/3527603352.ch9d. http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1002/3527603352.ch9d. – ISBN 9783527603350

[23] Vetter, G.: *Handbuch Dosieren.* Vulkan-Verlag, 2002 https://books.google.de/books?id=CBTdYGhyPecC. – ISBN 9783802721991

[24] Lindquist, Edward W.: *Weighing-Hopper.* U.S. Patent 761 515, März 24, 1903

[25] Technisches Personal der Bitzer Wiegetechnik GmbH: *Pers. Gespräch.* 2020. – 27.08.2020

[26] Technisches Personal der Thermo Fisher Scientific Inc.: *Pers. Gespräch.* 2020. – 27.08.2020

[27] Carter, Edward D.: *Continuous Weighing-Scale.* U.S. Patent 837 794, Aug. 21 1905

[28] Coffman, Paul A.: *Continuos Weigher.* G.B. Patent 811 461, Mai 07,1956

[29] Hindley, Tony Kenneth D.: *Weighing Material in Hopper.* G.B. Patent 2 012 434, Jan. 16, 1978

[30] Technisches Personal der AVITEQ Vibrationstechnik GmbH: *Pers. Gespräch.* 2020. – 17.08.2020

[31] Carter, Clarence W.: *Feed Regulator.* U.S. Patent 15 586 668, Nov. 26, 1923

[32] Harper, Lyndus E.: *Feed Measurement and Controlling Apparatus.* U.S. Patent 573 740, März 26, 1956

[33] Technisches Personal der Carl Schenck AG: *Pers. Gespräch.* 2020. – 17.08.2020

[34] *Meßgerät zur Ermittlung des Gewichts eines Schüttgutstromes.* DE Patent 1 802 213, Okt. 10, 1968

[35] Penno, Bernhard ; Bickmann, Frank: *Vorrichtung zum Messen von Massenströmen.* DE Patent 10 2008 011 564, Feb. 02, 2008

[36] Technisches Personal der REMBE Kersting GmbH: *Pers. Gespräch.* 2020. – 25.08.2020

[37] Technisches Personal der Hense Waegetechnik GmbH: *Pers. Gespräch.* 2020. – 26.08.2020

[38] Fassbinder, Hans G. ; Brotzmann, Karl: *Verfahren und Vorrichtung zum bestimmen des Durchflusses eines Massestroms.* DE Patent 2 544 976, Okt. 08, 1975

[39] Friedrich, Claus: *Meßvorrichtung zur kontinuierlichen Ermittlung der Durchsatzmenge von Materialströmen.* DE Patent 3 346 145, Dez. 21, 1983

[40] Technisches Personal der FRIEDRICH electronic GmbH & Co. KG: *Pers. Gespräch.* 2020. – 17.08.2020

[41] Kobler, Arthur: *Bandwaage.* CH Patent 483 623, Feb. 13, 1970

[42] Merrick, Herbert L.: *Integrating Apparatus.* G.B. Patent 5 286, März 09, 1908

[43] Antrag auf Nichtnennung: *Bandwaage.* DE Patent 1 291 130, März 20, 1969

[44] MTS Messtechnik Sauerland GmbH (Hrsg.): *Datenblatt Bandwaage ESW 2.2.* Olsberg, Germany: MTS Messtechnik Sauerland GmbH, 2020. https://www.mts-waagen.de/fileadmin/user_upload/images/produkte/datenblaetter_pdf/DBL_ESW_2.2.pdf. – [Online; Abgerufen am: 08.10.2020]

[45] Technisches Personal der Kukla Waagenfabrik GmbH & Co KG: *Pers. Gespräch.* 2020. – 17.08.2020

[46] Technisches Personal der Tuff Temp Corp.: *Pers. Gespräch.* 2020. – 17.08.2020

[47] Technisches Personal der ContiTech AG: *Pers. Gespräch.* 2020. – 17.08.2020

[48] Technisches Personal der Rexnord Corporation: *Pers. Gespräch.* 2020. – 17.08.2020

[49] Technisches Personal der STAG AG: *Pers. Gespräch.* 2020. – 17.08.2020

[50] Technisches Personal der Anlagenbau Stampfer GmbH: *Pers. Gespräch.* 2020. – 17.08.2020

[51] Freiberg, Gottfried K. ; Freiberg, Joachim H.: *Radiometrische Meßeinrichtung zur berührungslosen Messung der über Gurtbandförderer transportierten Massen von Schüttgütern.* DDR Patent 66 030, März 22, 1969

[52] Technisches Personal der Berthold Technologies GmbH & Co. KG: *Pers. Gespräch.* 2020. – 28.08.2020

[53] Berthold Technologies GmbH & Co. KG (Hrsg.): *Fördermengen und Durchsatz - Berührungsloses messen, Systemübersicht.* Bad Wildbad, Germany: Berthold Technologies GmbH & Co. KG, 2017. https://www.berthold.com/?eID=dumpFile&t=f&download=1&logInUri=%2Fde%2Fmeinberthold%2F&f=1899&token=c85500218944f1de878569b2a31a5dc794a82258. – [Online; Abgerufen am: 08.10.2020]

[54] Dipl.-Ing. Franke, Peter ; Riedel, Christian ; Dr.-Ing. Wernecke, Rainer ; Dipl.-Ing. Kretschmer, Horst ; Dipl.-Ing. Scheller, Manfred ; Dr.-Ing. Göhler, peter ; Dipl.-Phys. Beiermann, Norbert: *Vorrichtung zur radiometrischen Dichtemessung von fließfähigen Medien.* DDR Patent 217 016, Jan. 02, 1985

[55] Technisches Personal der H-Sensortechnik GmbH: *Pers. Gespräch.* 2020. – 14.10.2020

[56] H-Sensortechnik GmbH (Hrsg.): *Optical Belt Scale Brochure 2020.* Au an der Donau, Oestereich: H-Sensortechnik GmbH, 2020. – [Online; Abgerufen am: 08.10.2020]

[57] Flaherty, John J. ; Soble, Richard M.: *Ultrasonic Doppler Instrument.* U.S. Patent 3 732 532, Mai 08, 1973

[58] Perdue, Kenneth L.: *Apparatus and method for measuring mass flow rate of a moving medium*. U.S. Patent 5 550 537, Aug. 27, 1996

[59] Petlevich, Walter J. ; Sverdrup, Edward F.: *Doppler Radar Flowmeter*. U.S. Patent 4 091 385, 1978

[60] Technisches Personal der DYNA Instruments GmbH: *Pers. Gespräch*. 2020. – 17.08.2020

[61] Fett, Theo ; Fett, Karl: *Vorrichtung zur kapazitiven Durchflußmessung an dieelektrischen Flüssigkeiten*. DE Patent 2 263 717, Sep. 04, 1972

[62] Technisches Personal von Envea: *Pers. Gespräch*. 2020. – 17.08.2020

[63] Schulze, Dietmar: *Pulver und Schüttgüter*. 4., ergänzte Auflage. Springer Vieweg, 2019 https://doi.org/10.1007/978-3-662-58776-8. – ISBN 978–3–662–58776–8

[64] ME-Messsysteme GmbH (Hrsg.): *GSV-15KL4 Messverstärker*. Hennigsdorf, Deutschland: ME-Messsysteme GmbH, 2020

[65] Vipa: *Vipa 300s CPU 315-4NE23*. https://www.vipa.com/de/produkte/steuerungssysteme/300s/cpus/artn/315-4ne23-19/detail/2/. – [Online; Abgerufen am: 15.02.2020]

[66] Wohlfart, Dr.-Ing. I.: *Ausgewählte Abbildungen zum Modul Qualitätsmanagement*. 2018. – Vorlesungsskript des Moduls Qualitätsmanagement an der TH Wildau

[67] *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, 100:2008*. Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1), 2008

[68] Wohlfart, Dr.-Ing. I.: *Ausgewählte Abbildungen zum Modul Fertigungsmesstechnik*. 2017. – Vorlesungsskript des Moduls Fertigungsmesstechnik an der TH Wildau

[69] Technisches Personal von ME-Messsysteme GmbH: *Pers. Gespräch*. 2020. – 12.10.2020

[70] Technisches Personal von Yaskawa Europe GmbH: *Pers. Gespräch*. 2020. – 12.10.2020

[71] Technisches Personal von Bosche Wägetechnik GmbH: *Pers. Gespräch*. 2020. – 26.11.2020

[72] Saint Gobain Proppants (Hrsg.): *Sintered Bauxite*. Fort Smith, AR, USA: Saint Gobain Proppants, 2013

[73] ME-Messsysteme GmbH (Hrsg.): *LCS130 500kg Wägezelle*. Hennigsdorf, Deutschland: ME-Messsysteme GmbH, 2020

[74] Yaskawa (Hrsg.): *Datenlogger SM 331 - Analoge Eingabe (331-1KF01)*. Eschborn, Deutschland: Yaskawa, 2020

[75] Tedea-Huntleigh, VPG Inc. (Hrsg.): *Hochlast Single-Poit Aluminium-Wägezelle, Modell 1 263.* Malvern, USA: Tedea-Huntleigh, VPG Inc., 2014

[76] Bosche Wägetechnik GmbH (Hrsg.): *Wägetransmitter WTB-Analog Bedienungsanleitung Version A.02 DE.* Damme, Deutschland: Bosche Wägetechnik GmbH, 2020

Anhang

A.1 Erweiterte Anforderungen an ein Massenstrommessgerät

Die nachfolgenden drei Anwendungsfälle 2 bis 4 haben ähnliche Anforderungen an ein Massenstrommessgerät wie der Anwendungsfall 1 in Kapitel 2.1. Deshalb werden nur die Punkte erläutert, in denen sich die Anforderungen unterscheiden.

Anwendungsfall 2 betrifft ein Gerät für die Massenstrommessung im Auslassbereich. Dieses Gerät soll dazu verwendet werden, den Partikelstrom zu messen, der aus dem Receiver austritt. Damit soll eine Art Referenz bzw. Vergleichswert zur Eingangsmessung geschaffen und damit die Datenlage verbessert werden. Die hierbei gewonnenen Daten sollen ebenfalls verwendet werden, um den Wirkungsgrad exakt zu berechnen, sowie dosieren zu können.

Der einzige Unterschied zum ersten Anwendungsfall ist die Partikeltemperatur. Beim Auslass aus dem Receiver können die Partikel eine Temperatur von bis zu 1000°C haben. Das Messgerät muss diesen Temperaturen entsprechend standhalten können.

Die Anwendungsfälle 3 und 4 beziehen sich auf ein Messgerät, welches zur Überprüfung des Massenstroms im Ein- und Auslassbereich dienen soll. Hierbei soll kein konkreter Wert für den Massenstrom ermittelt werden. Das Ziel dieser Messung ist, lediglich zu bestimmen, ob der Massenstrom sich in einem bestimmten Bereich in Abhängigkeit vom Soll-Wert des Massenstroms befindet. Also eine Art Sicherheitssystem.

Wenn das Messgerät beispielsweise fehlerhafte Werte ausgibt und der Massenstrom dadurch viel zu hoch, oder zu niedrig eingestellt ist, kann das zu Problemen im Receiver führen. Das Gerät zur Überprüfung soll in einem solchen Fall feststellen, ob der Massenstrom außerhalb eines tolerierbaren Bereiches um den Soll-Wert liegt und eine Meldung im Steuersystem auslösen und entsprechend weitere Schritte einleiten, beispielsweise das Herunterfahren der Anlage.

Dementsprechend darf die Genauigkeit dieses Messgerätes auch entsprechend geringer sein als für die Anwendungsfälle 1 und 2. Die genaue Quantifizierung des Wertes ist noch nicht erfolgt (3.1 und 4.1). Außerdem muss den bereits genannten Anforderungen eine weitere hinzugefügt werden: Die Schwellwerte für eine Meldung

im System (3.4 und 4.4). Wie bereits beschrieben soll der tolerierbare Bereich in Abhängigkeit vom Soll-Wert festgelegt werden. Wie genau das erfolgen soll und mit welchen Parametern, wurde ebenfalls noch nicht genau definiert.

Tabelle A.1 – Lastenheft, in dem drei zusätzliche Anwendungsfälle sowie die konkreten Anforderungen an ein Messgerät für die Massenstrommessung im Einlassbereich eines Zentrifugal-Receivers dargestellt sind.

Nr.	Anforderung	Quantifizierung
1. Gerät für die Massenstrommessung im Auslassbereich		
1.1	Messgenauigkeit	Unsicherheit $< 3\,\%$
1.2	Messbereich(CentRec500)	0,3 kg/s bis 3 kg/s
1.3	Messbereich(allg.)	$> 0{,}3$ kg/s
1.4	Einfluss der Schüttgutdichte auf Ergebnis	Möglichst gering
1.5	Verschleiß und Wartung	Möglichst gering
1.6.1	Temperaturbeständig	bis 1000 °C
1.6.2	Schutz vor Abrasion	hoch
1.6.3	Staubschutz	hoch
2. Gerät zur Überprüfung des Massenstroms (An/Aus) im Einlassbereich		
2.1	Messgenauigkeit	Nicht definiert
2.2	Messbereich(CentRec500)	0,3 kg/s bis 3 kg/s
2.3	Messbereich(allg.)	$> 0{,}3$ kg/s
2.4	Schwellwert für Meldung im System	In Abhängigkeit von aktuellem Soll-Wert
2.5	Einfluss der Schüttgutdichte auf Ergebnis	Möglichst gering
2.6	Verschleiß und Wartung	Möglichst gering
2.7.1	Temperaturbeständig	bis 400 °C
2.7.2	Schutz vor Abrasion	hoch
2.7.3	Staubschutz	hoch
3. Gerät zur Überprüfung des Massenstroms (An/Aus) im Auslassbereich		
3.1	Messgenauigkeit	Nicht definiert
3.2	Messbereich(CentRec500)	0,3 kg/s bis 3 kg/s
3.3	Messbereich(allg.)	$> 0{,}3$ kg/s
3.4	Schwellwert für Meldung im System	In Abhängigkeit von aktuellem Soll-Wert
3.5	Einfluss der Schüttgutdichte auf Ergebnis	Möglichst gering
3.6	Verschleiß und Wartung	Möglichst gering
3.7.1	Temperaturbeständig	bis 1000 °C
3.7.2	Schutz vor Abrasion	hoch
3.7.3	Staubschutz	hoch

A.2 Technische Daten der Bauxit-Partikel

16/30 Sintered Bauxite

Typical Properties

Size and Shape	
Sieve No.	% Retained
16	4
20	84
30	12
<30	Trace

ISO Mean Particle Diameter	0.98 mm
Median Particle Diameter	0.95 mm
Roundness/Sphericity (Krumbein & Sloss)	0.9

Physical Properties

Bulk Density	2.04 g/cc (127 lbs/ft^3)
Specific Gravity	3.5
Absolute Volume	0.0347 gal/lb
Acid Solubility, %	1.9
Crush Resistance at Stress %	7,500 psi 1.0 10,000 psi 2.5 12,500 psi 4.5 15,000 psi 9.0

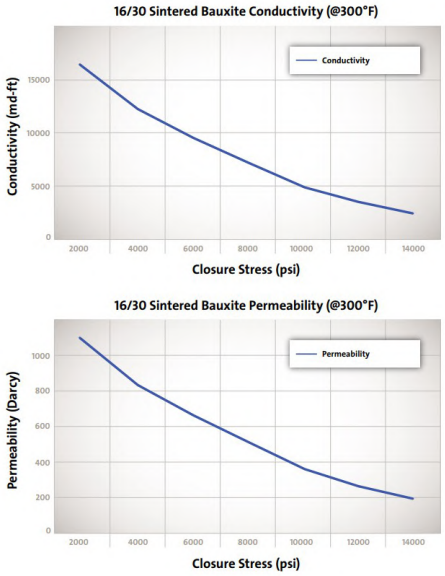


Abb. A.1 – Technische Daten der verwendeten Bauxit-Partikel [72]

A.3 Technische Daten für die Komponenten der Differentialdosierwaage

A.3.1 Technische Daten Wägezelle

ME-Meßsysteme GmbH
Neuendorfstr. 18a
DE-16761 Hennigsdorf

Tel +49 (0)3302 8982 4 60
Fax +49 (0)3302 8982 4 69

Mail info@me-systeme.de
Web www.me-systeme.de

Technische Daten

Kraftsensor		
Typ	Wägezelle	
Kraftrichtung	Druck	
Nennkraft Fx	500	kg
Krafteinleitung	Innengewinde	
Abmessung 1	M12x1,75	
Sensor Befestigung	Durchgangsbohrung	
Abmessung 2	2xØ13	
Gebrauchskraft	150	%FS
Nennmessweg	0.08	mm
Material	Edelstahl	
Höhe	32	mm
Länge oder Durchmesser	130	mm

Elektrische Daten		
Eingangswiderstand	1000	Ohm
Toleranz Eingangswiderstand	50	±
Ausgangswiderstand	1000	Ohm
Toleranz Ausgangswiderstand	10	±
Isolationswiderstand	5x10^9	Ohm
Nennbereich der Speisespannung	2.5 ... 5	V
Gebrauchsbereich der Speisespannung	1 ... 10	V
Nullsignal	0.05	mV/V
Nennkennwert	2	mV/V / FS

Genauigkeitsdaten		
Genauigkeitsklasse	0,05%	
relative Linearitätsabweichung	0.05	%FS
relative Nullsignalhysterese	0.05	%FS
Temperatureinfluss auf das Nullsignal	0.012	%FS/K
Temperatureinfluss auf den Kennwert	0.009	%RD/K
relatives Kriechen	0.25	%FS

Anschlussdaten		
Anschlusstyp	6-Leiter offen	
Kabellänge	6	m

Umweltdaten		
Nenntemperaturbereich	-10 ... 70	°C
Gebrauchstemperaturbereich	-10 ... 85	°C
Lagertemperaturbereich	-10 ... 85	°C
Schutzart	IP67	

Abkürzungen: RD: Istwert („Reading"); FS: Endwert („Full Scale");

Abb. A.2 – Technische Daten der Wägezellen, welche in der Differentialdosierwaage verwendet werden [73]

A.3.2 Technische Daten Messverstärker

ME-Meßsysteme GmbH
Neuendorfstr. 18a
DE-16761 Hennigsdorf

Tel +49 (0)3302 8982 4 60
Fax +49 (0)3302 8982 4 69

Mail info@me-systeme.de
Web www.me-systeme.de

Technische Daten

Eingang analog		
Eingangsempfindlichkeit-stufenlos	0.2 ... 3.5	mV/V
Eingangswiderstand-DMS-Vollbrücke	70 ... 50000	Ohm

Ausgang analog		
Anzahl der Analogausgänge	1	
Spannungsausgang	-10 ... 10	V
Ausgangswiderstand-Spannung	33	Ohm
Stromausgang	4 ... 20	mA
Ausgangswiderstand-Strom	300	Ohm

Versorgung		
Versorgungsspannung	11 ... 28	V
DMS-Brückenspeisung	5	V

Umweltdaten		
Nenntemperaturbereich	-10 ... 85	°C
Gebrauchstemperaturbereich	-40 ... 85	°C
Schutzart	IP66	

Basis Daten		
Anschluss	Schraubklemme	
Kanalzahl	1-Kanal	

Genauigkeitsdaten		
Genauigkeitsklasse	0,1%	
Temperatureinfluss auf den Nullpunkt	0.05	%FS/10°C
Temperatureinfluss auf die Empfindlichkeit	0.01	%RD/10°C
Auflösung	16	Bit

Abb. A.3 – Technische Daten des Messverstärkers, welcher in der Differentialdosierwaage verwendet wird [64]

A.3.3 Technische Daten Datenlogger

YASKAWA

Datenblatt
SM 331 - Analoge Eingabe (331-1KF01)

Technische Daten

Artikelnr.	331-1KF01
Bezeichnung	SM 331 - Analoge Eingabe
Allgemeine Informationen	
Hinweis	-
Features	8x AI 13 Bit Spannung +/- 10 V, +/- 50 mV, +/- 500 mV, +/- 5 V, 0 V ... +10 V Strom +/- 20 mA, 0/4...20 mA Widerstandsthermometer Für 40pol. Frontstecker
SPEED-Bus	-
Stromaufnahme/Verlustleistung	
Stromaufnahme aus Rückwandbus	255 mA
Verlustleistung	1,3 W
Technische Daten Analoge Eingänge	
Anzahl Eingänge	8
Leitungslänge geschirmt	50 m
Lastnennspannung	-
Stromaufnahme aus Lastspannung L+ (ohne Last)	-
Spannungseingänge	ja
min. Eingangswiderstand im Spannungsbereich	100 kOhm
Eingangsspannungsbereiche	-50 mV ... +50 mV -500 mV ... +500 mV -1 V ... +1 V -5 V ... +5 V 0 V ... +10 V -10 V ... +10 V +1 V ... +5 V
Gebrauchsfehlergrenze Spannungsbereiche	+/-0,5% ... +/-0,6%
Gebrauchsfehlergrenze Spannungsbereiche mit SFU	-
Grundfehlergrenze Spannungsbereiche	+/-0,3% ... +/-0,4%
Grundfehlergrenze Spannungsbereiche mit SFU	-
Zerstörgrenze Spannung	max. 30V
Stromeingänge	ja
max. Eingangswiderstand im Strombereich	100 Ohm
Eingangsstrombereiche	-20 mA ... +20 mA 0 mA ... +20 mA +4 mA ... +20 mA
Gebrauchsfehlergrenze Strombereiche	+/-0,5%
Gebrauchsfehlergrenze Strombereiche mit SFU	-
Grundfehlergrenze Strombereiche	+/-0,3%
Grundfehlergrenze Strombereiche mit SFU	-
Zerstörgrenze Stromeingänge (Strom)	max. 40mA
Zerstörgrenze Stromeingänge (Spannung)	max. 15V
Widerstandseingänge	ja
Widerstandsbereiche	0 ... 600 Ohm 0 ... 6000 Ohm

© by Yaskawa Europe GmbH, Ohmstr. 4, 91074 Herzogenaurach, Deutschland
Angaben ohne Gewähr, Änderungen und Irrtümer vorbehalten.
Stand: 09.04.2020

Abb. A.4 – Technische Daten des Datenloggers, welcher in der Differentialdosierwaage verwendet wird (Seite 1) [74]

YASKAWA

Gebrauchsfehlergrenze Widerstandsbereiche	+/-0,5%
Gebrauchsfehlergrenze Widerstandsbereiche mit SFU	-
Grundfehlergrenze Widerstandsbereiche	+/-0,3%
Grundfehlergrenze Widerstandsbereiche mit SFU	-
Zerstörgrenze Widerstandseingänge	max. 15V
Widerstandsthermometereingänge	ja
Widerstandsthermometerbereiche	Pt100 Ni100 Ni1000
Gebrauchsfehlergrenze Widerstandsthermometerbereiche	+/-1K ... +/-1,2K
Gebrauchsfehlergrenze Widerstandsthermometerbereiche mit SFU	-
Grundfehlergrenze Widerstandsthermometerbereiche	+/-0,8K
Grundfehlergrenze Widerstandsthermometerbereiche mit SFU	-
Zerstörgrenze Widerstandsthermometereingänge	max. 15V
Thermoelementeingänge	-
Thermoelementbereiche	-
Gebrauchsfehlergrenze Thermoelementbereiche	-
Gebrauchsfehlergrenze Thermoelementbereiche mit SFU	-
Grundfehlergrenze Thermoelementbereiche	-
Grundfehlergrenze Thermoelementbereiche mit SFU	-
Zerstörgrenze Thermoelementeingänge	-
Temperaturkompensation parametrierbar	-
Temperaturkompensation extern	-
Temperaturkompensation intern	-
Temperaturfehler der internen Kompensation	-
Technische Einheit der Temperaturmessung	°C, °F, K
Auflösung in Bit	13
Messprinzip	Sigma-Delta
Grundwandlungszeit	61 ms/51 ms / Kanal
Störspannungsunterdrückung für Frequenz	50 Hz/60 Hz
Eingangsdatengröße	16 Byte

Status, Alarm, Diagnosen

Statusanzeige	keine
Alarme	nein
Prozessalarm	nein
Diagnosealarm	nein
Diagnosefunktion	nein
Diagnoseinformation auslesbar	keine
Versorgungsspannungsanzeige	keine
Sammelfehleranzeige	keine
Kanalfehleranzeige	keine

Potenzialtrennung

zwischen den Kanälen	-
zwischen den Kanälen in Gruppen zu	-
zwischen Kanälen und Rückwandbus	ja
zwischen Kanälen und Spannungsversorgung	-
max. Potenzialdifferenz zwischen Stromkreisen	-
max. Potenzialdifferenz zwischen Eingängen (Ucm)	DC 2 V

www.yaskawa.eu.com
© by Yaskawa Europe GmbH, Ohmstr. 4, 91074 Herzogenaurach, Deutschland
Angaben ohne Gewähr, Änderungen und Irrtümer vorbehalten.
Stand: 09.04.2020
Seite 2/3

Abb. A.5 – Technische Daten des Datenloggers, welcher in der Differentialdosierwaage verwendet wird (Seite 2)[74]

A.4 Technische Daten für die Komponenten der Plattformwaage

A.4.1 Technische Daten Wägezelle

Modell 1263

Tedea-Huntleigh

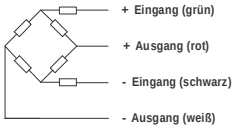
Hochlast Single-Point Aluminium-Wägezelle

TECHNISCHE DATEN			
PARAMETER	**Wert**		**Einheit**
Nennlast-R.C. (Emax)	50, 100, 150, 200, 250, 300, 500, 635		kg
NTEP / OIML Genauigkeitsklasse	Nicht eichfähig	C3*	
Maximale Anzahl von Intervallen (n)	1000	3000	
Y = Emax / Vmin	2000	15000	Maximal verfügbare
Nennkennwert - R.O. (=S)	2.0		mV/V
Nennkennwert Toleranz	0.2		±mV/V
Nullabgleich	0.2		±mV/V
Kriechfehler, 30 min.	0.050	0.0170	±% der aufgebrachten Last
Gesamtfehler	0.0300	0.0200	±% S
Temperatureinfluss auf den Nullpunkt	0.0100	0.0023	±% des S / ° C
Einfluss der Temp. auf das Ausgangssignal	0.0030	0.0010	±% der aufgebrachten Last / ° C
Eckenlastabweichung	0.0050	0.0033	±% der Nennlast / cm
Temperaturbereich kompensiert	–10 bis +40		°C
Gebrauchstemperaturbereich	–20 bis +70		°C
Maximale sichere Überlastung	150		% der Nennlast (R.C.)
Bruchlast	300		% der Nennlast (R.C.)
Empfohlene Speisespannung	10		VDC oder VAC RMS
Maximale Speisespannung	15		VDC oder VAC RMS
Eingangswiderstand	415±15		Ω
Ausgangswiderstand	350±3		Ω
Isolationswiderstand	>2000		MΩ
Kabellänge	1.5		m
Kabeltyp	4-Leiter, PVC, Schirm nicht aufgelegt		Standard
Konstruktion	Aluminium		
Schutzart	IP66		
Plattformgröße (max)	600 x 600 mm		mm
Empfohlenes Drehmoment	Bis 300 kg: 25,0 über 300 kg: 30,0		N*m

* 50% Auslastung

Alle Spezifikationen können ohne vorherige Ankündigung geändert werden.

Elektrische Anschlüsse
Schematische Darstellung
(unsymmetrische Temperatur Kompensation)



Stand: 07.2012

Abb. A.6 – Technische Daten der Wägezelle, welche in der Plattformwaage verwendet wird [75]

A.4.2 Technische Daten Gewichtsmessumformer

Bedienungsanleitung

7 Technische Daten

Gewichtssender für Wägezelle mit 6 Kabeln, geeignet für Montage an Omega/DIN-Schiene auf Schalttafelrück-.Abmessungen: 26x115x120 mm. 6-stellige, halb-alphanumerische Anzeige, mit 8 mm und 7 Segmenten. Tastatur mit 4 Tasten.
Serieller Port RS485 für Anschluss an: PC/SPS für bis zu 32 Instrumente (max. 99 mit Leitungs-Fernanzeigen) über Protokoll ASCII oder Modbus R.T.U., Gewichtsanzeige.

Optional: Integrierter Ausgang CANopen, DeviceNet, CC-Link, PROFIBUS DP, Modbus/TCP, Ethernet TCP/IP, Ethernet/IP, PROFINET IO, EtherCAT, POWERLINK, SERCOS III.

Versorgung und Verbrauch		12/24 VDC ±10%; 5 W
Anzahl Wägezellen in Parralelschaltung und Versorgung		max 8 (350 ohm); 5 VDC / 120 mA
Linearität		< 0.01% SE
Wärmeabhängige Abweichung		< 0.0005% SE/°C
A/D-Wandler		24 bit (16000000 Punkte)
Zählerschritte (mit Messbereich ±10 mV = Empf. 2mV/V)		±999999
Messbereich		±39 mV
Max. Empfindlichkeit Verwendbare Wägezelle		±7 mV/V
Max. Konvertierungen pro Sekunde		300 Konvertierungen/Sekunde
Anzeigebereich		±999999
Dezimalstellen / Auflösung Anzeige		0÷4 / x 1 x 2 x 5 x 10 x 20 x 50 x 100
Digitalfilter / Ablesungen pro Sekunde		10 Stufen / 5÷300 Hz
Relais-Ausgänge		N. 3 - max 115 VAC; 150 mA
Digital-Eingänge		N. 2 - optoisoliert 5 - 24 VDC PNP
Serielle Ports		RS485
Baudrate		2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 115200
Feuchtigkeit (ohne Kondenswasserbildung)		85%
Lagertemperatur		-30°C +80°C
Betriebstemperatur		-20°C +60°C
Analog-Ausgang Optoisoliert (nur WTB analog) 16 bit - 65535 Zählerschritte		0÷20 mA; 4÷20 mA (max 300 ohm); 0÷10 V; 0÷5 V, ±10 V; ±5 V (min 10 kohm)
c UL us	Relais-Ausgänge	N. 3 - max 30 VAC, 60 VDC; 150 mA
	Equipment to be powered by 12-24 VDC LPS or Class 2 power source.	

Abb. A.7 – Technische Daten des Gewichtsmessumformers, welcher mit der Plattformwaage verwendet wird [76]

A.5 t-Verteilung

JCGM 100:2008

Table G.2 — Value of $t_p(v)$ from the t-distribution for degrees of freedom v that defines an interval $-t_p(v)$ to $+t_p(v)$ that encompasses the fraction p of the distribution

Degrees of freedom	Fraction p in percent					
v	68,27[a)]	90	95	95,45[a)]	99	99,73[a)]
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,80
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,85
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90	3,51
18	1,03	1,73	2,10	2,15	2,88	3,48
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
35	1,01	1,70	2,03	2,07	2,72	3,23
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

a) For a quantity z described by a normal distribution with expectation μ_z and standard deviation σ, the interval $\mu_z \pm k\sigma$ encompasses p 68,27 percent, 95,45 percent and 99,73 percent of the distribution for k 1, 2 and 3, respectively.

© JCGM 2008 – All rights reserved

Abb. A.8 – Werte für den t-Faktor, tF, aus der t-Verteilung für den jeweiligen Freiheitsgrad, $v = n - 1$. Der t-Faktor definiert ein Intervall, $-tF$ bis $+tF$, das den Anteil, P, der Verteilung umfasst [67, Tabelle G.2].