



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Experimentelle Untersuchungen an einer Zellradschleuse für Sandungsanlagen am Schienenfahrzeug

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg Kartnig

(E307 Institut für Konstruktionswissenschaften und technische Logistik)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Raffael Fux, BSc.

Matrikelnummer: 0746321

Studienkennzahl: 066 484

Wien, im April 2016

Raffael Fux



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Masterarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Januar 2015

Raffael Fux

Danksagung

Ich möchte mich bei Herrn **Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg Kartnig** dafür bedanken, dass Er die Betreuung meiner Diplomarbeit übernommen hat und mir viele gute Gedankenanstöße gegeben hat.

Mein weiterer Dank gilt seitens der Firma Knorr- Bremse den Kollegen **Georg Krismanic, Florian Hösch, Andreas Lang, Albert Schneider, Wolfgang Maglot** und **Klemens Bernreiter**, die mich engagiert betreut haben und mich jederzeit tatkräftig bei Fragestellungen und Problemen unterstützt haben.

Außerdem möchte ich mich bei allen **Studenten** im Studentenzimmer bedanken, die mir die Pausen verschönert haben.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei **Claudine Egger, Karla Kröchert, Pommès** und **Professor** bedanken, die mir jederzeit außerhalb der Firma mentale Unterstützung gegeben haben und mit denen ich viele Tage schreibend verbracht habe.

Kurzfassung

Schienenfahrzeuge stellen einen wesentlichen Bestandteil des öffentlichen Personenverkehrs dar. Witterungsbedingt – durch Regen, Laub oder Schnee – kann es bei ihnen zu verlängerten Bremswegen kommen, was zu einem erhöhten Verkehrsrisiko führt. Daher wird mit Hilfe von Sandungsanlagen Sand zwischen Schiene und Rad gefördert, um den Kraftschluss zu erhöhen. Bisher wird der Sand pneumatisch dosiert und gefördert, allerdings ist es bei diesem Konzept kaum möglich die Dosiergenauigkeit zu erhöhen. Deswegen werden aktuell Überlegungen hinsichtlich anderer Dosierkonzepte für Sandungsanlagen gemacht.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, ob eine Horizontalzellradschleuse als mechanische Dosiereinheit für Sandungsanlagen verwendbar ist. Deren Eignung wird anhand eines empirischen Versuches getestet, wobei der Focus auf *Lebensdauer*, *Dosierbarkeit* und *Dosiergenauigkeit* liegt.

Als Erstes wird ein Überblick über den Aufbau von derzeit verwendeten Sandungsanlagen sowie die Anforderungen, die an diese gestellt werden, gegeben. Es wird vergleichend auf die Funktionsweise von pneumatischen Förderern eingegangen. Anschließend wird der Aufbau und die Funktionsweise einer Zellradschleuse erklärt, wobei hier zwischen Horizontal- und Vertikalzellradschleuse unterschieden wird.

Anhand zweier Prototypen wird die Tauglichkeit der Horizontal-Zellradschleuse untersucht und hinsichtlich konstruktiver Auslegung behandelt. Außerdem wird auf Verschleißmechanismen durch den Sand eingegangen und inwiefern sich Änderungen an Material und Geometrie der Zellradschleuse auf den Verschleiß auswirken können.

Auf Basis der empirischen Ergebnisse wird die Zellradschleuse mit einer pneumatischen Sandungsanlage verglichen, um deren technischen Nutzen zu bewerten. Auf Basis der Versuchsergebnisse und des Vergleichs mit der pneumatischen Sandungsanlage wird ein Ausblick hinsichtlich zukünftiger Verbesserungsmöglichkeiten des Prototyps gemacht.

Abstract

Rail vehicles are an important part of public transport. Due to weather conditions - rain, leaves or snow - braking distances can strongly exceed, leading to an increased road risk. Therefore sand is transported between rail and wheel with sanding devices to increase friction. So far the sand is pneumatically dosed and conveyed, however, it is hardly possible to increase the accuracy of dosing with this concept. Therefore, it is considered to use other dosing concepts for sanding systems.

This work deals with the question whether a horizontal -rotary valve can be used as a mechanical dosing system for sanding devices. Their suitability is tested by means of an empirical experiment, focusing especially on duration of life, dosing and dosing accuracy.

First, an overview of the requirements and the assembly of the currently used sanding systems is given. Comparatively the function of pneumatic sanding devices is discussed. Subsequently, the construction and operation of a rotary valve is explained separately for horizontal- and vertical -rotary valve.

Based on two prototypes, the design and the suitability of a horizontal -rotary valve is examined. Also wear mechanisms through the sand are discussed and to what extent changes in material and geometry of the rotary valve can affect the wear.

Based on the empirical results, the rotary valve is compared with a sanding system currently used to evaluate the technical benefits. Based on the results a forecast is made with respect to future improvement of the prototype.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Die Sandungsanlage	7
2.1	Aufbau der Sandungsanlage	7
2.2	Spezifikationen der Sandungseinrichtung	10
2.2.1	Funktionsspezifikationen	10
2.2.2	Mechanische und elektrische Spezifikationen	12
2.2.3	Spezifikationen auf Grund von Witterungsbedingungen	13
2.2.4	Lebensdauer	13
3	Dosiervorrichtungskonzepte	15
3.1	Pneumatische Dosierung	15
3.2	Elektromechanische Dosierung	17
3.2.1	Mechanische Dosierung mit einer Förderschnecke	18
3.2.2	Mechanische Dosierung mit einer Zellradschleuse	19
3.3	Zellradschleusenprototypen	22
3.3.1	Horizontal-Stahlzellradschleuse	22
3.3.2	Horizontal-Vulkollanzellradschleuse	25
3.3.3	Zellrad-Gehäuse-Passung	27
3.3.4	Verschleißverhalten der Zellradschleuse	29
3.3.5	Der Ejektor zur pneumatischen Förderung	33
3.3.6	Motor	34
4	Versuchsaufbau	37
4.1	Aufbau und Komponenten des Versuches	37
4.2	Versuchsplan	39
4.3	Durchführung der Messungen	43
4.4	Verwendete Messmittel	46
5	Auswertung der Messergebnisse	49
5.1	Auswertung der Messungen am Stahlzellrad	49
5.1.1	Sandmengenmessung	49

5.1.2	Ansprechverhalten der Sandungsanlage.....	58
5.1.3	Feinstaub	59
5.1.4	Selbstentleerung	60
5.1.5	Drehmoment	61
5.1.6	Verschleißmessungen.....	65
5.2	Auswertung der Messungen am Vulkollanzellrad	70
5.2.1	Verschleißuntersuchung.....	70
5.2.2	Sandmengenmessung	71
5.2.3	Entladungsblitze.....	71
5.3	Verschleißuntersuchungen am Ejektor	71
5.4	Vergleich zwischen einer pneumatischen Sandungsanlage und der mechanischen Sandungsanlage.....	75
6	Verbesserungsvorschläge	83
6.1	Verbesserungen hinsichtlich Sandfördermasse.....	83
6.2	Verringerung des Verschleißes	84
6.3	Verringerung von Masse und Geometrie	84
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	87
	Anhang.....	89
	Literaturverzeichnis	105
	Abbildungsverzeichnis.....	107
	Tabellenverzeichnis.....	109
	Abkürzungsverzeichnis.....	111

1 Einleitung

Das Schienenfahrzeug ist heute eines der wichtigsten Massenverkehrsmittel. Sei es im Fernverkehr, wo sich Hochgeschwindigkeitszüge über Land mit mehreren hundert Kilometern pro Stunde fortbewegen, oder in der Stadt, die sich mit der U-Bahn und der Straßenbahn ebenfalls des Schienenverkehrs bedient.

Es ist nicht nur eines der am meisten genutzten Verkehrsmittel sondern auch eines der statistisch sichersten. Gerade weil ein Schienenfahrzeug eine große Menge an Menschen transportieren kann, werden an dieses besonders hohe Sicherheitsanforderungen gestellt. Eine zentrale sicherheitsrelevante Komponente eines Personentransportmittels ist die Bremse. Es existiert bereits eine Vielzahl verschiedener Bremssysteme für Schienenfahrzeuge. Eine erste Einteilung der Bremsen kann in kraftschlussabhängige Bremssysteme und kraftschlussunabhängige Bremssysteme erfolgen.

Kraftschlussabhängige Bremsen übertragen die Bremskraft über das Rad auf die Schiene. Hauptvertreter sind die Klotzbremse und die Scheibenbremse. Im Gegensatz dazu gibt es auch kraftschlussunabhängige Bremssysteme, die die Bremskraft direkt auf die Schiene übertragen.

Bei kraftschlussabhängigen Bremsen stellt die Reibungskraft zwischen Bremse und Rad und zwischen Rad und Schiene die zentrale Größe dar, die das Schienenfahrzeug zum Stillstand bringt. Die Reibung wird allerdings auch zum Anfahren des Schienenfahrzeugs benötigt. Würde keine Reibung zwischen Drehgestell und Schiene herrschen, könnte das Schienenfahrzeug nicht beschleunigen.

Nun wurden bei Schienenfahrzeugen zwei Phänomene festgestellt. Zum einen, dass das Rad bei Bremsvorgängen eine Relativgeschwindigkeit gegenüber der Schiene hat. Hier findet ein Übergang zwischen Haft- und Gleitreibung statt, ab dem das Rad auf der Schiene zu gleiten beginnt.

Ein weiteres Problem tritt beim Beschleunigen des Zuges auf. Ist die Antriebskraft des Rades größer als die Reibungskraft zwischen Rad und Schiene, dann dreht das Rad beim Beschleunigen durch.

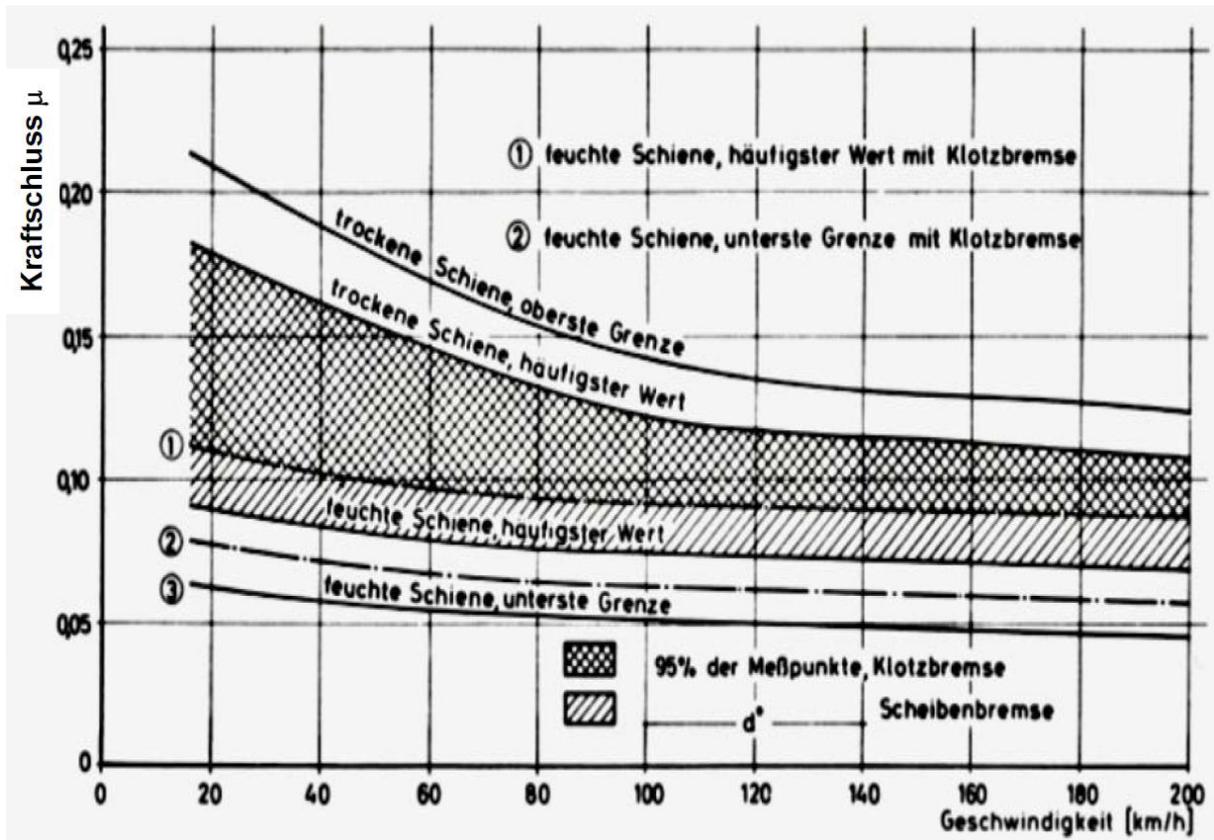


Abbildung 1.1 Veränderung des Reibkoeffizienten aufgrund von Witterungsbedingungen [1]

Der Kraftschluss hängt wesentlich vom Schienenzustand, von der Materialpaarung (bei Schienenfahrzeugen die Materialpaarung Stahl-Stahl) von der Fahrzeuggeschwindigkeit, sowie von Umgebungseinflüssen, z.B. Laub oder Feuchtigkeit ab [siehe Abbildung 1.1].

Allerdings wird der Reibungskoeffizient auch negativ durch Wasser oder Laub auf der Schiene beeinflusst. Feuchte Witterung wirkt sich besonders stark auf den Reibungskoeffizienten aus.

Bereits im 19. Jahrhundert hat man festgestellt, dass durch aufbringen von Streumitteln zwischen Schiene und Rad der Kraftschluss stark erhöht werden kann. Als Streumittel wurde auch damals bereits Sand verwendet. Um genauer und schneller Sand zwischen Schiene und Rad zu fördern, wurde eine neue Fahrgestellkomponente entwickelt: Die Sandungsanlage.

Auf dem Zug mitgeführter Sand wird bei Brems- und Beschleunigungsvorgängen zwischen Schiene und Rad gefördert, um den Reibungskoeffizienten zu erhöhen. Der Sand erhöht durch seine Grobkörnigkeit den Reibkoeffizienten.

Inzwischen haben sich Sandungsanlagen zur Standardausstattung bei Zügen entwickelt. Die meisten Sandungsanlagen, die derzeit im Einsatz sind, beruhen auf einem rein pneumatischen Förderprinzip.

Bei den bisherigen Sandungsanlagen, die auf der pneumatischen Förderung basieren, gibt es ein wesentliches Problem. Die Dosierung und die Förderung der pneumatischen Sandungsanlagen werden nicht getrennt voneinander durchgeführt, was abhängig von der gewünschten Sandfördermenge zu sehr unterschiedlichen Ansprechzeiten führt. Außerdem kann es zu starken Schwankungen der Sandmenge kommen. Aus diesem Grund soll die Zellradschleuse als neues Konzept zur Dosierung von Sand untersucht werden.

Die Frage, die in dieser Diplomarbeit behandelt wird, ist die, ob sich die Zellradschleuse als neues Dosierkonzept für Sandungsanlagen im Schienenverkehr eignet. In Kapitel 2 wird auf den derzeit üblichen Aufbau und die Systemkomponenten der Sandungsanlage eingegangen. Anschließend werden die wichtigsten Spezifikationen der Sandungsanlage geklärt, wobei hier zwischen Funktionsspezifikationen, Spezifikationen aufgrund von Witterungsbedingungen und mechanische und elektrische Spezifikationen unterschieden wird.

In Kapitel 3 werden verschiedene Konzepte behandelt, die sich zur Sanddosierung bei Sandungsanlagen eignen. Es werden zwei bereits verwendete Dosierkonzepte vorgestellt, bei denen der Sand pneumatisch gefördert wird. Diesen gegenübergestellt werden zwei elektromechanische Fördermethoden: Einerseits wird auf die Förderschnecke eingegangen und andererseits auf die Zellradschleuse. Anschließend wird auf die konstruktive Gestaltung der Zellradschleusen-Prototypen eingegangen.

Kapitel 4 behandelt den Aufbau des Versuchstandes. Die wesentlichen Eigenschaften, die mit dem Versuchstand untersucht werden sollen, sind, ob das geforderte Sandaustragsintervall von 200 g/30 s bis 2400 g/30 s erreicht werden kann. Es soll eine Sandaustragskennlinie erstellt werden, die einen Zusammenhang zwischen Drehzahl der Zellradschleuse und der Sandfördermenge liefert. Dazu wird die Drehzahl der Zellradschleuse variiert. Weiters soll die Streuung des Sandmassenstromes ermittelt werden. Außerdem soll die Lebensdauer der Zellradschleuse überprüft werden, indem die Zuverlässigkeit der Sandaustragsmenge und der Streuung der Sandaustragsmenge über die Betriebsdauer ermittelt wird. Dazu sollen 10.000 kg Sand gefördert werden, was einer Betriebsdauer von ca. 10 Jahren entspricht.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse aus den durchgeführten Versuchen präsentiert und mit Versuchsergebnissen einer pneumatischen Sandungsanlage verglichen. Der Vergleich der Sandungsanlagen erfolgt über die technische Wertigkeit.

In Kapitel 6 werden auf Basis der vorangegangenen Versuche konstruktive Anpassungsmöglichkeiten behandelt, die festgestellte Mängel an dem Prototyp beheben können.

2 Die Sandungsanlage

Die Aufgabe der Sandungsanlage ist der Transport von Sand zur Kontaktzone zwischen Schiene und Rad. Der Sand hat die Aufgabe den Kraftschluss zwischen Schiene und Rad zu erhöhen. Die Förderung soll möglichst genau steuerbar sein. Um einen Überblick über den Aufbau eines Sandungssystems zu erhalten, werden im folgenden Kapitel dessen Systemkomponenten und ihre Aufgaben erläutert. Anschließend wird auf die Spezifikationen der Sandungsanlage eingegangen.

2.1 Aufbau der Sandungsanlage

Um einen besseren Überblick über das Gesamtsystem der Sandungsanlage zu liefern, wird der Aufbau der Sandungsanlage beschrieben.

In Abbildung 2.2 ist der Aufbau einer pneumatischen Sandungsanlage inklusive der Kennzeichnung der wichtigsten Systemkomponenten dargestellt. Der Sand wird in einem Sandkasten gelagert. Dieser muss bei der rein pneumatischen Förderung des Sandes druckdicht sein, da ein geschlossenes Drucksystem vorherrschen muss (pneumatische Förderung).

- Der Sandkasten:

Auf der Oberseite des Sandkastens befindet sich die Einfüllöffnung, über die der Sandkasten befüllt werden kann. Die Einfüllöffnung ist mit dem Sandkastendeckel mit Überdrucksicherung abgeschlossen. Der Sandkasten selbst steht abhängig vom Förderprinzip unter Druck oder nicht. Außerdem muss der Sandkasten recht stabil gegen äußere Krafteinwirkung (Steinschlag) sein, da er meistens sehr exponiert außen auf Höhe des Drehgestells angebracht ist. Zudem trägt der Sandkasten das Gewicht der Sandungseinrichtung. Unten ist eine Öffnung, an die die Sandungseinrichtung angeflanscht werden kann. Der Sandkasten hat zur Auslassöffnung hin ein Gefälle, sodass der gesamte Sand trichterförmig in die Sandungseinrichtung abfließen kann. Diese Schrägung wird idealerweise so gewählt, dass der gesamte Sand ausgebracht wird. Dazu muss der Böschungswinkel des Sandes berücksichtigt werden. Ist der Winkel zu klein, wird der Sandkasten nie vollständig entleert. Der Sandkasten wird am Fahrzeug aufgehängt (siehe Abbildung 2.1).

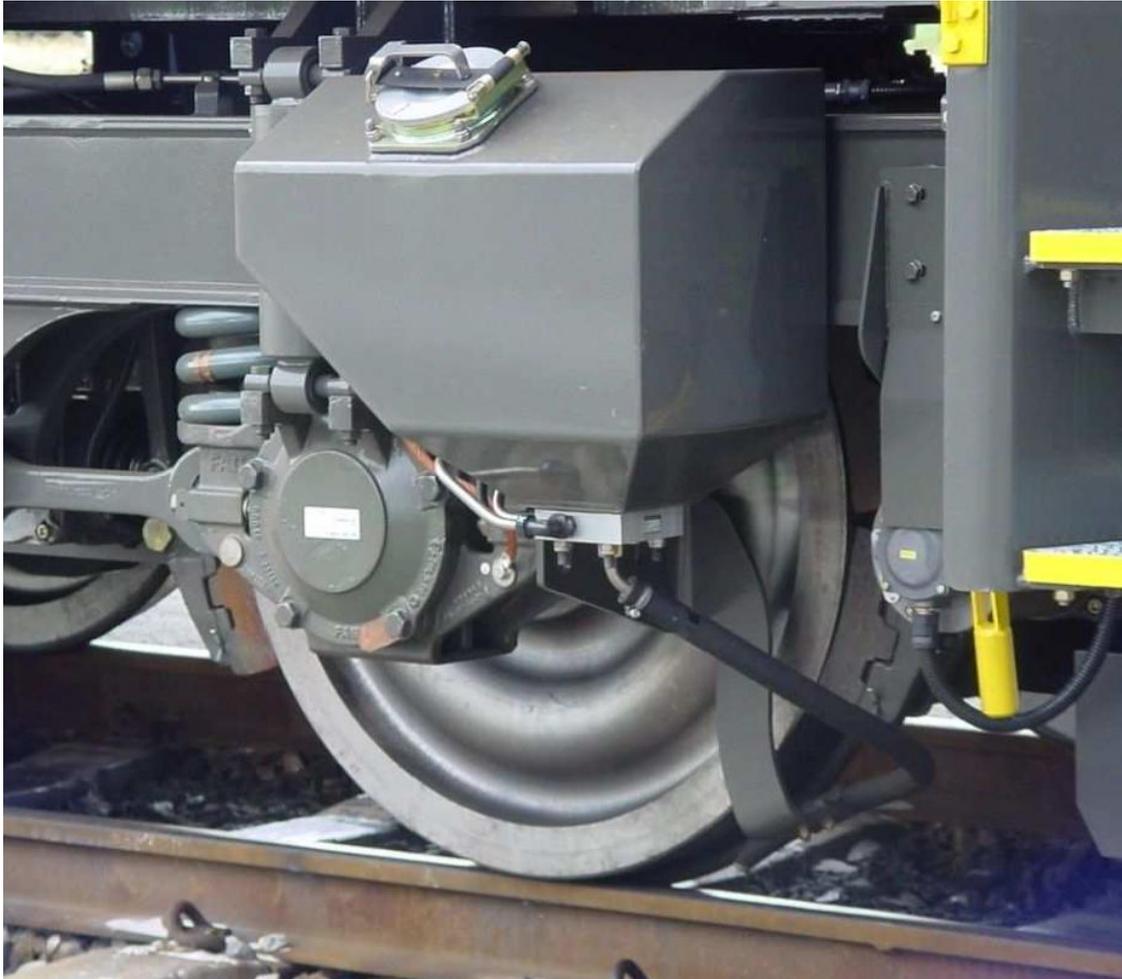


Abbildung 2.1 Sandungsanlage am Drehgestell [1]

- Sandungseinrichtung mit Sandtrocknung:
Die Sandungseinrichtung ist für die Förderung und Dosierung des Sandes zuständig. Sie ist die komplexeste Komponente des Sandungssystems. Zusätzlich zur Sandförderung, ist sie ebenfalls für die Sandtrocknung zuständig. Weil der Sand im Sandkasten nicht vollständig von Feuchtigkeit freigehalten werden kann, muss der Sand mittels Heizpatronen getrocknet werden. Vor allem bei nicht druckdichten Sandkästen kann Feuchtigkeit aus der Umgebung in den Sandkasten kommen. Feuchtigkeit wirkt sich ausgesprochen schlecht auf das Förderverhalten des Sandes aus, weil feuchter Sand Klumpen bildet. Deswegen wird üblicherweise abhängig von der Umgebungstemperatur heiße Luft in den Sandkasten befördert um den Sand zu trocknen. Üblicherweise schaltet sich die Sandtrocknung bei Temperaturen unter 5°C ein.
- Sandschlauch
Der Sandschlauch dient der Führung des Fördergutes zum gewünschten Bereich zwischen Schiene und Rad. Weil am Drehgestell des Zuges nur begrenzt Platz zur

Verfügung steht, kann die Position des der Aufhängung des Sandungssystems je nach Fahrzeugtyp variieren. Daher muss der Sand oft über längere Strecken geführt werden. Der Sandschlauch ist von wesentlicher Bedeutung sowohl für die Steuerung der ausgebrachten Sandmenge als auch für das Ansprechverhalten der Sandungsanlage.

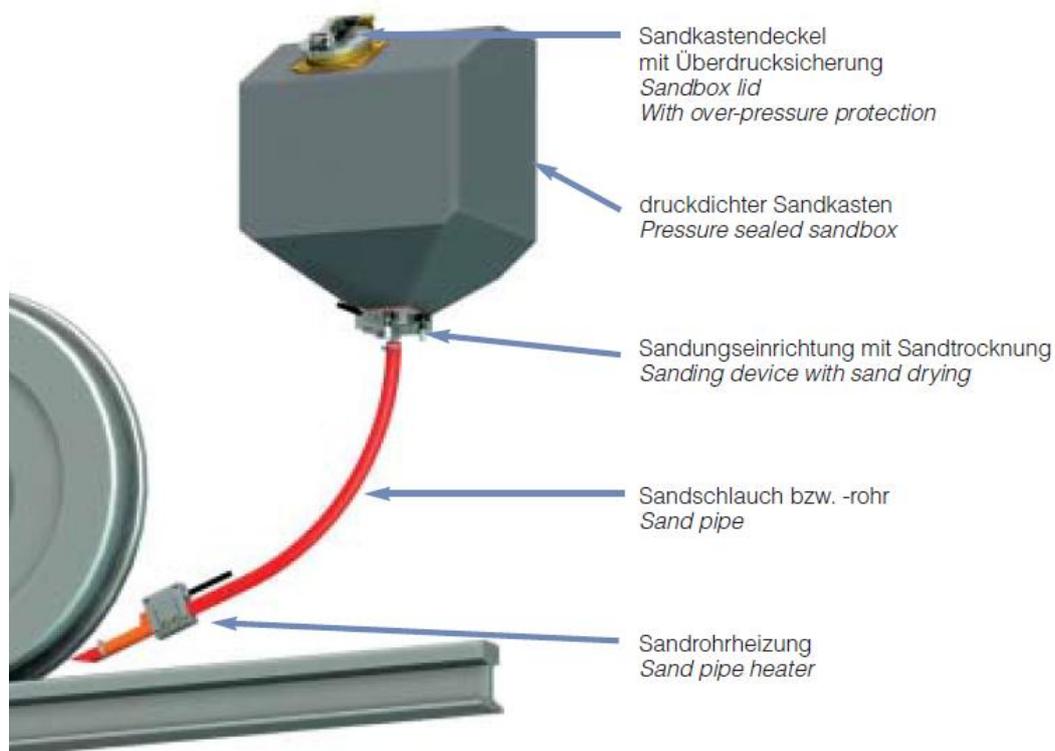


Abbildung 2.2 Aufbau einer Sandungsanlage

- Sandrohrheizung

Die Sandrohrheizung ist direkt an der Öffnung des Sandschlauches zur Schiene angebracht. Je nach Witterungsbedingungen kann es zu Eisbildung an der Öffnung des Sandschlauches kommen. Um zu gewährleisten, dass der Sandschlauch immer vollständig frei von Eis ist, wird am an der Öffnung des Sandschlauches zur Kontaktstelle zwischen Schiene und Rad die Sandrohrheizung angebracht. Diese verhindert das Zufrieren der Schlauchöffnung und gewährleistet, dass zu jedem Zeitpunkt die Sandförderung ermöglicht wird. Die Sandrohrheizung wird abhängig von der Umgebungstemperatur gesteuert. Wenn die Außentemperatur unter 5°C sinkt, schaltet sich die Sandrohrheizung ein. (siehe Abbildung 2.2)

2.2 Spezifikationen der Sandungseinrichtung

Die Spezifikationen sind vom Kunden geforderte Mindestanforderungen an die Sandungsanlage, die jedenfalls zu erfüllen sind. Die Spezifikationen werden als Grundlage zur Auslegung der Sandungsanlage herangezogen. Die festgelegten Spezifikationen werden eingeteilt in Funktionsspezifikationen, Spezifikationen aufgrund von Witterungsbedingungen und mechanische / elektrische Spezifikationen.

2.2.1 Funktionsspezifikationen

Die Funktionsspezifikationen legen vor allem die Anforderungen an die Sandförderung fest.

1. **Sandaustragsmenge:** Eine der wichtigsten Anforderungen an die Sandungseinrichtung ist die Regelbarkeit der Sandaustragsmenge je Zeiteinheit, also der geförderte Massenstrom $\dot{m}(t)$. Die Sandungsanlage soll einen Betriebsbereich von 200 g/ 30s bis 2400 g/30 s ermöglichen. Das große Fördermengenintervall ist notwendig, da der notwendige Sandmassenstrom $\dot{m}(t)$ abhängig von der Zuggeschwindigkeit ist. Versuche haben ergeben, dass ab einer gewissen Sandmenge keine Verbesserungen des Reibungskoeffizienten mehr erzielt werden können. Deswegen soll der Massenstrom in Abhängigkeit Zuggeschwindigkeit steuerbar sein. Je höher die Zuggeschwindigkeit, desto größer muss der auszubringende Massenstrom \dot{m} sein. [2]

Außerdem muss eine Haufenbildung auf dem Gleis vermieden werden. Das liegt vor allem daran dass zu viel Sand zwischen Schiene und Rad kurzzeitig dazu führen kann, dass das Rad den Kontakt zur Schiene verliert. Das kann dazu führen, dass der Zug nicht im Zugsystem erscheint.

Die derzeit verwendeten Sandungsanlagen sind nicht regelbar. Derzeit werden Sandungseinrichtungen danach ausgelegt, in welchem Geschwindigkeitsbereich Sie eingesetzt werden. Der Schienenfahrzeugbauer gibt für die Auslegung der Sandungsanlage an wie hoch die übliche Maximalgeschwindigkeit des Zuges ist, in dem die Sandungsanlage verbaut werden soll. Die Sandungsanlage wird für die entsprechende Zuggeschwindigkeit ausgelegt und kann anschließend nicht mehr variiert werden. Die Sandmenge kann nicht gesteuert werden.

2. **Streuung:** Zudem soll der Massenstrom eine maximale Streuung von ± 15 g/ 10 s nicht überschreiten. Diese Spezifikation kann im umgesetzten Prüfstand nicht überprüft werden, da die Sandaustragsmenge über einen Zeitraum von 30 Sekunden gemittelt wird. Allerdings kann die Streuung über 30 Sekunden überprüft werden.

3. **Ansprechzeit:** Die Ansprechzeit der Sandungsanlage soll kleiner als 0,2 Sekunden sein. Das heißt für den Betrieb, das Zeitintervall zwischen dem Moment, in dem der Lokführer die Sandungsanlage betätigt, bis zu dem Moment, in dem der Sand die Schiene erreicht, soll maximal 0,2 Sekunden betragen.
4. Der Betrieb der Fördereinheit muss von der Dichtigkeit des Sandbehälters unabhängig sein. Das gilt nur für Sandungsanlagen, die nicht nach dem Überdruckprinzip funktionieren (siehe Pneumatische Dosierung).
5. Der Betrieb der Sandungseinrichtung muss unabhängig davon sein, ob der Sandbehälter mit Druckluft und Feinstaubanteilen gefüllt wird
6. Der Sandbehälter muss durch die Sandungseinrichtung vollständig entleert werden können.
7. Es darf zu keiner Selbstentleerung des Sandkastens aufgrund von Vibrationen kommen.
8. Brückenbildungen und Verfestigungen des Sandes Im Sandbehälter müssen durch die Sandungseinrichtung aufgebrochen werden können. Brückenbildung ist ein häufig auftretendes Problem der Schüttguttechnik. Dabei kommt es zur Verfestigung eines Fördermediums, da sich die einzelnen Partikel gegeneinander abstützen (siehe Abbildung 2.3). Die einzelnen Partikel stützen sich gegeneinander über Haftkräfte ab. Die Verfestigung wird durch Vibrationen begünstigt. Das Resultat sind Verstopfungen. [3]

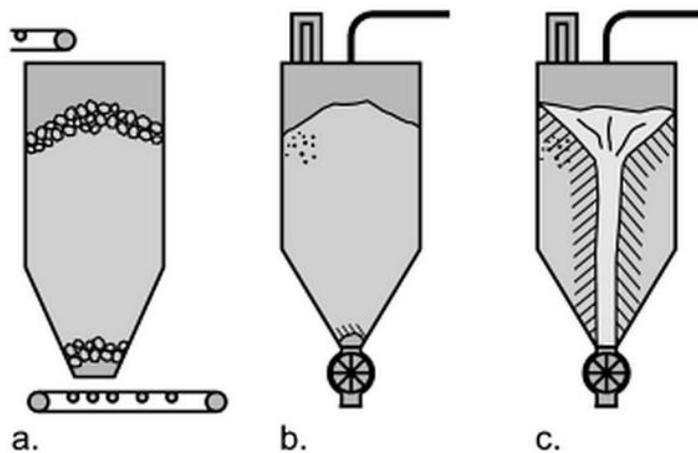


Abbildung 2.3 a. Brückenbildung durch Verkeilen einzelner Partikel; b. Brückenbildung des Schüttgutes aufgrund von Druckverfestigung; c. Schachtbildung [3]

9. Zusätzlich zur Fördermenge wird auch definiert, welche Fördermedien am Prüfstand zum Einsatz kommen. Bahnbetreiber haben gewisse Anforderungen an das Fördermedium, da dessen Körnung sich sowohl auf den Betrieb der Sandungsanlage als auch auf den Reibwert zwischen Schiene und Rad auswirken kann. Um eine möglichst große Annäherung an den realen Betrieb zu erhalten, werden deshalb an

die Prüfungsdurchführung die gleichen Anforderungen gestellt. Als Grundlage wird die Norm der deutschen Bahn herangezogen, die die Verteilung der Korngrößen festlegt. In Abbildung 2.4 ist in Zahlen die Korngrößenverteilung ersichtlich.

> 3 mm	0%	<i>Achtung: Zusätzlich zu BN918224:2000-5 festgelegt, da sonst theoretisch auch sehr große Steine förderbar sein müssten.</i>
> 2,5 mm	<0,1 %	
2,5 > 2,0	<5 %	
2,0 > 1,6	<30 %	
1,6 > 0,8	>50 %	
0,8 > 0,63	<30 %	
0,63 > 0,1	<5 %	
< 0,1	<0,5 %	

Abbildung 2.4 Größenverteilung des Korndurchmessers [mm] laut Bahnnorm BN918224:2000-5 [2]

Um zu gewährleisten, dass keine Steine in die Sandungsanlage gefüllt werden, die den wartungsfreien Betrieb gefährden, wurde zusätzlich festgelegt, dass 0% Körner mit einem Durchmesser größer als 3 mm genutzt werden sollen.

Der zur Prüfung bezogene Sand wurde bei den ersten 5 Tonnen ebenfalls vom Sandlieferanten der DB bezogen. Anschließend wurde zum Lieferanten der ÖBB gewechselt.

Zusätzlich zur Korngrößenverteilung darf Sand, der eine Feuchtigkeit von mehr als 0,5 Gewichts- % überschreitet, nicht zur Förderung verwendet werden, da sich dieser ebenfalls auf den Massenstrom auswirken kann. [2]

2.2.2 Mechanische und elektrische Spezifikationen

Im folgenden Abschnitt wird auf die wichtigsten mechanischen und elektrischen Spezifikationen eingegangen.

1. Masse: Die Masse der Sandungseinrichtung sollte 4 kg nicht überschreiten. Das Maximalgewicht resultiert daraus, dass die gesamte Sandungsanlage am Sandkasten angeflanscht wird und dieser die gesamte Masse tragen muss. Ab einer Masse größer als 4 kg muss der Anschlussflansch größer dimensioniert werden.
2. Alle Schnittstellen der Sandungseinrichtung sowie die Sandungseinrichtung selbst müssen vor dem Eindringen von Wasser geschützt sein.
3. Die Bauhöhe der Sandungsanlage soll so klein wie möglich gehalten werden. Die Bauhöhe kann problematisch sein, da der Sandkasten über den Schienen aufgehängt ist. Der Mindestabstand der Sandungseinrichtung zur

Schienenoberkante soll 300 mm nicht unterschreiten. Dadurch ist sie auch besser vor Fremdeinwirkung geschützt (Steinschlag).

4. Die Oberflächen innen und außen sollen vor Korrosion geschützt sein.

2.2.3 Spezifikationen auf Grund von Witterungsbedingungen

Da die Sandungsanlage außen an einem Zug befestigt ist, wird sie unter verschiedenen Umweltverhältnissen betrieben. Deshalb wird in den folgenden Punkten festgelegt, welche klimatischen Verhältnisse berücksichtigt werden müssen. Die folgenden Spezifikationen wurden am Prüfstand nicht überprüft, dennoch werden Sie der Vollständigkeit halber kurz erwähnt.

1. Umgebungstemperatur: Einsatz zwischen -50°C und $+40^{\circ}\text{C}$
2. Steinschlag: Die ZRS (Zellradschleuse) soll einem Einschlag von bis zu 1200 Joule standhalten. Das entspricht einem Stein mit 5 kg Masse und einer Geschwindigkeit von 250 km/h
3. Die Sandungsanlage muss scharfkantigem Eisschlag standhalten können und sollte Eisbildung standhalten können
4. Temperaturbeständigkeit bis 200°C (Im Sandkasten können durch Sandtrocknung Temperaturen bis 200°C auftreten)
5. 5% - 100% Luftfeuchtigkeit
6. Aufgrund des Einsatzes in Küstengebieten muss die Zellradschleuse salzhaltiger Luft standhalten können (Korrosionsgefahr)
7. Im Einbauzustand sicher vor Wasserhochdruck bzw. Dampfstrahlreinigung
8. Resistent gegenüber Sonneneinstrahlung

Grundsätzlich gilt, dass die Sandungseinrichtung jeglichen Witterungsbedingungen, denen sie als außenliegende Komponente an einem Schienenfahrzeug ausgesetzt wird, standhalten können muss.

2.2.4 Lebensdauer

Die Lebensdauer der Sandungsanlage ist von entscheidender Bedeutung und ist eine zentrale Motivation für den durchgeführten Dauerversuch. Die von Bahnbetreibern und in weiterer Folge von den Fahrzeugbauern geforderte Mindestlebensdauer beträgt im Schienenverkehr üblicherweise 30 Jahre. Der Zielwert für die Lebensdauer beträgt 40 Jahre.

Außerdem wird ein wartungsfreier Betrieb von zehn Jahren gefordert. Im Bahnverkehr wird üblicherweise nach zehn Jahren eine ausführliche Überholung einer Fahrzeuggarnitur durchgeführt. Das bedeutet für die Sandungsanlage, dass von jedem einzelnen Teil eine

Lebensdauer von zehn Jahren gefordert wird. Im Zuge der Überholung können Verschleißteile getauscht werden. [2]

3 Dosiervorrichtungskonzepte

In Kapitel 3 wird der derzeitige Stand der Technik auf dem Gebiet der Sandungseinrichtungen behandelt. Einerseits wird das Prinzip der pneumatischen Sandförderung und Dosierung erläutert. Auf diesen Konzepten beruhen derzeit produzierte Sandungsvorrichtungen. Andererseits wird auf alternative mechanische Verfahren von Sandungsanlagen eingegangen. Dabei wird einerseits auf die Förderschnecke eingegangen und andererseits auf die Zellradschleuse. Beide basieren auf dem Prinzip der elektromechanischen Förderung. Die ZRS wird ausführlicher behandelt, da sie im Zentrum der Untersuchungen steht. Dabei werden die Funktionsweise und konstruktive Auslegung geklärt. Die Verschiedenen Konzepte werden einander gegenübergestellt um die Vor- und Nachteile abwägen zu können.

3.1 Pneumatische Dosierung

Die pneumatischen Sandungsanlagen stellen den aktuellen produktreifen Stand der Technik dar. Die Förderung und Dosierung des Sandes erfolgt ausschließlich über Luftdruck. Bei den pneumatischen Sandungsanlagen kann zwischen zwei verschiedenen Konzepten unterschieden werden: Dem Unterdruckprinzip und dem Überdruckprinzip.

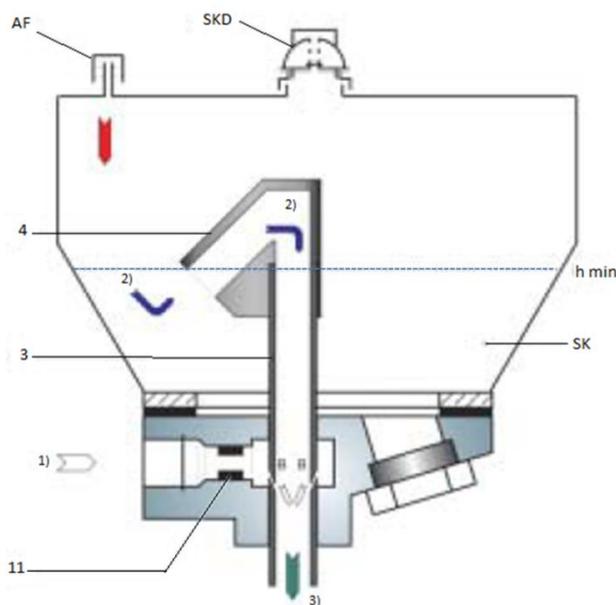


Abbildung 3.1 pneumatische Sandungsanlage nach dem Unterdruckprinzip [1]

Abbildung 3.1 zeigt den Aufbau einer Sandungsanlage nach dem Unterdruckprinzip. Der Sand befindet sich im Sandkasten (6). Die Sandungsanlage ist unten an den Sandkasten angeflanscht. Wenn ein Sandungsvorgang gestartet werden soll, strömt Druckluft von (1) durch die Düse (4) und durch die gerichteten Bohrungen in das Saugrohr (3). Dadurch wird ein Unterdruck im Saugstutzen (2) hergestellt. Durch den Unterdruck im Saugstutzen wird Luft durch den Ansaugfilter (1) in den Sandkasten gesaugt. Der Luftstrom strömt durch den Sand im Sandkasten und fördert diesen mit in das Saugrohr. Anschließend wird der Sand im Saugrohr weiter beschleunigt um zwischen Schiene und Rad transportiert zu werden. [1]

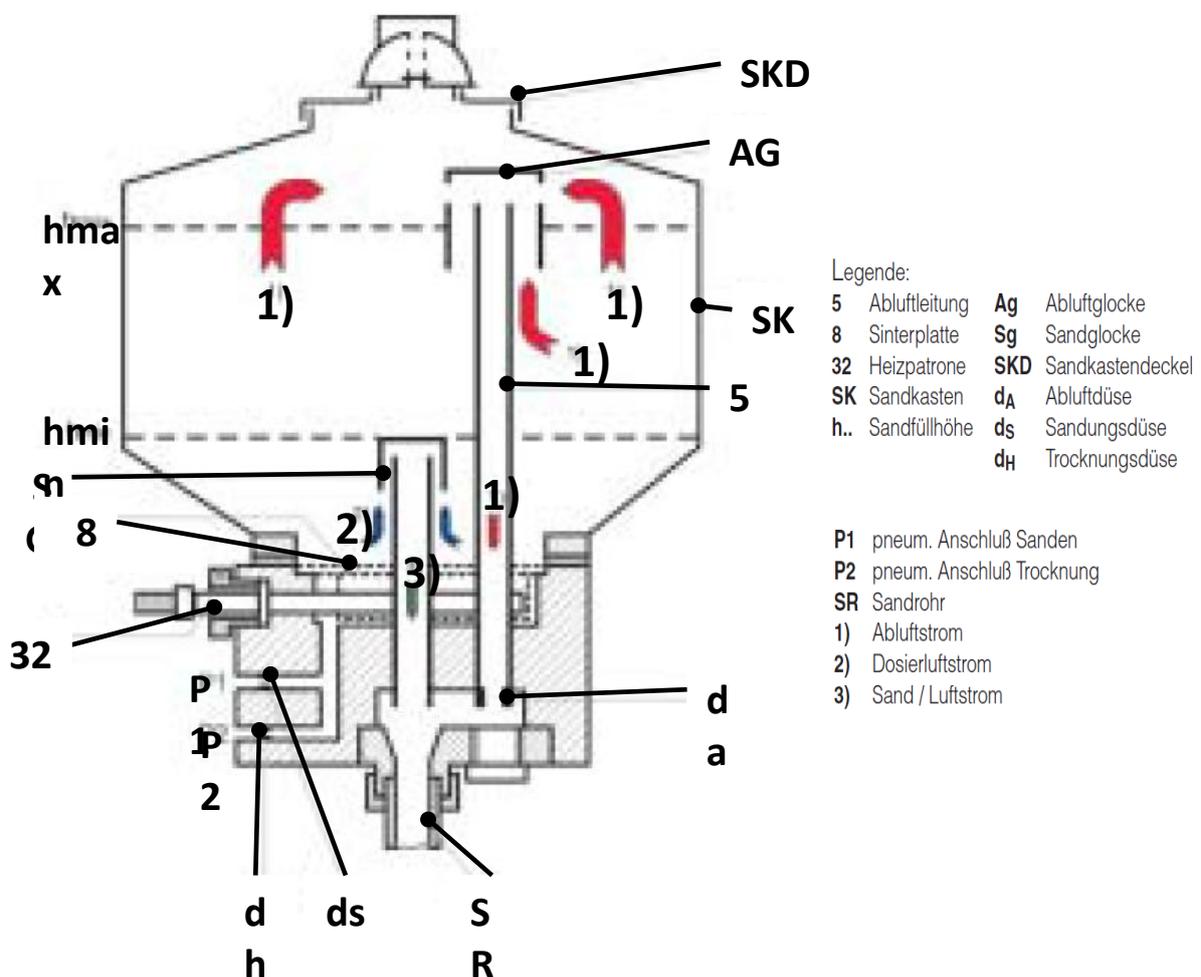


Abbildung 3.2 Schema einer Überdruck- ZRS [1]

In Abbildung 3.2 ist der Aufbau einer Sandungsanlage nach dem Überdruckprinzip dargestellt. Die Sandungsanlage ist ebenfalls unter den Sandkasten angeflanscht. Wenn Sand gefördert werden soll, wird die Sandungsdüse (ds) mit Druck beaufschlagt. Der Luftstrom kommt von unten in den Sandkasten und setzt diesen unter Druck. Aufgrund des Strömungswiderstandes werden Sandkörner erfasst und mittransportiert. Im Sandkasten befinden sich zwei Rohre, Die Abluftleitung (5) und das Sandrohr (SR). Der Luftstrom

verzweigt sich beim Eintritt in den Sandkasten in zwei Luftströme. Der Abluftstrom strömt vollständig durch den Sand, tritt oberhalb aus und strömt über die Abluftleitung hinaus. Damit der Abluftstrom frei von Sand bleibt, muss die Abluftleitung immer oberhalb der Sandoberfläche sein. Die Höhe der Abluftglocke gibt den maximalen Füllstand des Sandkastens vor. Der zweite Luftstrom nimmt den Sand auf und strömt über die Sandglocke in das Sandrohr. Das Sandrohr endet im Gehäuse der Sandungsanlage. Hier wird über die Abluftdüse (da) der Abluftstrom wieder zugeführt. Er wird genutzt um den Sand zu beschleunigen und zwischen Schiene und Rad zu transportieren. Die Sandglocke (Sg) gibt im Gegensatz zur Abluftglocke den minimalen Füllstand des Sandkastens vor. Die Sandglocke muss immer mit Sand bedeckt sein, sodass der Luftstrom 3) den Sand aufnimmt und ein Sand/ Luftgemisch entsteht. [1]

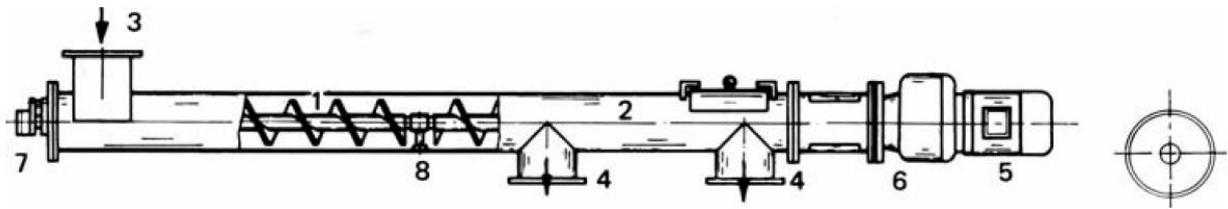
Entscheidend für die richtige Funktion der pneumatischen Überdrucksandungsanlage ist ein druckdichter Sandkasten.

Die Sinterplatte (8) ist für die Sandtrocknung verantwortlich. Wenn der Sand getrocknet werden muss, wird eine Heizpatrone (32) gezündet und die warme Luft wird über die Sinterplatte im Sandkasten verteilt. So wird der Sand getrocknet.

3.2 Elektromechanische Dosierung

Die elektromechanische Dosierung beruht auf dem Konzept der Förderung mittels eines elektrischen Motors. Der Motor treibt ein Zellrad oder eine Förderschnecke an, welche wiederum den Sand transportiert. Die Dosierung kann dabei über die Drehzahl des Motors gesteuert werden.

3.2.1 Mechanische Dosierung mit einer Förderschnecke



SPIRATOR - Förderschnecke in Rohrform

- 1 Schnecke
- 2 Trog
- 3 Gutaufgabe
- 4 Gutabgabe
- 5 Getriebemotor
- 6 Festlager
- 7 Loslager
- 8 Zwischenlager

Abbildung 3.3 Schema eines Schneckenförderers [4]

Schneckenförderer werden „in DIN 15201 definiert als Stetigförderer, bei denen ein rotierender, schraubenförmiger, durchgehender oder unterbrochener Körper (Schnecke) das Fördergut waagrecht, geneigt oder senkrecht fördert.“ [4]

In Abbildung 3.3 ist beispielhaft der Aufbau einer Förderschnecke mit horizontaler Drehachse dargestellt. Die Förderschnecke kann horizontal, schräg oder vertikal fördern. Für eine Anwendung an der Sandungsanlage kommt aufgrund der langen Förderachse, nur eine Horizontalförderschnecke in Betracht. Das Fördergut gelangt über die Gutaufgabe (3) in den Förderraum. Dort wird es von der Förderschnecke (1) aufgenommen und parallel zur Drehachse gefördert. Der Massenstrom \dot{m} ist dabei proportional zur Motordrehzahl. Bei der Gutaufgabe fällt das Fördergut aus dem Förderraum. Die Förderschnecke zählt zu den Stetigförderern, da das Fördergut konstant ausgebracht werden kann.

Der ausgebrachte Massenstrom der Förderschnecke ist definiert als

$$\dot{m} = \dot{V} \rho$$

\dot{V} ist der Volumenstrom und ρ die Schüttgutedichte. Der Volumenstrom kann berechnet werden mit

$$\dot{V} = A s n \varphi c$$

Wobei der Schneckenquerschnitt A folgendermaßen bestimmt werden kann

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Dabei ist D der Schneckenaußendurchmesser, n die Schneckendrehzahl, φ der Füllgrad, c der Geschwindigkeitsbeiwert und s die Steigung.

Die Förderschnecke kommt grundsätzlich als Dosierer für die Sandungsanlage in Frage. Allerdings hat sie aufgrund des schneckenförmigen Aufbaus eine recht große Bauform. Außerdem hat Sie gegenüber der Zellradschleuse einen entscheidenden Nachteil. Der Auslass der Förderschnecke muss durch eine Abdeckung gesichert werden. Während des Bahnbetriebes kommt es zu Vibrationen, die ohne eine Abdeckung zu einer Selbstentleerung der Förderschnecke führen würde. Für die Nutzung als Sandungseinheit müsste die Förderschnecke einen Öffnen-und Schließmechanismus haben um die Selbstentleerung zu verhindern.

3.2.2 Mechanische Dosierung mit einer Zellradschleuse

Zellradschleusen dienen der Förderung von Schüttgut und werden ebenfalls zur volumetrischen Dosierung von Feststoffen verwendet. Sie haben sich aufgrund ihrer einfachen Bauform als ein bewährtes Förderwerkzeug erwiesen und kommen in vielen Industriebereichen zum Einsatz. Zellradschleusen kommen je nach Anwendungsgebiet in den verschiedensten Ausführungen zum Einsatz. [5]

Die Zellradschleuse funktioniert nach folgendem Prinzip: das Zellrad oder der Rotor, wird über einen Motor in einem Gehäuse angetrieben, dessen Innenmaße an den Durchmesser und die Höhe des Zellrades angepasst sind. Die Zellen im Rotor werden durch Nutzung der Schwerkraft am Einlauf gefüllt und durch das Gehäuse transportiert. Am Auslauf werden die Zellen entleert. Über die Drehzahl kann die Fördermenge gesteuert werden.

Eine Unterscheidung der Bauformen von Zellradschleusen kann über die Drehachse gemacht werden. Die üblichste Bauart ist eine Zellradschleuse mit horizontaler Drehachse. Das Zellrad sitzt auf der Antriebswelle und ist seitlich durch das Gehäuse begrenzt. Das Fördergut gelangt über den Einlauf auf der Oberseite in die Zellen. Über die Zellen wird das Schüttgut zur Auslassöffnung auf der Unterseite des Gehäuses transportiert. Dort wird es entweder über Unterdruck oder durch die Schwerkraft herausbefördert. Weil das Schüttgut vertikal durch das Zellrad befördert wird, bezeichnet man diese Bauform als Vertikal-ZRS. [5]

In Abbildung 3.4 ist der Schnitt einer Vertikal-ZRS zu sehen. [3]

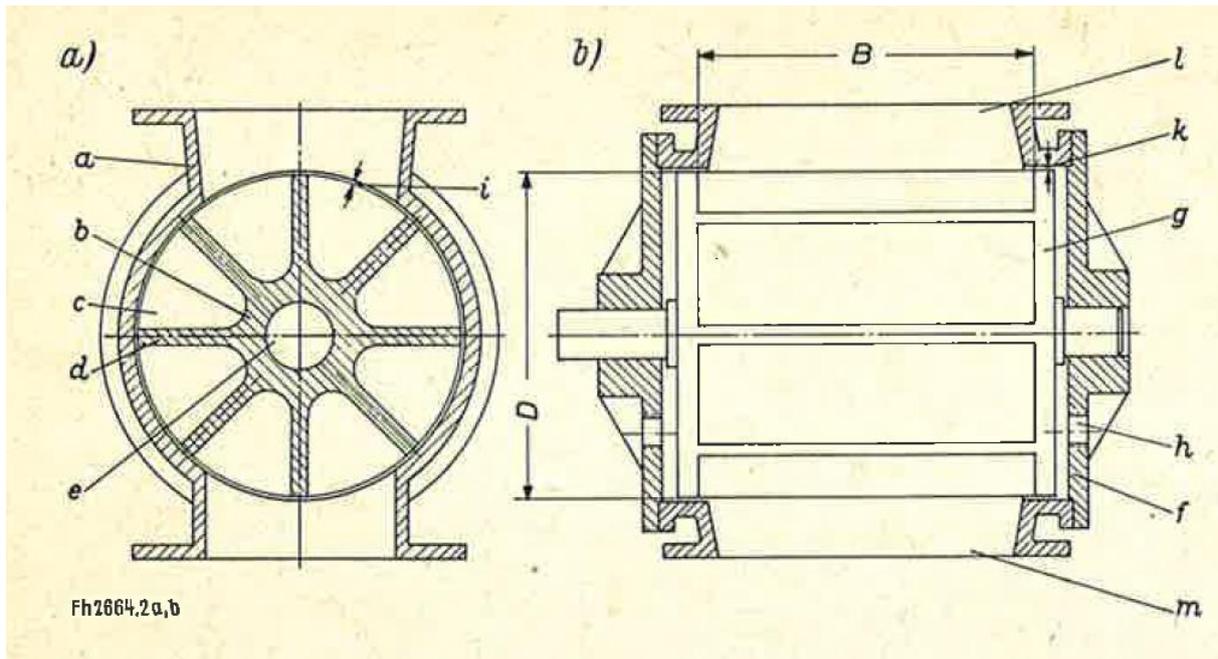


Abbildung 3.4: Schema einer Vertikal-ZRS [5]

Eine weitere Ausführungsmöglichkeit der ZRS ist mit einer vertikalen Drehachse gegeben. Dabei rotiert das Zellrad um die Vertikalachse. Der Einlass ist wie beim Vertikalzellrad auf der Gehäuseoberseite und der Auslass ist um 180° versetzt auf der Gehäuseunterseite. Diese Bauweise wird auch als Horizontalzellradschleuse bezeichnet weil das Fördermedium horizontal durch die ZRS befördert wird. In Abbildung 3.5 ist das Schema einer Horizontal-ZRS abgebildet. Auch bei diesem Konzept gibt es verschiedenste Ausführungsmöglichkeiten. [3]

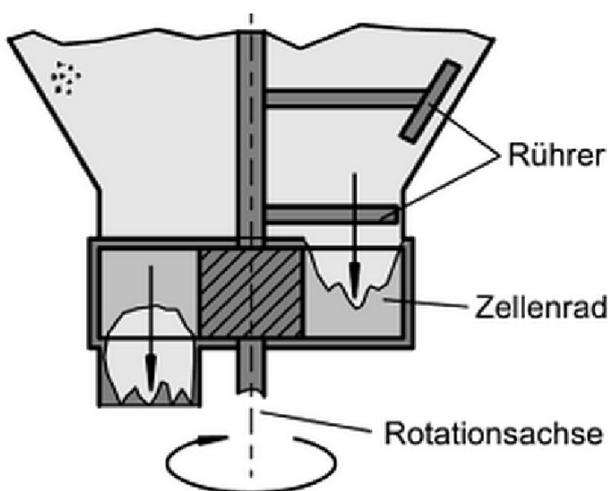


Abbildung 3.5: Schema einer Horizontal-ZRS [3]

Um ein optimale Auslegung der ZRS hinsichtlich Fördermenge gewährleisten zu können, muss eine theoretische Berechnung ermöglicht werden. Die Fördermenge wird einerseits durch die Zellradgeometrie, also Innendurchmesser, Außendurchmesser, Zellenvolumen,

Einlassgeometrie und die Auslassgeometrie beeinflusst. Weiters spielt die Drehzahl des Zellrades eine zentrale Rolle. Andererseits wird die Fördermenge durch das Schüttgut beeinflusst. Dabei spielen die Korngrößenverteilung, Kohäsion, Kornform, Schüttgutdichte, Schüttwinkel, die innere Reibung des Mediums sowie die Reibung an der Zellwand eine entscheidende Rolle. [5]

Laut Finklbeiner kann der Massenstrom für die ZRS nach folgender Formel berechnet werden:

$$\dot{m} = \dot{V} \rho_s = \frac{\pi}{4} D^2 H n \rho_s \psi \varphi$$

- Durchmesser des Zellrades D
- Höhe des Zellrades H
- Anzahl der Zellen n
- Füllgrad des Zellrades φ
- Ausnutzungsgrad des Zellrades ψ
- Anzahl der Zellradstege s

Der Ausnutzungsgrad des Zellrades ψ ist das Verhältnis aus der Querschnittsfläche der Zellen zur Gesamtquerschnittsfläche des Zellrades. Er ist nur von der Geometrie des Zellrades abhängig und wird wie folgt berechnet. (5 S. 9)

$$\psi = \frac{\text{Querschnittsfläche der Zellen}}{\text{Querschnittsfläche des Zellrades}} = \frac{\sum Fz}{\frac{\pi}{4} D^2}$$

Dabei ist F die Querschnittsfläche einer Zelle und z die Anzahl der Zellen.

φ ist der Füllgrad. Er ist das Verhältnis aus effektivem Füllvolumen einer Zelle und dem theoretisch nutzbarem Volumen der Zelle. Er ist abhängig von der Einlaufgeometrie, von der Drehzahl sowie vom Zellvolumen. Er gibt an wie gut das Zellvolumen genutzt werden kann. Er kann nach folgender Formel berechnet werden (5 S. 9)

$$\varphi = \frac{\text{effektives Fördervolumen}}{\text{theoretisches Fördervolumen}} = \frac{V_{eff}}{V_{th}}$$

Allerdings ist es nicht einfach den Füllgrad theoretisch zu bestimmen. Für den Bau des Prototypen wurde ein theoretischer Füllgrad von 95% angenommen. Dieser ist realistisch, solange die Zelle sich mit Sand befüllt. Ist die Drehzahl besonders hoch oder die Einlassöffnung nicht groß genug, dann ist es möglich dass die Zelle sich nicht vollständig mit Sand füllt, weil der Befüllvorgang nicht schnell genug vor sich geht, bis die Zelle den Einlass passiert hat.

3.3 Zellradschleusenprototypen

Um die oben genannten mechanischen Anforderungen und Betriebsspezifikationen zu prüfen, wurden zwei Prototypen gefertigt und in Versuchen auf Tauglichkeit geprüft. In den folgenden Kapiteln wird die konstruktive Auslegung und der Aufbau der Prototypen behandelt.

3.3.1 Horizontal-Stahlzellradschleuse

In Kapitel 3.2.2 wurde die Zellradschleuse vorgestellt. Dabei wurden die wesentlichen Eigenschaften und das zugrunde liegende Prinzip erklärt. Im folgenden Kapitel wird auf die konstruktive Auslegung der ZRS eingegangen.

Die Horizontal-Stahl-ZRS ist der erste Prototyp. In Abbildung 3.6 und Abbildung 3.7 sind die Draufsicht und ein Schnitt durch die ZRS abgebildet. Das Zellrad selbst ist vom Gehäuse, bestehend aus Gehäusedeckplatte (6), Gehäusegrundplatte (1), Zellradgehäuse (10) und Ringbelüfterflansch (7) umgeben. Der Elektromotor mit integriertem Getriebe (8) ist über vier Schrauben an die Gehäusegrundplatte angeflanscht. Er überträgt das Drehmoment auf die vertikale Antriebswelle (12). Die Drehmomentübertragung von der Welle auf das Zellrad und das Getriebe erfolgt über Passfedern. Die Welle fluchtet im Gutaktivator (3). Dieser wird oberhalb der Gehäusedeckplatte montiert und ist über drei Schrauben mit dem Zellrad verbunden. Dazwischen befindet sich der Adapterring (13), der als Abstandshülse zwischen Zellrad und Gutaktivator dient und gewährleistet, dass der Gutaktivator nicht auf die Deckplatte gepresst wird. Auf dem Gutaktivator ist ein Kegelaufsatz (2) angebracht, der gewährleisten soll, dass kein Restsand auf dem Gutaktivator zu liegen kommt. Der Austragsstutzen (11) dient als Verbindungsstück zwischen ZRS und Ejektor. Er deckt den Auslass der Gehäusegrundplatte ab. Er verläuft kegelig nach unten, sodass der Sandmassenstrom auf dem Durchmesser des Ejektors gebündelt wird. Am rohrförmigen Auslass hat der Austragsstutzen ein $\frac{3}{4}$ - Zoll-Außengewinde zur Befestigung des Ejektors. Der Austragsstutzen ist über vier Schrauben mit der Gehäusegrundplatte verbunden. Die Welle ist axial über zwei Schrauben gesichert.

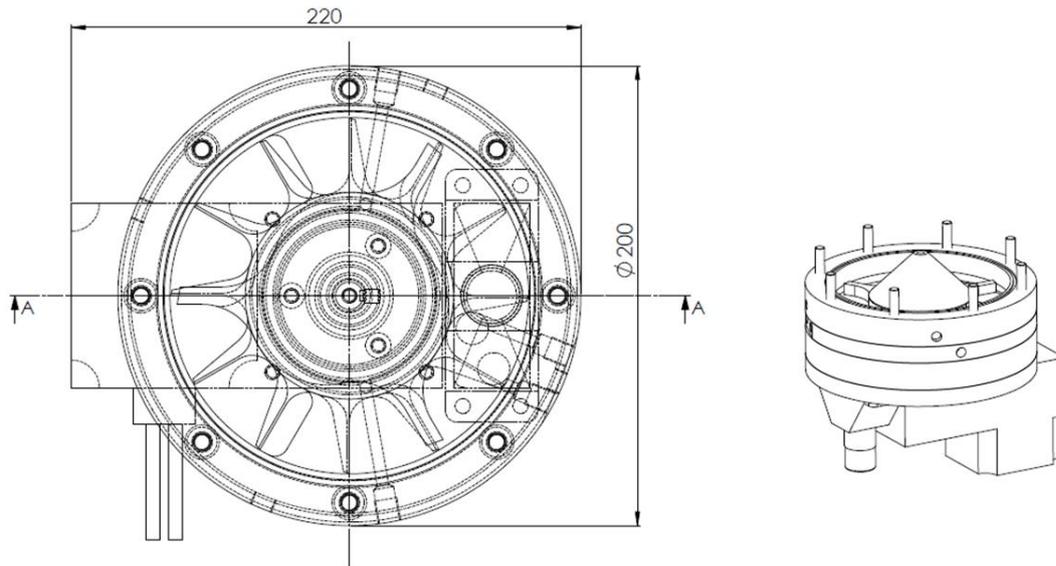


Abbildung 3.6: Draufsicht und ISO- Ansicht der Horizontal- ZRS

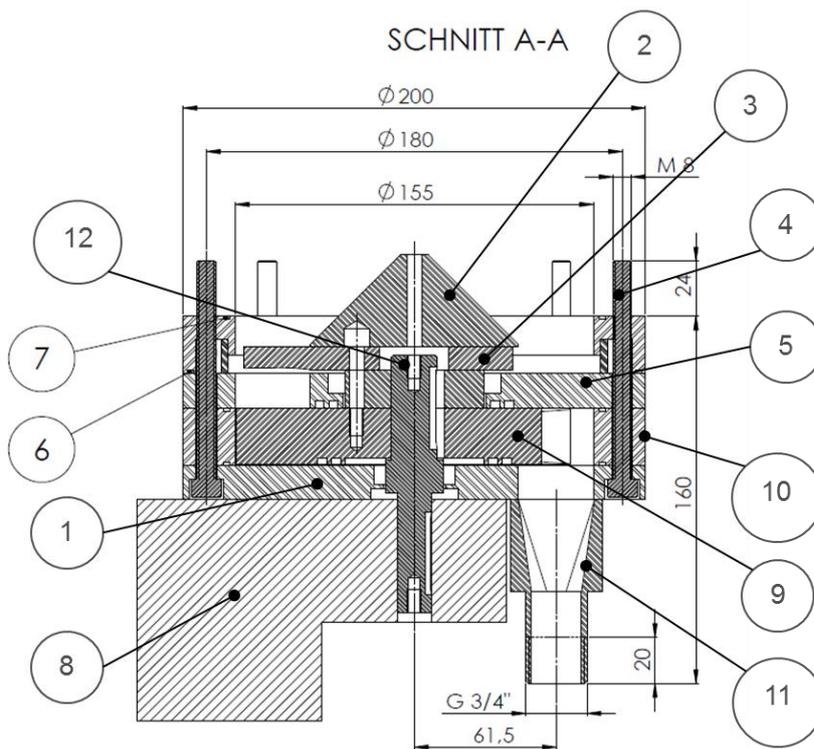


Abbildung 3.7: Schnitt A-A Horizontal- ZRS

Die Auslegung der ZRS erfolgt über die Geometrie vom Zellrades. Über die Variation des Fördervolumens sowie der minimalen und maximalen Drehzahl wird überprüft ob das notwendige Sandaustagsintervall von 200g/30s bis 2400g/30s (siehe S.10) eingehalten werden kann.

Das Fördervolumen der ZRS wird über folgende Formel berechnet

$$V_{Förder} = \left[\frac{D_a^2 - D_i^2}{4} \pi - n \frac{s_{Steg} (D_a - D_i)}{2} \right] * h$$

Der Fördermassenstrom kann über folgende Formel berechnet werden:

$$\dot{m} = V_{Förder} n \rho \varphi$$

Durch Variation der unten angegebenen Parameter kann die Geometrie des Zellrades bestimmt werden. Die beiden Prototypen wurden folgendermaßen ausgelegt, um das Sandaustragsintervall einzuhalten:

- Innendurchmesser Zellrad $D_i = 90 \text{ mm}$
- Außendurchmesser Zellrad $D_a = 155 \text{ mm}$
- Höhe Zellrad $h = 25 \text{ mm}$
- Anzahl Zellen Zellrad $n = 12 \text{ mm}$
- Dicke Zellradsteg $s_{Steg} = 6 \text{ mm}$
- Minimale Drehzahl $n_{min} = 1 \text{ U/Min}$
- Maximale Drehzahl $n_{max} = 14 \text{ U/Min}$
- Füllgrad $\varphi = 95\%$
- Schüttgutdichte $\rho = 1,6 \text{ kg/m}^3$

Der größte Durchmesser der ZRS beträgt 200 mm. Die ZRS wird oben durch den Ringbelüfterflansch begrenzt, der koaxial mit dem Verbindungsflansch am Sandkasten angeschraubt ist. Die Gesamthöhe der ZRS inklusive Ejektor und Motor ist abhängig davon, wie weit der Förderer auf das Gewinde am Austragstutzen geschraubt wird. Die Höhe der ZRS von der Oberseite des Ringbelüfterflansches bis zum Ejektor beträgt 160 mm. Das Gewinde hat eine Länge von 20 mm. Die Höhe der ZRS beträgt 73mm. Die Gesamthöhe kann also zwischen 213 mm und 228 mm liegen, wenn man von einer minimalen Einschraubtiefe des Ejektors von 5 mm ausgeht.

Die Gesamtmasse der Fördereinrichtung mit mechanischem Dosierer, Motor und Förderer beträgt 16,34 kg. Die Zellradschleuse kommt auf ein Gesamtgewicht von 13,1 kg.

Die Einzelzeile der Zellradschleuse sind aus Baustahl S355 gefertigt. Zusätzlich wurden alle Einzelteile durch nitrieren oberflächengehärtet¹.

¹ Das „Nitrieren“ ist ein Verfahren der Oberflächenhärtung. Dabei werden die Werkstücke in unter Zugabe von Stickstoff bei ca. 500°C warmgeglüht. Es bilden sich Nitride die im Stahlgitter eingelagert werden und eine besonders harte Randschicht erzeugen. [7]

Tabelle 3.1 Stückliste der Stahl- ZRS

Nummer	Bezeichnung	Masse [g]	Stück	Gesamtmasse [g]
1	Zellrad/ Welle/ Passfedern	2006	1	2006
2	Gehäusedeckplatte	2502,5	1	2502,5
3	Gehäusegrundplatte und Gehäuse	5423,5	1	5423,5
4	Ringbelüfterflansch	1422,5	1	1422,5
5	Gutaktivator	431,5	1	431,5
6	Kegelaufsatz	765,5	1	765,5
7	Auslass	419	1	419
8	Schraube M8*90	39	6	234
9	Schraube M6*16	5,5	4	22
10	Schraube M6*65	15,5	4	62
11	Sprengring M6	1	4	4
12	Schraube M6*35	9	4	36
13	Schraube M6*60	9	1	9
14	Schraube M6*35	15	1	15
15	Förderer	827,5	1	827,5
16	Motor	2416	1	2416
			Σ	16596

3.3.2 Horizontal-Vulkollanzellradschleuse

Die Vulkollan-ZRS entspricht geometrisch der Stahl-ZRS. Der Förderraum ist identisch ausgelegt. Es gibt jedoch zwei wesentliche Unterscheidungen der beiden Prototypen: Das Material des Zellrades und die Beschichtung der Grundplatte.

Hier besteht das Zellrad, wie die Überschrift bereits sagt, aus Vulkollan. Dieses Material ist ein Polyurethan, welches zu den Elastomeren gehört. Es hat eine vergleichsweise hohe Festigkeit. Die Drehmomentübertragung erfolgt beim Vulkollanzellrad nicht direkt über die Passfeder. Das Zellrad besteht einerseits aus dem Zellradkörper welcher aus Polyurethan gefertigt ist. Das Zellrad hat drei Durchgangsbohrungen. Zur Aufnahme des Drehmoments über die Passfeder wird ein Adapterring aus Stahl eingesetzt. Dieser überträgt das Drehmoment über drei M6-Stiftschrauben auf den Zellradkörper (siehe Abbildung 3.8). Diese werden über Durchgangsbohrungen durch Gutaktivator und Zellradkörper geführt und in den Adapterring eingeschraubt.

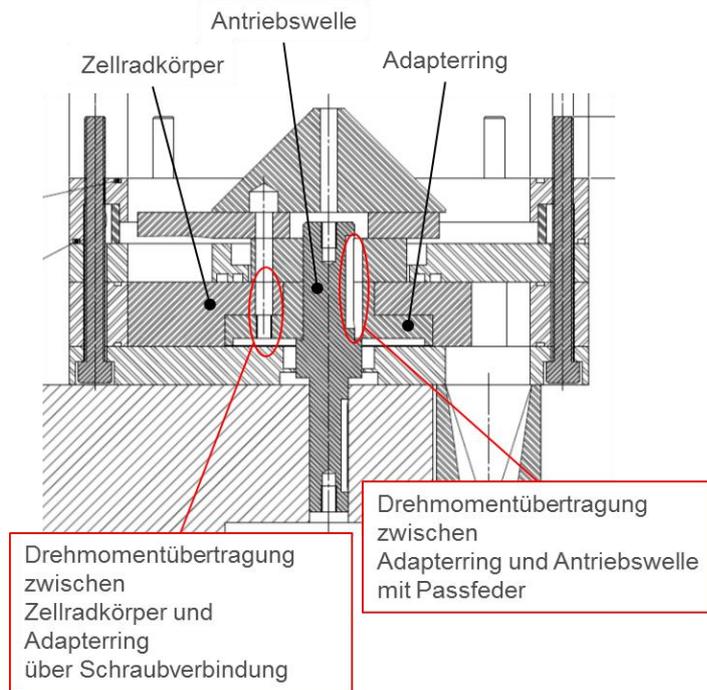


Abbildung 3.8 Drehmomentübertragung beim Vukollanzellrad



Abbildung 3.9 Vulkollanzellrad

Der zweite wesentliche Unterschied ist die Beschichtung der Gehäusegrundplatte. Im Gegensatz zur Stahl-ZRS ist die Grundplatte keramikbeschichtet (siehe Abbildung 3.9). Keramik weist eine höhere Härte als nitrierter Stahl auf, ist allerdings auch spröder als Stahl. Die Einzelteile der ZRS sind aus Vergütungsstahl 42CrMo4 gefertigt. Dieser weist eine höhere Festigkeit als Baustahl auf.

Die Masse der Vulkollan-ZRS ist mit insgesamt 15,73 kg knapp einen Kilo leichter als die Stahl-ZRS (siehe Tabelle 3.2). Das liegt vor allem am Material des Zellrades, das wesentlich

leichter ist. Auch hier ist das Gewicht allerdings weit von den geforderten 4 kg Maximalgewicht entfernt.

Tabelle 3.2 Stückliste Vulkollan- ZRS

Stückliste Zellrad schleuse FM02

Nummer	Bezeichnung	Masse [g]	Stück	Gesamtmasse [g]
1	Zellrad	576,2	1	576,2
2	Gehäusegrundplatte und Gehäuse	5423,5	1	5423,5
3	Zellraddeckplatte HZD	2505,7	1	2505,7
4	Ringbelüfterflansch	1411,5	1	1411,5
5	Welle mit Passfedern	240,8	1	240,8
6	Gutaktivator	432,8	1	432,8
7	Adapterring	319,2	1	319,2
8	Kegelaufsatz	764,9	1	764,9
9	Auslass	419,6	1	419,6
10	Motor	2430,4	1	2430,4
11	Förderer	827,5	1	827,5
12	Schraube M8*90	39	6	234
13	Schraube M6*16	5,5	4	22
14	Schraube M6*65	15,5	4	62
15	Sprengtring M6	1	4	4
16	Schraube M6*35	9	4	36
17	Schraube M6*60	9	1	9
18	Schraube M6*35	15	1	15
			Σ	15734,1

3.3.3 Zellrad-Gehäuse-Passung

Die konstruktive Lage des Zellrades gegenüber dem Gehäuse wird einer genaueren Betrachtung unterzogen, da sie wesentlich für den Verschleiß von Zellrad und Gehäuse als auch für die Streuung der Sandfördermenge sein kann. Um die konstruktiv gewählte Passungsart zu ermitteln, wurden die Nennmaße und die zulässigen Maßtoleranzen vom Zellradgehäuse aus den Fertigungszeichnungen entnommen. Dabei werden einerseits die Höhe bzw. Breite von Zellrad und Gehäuse gegenübergestellt und andererseits der Außendurchmesser vom Zellrad und der Innendurchmesser vom Gehäuse.

- Vorgesehene Nennmaße Zellradgehäuse (10) sowie zulässige Maßtoleranzen:

1. Innendurchmesser Zellradgehäuse Nennmaß: $D_i = 155\text{mm}_{+0,05}^{+0,15}$
2. Breite Zellradgehäuse: $b_i = 25\text{mm}_{+0,05}^{+0,15}$

- Vorgesehene Nennmaße Zellradgehäuse (10) sowie zulässige Maßtoleranzen:
 1. Außendurchmesser Zellrad: $D_a = 155\text{mm}_{-0,1}^{+0,1}$
 2. Breite Zellrad $b_a = 25\text{mm}_{-0,1}^{+0,1}$

Mit den Maßtoleranzen werden nun über die maximalen und minimalen Maßtoleranzen die Passungsgrenzen geprüft:

- kleinstmögliche radiale Spaltbreite $R_{D,min}$ Gehäuse – Zellrad:

$$R_{D,min} = \frac{D_{i,min} - D_{a,max}}{2} = \frac{155,05\text{mm} - 155,1\text{mm}}{2} = -0,025\text{mm}$$

- größtmögliche radiale Spaltbreite $R_{D,max}$ Gehäusedurchmesser - Zellrad:

$$R_{D,max} = \frac{D_{i,max} - D_{a,min}}{2} = \frac{155,15\text{mm} - 154,9\text{mm}}{2} = 0,125\text{mm}$$

- kleinstmögliches Spiel $R_{b,min}$ Gehäusebreite - Zellrad:

$$R_{b,min} = \frac{b_{i,min} - b_{a,max}}{2} = \frac{25,05\text{mm} - 25,1\text{mm}}{2} = -0,025\text{mm}$$

- größtmögliches Spiel $R_{b,max}$ Gehäusebreite - Zellrad:

$$R_{b,max} = \frac{b_{i,max} - b_{a,min}}{2} = \frac{25,15\text{mm} - 24,9\text{mm}}{2} = 0,125\text{mm}$$

Aus den Berechnungen ergibt sich, dass sowohl für die radiale Lage als auch für die Höhe die Passungen im Übergangsbereich zwischen Pressung und Spiel sind. Das ist ein konstruktiver Fehler, da auf keinen Fall zu irgendeinem Zeitpunkt eine Pressung zwischen Zellrad und Gehäuse erwünscht ist. Würde die Ausführung des Zellrades und des Gehäuses in den Bereich der Pressung fallen, wäre es nicht mehr möglich die ZRS in Betrieb zu nehmen.

Aufgrund der vorherigen Überlegungen stellt sich die Frage der optimalen Passung für Gehäuse und Zellrad. Es stellt sich außerdem die Frage, wie sich die Wahl der Lagetoleranzen auf die ZRS und vor allem auf die Sandförderung auswirkt. In die Betrachtung muss außerdem das Materialverhalten miteinbezogen werden, d.h. inwiefern wirken sich verschiedene Materialpaarungen (siehe Zellradprototypen =>Stah/Stahl bzw. Polyurethan/Stahl) und Passungen auf Verschleiß, Leistungsbedarf und Fördermenge aus.

3.3.4 Verschleißverhalten der Zellradschleuse

Wesentlich für den Verschleiß ist vor allem die Relativbewegung der beteiligten Körper, die Härte der beteiligten Materialien und die Spaltgeometrie.

Die Abrasion ist eine Form von Verschleißmechanismus, bei dem der härtere Körper in den weicheren eindringt und über dessen Oberfläche gleitet. Bei duktilen Werkstoffen kommt es dabei zu plastischen Verformungen. Bei spröden Einschlüssen im Grundwerkstoff kommt es zu Mikrorissen. Bei wiederholtem Übergleiten kommt es zur Ermüdung des weicheren Werkstoffes und schließlich zum Bruch. [6]

Hinsichtlich Materialeigenschaften kann die **Härte** der beteiligten Werkstoffe als eine zentrale Einflussgröße für den Verschleiß herangezogen werden, gibt sie doch den Widerstand eines Materials gegen Eindringen eines Fremdkörpers an.

Der dem Anwendungsfall zugrunde liegende Verschleißmechanismus kann dem Dreikörper-Abrasivverschleiß zugeordnet werden. Dabei befinden sich Körner in einem Spalt zwischen Grund- und Gegenkörper. Grund- und Gegenkörper bewegen sich relativ zueinander. Die im Spalt liegenden Körner werden zerrieben und führen eine Mischung aus Roll- und Gleitbewegung aus. [6]

Eine Gegenüberstellung der Materialien anhand der angegebenen Härte stellt sich als schwierig heraus, da die Materialien mit verschiedenen Härteprüfverfahren geprüft werden. Die Härte von Elastomeren wird in Shore angegeben, welches ein Prüfverfahren ist, das im Stahlbau nicht etabliert ist, und mit der Vickershärte schwer verglichen werden kann. Der Quarzsandhersteller gibt die Mohshärte an. Die Mohshärteskala ist eine vergleichende Härteskala, die Härten zwischen 1 und 10 angibt. Dabei ist Talk mit einer Mohshärte von 1 das weichste Material in der Härteskala und Diamant das härteste Material mit einer Mohshärte von 10.

Ein Zusammenhang zwischen der Vickershärte und der Mohshärte kann über folgende Beziehung ausgedrückt werden:

$$M = 0,675\sqrt[3]{HV}$$

M Mooshärte

HV Vickershärte

Bei diesem Zusammenhang kann es bei der Umrechnung von Mohshärte zu Vickershärte zu Abweichungen von bis zu 30% von der tatsächlichen Vickershärte kommen. Allerdings kann

er dennoch als Orientierungshilfe herangezogen werden, wenn von Materialien keine Vickershärte bekannt ist. [6]

Grundsätzlich gilt, dass der Sand unabhängig von der Materialwahl zu Verschleiß von Körper und Gegenkörper führt, weil dessen Härte im Vergleich zu den möglichen Materialien für Zellrad und Gehäuse entsprechend hoch ist. Die Härte des gelieferten Quarzsandes beträgt laut Hersteller 7 Mohs.(7)

Die Oberflächenhärte von nitriertem Baustahl St37 beträgt 250 HV (basierend auf Erfahrungswerten), und die Oberflächenhärte von nitriertem Vergütungsstahl 42CrMo4 V 650 HV. Laut dem Datenblatt des Sandes besteht der Sand zu 96 Gewichts-% aus Quarz. Quarz hat eine Härte von 1120 HV.

Um den Verschleiß durch den Sand zu minimieren, wird also ein möglichst hartes Material gewählt. Falls zwischen Verschleiß und Härtedifferenz ein linearer Zusammenhang besteht, dann ist der Verschleißfortschritt bei Materialien, die aus ST37 gefertigt sind wesentlich schneller als bei Materialien aus Vergütungsstahl.

Den Verschleiß von Polyurethan nur auf die Härte zu reduzieren ist nicht so einfach, da es bei Elastomeren zu elastischen Verformungen kommt, welche sich wieder zurückbilden. Dadurch können auch Sandkörner eindringen, die größer sind als die Spaltbreite. Versuche die von einem externen Forschungsinstitut mit verschiedenen Körpern gemacht wurden, haben gezeigt, dass das Polyurethan umso stärker verschleißt, je härter es ist, was dem vorher angeführten Zusammenhang von Härte und Verschleiß bei Stahl widerspricht.

Die **Relativbewegung** zwischen Zellrad und Gehäuse ist eine weitere Einflussgröße für den Verschleiß. Grundsätzlich gilt: Je größer die Relativbewegung zwischen Gehäuse und Zellrad, desto größer ist der Verschleiß. Die Drehzahl ist wesentlich von der Geometrie des Zellrades (aufgrund des erforderlichen Sandmassenstroms) abhängig, kann also nur aufgrund von konstruktiven Veränderungen angepasst werden. Je kleiner die Bauform der ZRS ausfällt, desto größer müssen die maximale und minimale Drehzahl gewählt werden und desto schneller wird die ZRS verschleifen.

Die **Geometrische Gestaltung des Spaltes** zwischen Grundkörper und Gegenkörper ist von entscheidender Bedeutung für den Verschleiß der Materialien, da sie sich wesentlich auf das Einzugsverhalten des körnigen Mediums auswirkt und das kinematische Verhalten des Zwischenmediums vorgibt. Außerdem findet vor dem Spalt eine KorngröÙenselektion statt. In den Spalt werden nur Körner eingezogen, die einen Durchmesser kleiner als die Spaltbreite haben. [6]

Laut einem Modellversuch sind für den Verschleiß hauptsächlich die Körner verantwortlich, die gerade die Größe des Spaltes haben oder minimal kleiner sind (siehe Abbildung 3.10). Größere Körner werden vor dem Spalt hergeschoben und wirken sich kaum auf den Verschleiß aus. [6]

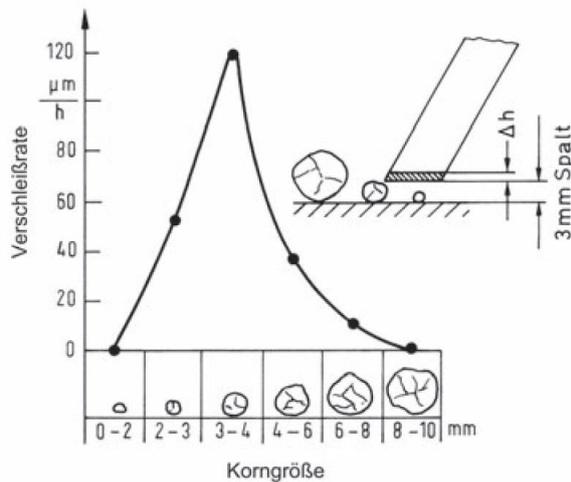


Abbildung 3.10 Verschleiß der Mischerschaukelkante eines Modellbetonmischers in Abhängigkeit der Korngröße des Mischgutes (trockener Sand) bei konstantem Spalt [6]

Für die Passungswahl gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten:

Entweder die Passung wird so gewählt, dass der Spalt minimal ist. Dabei ist vor allem die Größe der Sandkörner relevant. Das Ziel dabei ist, dass ein möglichst großer Teil des Fördergutes abtransportiert wird. Das Größenspektrum der Sandkörner reicht von 0,1 mm bis 0,25 mm. Dementsprechend muss die Spaltbreite $R_{b,max} < 0,1 \text{ mm}$ sein. Gleichzeitig muss $R_{b,min} = 0 \text{ mm}$ sein, da weiterhin Spiel vorgesehen werden soll.

Aus den Passungen ergibt sich eine Toleranz von 0,1 mm. Ein Vorteil dieser konstruktiven Auslegung ist, dass die Fördermenge theoretisch sehr genau gesteuert werden kann. Allerdings kann damit gerechnet werden, dass es zu einem höheren Leistungsbedarf kommt, weil eine hohe Reibung zwischen Grundkörper, Gegenkörper und den Körnern entsteht. Außerdem kann man damit rechnen, dass es zu Verschleiß von Zellrad und Gehäuse kommt, womit man nach längerer Standzeit aus der Toleranz fällt weil sich die Spaltgröße erhöht.

Die zweite Möglichkeit ergibt sich in einer Passungswahl, die den Sandkörnern ausreichend Spiel zwischen Zellrad und Gehäuse bietet. Das Spiel muss also so gewählt werden, dass das größte Sandkorn gerade noch durch den Spalt passt. Dementsprechend müssen die Fertigungstoleranzen für Gehäuseinnendurchmesser und Zellraddurchmesser so gewählt werden, dass die minimale Spaltbreite $R_{D,min} > 2,5 \text{ mm}$ eingehalten wird. Gemäß den

Versuchen, die für Abbildung 3.10 gemacht wurden, kommt es zu keinem Verschleiß. Es stellt sich allerdings die Frage, ob trotz des großen Spaltes die Spezifikationen hinsichtlich Sandfördermenge eingehalten werden können. Hinsichtlich Motorleistung wird jedenfalls mit der Ausführung des großen Spiels der Leistungsbedarf sinken, weil davon auszugehen ist, dass es zu geringeren Reibungsverlusten zwischen Zellrad und Gehäuse kommt.

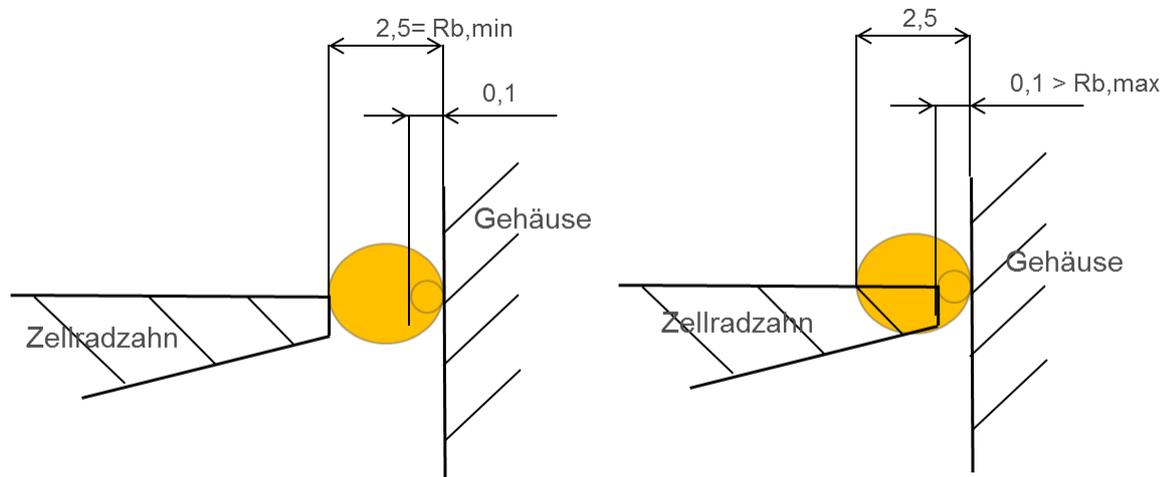


Abbildung 3.11: Ausführungsmöglichkeiten der Passung Gehäuse- Zellrad

Diese Wahl der Passung würde höchstwahrscheinlich zu einem deutlich langsameren Verschleiß führen. (siehe Abbildung 3.11)

Für den Spalt zwischen Deckplatte und Zellradoberseite sowie Grundplatte und Zellradunterseite sind die ausgeführten Überlegungen hinsichtlich Passung äquivalent gültig.

Die gleichen Überlegungen hinsichtlich der Passungswahl können auch für das Vulkollanzellrad mit Stahlgewehäuse gemacht werden. Das Elastomer erfährt im Gegensatz zum Stahl größere elastische Verformung. Bei Elastomeren kann die Härte allein zur Prognose des Verschleißes nicht herangezogen werden.

Es ist möglich, dass das Elastomer nachgibt, es allerdings zu keiner Rissbildung des Körpers und dadurch nicht zu abrasivem Verschleiß kommt (siehe Abbildung 3.12). Dementsprechend kann trotz großer Härte­differenz zwischen Polyurethan und Quarzsand keine Verschleißprognose gegeben werden.

Wenn der in Abbildung 3.12 dargestellte Fall des Einpressens des Sandkorns zwischen Gehäuse und Zellrad stattfindet, wie es bei Ausführung eines möglichst kleinen Spiels der Fall wäre, tritt eine sehr viel stärkere Reibkraft auf. Das Elastomer verformt sich elastisch, versucht aber seine ursprüngliche Form wiederanzunehmen und presst das Sandkorn auf das Gehäuse. Dadurch kommt es zu einer weitaus größeren Normalkraft zwischen Gehäuse und Sandkorn und dementsprechend zu einer weitaus höheren Reibkraft. Einerseits führt

das zu einem stärkeren Verschleiß des Gehäuses, andererseits wirkt es sich wesentlich auf die erforderliche Leistung aus.

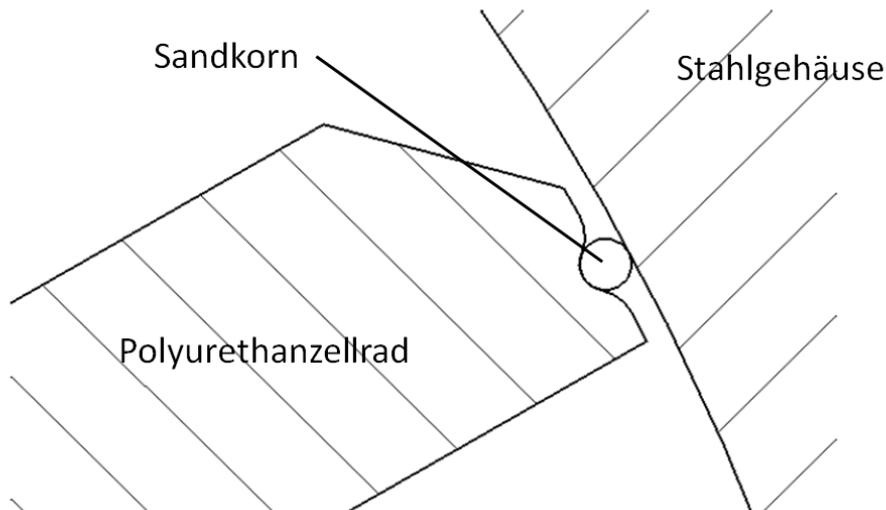


Abbildung 3.12 Materialverhalten eines Elastomers bei Drei-Körper-Abrasivverschleiß

Wenn eine Passung mit großem Spiel gewählt wird, dann kann von ähnlichen Überlegungen wie beim Stahlzellrad ausgegangen werden. Auch sind Spaltverluste möglich, was zu einer Erhöhung der Streuung der ausgebrachten Sandmenge führen kann. Über den Verschleiß des Zellrades kann keine Aussage gemacht werden, allerdings kann davon ausgegangen werden, dass Verschleißfortschritt langsamer stattfindet. Außerdem kann aufgrund geringerer Reibverluste von einem geringeren Leistungsbedarf ausgegangen werden.

3.3.5 Der Ejektor zur pneumatischen Förderung

Der Förderer hat die Aufgabe, den Sand zu beschleunigen, sodass er über einen Schlauch zwischen Schiene und Rad geführt wird. Die Beschleunigung des Sandes erfolgt pneumatisch. In Abbildung 3.13 ist der Aufbau der genutzten Fördereinheit dargestellt.

Die roten Pfeile geben die Förderrichtung des Sandes an. Die Fördereinheit funktioniert nach dem Venturiprinzip. Die Einspritzdüse fördert einen Luftmassenstrom in Richtung des Lavalrohres. Die Einspritzdüse erzeugt auf der Seite der ZRS Unterdruck, wodurch der Sand zusätzlich zur Erdbeschleunigung nach unten gezogen wird. Über dem Kunststoffeinsatz wird das Fördergut um 90° umgelenkt. Anschließend wird es bis zum Mittelpunkt der Lavaldüse weiter beschleunigt und verlässt durch die Schlauchaufnahme die Fördereinheit.

Die Fördereinheit wird über Schrauben an die ZRS angeflanscht. Zwischen dem Eingang der Fördereinheit und der ZRS muss ein Luftspalt erhalten bleiben, bzw. muss Umgebungsluft

angesaugt werden können, andernfalls würde ein dauerhafter Unterdruck in der ZRS entstehen.

Die Umlenkung wird über eine Sicherungsplatte im Gehäuse fixiert. Diese wird auf der Gehäuseoberseite eingelegt und über drei Schrauben fixiert. Die Einspritzdüse wird über eine Bohrung im Gehäuse eingelegt und ist koaxial mit der Lavaldüse positioniert. Fixiert wird sie innen über einen Absatz und außen über einen Sicherungsring. Die Lavaldüse wird ebenfalls eingelegt und anschließend über die Schlauchaufnahme gesichert.

Konstruktiv muss die Lavaldüse anhand des maximalen Massenstromes $\dot{m}(t)$ ausgelegt werden. Der maximale Massenstrom muss mit einem Luftmassenstrom noch durch den engsten Querschnitt gefördert werden können.

Die Fördereinheit ist konstruktiv (Sanddurchsatz 2700 g/30 s) bereits an der Grenze ihrer Auslegung. Der kleinste Durchmesser ist kaum in der Lage den Massenstrom zu fördern. Die Lavaldüse müsste für die Größe der Sandmassenströme größer ausgelegt werden. Die Fördereinheit ist nicht direkt für die ZRS ausgelegt worden, sondern ist eine Komponente einer pneumatischen Sandungsanlage.

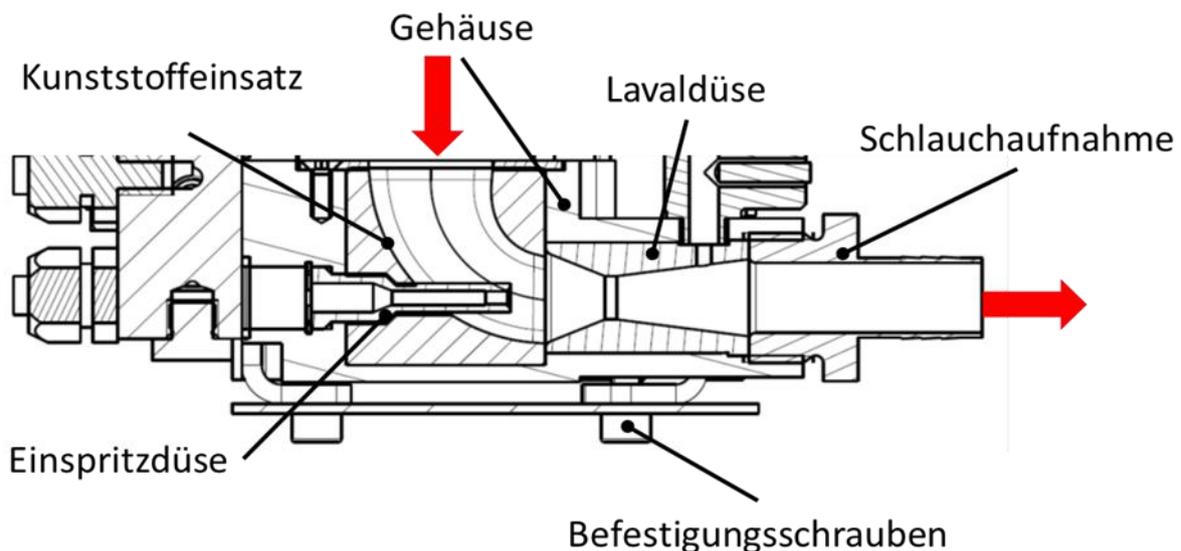


Abbildung 3.13 Schnitt durch Fördereinheit

3.3.6 Motor

Um die ZRS anzutreiben kommt ein bürstenloser Gleichstrommotor der Marke Oriental mit einer Nennleistung von 60 Watt zum Einsatz. An diesen ist ein 100:1 Hohlwellenuntersetzungsgetriebe angeflanscht. Die getriebeseitige Drehmomentübertragung

erfolgt über eine Passfeder. Abbildung 3.14 zeigt die Anschlussmaße des Motors. Abbildung 3.15 zeigt zulässige Drehmomente in Abhängigkeit von der Betriebsgeschwindigkeit des Motors.

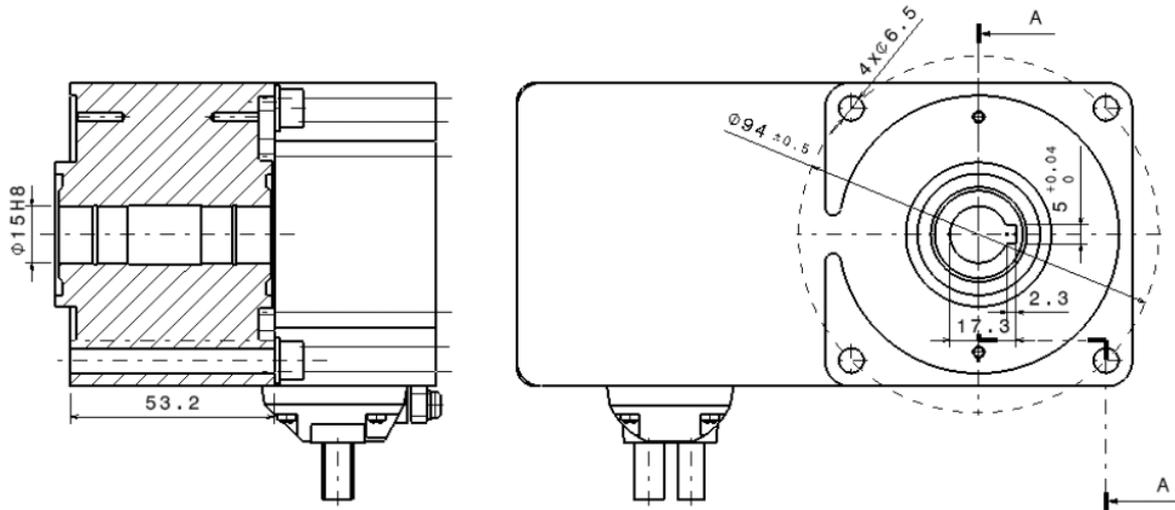


Abbildung 3.14 Anschlussmaße des verwendeten Motors [8]

Speed – Torque Characteristics

Continuous Duty Region: Continuous operation is possible in this region.
 Limited Duty Region: This region is used primarily when accelerating. When a load that exceeds the rated torque is applied continuously for approximately 5 seconds, overload protection is activated and the motor comes to stop.

BLF460-□/ BLF460-□FR/ BLF460-□-A

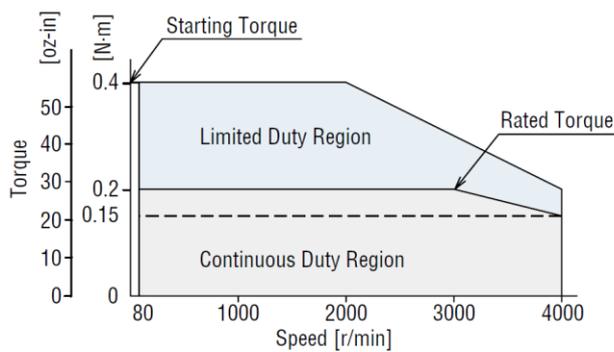


Abbildung 3.15 Zulässige Drehmomente in Abhängigkeit von der Betriebsgeschwindigkeit [8]

4 Versuchsaufbau

Zur Überprüfung der Spezifikationen der ZRS wurde ein Versuchsstand entworfen und aufgebaut. Mit diesem soll das Betriebsverhalten der ZRS überprüft werden. Vor allem sollen mit den Untersuchungen die Spezifikationen hinsichtlich Sandaustrag und Streuung überprüft werden. Außerdem soll die Mindestlebensdauer der ZRS überprüft werden.

Das Ziel dabei ist die Förderung von ungefähr zehn Tonnen Sand. Dies entspricht ungefähr der geförderten Sandmenge einer Straßenbahn innerhalb von zehn Jahren. Sandunganlagen, die in Straßenbahnen verwendet werden, können als oberster Richtwert für die Standzeit verwendet werden, da sie trotz vergleichsweise geringer geförderter Massenströme $\dot{m}(t)$ zwischen 400 g/30 s bis 600 g/30 s den größten Sandverbrauch pro Jahr haben, was auf die große Anzahl an Brems- und Beschleunigungsvorgängen zurückzuführen ist.

In Kapitel 4.1 wird der Aufbau des Versuches beschrieben. Außerdem werden die Messmittel und ihre Eigenschaften kurz angesprochen. In Kapitel 0 wird beschrieben wie die Versuchsdurchführung erfolgt. Dabei soll verständlich gemacht werden, auf welche Weise die Funktionsspezifikationen überprüft werden. In Kapitel 4.2 wird der Versuchsplan dargestellt, der die zeitliche Umsetzung und die sinnhafte Reihung der Messungen festlegt.

4.1 Aufbau und Komponenten des Versuches

Im folgenden Kapitel wird der Versuchsaufbau beschrieben. Um ein Verständnis für den Versuchsaufbau zu erhalten, wird der Versuchsaufbau in der Reihenfolge behandelt in der der Sand hindurch gefördert wird. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.1 abgebildet.

Die gesamte Prüfstandkonstruktion ist auf einem Gestell aus Boschprofilen aufgehängt. Der Sandbehälter wird über einen Verbindungsflansch mit dem Zellrad verbunden. Der Sandbehälter hat den gleichen Innendurchmesser wie das Gehäuse des Zellrades, sodass der gesamte Sand auf jeden Fall auf der Deckplatte der ZRS zu liegen kommt. Der zylindrische Sandbehälter hat ein Fassungsvermögen von 17 Litern, was einer Sandmasse von ca. 25 kg entspricht. Laut den Spezifikationen darf der Sandbehälter nicht druckdicht sein, also wird der Sandbehälter während der Versuche offen gelassen.

Die ZRS ist über acht Durchgangsschraubverbindungen am Verbindungsflansch aufgehängt. Der Verbindungsflansch ist wiederum über sechs Hammerkopfschrauben auf den Boschprofilen fixiert. Der Motor ist unter dem Zellrad angeflanscht. Ebenfalls unter dem Zellrad befestigt ist der Ejektor, der mit Druck den Sand in den Ausblasschlauch fördert.

Durch den Ausblasschlauch wird der Sand in einen Kübel gefördert, der auf einer Waage steht. Die Waage misst die ausgebrachte Masse und übermittelt sie an den Messcomputer. Über die Regelung der Drehzahl des Motors kann die auszutragende Sandmenge eingestellt werden.

Während der Versuche entsteht sehr viel Feinstaub, einerseits weil Feinstaub bereits im Sand enthalten ist, vor allem aber durch das Zerreiben des Sandes während der Dosierung in der ZRS. Deswegen ist der Kübel, in den der Sand gefördert wird, in einem separaten Schrank untergebracht, an den eine Feinstaubabsaugung angebracht ist. Damit soll der Arbeitsplatz möglichst feinstaubfrei gehalten werden.

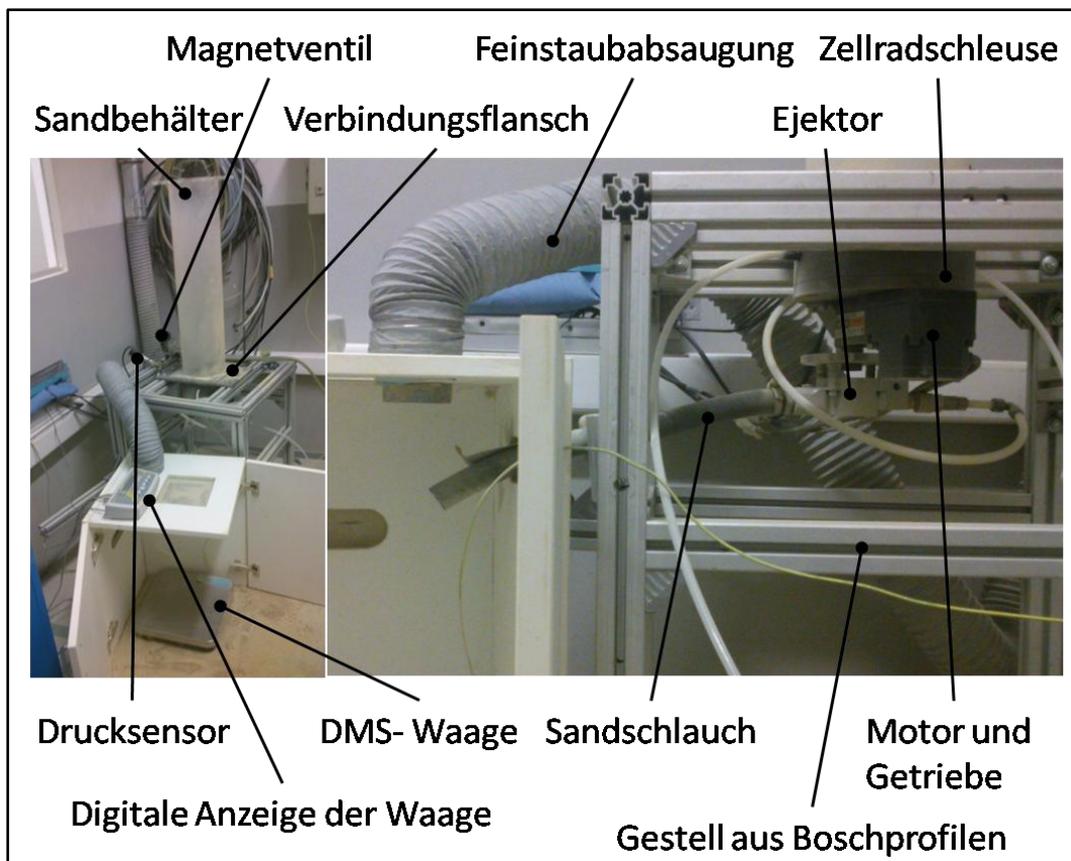


Abbildung 4.1 Prüfstands Aufbau

Außerdem befindet sich vor dem Ejektor ein Magnetventil, das die Luftzufuhr zum Ejektor steuert. Vor dem Eingang der Luftversorgung zum Ejektor ist ein Drucksensor vom Typ PMP4070 angebracht, der sowohl den angelegten Förderdruck als auch den Nachblasdruck misst. Über ein Luftmengenmessgerät, wird der notwendige Luftmassenstrom für den Ejektor gesteuert.(2 S. 77)

4.2 Versuchsplan

Im Versuchsplan wird festgelegt, was gemessen werden soll und in welcher Reihenfolge. Über eine Variation der Eingangsvariablen können verschiedene Ausgangsvariablen ermittelt werden.

In den Spezifikationen der Sandungsanlage (siehe 2.2) wurden die Anforderungen an die ZRS festgelegt. Alle Spezifikationen können am Versuchsaufbau nicht geprüft werden, vor allem Umgebungsspezifikationen können im Prüfraum nicht simuliert werden. Auf dem Prüfstand werden die mechanischen und elektrischen Spezifikationen, sowie die funktionalen Spezifikationen geprüft. Außerdem wird der Verschleiß der ZRS und der Fördereinheit aufgenommen um festzustellen, ob er einen Einfluss auf die Spezifikationen hat.

Zwar wurden bereits theoretische Überlegungen zum Verschleiß gemacht. Quarzsand ist ein stark abrasives Fördermedium, deswegen müssen Untersuchungen hinsichtlich Lebensdauer gemacht werden.

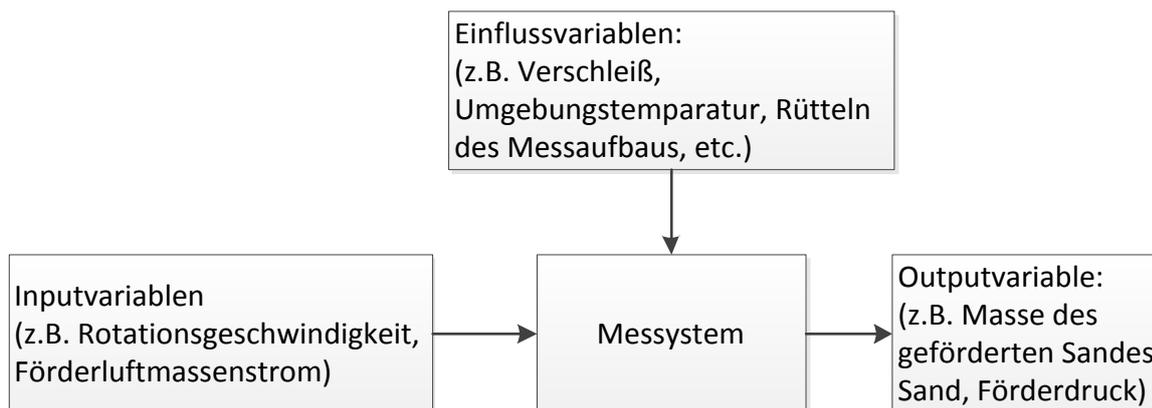


Abbildung 4.2 Schematische Darstellung eines zu untersuchenden Systems

Die Einflussvariablen können nicht gezielt variiert werden. Allerdings können Sie unter Umständen ebenfalls erfasst und mit dem Output in Verbindung gebracht werden. Es ist von wesentlicher Bedeutung, Kenntnis von Ihnen zu haben, da diese mit unvorhergesehenen Veränderungen in Ergebnissen in Verbindung gebracht werden können.(9 S. 5)

Folgende Ziele und Fragenstellungen ergeben die Motivation für den Prüfstand:

1. Prüfen, ob die erforderliche Mindestlebensdauer von zehn Tonnen Sandfördermenge eingehalten werden kann
2. Ermittlung der Sandaustragskennlinie
3. Ermittlung der Streuung der Sandfördermenge um Arbeitspunkte
4. Ermittlung der Stetigkeit der ausgebrachten Sandmenge
5. Abschätzung der erforderlichen Motorleistung

Zur Ermittlung der Ergebnisse werden Messgrößen festgelegt, die aus dem Messsystem erfasst werden müssen.

Folgende **Messgrößen** werden für den Versuch festgelegt:

1. Ausgebrachter Sand über eine Sandungsdauer von 30 Sekunden
2. Förderdruck während der Sandförderung
3. Lastfaktor des Motors (Über diesen kann das Drehmoment bestimmt werden)

Um das Steuerungsverhalten der ZRS bestimmen zu können, müssen die Inputvariablen definiert werden. Dazu müssen die Größen festgelegt werden, die bei den Messungen variiert werden müssen um den Einfluss auf die Messgrößen zu untersuchen. In diesem Versuchsaufbau sind folgende **Inputvariablen** festgelegt:

1. Drehzahl des Motors
2. Förderluftmassenstrom

Mögliche **Einflussvariablen** für den Versuch können sein:

1. Verschleiß
2. Sandkorngroße
3. Umgebungstemperatur
4. Störeinflüsse durch andere Versuche (Rüttler im Nebenraum)
5. Eigenschwingung des Versuches während des Betriebes

Die Umgebungstemperatur ist während der Versuche weitestgehend konstant. Deshalb wird sie nicht erfasst. Auch die Erfassung der Störeinflüsse wird als nebensächlich ausgeklammert, solange keine unerwarteten Ergebnisse bei der Messung auftreten. Die Eigenschwingung des Messaufbaus wird ebenfalls als vernachlässigbar betrachtet, da es auch im Bahnbetrieb zu stärkeren Schwingungen kommt.

Der Verschleiß wird als wesentliche Einflussgröße für den Betrieb der ZRS angenommen, weil es durch diesen zu Geometrieänderungen kommen kann. Aus diesem Grund wird dieser regelmäßig gemessen.

Nun wird der Versuchsplan erstellt. Der Versuchsplan legt fest, wie die Inputvariablen variiert werden müssen und in welcher zeitlichen Folge die Messungen durchgeführt werden sollen. Wie bereits erwähnt beträgt die geförderte Sandmenge über 10 Jahre im Bahnbetrieb ca. 10.000 kg, was der geforderten Mindestlebensdauer entspricht.

Um die geforderte Variation der Sandaustragsmenge (200 g/30 s bis 2400 g/30 s) abzudecken und den Sandaustrag über die Lebensdauer zu prüfen wurde eine Variation des

Sandaustrags festgelegt. Die Drehzahl wird zwischen 1 und 14 U/Min variiert, um einen Zusammenhang zwischen der ausgebrachten Sandmenge und der Drehzahl des Motors herzustellen. Zusätzlich wird die Drehzahl zyklisch über 300 kg geförderter Sandmenge, zwischen 1 und 14 U/Min variiert, um zu überprüfen ob der Verschleiß einen Einfluss auf die ausgebrachte Sandmenge hat (siehe Tabelle 4.1).

Der Versuch wird folgendermaßen umgesetzt: Der Sandkasten wird mit ca. 25 kg (genauer Wert wird dokumentiert) Sand gefüllt. Nun beginnt eine Sandkastenentleerung mit der Drehzahl 1 U/Min (das entspricht ca. einer Sandfördermenge von 200 g/30 s). Es werden 138 Sandungsvorgänge zu je 30 Sekunden durchgeführt. Zwischen jedem Sandungsvorgang findet eine Pause von 30 Sekunden statt. Also dauert die Entleerung des Sandkastens 138 Minuten. Anschließend wird der gleiche Ablauf mit 2 U/Min wiederholt. Allerdings halbiert sich aufgrund der doppelten Drehzahl die Anzahl der Sandungsvorgänge und die Dauer der Entleerung. Das gleiche wird nun mit 4, 8 und 14 U/Min gemacht, wobei hier mehrere Sandkastenentleerungen durchgeführt werden, wie Tabelle 4.1 zeigt. Nachdem die komplette Drehzahlvariation gemacht wurde, wird wieder von vorne angefangen.

Sobald 1.000 kg Sand gefördert wurden, wird die ZRS zerlegt und der Verschleiß wird anhand von Fotografien und mithilfe einer Schiebeleere dokumentiert um mögliche Geometrieänderungen festzustellen.

Zusätzlich wird pro Sandkastenentleerung mindestens ein Mal mithilfe einer Kamera der Lastfaktor am Steuergerät des Motors erfasst um auch den Einfluss des Verschleißes auf das Drehmoment bewerten zu können.

Tabelle 4.1 Eine Drehzahlvariation: Dauer der Sandkastenentleerungen in Abhängigkeit von der Drehzahl

Drehzahl [U/min]	Anzahl Sandkastenentleerungen (1 Entleerung entspricht 25 kg)	Geförderte Sandmenge [kg]	Sandungsvorgänge pro Entleerung	Versuchsdauer [Min]
1	1	25	138	138
2	1	25	69	69
4	2	50	35	70
8	3	75	18	54
14	5	125	10	50
	Σ12	Σ 300		Σ381

Nun wird eine zeitliche Abschätzung der Versuchsdauer gemacht, um den Aufwand der Lebensdauerprüfung zu schätzen.

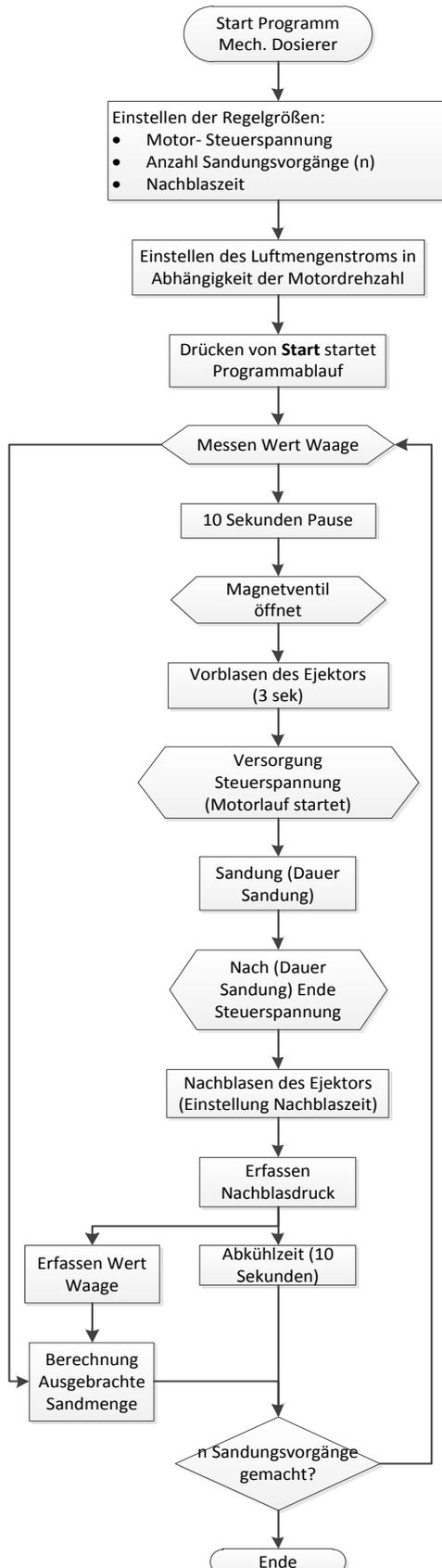
Die Rüstzeit zwischen jeder Sandkastenentleerung beträgt ca. 10 Minuten.

Die Durchführung einer Drehzahlvariation (Tabelle 4.1) beträgt inklusive Rüstzeit $12 \cdot 5 \text{ Min.} + 381 \text{ Min.} = 441 \text{ Min.}$ also 7,35 Stunden.

Um den Sanddurchsatz von 10.000 kg zu erreichen muss die Drehzahlvariation $n = 10.000\text{kg}/300\text{kg}=33,3$ mal durchgeführt werden, was einer Versuchsdauer von 245 Stunden entspricht.

Das entspricht bei einem Arbeitstag von 8 Stunden 30,625 Arbeitstagen, also 6 Wochen.

4.3 Durchführung der Messungen



Im folgenden Kapitel wird auf die Durchführung der Messungen eingegangen. Die Steuerung des Versuches sowie die Datenerfassung erfolgt mittels Labview. In diesem können die Regelgrößen angepasst werden.

Der Prüfaufbau sieht vor, dass der über der ZRS angeordnete Sandbehälter befüllt wird. Ist er befüllt, wird ein Prüfablauf gestartet, der so lange läuft, bis der Behälter vollständig entleert wurde.

Um eine übersichtliche Darstellung des Prüfablaufs zu erhalten wurde ein Flussdiagramm erstellt, das den Prüfablauf, bzw. den Programmablauf beschreibt. Dieser wird gestartet, sobald der Sandkasten befüllt ist und soll so lange laufen bis kein Sand mehr im Sandkasten ist.

Vor Beginn des Programmablaufs und nach dem Ende des Programms wird der in den Behälter gefüllte Sand gewogen und die Sandmasse erfasst. Dadurch kann ermittelt werden, wie viel Sand durchschnittlich bei einem Sandungsvorgang verloren geht. Dies kann einerseits Sand sein, der zwischen dem Spalt für die Falschlufversorgung zwischen ZRS und Ejektor verloren geht. Dies sollte einen geringeren Teil des verlorenen Anteils ausmachen. Andererseits kann es Sand sein, der nicht in den auf der Waage stehenden Sandbehälter kommt (durch Verwirbelungen und Ausblasen des Sandes). Der größte Anteil des verlorenen Sandes kann vermutlich dem Verlust in Form von Feinstaub zugeschrieben

Abbildung 4.3 Ablauf einer Sandkastenentleerung

werden. Höchstwahrscheinlich kann also über den Sandverlust auf die erzeugte Feinstaubmenge durch die ZRS geschlossen werden.

Die Steuerspannung gibt vor, wie schnell sich der Motor dreht. Die der jeweiligen Steuerspannung zugehörige Drehzahl wurde durch Variation der Steuerspannung ermittelt.

Der Luftdruck wird über ein Luftmengenmessgerät eingestellt. Anfangs wurde der Luftdruck so eingestellt, dass der Sand ohne Probleme ausgebracht werden kann. Im späteren Verlauf der Versuche wurde der Luftdruck, bzw. die Luftmenge so eingestellt, dass er gerade ausreicht, um die Fördermenge zu transportieren.

Das Magnetventil öffnet drei Sekunden vor Beginn der Sandung, sodass eventuell im Sandschlauch verbliebene Sandreste ausgeblasen werden und kein Rückstau entsteht. Das Nachblasen des Ejektors für die Dauer von drei Sekunden hat ebenfalls den Zweck, dass kein Sand im Sandschlauch verbleibt und dieser bei einem der nächsten Sandungsvorgänge verstopfen könnte.

Nach dem Schließen des Magnetventils ist noch eine Abkühlzeit aller Betriebsteile eingerechnet. Da ja in der Realität ebenfalls nur ein kurzer Betrieb stattfindet und alle Komponenten erst bei der nächsten Sandung benutzt werden.

Alle vom Labview- Programm erfassten Messwerte werden in Excel exportiert und erfasst. In Abbildung 4.4 ist dargestellt, wie die während einer Sandkastenentleerung mit Labview erfassten Messwerte ausgegeben werden.

C:\Users\lext-fux\Desktop\temp\test.xls		Steuerspannung	Wartezeit	Sandungszeit	Nachblaszeit	Masse eingebrachter Sand [g]	Wie vieles Mal wurde Sand gefördert?
Datum_Zeit	Sandungsanzahl	Förderdruck [bar]	Nachblasdruck [bar]				
18.06.2014 09:23	18	2,406	3	30	10	25740	1
Datum_Zeit	Ausbringungsmenge [g/30s]						Anzahl Ausfälle Motor
18.06.2014 09:23	1453	3,174518	3,167064				
18.06.2014 09:24	1531,8	3,173787	3,165258				
18.06.2014 09:25	1533,5	3,170581	3,165096			Masse ausgebrachter Sand [g]	0
18.06.2014 09:26	1557	3,172281	3,162828				
18.06.2014 09:27	1546,2	3,170062	3,161662			Eingestellter Luftmassenstrom [Nl/min]	
18.06.2014 09:28	1542,6	3,169678	3,162284			250	
18.06.2014 09:29	1548,1	3,169118	3,161905			Maximale Ausbringungsmenge	
18.06.2014 09:30	1551,7	3,169422	3,161712			1564	
18.06.2014 09:31	1544,1	3,167147	3,159863				
18.06.2014 09:32	1545,3	3,166948	3,160665			Minimale Ausbringungsmenge	
18.06.2014 09:33	1530,3	3,165103	3,159548			1524,5	
18.06.2014 09:34	1564	3,169141	3,158503				
18.06.2014 09:35	1540,9	3,166333	3,157797				
18.06.2014 09:36	1540,3	3,166369	3,158639			Mittlere Ausbringungsmenge	
18.06.2014 09:37	1524,5	3,163458	3,158328			1542,87857	
18.06.2014 09:38	1521	3,166237	3,156582				
18.06.2014 09:39	1049,8	3,164452	3,156307				
18.06.2014 09:40	44,3	3,165088	3,156206				

Abbildung 4.4 Erfassung der Messwerte eines Entleervorgangs

4.4 Verwendete Messmittel

Folgende Messmittel wurden am Prüfstand verwendet:

- Drucksensor PMP4070
- Waage Kern DS36k0.2
- Luftmengenmessgerät RectuTest RT02
- Schiebeleere
- Kamera

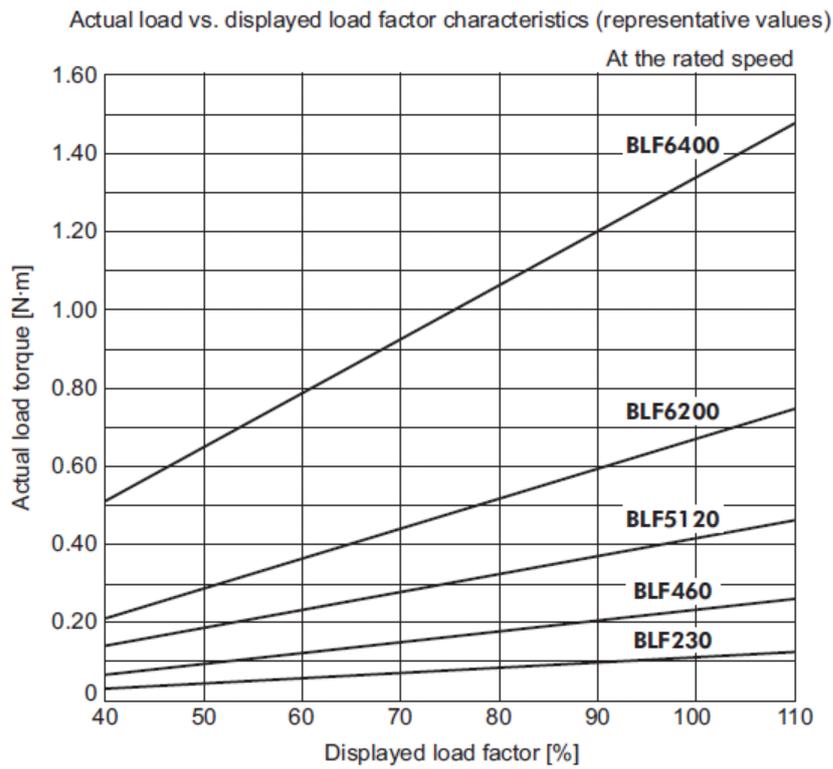
Zur Ermittlung des geförderten Massenstromes wurde eine Industrieplattform-Waage vom Typ DS36k0.2 verwendet. Sie hat eine Auflösung von 0,2 Gramm. Die Waage übermittelt die aufgenommenen Werte über eine serielle Schnittstelle an den Computer. Die digitale Anzeige der Waage hat eine Abtastrate von 5 Messungen pro Sekunde. [10]

Zur genauen Einstellung des notwendigen Förderdrucks je Drehzahl wird ein Luftmengenmessgerät RT02 in Verbindung mit einer Halbzolldüse verwendet. Bei jeder Drehzahl wird ermittelt wie groß der Förderdruck sein muss, sodass der Sandmassenstrom weggefördert werden kann.

Der Drucksensor PMP4070 wird für die Erfassung von Förder- und Nachblasdruck benötigt. Die Kamera wird für die Erfassung des Drehmoments und für die Dokumentation des Verschleißes benötigt.

Das Drehmoment wird über den Lastfaktor bestimmt. Der Lastfaktor wird über das Display des Steuergerätes des Motors erfasst. Der Lastfaktor wird während eines Sandungsvorgangs gemessen, d. h. über einen Zeitraum von 30 Sekunden. Anschließend wird mit Hilfe des Lastfaktors das Drehmoment am Getriebeausgangsschaft berechnet. Die Berechnung des Drehmoments erfolgt mit folgender Formel, die vom Hersteller angegeben wird [11]:

$$\text{Getriebeausgangs drehmoment} = \frac{\text{Nenn drehmoment} \cdot \text{Getriebe wirkungsgrad} \cdot \text{Getriebe übersetzung} \cdot \frac{\text{Lastfaktor}}{100 \%}}{100 \%} < \text{zulässiges Drehmoment}$$



* The above characteristics are representative values. Use them only as a reference when setting.

Abbildung 4.5 Motordrehmoment in Abhängigkeit des Lastfaktors [11]

Die Schiebeleere wird ebenfalls zur Erfassung des Verschleißes benötigt.

5 Auswertung der Messergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die auf Basis der Versuche erhaltenen Ergebnisse besprochen.

5.1 Auswertung der Messungen am Stahlzellrad

Mit dem Stahlzellrad wurden insgesamt 10.010 kg Sand gefördert, was der erforderlichen Mindestlebensdauer von zehn Jahren entspricht. Dabei wurden jeweils die bereits besprochenen Messungen durchgeführt. Diese werden nun ausgewertet und analysiert.

5.1.1 Sandmengenmessung

Über die Summe der aufgenommenen Messwerte können einige Aussagen über die ausgebrachte Sandmenge getroffen werden. Um eine genau definierte Sandmenge ausbringen zu können, soll eine Sandaustragskennlinie ermittelt werden.

Die Sandaustragskennlinie wird mit Hilfe einer Regressionsanalyse ermittelt (siehe Abbildung 5.1). Die Regressionsanalyse hat das Ziel eine Abhängige Variable y mit Hilfe einer oder mehrerer Variablen x_i in Form eines mathematischen Modells zu beschreiben. Dieses mathematische Modell soll dann mit Hilfe von empirischen Werten validiert werden. Die einfachste Form der Regressionsanalyse stellt die lineare Regression mit einer Variablen dar. Dabei wird eine Gerade mit minimalem Abstand zu der Summe aller Messwerte ermittelt. Im Fall der Sandaustragskennlinie handelt es sich um die einfachste Form eines Modells. Das Ziel der Regressionsanalyse ist es, einen Zusammenhang, also eine Geradengleichung zwischen der unabhängigen Eingangsgröße „Drehzahl x “ und der davon abhängigen Ausgangsgröße „Sandaustragsmenge y “ zu erhalten. [12]

Die Regressionsgerade kann über Excel bestimmt werden.

Die Regressionsgerade lässt noch kein Schluss darüber zu, wie genau das Modell die Realität beschreibt. Die Streuung um die Regressionsgerade kann so groß sein, dass das Modell nicht zutrifft. Zur Bestimmung der Genauigkeit des Modells wird das Bestimmtheitsmaß R^2 benötigt. Das Bestimmtheitsmaß gibt an, wie groß der Anteil der Variation der abhängigen Variable y ist, der von der Regression erklärt werden kann. Es kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Bei 0 herrscht kein linearer Zusammenhang, nimmt R^2 den Wert 1 an, besteht ein perfekter linearer Zusammenhang.

Das Bestimmtheitsmaß beträgt 99,9%. Es liegt ein beinahe perfekter linearer Zusammenhang zwischen der Drehzahl und der Sandaustragsmenge vor.

In Tabelle 5.1 sind der Mittelwert sowie die dreifache Standardabweichung der Sandaustragsmenge zu den zugehörigen Drehzahlen angegeben. Die dreifache Standardabweichung 3σ besagt, dass 99,7% aller Werte zu der jeweiligen Drehzahl in diesem Intervall zu finden sind. 3σ schwankt bei 1 U/min um $\pm 22,5 \frac{g}{30sek}$. Bei den Drehzahlen 2, 4 und 8 steigt 3σ auf 50 an und bei 14 U/min erreicht es eine Streuung von $125 g/30sek$. Die Streuung nimmt also mit steigender Drehzahl zu.

Die Spezifikationen des mechanischen Dosierers (siehe Seite 10) fordert eine maximale Streuung von $\pm 15 \frac{g}{30sek}$. Diese werden in keinem Drehzahlbereich erfüllt. Allerdings erfüllt die Anforderung derzeit auch keine andere auf dem Markt befindliche Sandungsanlage.

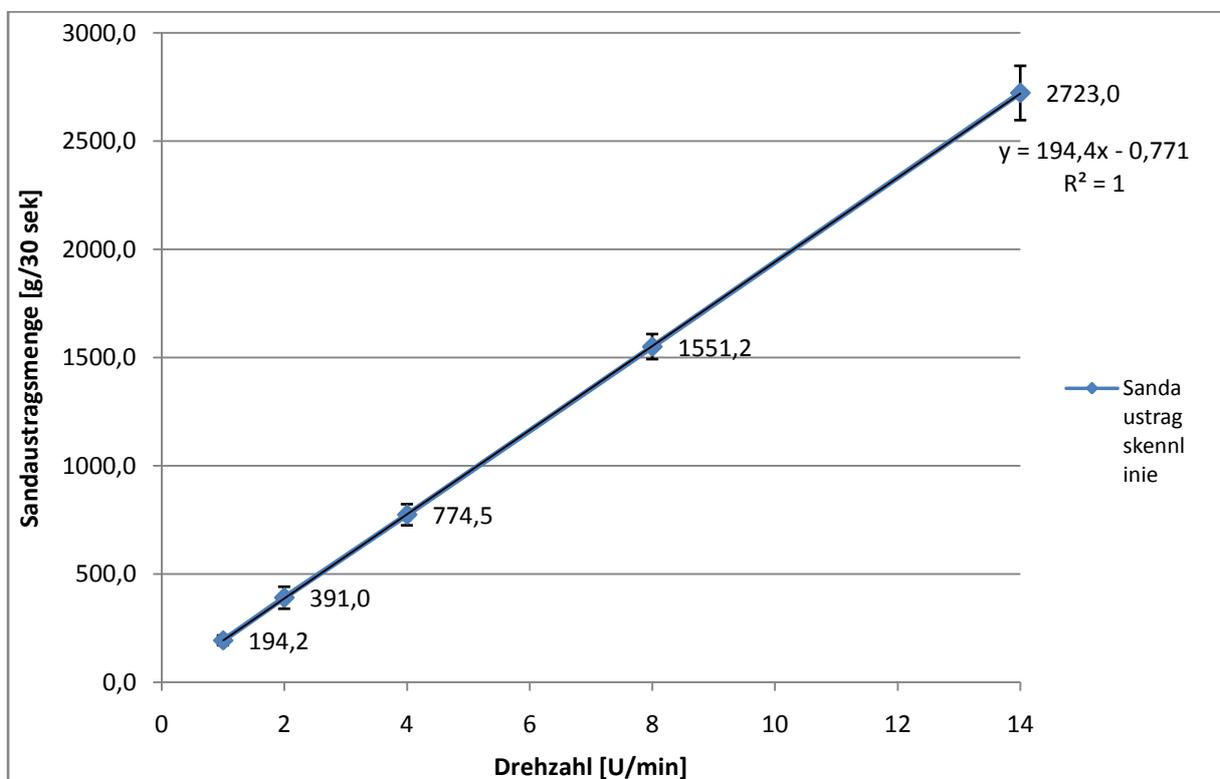


Abbildung 5.1 Sandaustragskennlinie

Tabelle 5.1 Werte der Sandaustragskennlinie

Drehzahl [U/min]	1	2	4	8	14
Mittelwert [g/30 sek]	194,2	391,0	774,5	1551,2	2723,0
Dreifache Standardabweichung [g/30 sek]	22,5	50,8	48,9	57,9	125,4

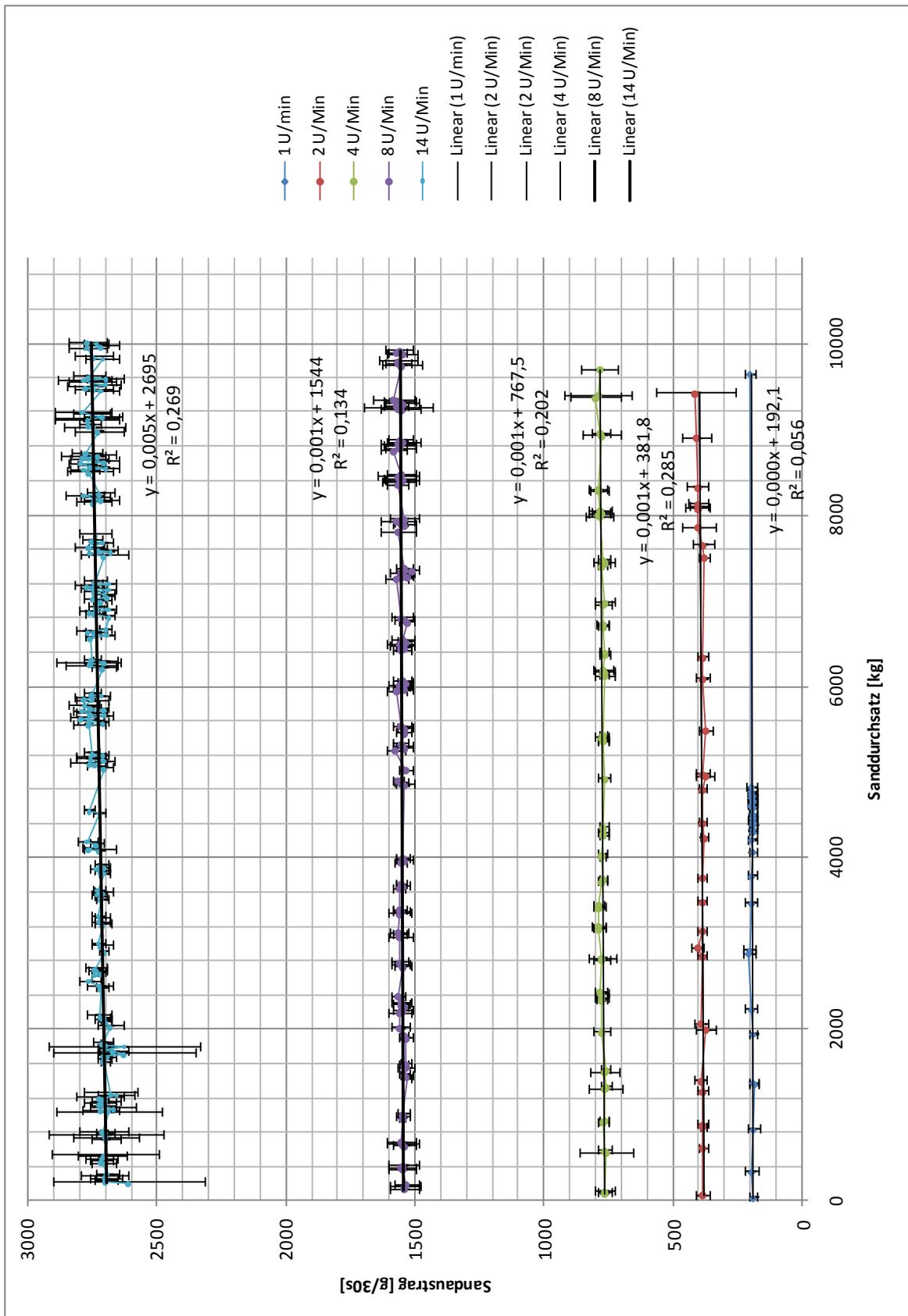


Abbildung 5.2 Reproduzierbarkeit der Sandausbringungsmenge in Abhängigkeit vom Sanddurchsatz

In Kapitel 5.1.6 wurde auf den Verschleiß der ZRS eingegangen. Nur der Verschleiß lässt allerdings noch keinen Schluss auf die Lebensdauer zu. Deswegen muss ein Schluss darüber gemacht werden, ob sich der Verschleiß in einer Form negativ auf die Leistung der ZRS auswirkt, sodass diese in ihrer Funktionsfähigkeit beeinträchtigt wird, bzw. die Funktionsanforderungen nicht mehr ausreichend erfüllt werden.

Dazu wurde die Reproduzierbarkeit der durchschnittlichen Sandausbringmenge in Abhängigkeit vom Sanddurchsatz überprüft. Andererseits muss überprüft werden, wie sich die Streuung in Abhängigkeit vom Sanddurchsatz verändert.

Dazu wird je Sandkastenentleerung der Mittelwert und die zugehörige dreifache Standardabweichung gebildet. Anschließend werden die Mittelwerte nach Sanddurchsatz angeordnet und nach Drehzahl geclustert. So kann je nach Drehzahl überprüft werden, ob sich ein gewisser Trend in durchschnittlicher Sandfördermenge oder Streuung ausbildet (siehe Abbildung 5.2).

Vor Durchführung der Versuche bestand der Verdacht, dass ab einem gewissen Verschleiß von Zellrad und Gehäuse aufgrund der erhöhten Spaltmaße, bzw. daraus resultierender Leckverluste die Sandfördermenge abnimmt. Eine weitere Überlegung war, dass die Streuung aufgrund des Verschleißes größer wird.

Wäre das der Fall, müsste sich beim Erstellen einer Regressionsgeraden nach der Drehzahl ein Trend dahin ergeben, dass die Steigung einen negativen Wert einnimmt. Allerdings ist ersichtlich, dass über alle Drehzahlen die Steigung der Regressionsgeraden im Bereich zwischen 0,000 und 0,005 ist (siehe Steigung der Geradengleichungen in Abbildung 5.2). Dadurch zeigt, dass kein Trend in der Sandausbringmenge über den Sanddurchsatz feststellbar ist, also dass der Verschleiß keine Auswirkung auf die erforderliche Sandausbringmenge der ZRS hat.

Um einen Trend in der Streuung festzustellen, wurde diese ebenfalls in Abhängigkeit vom Sanddurchsatz in einem separaten Diagramm ausgegeben (siehe Abbildung 5.3 bis Abbildung 5.7). Anschließend wurde der Verlauf der Streuung mit Hilfe des gleitenden Mittelwerts (engl. Moving Average) analysiert. Dieser ist ein häufig verwendetes Mittel in der Zeitreihenanalyse. Wenn eine Zeitreihe betrachtet wird können zufällige Störungen, oft auch Rauschen, nicht erklärt werden. Der gleitende Mittelwert kann Ausreißer und Rauschen beseitigen und gleichzeitig dazu verwendet werden, um Trends zu entdecken.

Der gleitende Mittelwert wird mit Folgender Formel berechnet [13]:

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} x(t - jT)$$

Er ist zeitabhängig bzw. im Fall der Versuchsreihe durchsatzabhängig und wird über den Zeitraum der letzten m Messungen ermittelt. Zum Zeitpunkt t wird also der Wert x(t-mT) weggelassen und der Wert x(t) wird einbezogen. Weil der gleitende Mittelwert rückwirkend berechnet wird, ist er einem Tempoeffekt unterworfen. Je größer die Anzahl m der einbezogenen Messungen, desto stärker werden die Messungen geglättet. Diese fortlaufende Mittelwertreihe kann daher deutlicher einen Trend anzeigen, der im geglätteten Fall nicht sichtbar wäre. [13]

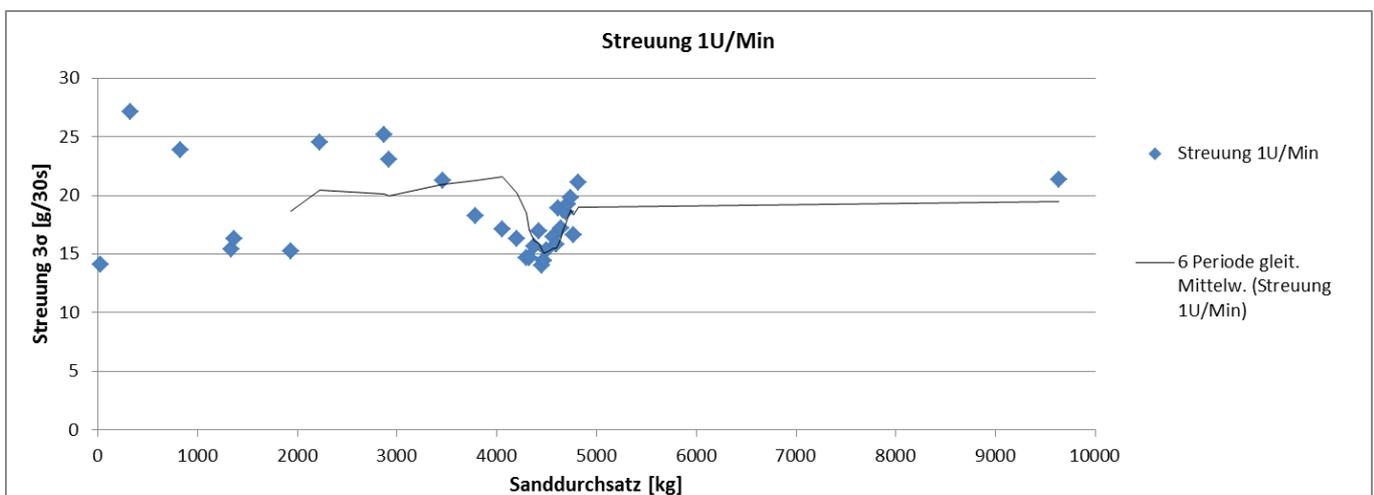


Abbildung 5.3 Streuung der ausgebrachten Sandmenge 3σ in Abh. Des Sanddurchsatzes bei 1U/Min

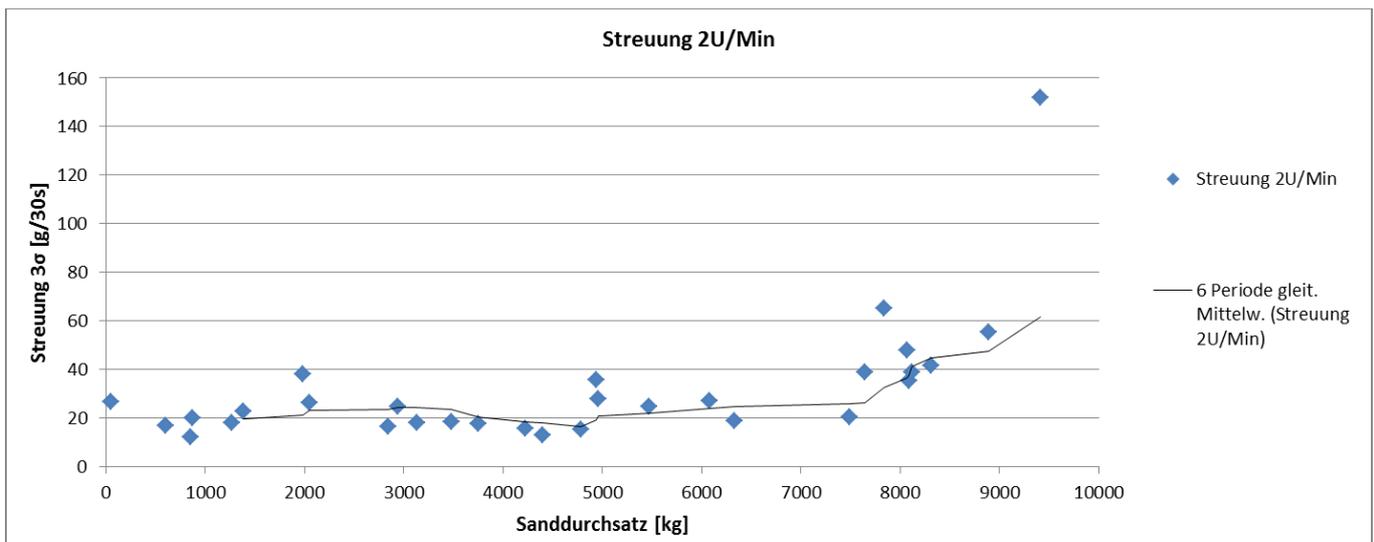


Abbildung 5.4 Streuung der ausgebrachten Sandmenge 3σ in Abh. Des Sanddurchsatzes bei 2U/Min

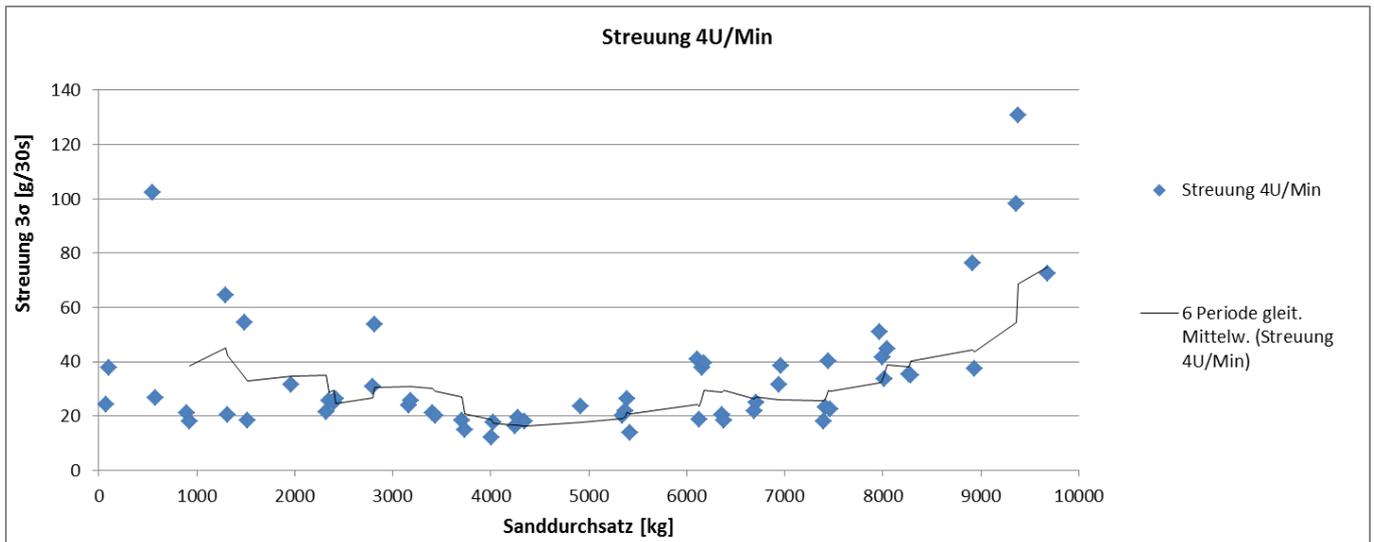


Abbildung 5.5 Streuung der ausgebrachten Sandmenge 3σ in Abh. Des Sanddurchsatzes bei 4U/Min

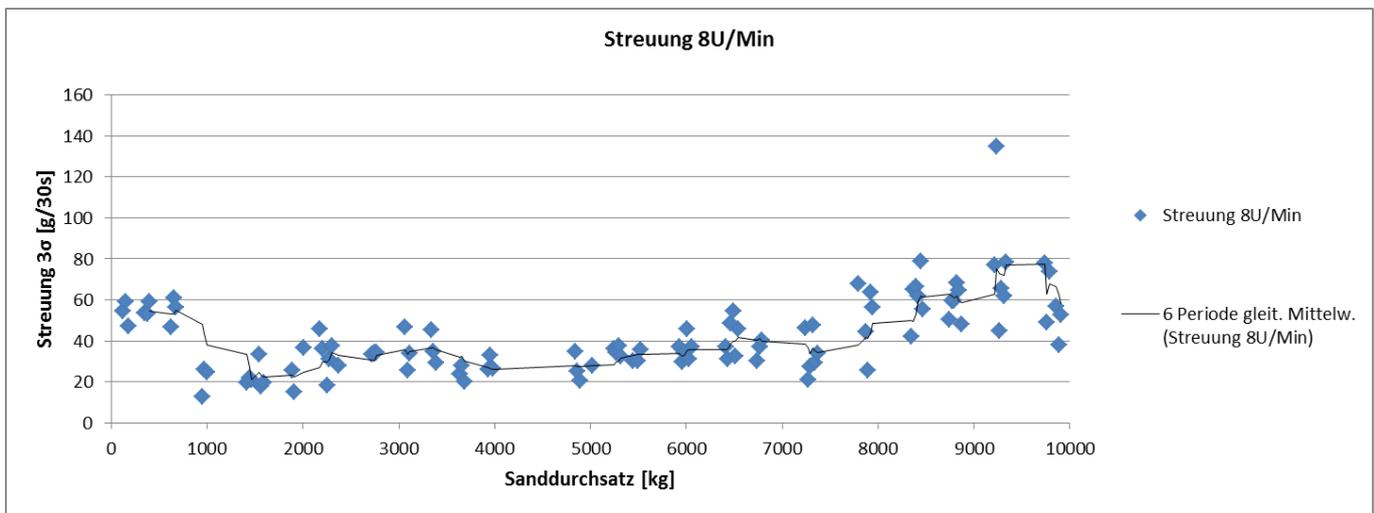


Abbildung 5.6 Streuung der ausgebrachten Sandmenge 3σ in Abh. Des Sanddurchsatzes bei 8U/Min

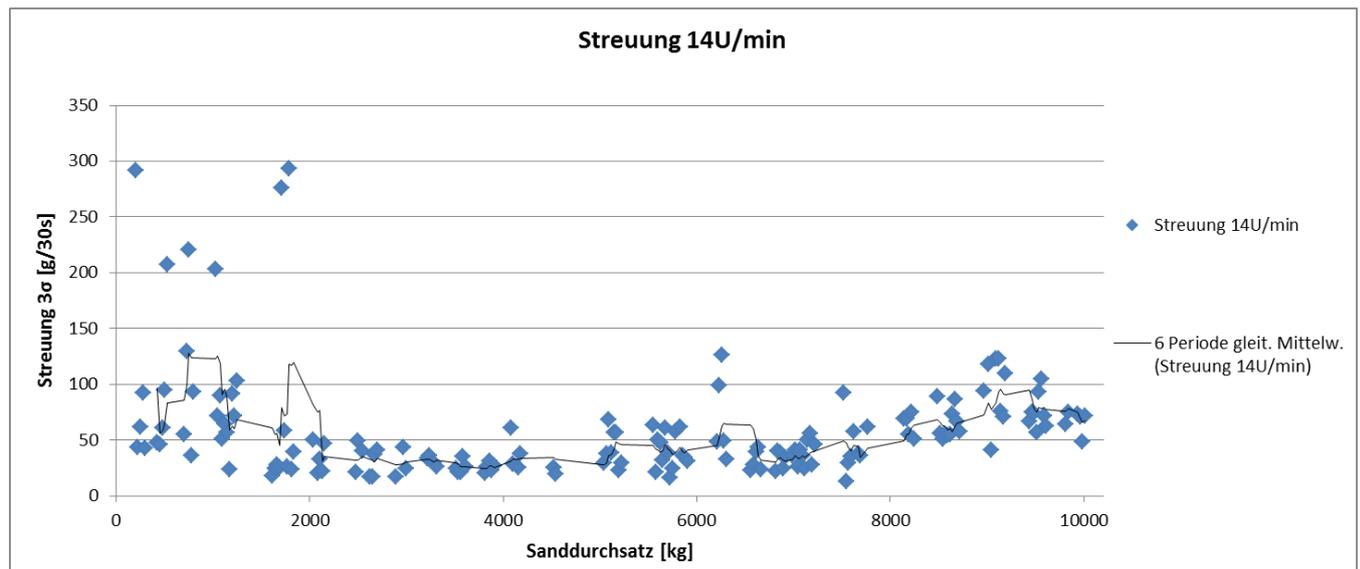


Abbildung 5.7 Streuung der ausgebrachten Sandmenge 3σ in Abh. Des Sanddurchsatzes bei 14U/Min

Der MA-Filter wird in den Streuungsverläufen angewendet, vor allem weil es zu teilweise großen Ausreißern kommt. Die Streuung bei 1 U/Min scheint keinem Trend zu folgen und hat auch keine größeren Ausreißer. Hier liegt die Streuung 3σ nach MA-Filterung immer zwischen 15 und 25 g/30 s. Die Streuungen der Drehzahlen 2 bis 14 sind deutlich höher. Außerdem sind sie nicht über den gesamten Zeitraum konstant, sondern haben leichte Schwankungen. Während der ersten 2000 kg ist die Streuung vor allem bei den Drehzahlen 8 und 14 höher. Die erhöhte Streuung im ersten Abschnitt der Lebensdauer scheint unerwartet. Aufgrund des geringen Verschleißes und der genauen Ausführung der Passung wird ein sehr genauer Sandaustag erwartet, da das Fördervolumen vollständig ausgenutzt wird und es zu keinem Materialverbleib in der ZRS kommt. Eine Vermutung über die erhöhte Streuung ergibt sich bei der Betrachtung des Drehmoments. Dieses ist vor allem während des Anfangsbetriebes ausgesprochen hoch. Häufig kommt es zum blockieren des Motors und sogar Motorausfällen. Außerdem werden im Anfangsbetrieb stark schwankende Drehmomente festgestellt. Die starken Streuungen in der Sandausbringmenge ergeben sich daher, dass keine konstante Rotationsgeschwindigkeit zustande kommt.

Zwischen 4000 und 7000 kg Sanddurchsatz ist die Streuung in allen Drehzahlbereichen bei einem Minimum und liegt bei allen Drehzahlen über weite Bereiche zwischen 20 und 40 g/30s.

Ab ca. 8000 kg kann wieder ein leicht steigender Trend der Streuung festgestellt werden. Dies könnte auf den steigenden Verschleiß und damit die größere Spaltbildung und ungenauere Dosiergenauigkeit zurückgeführt werden.

Außerdem wurde die Reproduzierbarkeit in Abhängigkeit vom Füllstand überprüft (siehe Abbildung 5.9 & Abbildung 5.8), d.h. es wurde überprüft ob der Füllstand des Sandbehälters in irgendeiner Form eine Auswirkung auf die mittlere ausgebrachte Sandmenge hat. Statistisch wird dies ausgewertet indem wiederum die einzelnen Messwerte des Sandaustrags je Drehzahl dargestellt werden. Anschließend wird der Mittelwert für den Sandungsvorgang gebildet, der gerade stattfindet. Zum Beispiel werden bei 14 U/Min immer 10 Sandungsvorgänge durchgeführt. Bei einer durchschnittlichen Sandfördermenge von 2723 g/30 s entspricht dass 27,23 kg. Beim ersten Sandungsvorgang wird weniger Sand gefördert, weil die Zellen noch nicht befüllt sind. Beim letzten Sandungsvorgang wird ebenfalls nur noch sehr wenig Sand gefördert, weil der Sandkasten fast vollständig entleert ist. Insgesamt wurden bei 14 U/Min 174 Sandkastenentleerungen durchgeführt. Also wird der Mittelwert sowie dreifache Standardabweichung von den 1. Sandungsvorgängen bis zu den 10. Sandungsvorgängen aus allen 174 Entleerungen gebildet.

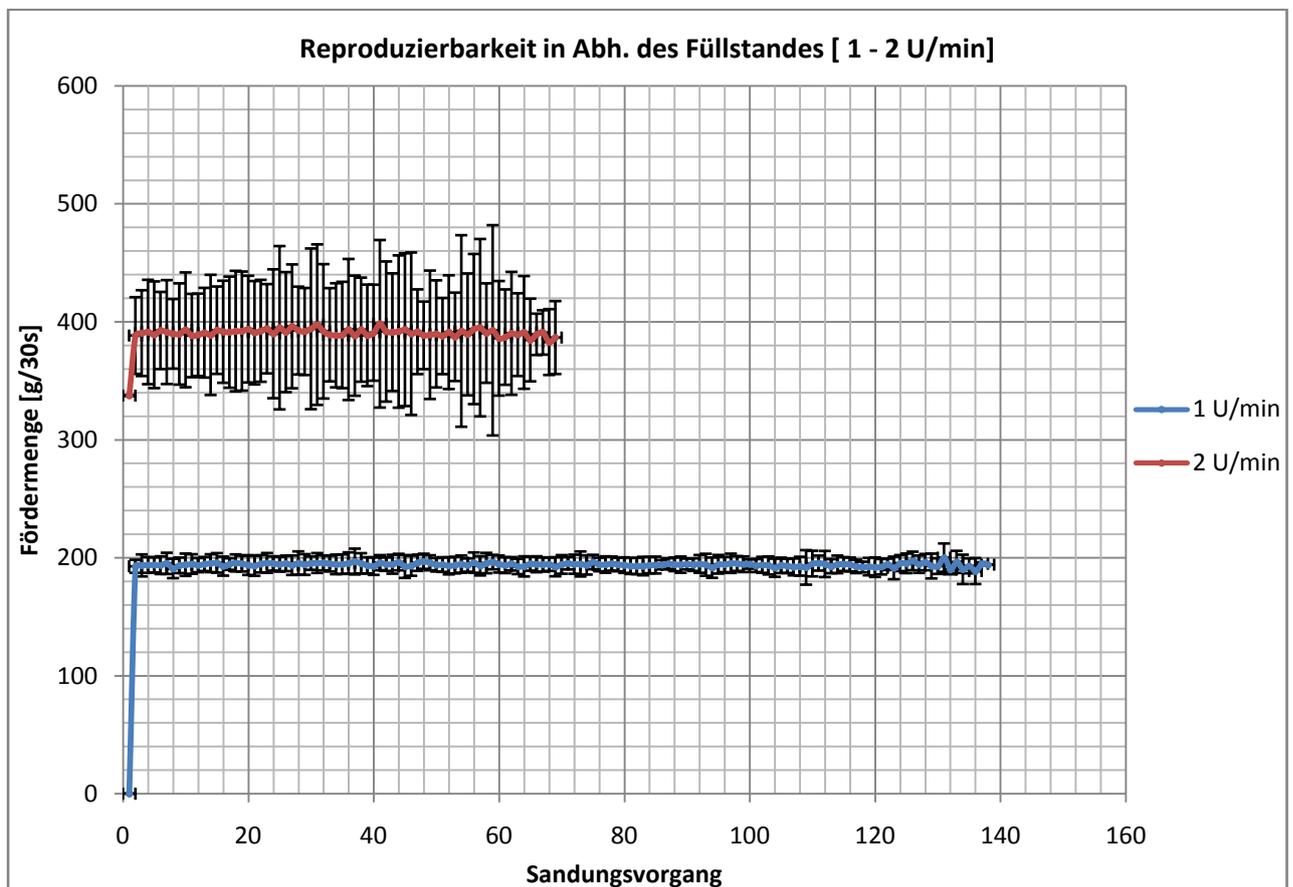


Abbildung 5.8 Reproduzierbarkeit der Sandausbringung in Abhängigkeit des Füllstandes [1 – 2 U/Min]

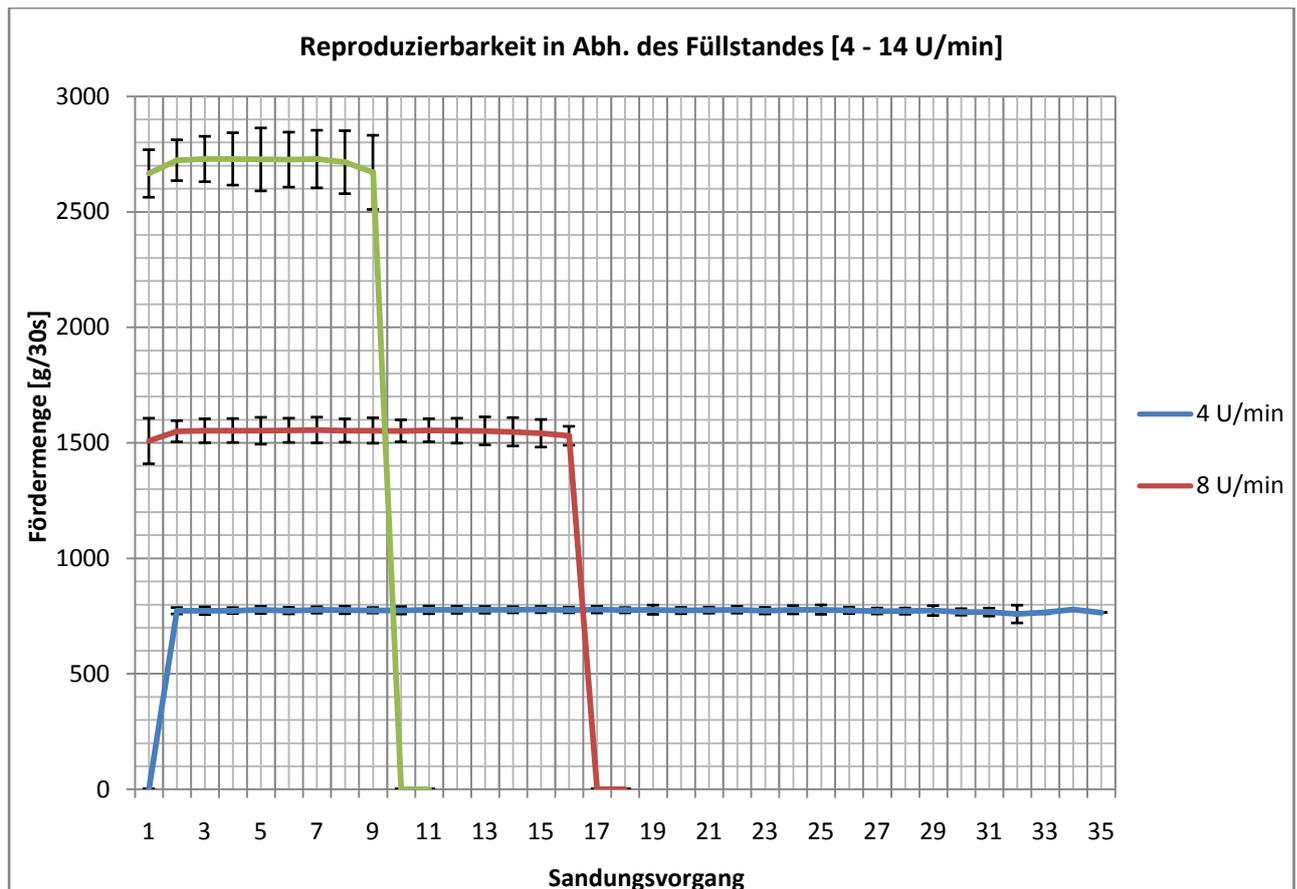


Abbildung 5.9 Reproduzierbarkeit der Sandausbringungsmenge in Abhängigkeit des Füllstandes [1 – 2 U/Min]

Der Verlauf der Kurve sollte im Optimalfall waagrecht verlaufen, da kein Einfluss des Sandkastenfüllstandes auf die ausgebrachte Sandmenge erwünscht ist. Ist das der Fall, heißt das der Füllstand hat keinen Effekt auf die Sandaustragsmenge. Der erste Sandungsvorgang hat immer einen geringeren Sandaustrag als die weiteren Sandungsvorgänge. Dadurch kommt es zu einer gewissen Totzeit. Für den Betrieb im Zug würde das bedeuten, dass vor dem ersten Betrieb einmal kurz gesendet werden muss, sodass die Zellen direkt vor dem Auslass bereits gefüllt sind. So würde es beim Bremsen nicht zu unerwünschten Totzeiten kommen.

Am Ende des Diagramms flacht die Kurve wieder ab. Zu diesem Zeitpunkt ist der Sandkasten entleert. Die Zellen werden nicht mehr vollständig befüllt, und die Sandausbringungsmenge flacht ab. Der Sandkasten darf also ein gewisses Füllstandminimum nicht erreichen.

Die Mittelwerte zwischen den ersten und letzten Sandungsvorgängen sowie deren Streuung weisen keine signifikanten Trends auf. Das heißt der Sandkastenfüllstand wirkt sich nicht auf die mittlere Sandausbringungsmenge aus.

In den bisherigen Betrachtungen wurde nur die ausgebrachte Sandmenge pro 30 Sekunden analysiert, also wie viel Sand während eines Sandungsvorgangs von 30 Sekunden gefördert wird. Allerdings ist es vor allem wichtig, den momentanen Massenstrom $\dot{m}(t)$ zu betrachten, vor allem weil die ZRS nicht zu den Stetigförderern zählt. Optisch lässt sich jedenfalls beobachten, dass der Sand nicht stetig ausgebracht wird, sondern pulsierend. In den Spezifikationen ist zwar nicht eindeutig festgelegt, dass der Sand nicht pulsierend ausgebracht werden darf, allerdings ist eine pulsierende Förderung kein erwünschter Effekt. Um den Sandmassenstrom $\dot{m}(t)$ aufzunehmen, wird während eines Sandungsvorgangs jede Millisekunde der Messwert der Waage erfasst. Mit dieser Abtastrate kann mit sehr guter Auflösung der momentane Messwert der Waage erfasst werden.

Betrachtet man den Massenstrom bei 1 U/Min (siehe A. 11), ist die Pulsation sehr stark ausgeprägt. In einem Zeitraum von ca. einer halben Sekunde kommt es zur Entleerung der Zelle die sich gerade am Auslass befindet. Anschließend wird 4,5 Sekunden kein Sand gefördert. Genau so lange dauert es bis sich der nächste Zellradsteg beim Auslass befindet. Also beträgt die Pulsationsfrequenz 5 Sekunden. Das ist ein Wert der für den Betrieb nicht akzeptabel ist. Die Pulsationsrate lässt sich auch anhand der Zellenzahl und der Drehzahl ermitteln. Das Zellrad hat 12 Zellen, bei einer Drehzahl von 1 U/Min wird es innerhalb von 30 Sekunden zu 6 Pulsen kommen. Die Pulsation kann anhand der Messungen des Massenstroms $\dot{m}(t)$ gezeigt werden.

Mit größerer Drehzahl wird die die Pulsationsfrequenz immer größer. Bei einer Drehzahl von 14 U/Min ist die Pulsationsrate im Verlauf von $\dot{m}(t)$ bereits kaum sichtbar. Allerdings kann man sie noch eindeutig sehen wenn man den Massenstrom $\dot{m}(t)$ betrachtet. Hier ist deutlich die Schwankung im Massenstrom sichtbar, allerdings in einem Ausmaß, welches für den Betrieb nicht mehr störend ist.

5.1.2 Ansprechverhalten der Sandungsanlage

Anhand des Massenstromes $\dot{m}(t)$ wurde auch das Ansprechverhalten der Sandungsanlage analysiert. Das Ansprechverhalten ist ebenfalls entscheidend für den Bremsweg. Der Sand sollte möglichst schnell zwischen Schiene und Rad transportiert werden. Um darüber eine Aussage zu machen, wie schnell das passiert, wird das Ansprechverhalten analysiert.

Ausgewertet wird der Zeitraum, ab dem der Motor angesteuert wird, bis zudem Zeitpunkt, ab dem Sand auf die Waage gelangt. Das Ansprechverhalten wird nur ermittelt, wenn bereits ein Teil der Zellen gefüllt ist, wie es üblicherweise im Betrieb der Fall ist. Beim ersten Sandungsvorgang sind die Zellen vor dem Auslass noch nicht gefüllt. Während des Bahnbetriebes sollte dieser Fall allerdings niemals auftreten. Zur Auswertung wurden die

Messungen herangezogen, bei denen der Sandmassenstrom jede Millisekunde aufgenommen wird. Anschließend wurde überprüft, ab welchem Zeitpunkt die Steuerspannung am Motor angelegt wird. Der Zeitpunkt, ab dem der erste Sand die Waage erreicht wurde ebenfalls ermittelt. Die Zeitdifferenz ergibt die Ansprechdauer. Dabei konnten für die jeweiligen Drehzahlen Ansprechverhalten laut Tabelle 5.2 ermittelt werden.

Tabelle 5.2 Ansprechverhalten der Stahl- ZRS

Anprechverhalten					
Drehzahl [U/Min]	1	2	4	8	14
Ansprechdauer [s]	3,402	2,602	2,001	1,801	1,601

Das zeigt, dass die derzeitige Ansprechdauer noch sehr langsam ist. Vor allem bei einer Drehzahl mit 1 U/Min ist die Ansprechdauer von 3,4 Sekunden sehr lang. Bedenkt man, dass Bremsvorgänge bei Straßenbahnen häufig nur ca. die 8 Sekunden dauern und gerade bei Straßenbahnen geringe Sandausbringmengen benötigt werden, ist dies eine zu lange Zeit für das Ansprechverhalten.

5.1.3 Feinstaub

Sand hat sich als nützliches Medium zur Erhöhung des Reibwertes zwischen Schiene und Rad erwiesen, führt allerdings zu dem unerwünschten Effekt der Feinstaubbelastung. Im Sand ist immer eine gewisse Menge an Feinstaub vorhanden, die gesundheitsgefährdend sein kann. Vor allem für den innerstädtischen Bereich, wo viele Straßenbahnen unterwegs sind und Feinstaub emittieren, kann dies problematisch sein.

Bei der Zellradschleuse wird der Sand zumindest teilweise zerrieben. Um den Einfluss der Zellradschleuse auf den Sand zu überprüfen, wurden zwei Auswertungen gemacht. Einerseits wurde immer die Gewichts Differenz des eingefüllten Sandes vor und nach der Sandkastenentleerung gemessen. Die Gewichts Differenz gibt Auskunft darüber, wie viel Feinstaub an die Umgebung abgegeben wurde.

Um zu analysieren, wie hoch die Feinstaubbelastung durch die ZRS ist, wurde der durchschnittliche Sandverlust während einer Sandkastenentleerung berechnet. Dieser betrug im Durchschnitt 248,34 g. Die mittlere Füllmenge des Sandkastens beträgt 24.900 Gramm, was bedeutet dass ca. 1% des geförderten Sandes in Form von Feinstaub an die Umgebung abgegeben wird. Nicht berücksichtigt ist dabei das weitere Zermahlen zwischen Schiene und Rad, welches ebenfalls einen wesentlichen Anteil der Feinstaubbelastung durch den Sandungsvorgang ausmacht.

Andererseits wurden Sandfraktionierungen gemacht. Dabei kann die Korngrößenverteilung des Sandes vor dem Fördern und nach dem Fördern überprüft werden. Diese Auswertung ist

hat das Ziel, zu überprüfen ob die Korngrößenverteilung des Sandes nach der Förderung weiterhin der vorgeschriebenen Sandkornverteilung (siehe Abbildung 2.4) entspricht. Dabei wird die Korngrößenverteilung des Sandes überprüft. Dies erfolgt folgendermaßen: Über einem in vertikaler Achse schwingenden Rüttler sind 12 Siebe mit verschiedenen Grobheiten angeordnet, wobei die Siebe nach unten hin immer feiner werden. Im obersten Sieb bleiben nur die größten Sandkörner mit Durchmessern größer als 2 mm liegen, während im untersten Behälter nur noch der Feinstaub mit einem Korndurchmesser von weniger als $2\mu\text{m}$ zu liegen kommt.

5.1.4 Selbstentleerung

Eine wichtige Anforderung an die Sandungsanlage ist, dass sie sich während einer Bahnfahrt nicht selbst entleert. Während des Bahnbetriebes kommt es zu Schwingungen durch den Zug. Deswegen muss überprüft werden, ob es bei der ZRS trotz erhöhtem Verschleiß (also nach zehn Jahren Betrieb) zur Selbstentleerung der gefüllten Zellen kommt. Die Selbstentleerung der Zellen hätte einen negativen Einfluss auf das zeitliche Ansprechverhalten des Zellrades.

Der Versuch wurde durchgeführt, als die Lebensdauerversuche bereits durchgeführt wurden, also als der Verschleiß der ZRS bereits sehr stark war.

Um die Selbstentleerung zu prüfen wurde die Zellradschleuse mit Sand gefüllt, auf einem Rüttler befestigt und vertikalen Schwingungen ausgesetzt. Dazu wurde die ZRS ohne Motor auf den Rüttler befestigt und die Zellen mit Sand gefüllt. Es wurden folgende sechs verschiedenen Erregungen in vertikaler Richtung simuliert:

1. Funktionales Rauschen (entspricht Erregung im üblichem Bahnbetrieb) nach IEC61373:2010 – Kat. 1b Dauer: 2 min
2. Überhöhtes Rauschen nach IEC61373:2010 – Kat. 1b Dauer: 2 min
3. Schock nach IEC61373:2010 – Kat. 1b Dauer: 6 Schocks
4. Funktionales Rauschen nach IEC61373:2010 – Kat. 2 Dauer: 2 min
5. Schock nach IEC61373:2010 – Kat. 2 Dauer: Stopp während der Vorschocks bei 150m/s^2 , wegen Sandaustritt
6. überhöhtes Rauschen mit $2,5\text{m/s}^2$ eff. Beschl. Dauer: 2 min

Nach jedem Erregungsvorgang wurde überprüft, ob der unter dem Zellrad angeordnete Behälter Sand enthält. Falls Sand vorgefunden wurde, wurde er gewogen.

Es hat sich gezeigt, dass auch mit erhöhtem Verschleiß, bei normalem Bahnbetrieb kein Sandaustritt aus der ZRS stattfindet (siehe Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3 Ergebnisse der Schwingprüfung der ZRS

Prüfbedingungen	effektive Beschleunigung	Sandaustritt
Funktionales Rauschen nach IEC61373:2010 – Kat. 1b	1,16 m/s ²	kein
Überhöhtes Rauschen	2,50 m/s ²	kein
Überhöhtes Rauschen nach IEC61373:2010 – Kat. 1b	5,67 m/s ²	7,5 g/2min
Schock nach IEC61373:2010 – Kat. 1b	30 m/s ² ; 30ms	kein
Funktionales Rauschen nach IEC61373:2010 – Kat. 2	5,38 m/s ²	25 g/2min
Schock (soll lt. IEC 61373:2010-Kat.2 ist 300 m/s ² ; 18ms)	150 m/s ² ; 18ms	vorhanden

Bei Erhöhung der Beschleunigung (4. funktionales Rauschen) ist über einen Zeitraum von zwei Minuten 25 g Sand ausgetreten.

Außerdem wurde festgestellt, dass sich das Zellrad nach den Versuchen am Schwingtisch über die Welle und unter Zuhilfenahme einer Rohrzange nicht mehr drehen ließ, was vor den Prüfungen ohne weiteres möglich war.

Die Ursache dafür könnte die Verdichtung des Sandes in den gefüllten Zellen sein.

5.1.5 Drehmoment

Im folgenden Kapitel wird auf den Verlauf des gemessenen Drehmoments eingegangen. Die Erfassung des Drehmoments ist von wesentlicher Bedeutung für die spätere Motorauswahl, bzw. um Spezifikationen für den Motor zu erstellen. Die Motorauswahl erfolgt wesentlich anhand der Motorleistung. Über das gemessene Drehmoment und die aktuelle Drehzahl kann ein Rückschluss auf die erforderliche Motorleistung gemacht werden. Weil Sand ein schwierig einzuschätzendes Fördermedium ist, ist die mathematische Auslegung des Motors besonders schwer. Die Erfassung des Drehmoments ermöglicht es den Leistungsbereich zu prognostizieren, in dem der Motor arbeiten muss.

Pro Sandungsvorgang (also über 30 Sekunden) werden ca. 120 bis 150 Messwerte des Lastfaktors erfasst. Den aufgenommenen Messwerten wird zugeordnet, mit welcher Drehzahl sie gemessen wurden, bei welchem Sandungsvorgang sie aufgenommen wurden (Füllstand des Sandkastens) und der wievielte Sandkastenentleervorgang derzeit stattfindet (Sanddurchsatz). Aufgrund des hohen Aufwandes der Datenerfassung wird das Drehmoment pro Sandkastenentleerung nur ein Mal erfasst.

Um einen Überblick über die Verteilung des Motordrehmoments zu erhalten, wird ein Boxplot erstellt. Dazu werden die Lastfaktoren nach Drehzahl geclustert und daraus das Motordrehmoment errechnet. Der Boxplot gibt in Quantilen die Verteilung aller erfassten

Messwerte an (siehe Abbildung 5.10). Dabei zeigt die Box in welchem Bereich 50 % aller erfassten Messwerte sind. Die waagrechte Linie in der Box zeigt an wo der Median liegt. Die Linien die unten und oben aus der Box kommen werden Whisker genannt und geben das untere und obere 25%- Quantil an, wobei am obersten Punkt das Maximal erfasste Drehmoment und am untersten Punkt das minimal gemessene Drehmoment dargestellt ist. Diese Form der Darstellung zeigt recht gut die Verteilung der Messwerte.

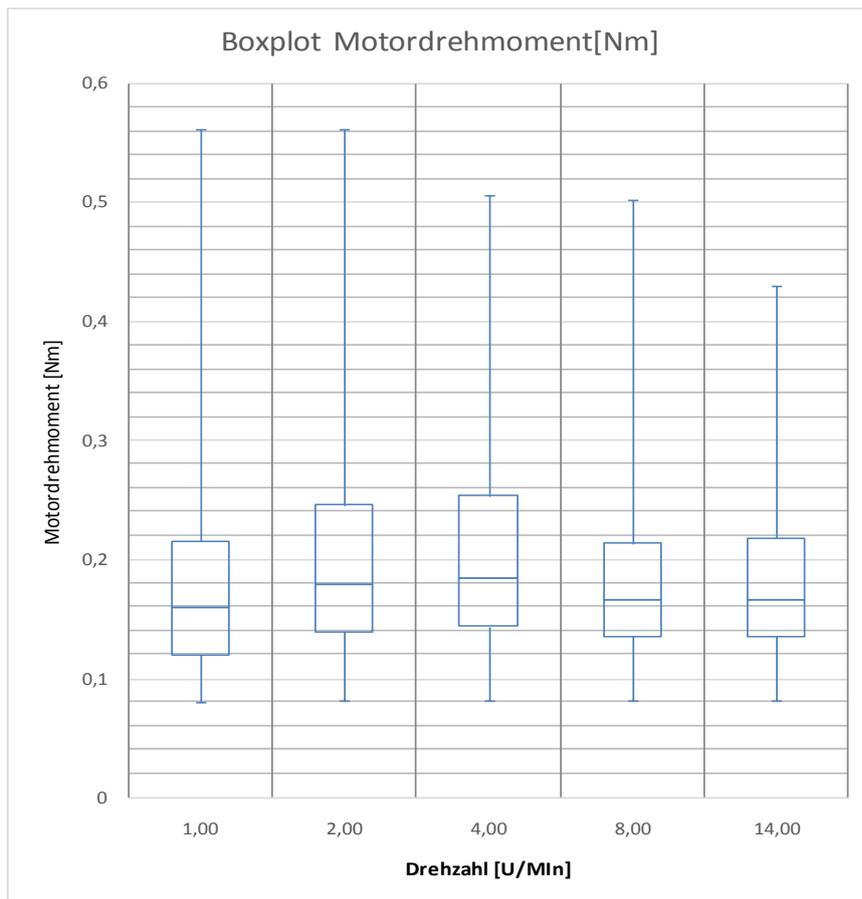


Abbildung 5.10 Boxplot Motordrehmoment

Andererseits wird die Reproduzierbarkeit des Drehmoments in Abhängigkeit des Sanddurchsatzes überprüft. Wesentlich ist hierbei, ob der Verschleiß eine Auswirkung auf das notwendige Drehmoment hat oder nicht. Dazu wird je Messreihe eines Entleervorgangs der Mittelwert, das Maximum und das Minimum bestimmt. Anschließend werden die drei Werte nach Sanddurchsatz geordnet. In Abbildung 5.11 ist das Drehmoment in Abhängigkeit vom Sanddurchsatz dargestellt. Um die starken Streuungen zu glätten, wird ein MA-Filter eingesetzt. Die Anzahl der miteinbezogenen Werte zu Bildung des MA (moving Average) beträgt $m=10$. Vor allem bei Betrachtung der Spitzen zeichnet sich ein deutliches Bild ab. Bei ca. 5000 kg ist eine ausgeprägte Stufe, bei der der MA von ca. 40 Nm auf 25 Nm sinkt. Anschließend sinkt er weiter mit einem leichten Gefälle bis auf 20 Nm bei 10.000kg.

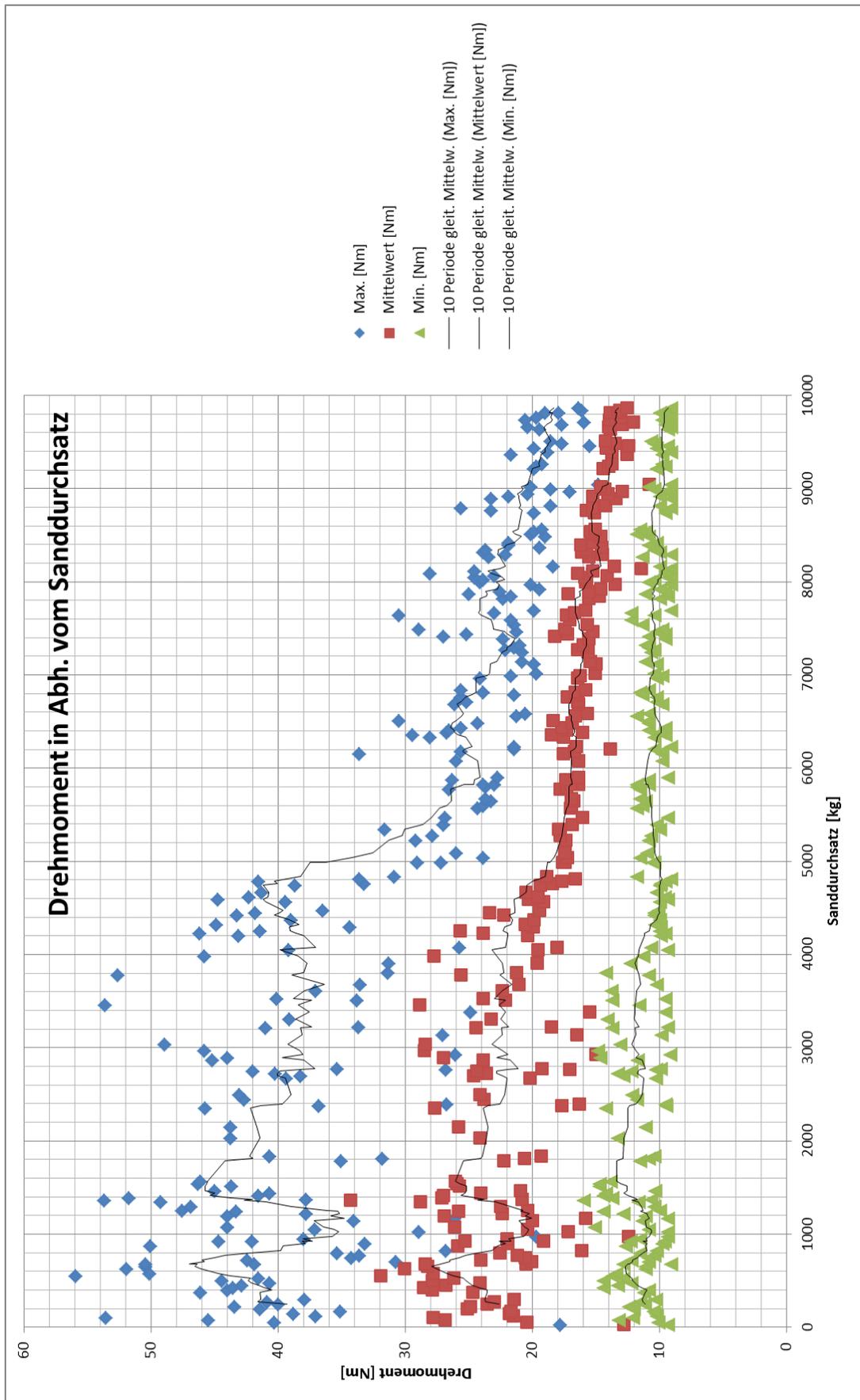


Abbildung 5.11 Drehmoment in Abhängigkeit des Sanddurchsatzes

Die ersten 5.000 kg hat das maximale Drehmoment Ausreißer, die bis zu 55 Nm erreichen. Das entspricht bereits dem 2,5 fachen Nenndrehmoment. Dazu muss erwähnt werden, dass der maximal angezeigte Lastfaktor auf dem Display 255% ist. Das entspricht dem 2,5 fachen Nenndrehmoment. Als Sicherungseinrichtung schaltet sich der Motor automatisch ab, wenn er länger als eine Sekunde mit einer Last betrieben wird, die mehr entspricht als dem Lastfaktor von 255%. Dieser Fall ist vor allem während der ersten 3.000 kg Betrieb vermehrt aufgetreten. Es wird vermutet, dass die Motorausfälle und das Absinken des Drehmoments vor allem mit dem Verschleiß von Zellrad und Gehäuse zusammenhängen. Dies ist die einzige Störgröße die nicht konstant ist. Die Motorausfälle treten vor allem in den niedrigen Drehzahlbereichen (1, 2 und 4 U/Min) auf. Warum das der Fall, ist wird folgendermaßen erklärt: Bei den Drehzahlen 8 und 14 hat das Zellrad hohe kinetische Energie und damit Kraft, den Sand zu zerreiben. Bei den niedrigen Drehzahlen schafft dies der Motor nicht, dadurch kommt es zum Verklemmen einzelner Sandkörner zwischen Zellrad und Gehäuse und damit zum Drehmomentanstieg des Motors. Diese Beobachtung wird dadurch bestätigt, dass vor Ausfall des Motors die Drehzahl auf 0 abfällt.

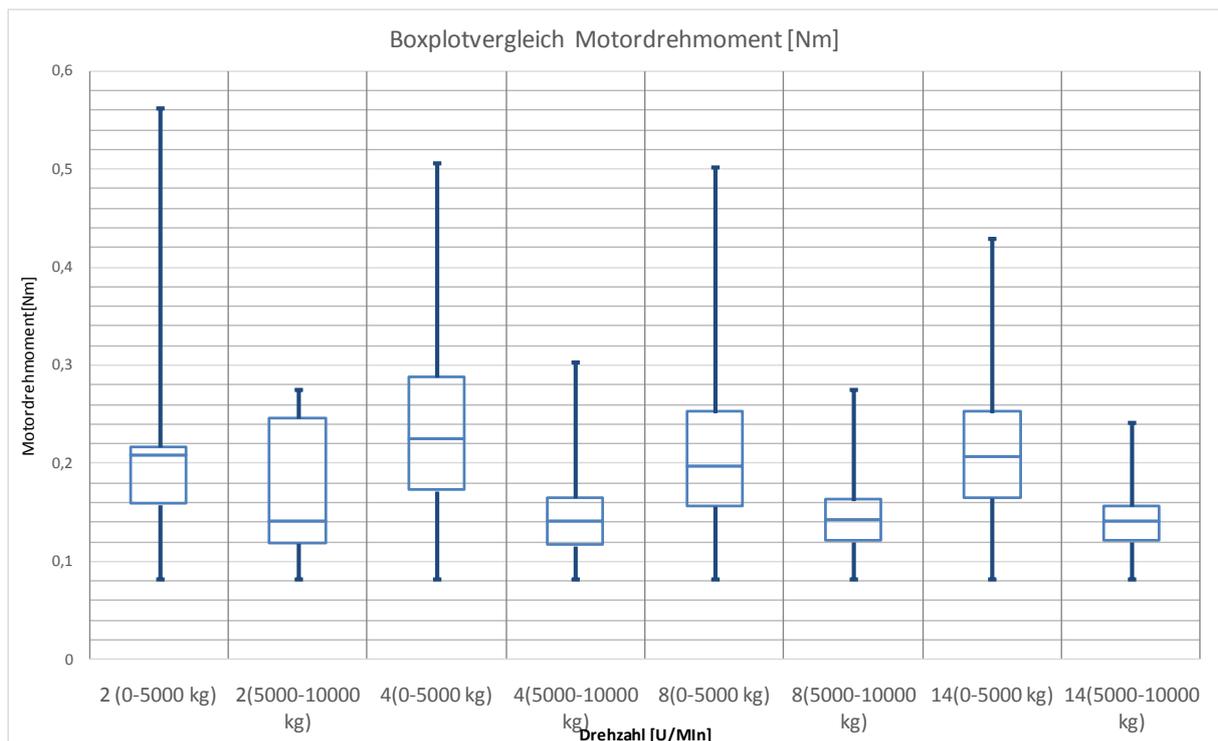


Abbildung 5.12 Boxplotvergleich Motordrehmoment

Um die Veränderung des Drehmoments nicht nur über den Mittelwert, sondern über die gesamte Verteilung zu betrachten, wird wieder ein Boxplot der einzelnen Drehzahlen erstellt. Diesmal wird es aufgeteilt in gemessene Lastfaktoren von 0 bis 5.000 kg und gemessene Lastfaktoren zwischen 5.000 und 10.000 kg (siehe Abbildung 5.12). Man kann sehen, dass

sich das 50 %-Quantil deutlich nach unten verlagert hat. Ebenso hat sich der Median bei allen Drehzahlen von ca. 0,2 Nm hin zu 0,14 Nm verlagert.

5.1.6 Verschleißmessungen

Um eine Aussage über die Lebensdauer zu machen, muss eine Dokumentation des Verschleißes gemacht werden. Dazu wird nach jeweils 1000 kg geförderten Sand die ZRS zerlegt und eine Dokumentation des Verschleißes vorgenommen.

Die Dokumentation wird an Hand von Fotografien erstellt. Diese können optisch miteinander verglichen werden. Dies gibt allerdings nur einen qualitativen Eindruck.

Der Verschleiß kann über eine Vielzahl von verschiedenen Messgrößen wie der Änderung der Geometrie der Einzelteile der ZRS, Gewichtsverlust, die Änderung der Oberflächenrauigkeit und Verlust der Nitrierschicht erfasst werden. Aus Zeitgründen ist es allerdings nicht möglich alle 1000 kg eine Erfassung aller Messgrößen mit geeigneten Messmitteln durchzuführen. Zudem wurde die ZRS im Neuzustand nicht vermessen, was die Vergleichbarkeit erschwert.

Die Geometrieänderung wurde ab 6000 kg alle 1000 kg bei Zerlegen des Zellrades mit Hilfe einer Schiebelehre erfasst. Dazu wurden auf den verschleißkritischen Stellen der Einzelteile anhand von Fotografien Messpunkte festgelegt. An diesen wird das Istmass mit Hilfe einer Schiebelehre erfasst. Weil an einigen Messpunkten die Schiebelehre nicht genau angelegt werden kann, kommt es zu Ungenauigkeiten in den Messungen, bzw. konnten einzelne Messpunkte manchmal nicht erfasst werden. Zudem wurden die Messpunkte nur visuell festgelegt (anhand von Fotografien), sodass Messunsicherheiten auch deswegen auftreten, weil nicht immer genau derselbe Messpunkt herangezogen wird.

Dennoch bietet die Vermessung einen groben Überblick über den Verschleiß.



Abbildung 5.13 Verschleißmuster Einlass Gehäusedeckplatte

Bereits nach 1000 kg geförderter Sandmasse können erste Verschleißerscheinungen erkannt werden. Das sichtlich stärkste Verschleißmuster befindet sich auf der Unterseite der Gehäusedeckplatte, also an der Stelle, an der der Sand zwischen Zellrad und der Deckplatte in das Gehäuse eintritt. In Abbildung 5.13 ist das Verschleißmuster über 10 Tonnen gefördertem Sand zu sehen. Es ist ersichtlich, dass eine Stufe zwischen Zellrad und Deckplatte ausgeschliffen wird. Das Verschleißmuster wird folgendermaßen erklärt: Ein Zellradsteg bewegt sich auf das Ende des Einlasses zu. Zwischen Zellradsteg und Gehäusedeckplatte werden Sandkörner eingezogen die kleiner oder gleich der Spaltgröße sind. Diese gleiten zwischen Zellrad und Deckplatte entlang. Es kommt zu abrasivem Verschleiß der Deckplatte. Nach 3800 kg (siehe Abbildung 5.13) können deutlich scharfkantige Schnitte erkannt werden, die den Abrasivverschleiß sehr anschaulich zeigen.

Die Verschleißstufe hat sich bis 5000 kg Fördermenge auf einen Winkel von ca. 45° weiter ausgeprägt, ist dann aber bei dieser Tiefe geblieben. Das lässt sich dadurch erklären, dass bei 45° der Auslass in der Gehäusegrundplatte 45° versetzt vom Einlass anfängt. Der Sand

wird also ca. bei Ende des Verschleißbildes aus dem Gehäuse gezogen, wodurch der Verschleiß abrupt abbricht. Die maximale Verschleißtiefe an der Einlassstufe befindet sich nach 10.040 kg Fördermenge an den Messpunkten 3, 5 und 11 und beträgt 1,35 mm (siehe A. 1 Messpunkte Gehäusedeckplatte). Gemessen wurde das Tiefenmaß in Abhängigkeit von der nicht dem Sand ausgesetzten Fläche der Durchgangsbohrungen.

Wenn man sich das Verschleißmuster in den Abbildungen sowie an Hand der Messwerte ansieht, lässt es vermuten, dass der Verschleiß ein Maximum erreicht hat, da sich auf die gesamte Breite der Deckplatte über 45° ca. die gleiche Tiefe ausgebildet hat und diese dann nicht mehr variiert. Außerdem nimmt die Verschleißtiefe nicht weiter zu. Der Verschleiß hat während der letzten 5.000 kg nicht im selben Maß zugenommen wie bei der Förderung der nächsten 5.000 kg. Die Belastung, mit der das Gehäuse beansprucht wird, nimmt also ab.

Zwischen 0 und 6.200 kg hat sich eine Verschleißtiefe von 1,14 mm ausgeprägt. Zwischen 6.200 kg und 10.040 kg hat sich diese von 1,14 mm weiter auf 1,35 mm ausgeprägt. Also innerhalb von 4000 kg nur um 0,21 mm erhöht. Der Trend scheint in die Richtung zu gehen, dass sich über die gesamte Verschleißstelle eine einheitliche Tiefe einstellt, die dann langsamer zunimmt.

Das kann dadurch erklärt werden, dass das Spiel zwischen Deckplatte und der Oberkante des Zellradsteges bereits größer als die meisten mitgeführten Sandkörner ist.

Die Grundplatte hat über die gesamte Fläche eine Aufrauung erfahren. Ebenso das Zellrad auf der Deckplatte. Außerdem hat das Zellrad auf Grund und Deckplatte leichte Aufrauungen und bereits eine minimale Verringerung der Dicke. Die Zellenstege haben leichte Verschleißerscheinungen an den Rändern.

Die Gehäusegrundplatte sowie das Gehäuse haben bereits nach 1.000 kg erste Aufrauungen erfahren (siehe Abbildung 5.14). Die drei nicht verschlissenen Ringe innen sind die Gegenfläche zu den Außnehmungen auf der Unterseite des Zellrades. Um den Verschleiß innen zu messen, werden diese als Bezugsebenen herangezogen. Bei Zerlegen des Zellrades, kann man jedes mal erkennen, dass auf der Grundplatte eine Sandschicht aufliegt, die nicht aus dem Zellrad ausgebracht wird.

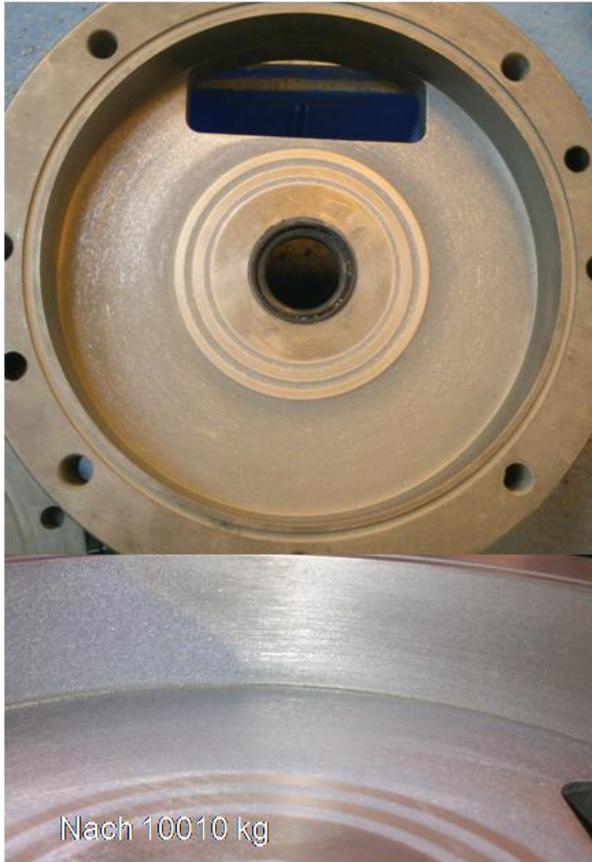


Abbildung 5.14 Verschleißmuster Gehäusegrundplatte und Gehäuse

Das Zellrad selbst hat ebenfalls bereits nach 1000 kg die ersten Verschleißerscheinungen. Das Zellrad erfährt über den Sanddurchsatz von 10010 kg vor allem einen Verschleiß an den Zellenstegen. Einerseits nimmt der Durchmesser des Zellrades ab. Dabei bildet sich an den Zähnen ein leicht konisches Muster aus. Vor allem während der ersten 5000 kg ist der Durchmesserverlust auf der Oberseite und der Unterseite besonders ausgeprägt. In Abbildung 5.15 ist ersichtlich wie der Spalt zwischen Gehäuse und Zellradsteg vergrößert wurde.



Abbildung 5.15 Verschleißmuster Zellrad

Aus dem Verschleiß der einzelnen Komponenten der ZRS ergeben sich neue Spaltgeometrien. Diese können störend wirken, indem die Streuung der Sandausbringmenge größer wird, als es der Toleranzbereich zulässt. Es stellt sich die Frage, ob ein Verschleißmuster entsteht, ab welchem die ZRS nicht mehr betrieben werden kann, bzw. ab dem die Spaltverluste des Sandes so groß werden, dass die Dosierungsgenauigkeit sinkt.

Anhand der Messwerte können die neuen Spaltmaße ermittelt werden. Das Spiel zwischen Zellrad und Gehäuse (Tabelle 5.4) weist mit einem maximalen Spalt von 2,75 mm bereits eine Größe auf, die einem 0,1%-Anteil der zulässigen Sandkörner laut vorgeschriebener Sandkornverteilung entspricht. D.h. nach dem Erreichen einer Spaltgröße die den maximal zulässigen Sandkörnern entspricht nimmt der Verschleiß, entgegen dem prognostizierten Verschleißverhalten laut Abbildung 3.10, weiterhin zu. Allerdings kann keine Aussage darüber getroffen werden, wie schnell der Verschleiß zunimmt.

Tabelle 5.4 Spiel Gehäuse- Zellrad in Abhängigkeit des Sanddurchsatzes [kg]

Spiel Gehäuse - Zellrad			
Sanddurchsatz [kg]	7940	8940	10040
Größtes Spiel [mm]: $\text{Max}(d_i) - \text{Min}(d_a) / 2$	1,95	2,05	2,75
kleinstes Spiel [mm]: $\text{Min}(d_i) - \text{Max}(d_a) / 2$	1,275	1,475	1,5

Auch der Spalt zwischen der Oberseite der Zellenstege und der in der Deckplatte ausgebildeten Stufe hat bereits eine maximale Spaltbreite von 2,05 mm (Tabelle 5.5). Damit liegt er in einem Intervall, in dem nur noch 5% der geförderten Sandkörner den größten Teil des abrasiven Verschleißes verursachen. Auch hier wird sich der Verschleiß weiter ausprägen, allerdings kann nicht klar prognostiziert werden, wie schnell.

Tabelle 5.5 Spiel Deckplatte- Zellrad

Spiel Deckplatte - Zellrad					
Sanddurchsatz [kg]	6200	7090	7940	8940	10040
Größtes Spiel [mm]: $\text{Max}(\text{Tiefe Zellradoberseite}) + \text{Max}(\text{Verschleiß Deckplatte})$	1,75	1,7	2	2,05	2,05
kleinstes Spiel [mm]: $\text{Min}(\text{Tiefe Zellradoberseite}) + \text{Min}(\text{Verschleiß Deckplatte})$	1,15	1,3	1,45	1,5	1,55

5.2 Auswertung der Messungen am Vulkollanzellrad

Das Vulkollanzellrad sollte ebenfalls hinsichtlich Sandausbringungsmenge sowie Verschleißbild untersucht werden. Allerdings gab es in der Anfangsphase der Versuche bereits eine große Anzahl an Problemen, weswegen nur eine kleine Anzahl an Versuchen durchgeführt wurde. Aufgrund von fertigungstechnischen Problemen musste das Vulkollanzellrad mehrmals nachgearbeitet werden, um es in Betrieb nehmen zu können. Es gab das Problem, dass der Hersteller des Zellrades den Adapterstutzen, der in den Zellradkörper eingesetzt wird als Presssitz ausgelegt hat. Dadurch wurde das elastische Vulkollanzellrad aufgebogen. Der Planlauf des Zellrades gegenüber dem Gehäuse wurde nicht mehr eingehalten. In weiterer Folge kam es beim Betrieb zu einer stark erhöhten Reibung und teilweise zum Verkleben zwischen Zellrad und Gehäuse.

Deswegen wurde der Adapterstutzen am Durchmesser nachbearbeitet, sodass es zu keiner Verformung des Zellradkörpers mehr kam. Mit der neuen Geometrie des Zellrades konnte es am Prüfstand eingebaut werden. Allerdings konnte der Prüfstand weiterhin nicht betrieben werden, weil der Motor das erforderliche Drehmoment nicht erbringen konnte. Während einer Sandkastenentleerung kam es in allen Drehzahlbereichen zu Motorausfällen. Insgesamt wurden nur 350 kg Sand gefördert.

5.2.1 Verschleißuntersuchung

Nach 350 kg geförderten Sandes kann eine Aufrauung des Zellrades beobachtet werden. Eine geometrische oder volumetrische Veränderung kann zu diesem Zeitpunkt noch nicht beobachtet werden.

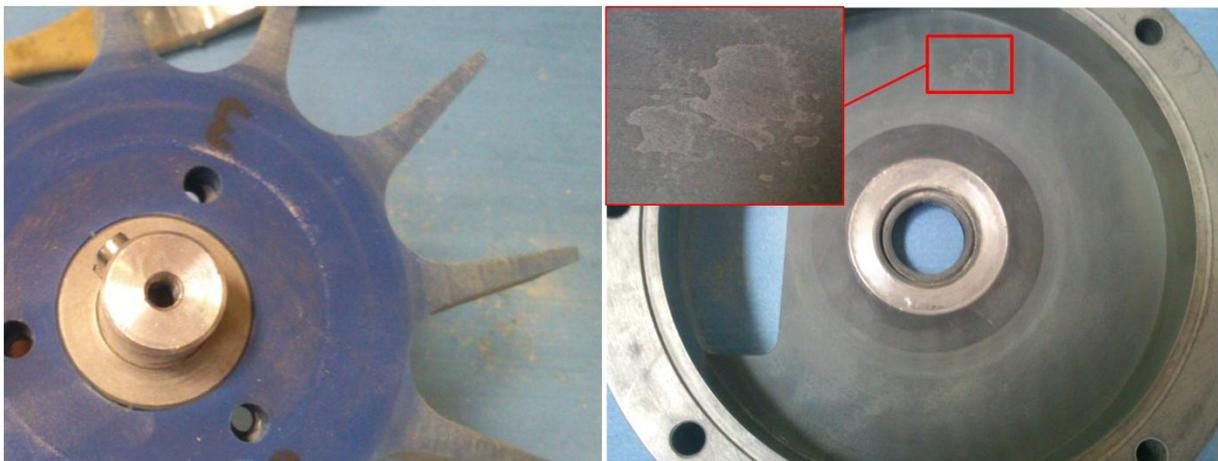


Abbildung 5.16 Verschleiß Vulkollanzellrad (links) und keramikbeschichtete Gehäusegrundplatte (rechts) nach 350 kg

Die keramikbeschichtete Gehäusegrundplatte zeigte bereits nach 350 kg Fördermenge einen ersten Abrieb an der Beschichtung. Die spröde keramische Beschichtung scheint dem abrasiven Verhalten des Sandes trotz weit größerer Härte nicht ausreichend entgegenzuwirken (siehe Abbildung 5.16 rechts).

5.2.2 Sandmengenmessung

Eine Auswertung der Sandaustragsmenge hinsichtlich Streuung und Kennlinie ist aufgrund der großen Anzahl an Motorausfällen nicht möglich.

5.2.3 Entladungsblitze

Ein weiteres Phänomen wurde beim Vulkollanzellrad beobachtet. Vor allem bei den Drehzahlen 14 U/Min und 8 U/Min kommt es zu Entladungsblitzen zwischen der ZRS und dem Ejektor (siehe Abbildung 5.17). Der Sand und das Vulkollan scheinen ein elektrostatisches Potenzial aufzubauen, welches sich dann über den Weg geringsten Widerstandes entlädt.

Elektrostatische Ladungen des Sandes sind am Schienenfahrzeug jedenfalls nicht erwünscht, weil es unter Umständen zu Störungen von Instrumenten führen kann.



Abbildung 5.17 Entladungsblitz zwischen Vulkollan-ZRS und Ejektor

5.3 Verschleißuntersuchungen am Ejektor

In Kapitel 2 wurde die am Prüfstand verwendete Fördereinheit vorgestellt. Die Fördereinheit wurde auf 5.000 kg Fördermenge getestet. Sie wurde ab 5.000 kg geförderter Sandmenge

genutzt und bis 10.100 kg Sanddurchsatz verwendet. Dabei wurde in Abhängigkeit vom Massenstrom $\dot{m}(t)$ der Luftmassenstrom eingestellt.

Wie bei der ZRS wurde nach je 1.000 kg Sanddurchsatz der Verschleiß der Fördereinheit dokumentiert. Allerdings konnte der Ejektor nicht alle 1000 kg zerlegt werden, weil die Einspritzdüse eingeklebt ist und ein Zerlegen der Fördereinheit nicht zerstörungsfrei möglich war.

Die Schlauchaufnahme musste alle 2.000 kg getauscht werden, da die gesamte Wandstärke durchgerieben wurde (siehe Abbildung 5.18). Die Schlauchaufnahme ist aus Aluminium gefertigt. Der starke Verschleiß entsteht einerseits dadurch, dass der Sand nach Durchfließen der Lavaldüse seine Maximalgeschwindigkeit erreicht und damit seinen größten Impuls hat. Dementsprechend ist die Schlauchaufnahme einer besonders großen Abrasion ausgesetzt.

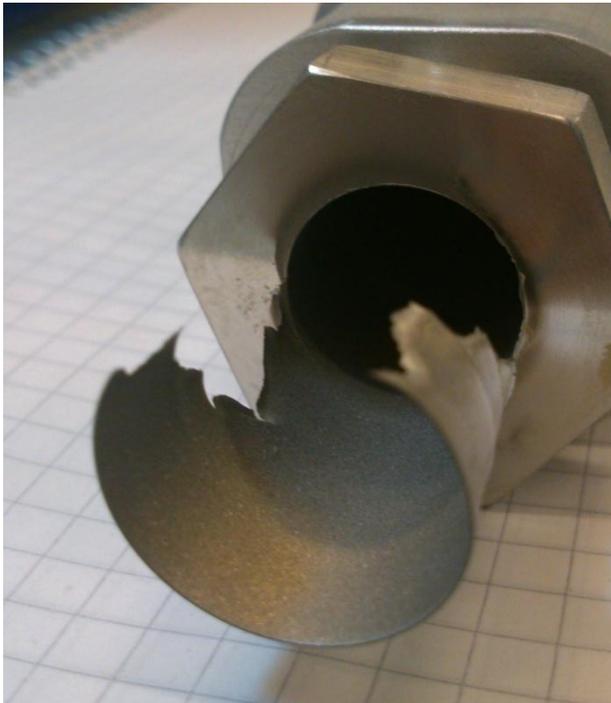


Abbildung 5.18 Verschleißmuster Schlauchaufnahme nach 2000 kg Fördermenge

Die Schlauchaufnahme hat auf der Seite des Lavalrohres ebenfalls ein Verschleißmuster. Die Schlauchaufnahme hat auf der Innenseite der Schlauchaufnahme einen Radius, der vollständig abgetragen wird. Diese ausgeprägte Abfräsung wird vor allem auf die konstruktive Ausführung zurückgeführt.

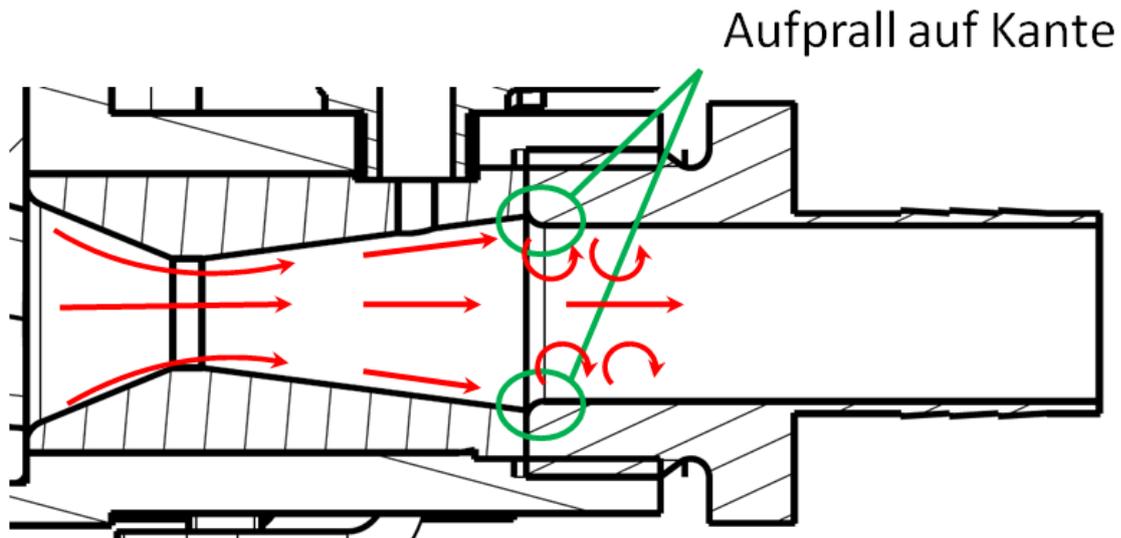


Abbildung 5.19 Sandsströmungsverlauf durch Lavalrohr

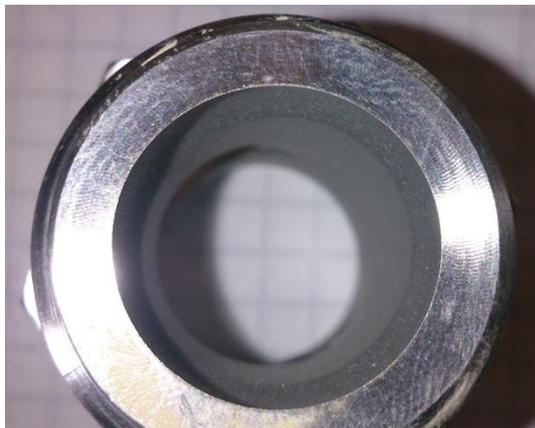


Abbildung 5.20 Abrieb Lavalrohrseitiger Innendurchmesser Schlauchaufnahme

In Abbildung 5.20 ist der Abrieb der Schlauchaufnahme zu sehen. Konstruktiv ist eine Stufe zwischen dem Lavalrohr und der Schlauchaufnahme vorgesehen (siehe Abbildung 5.19). Es wird vermutet, dass die Sandkörner sich bis zum Ende des Lavalrohres linear bewegen. Aufgrund von Reibung an der Innenwand kommt es bereits vorher zu Geschwindigkeitsunterschieden. Allerdings bewegen sich die Sandkörner noch geradlinig. Anschließend treffen Sie auf die Kante, wobei es zu Verwirbelungen kommt.

Theoretisch könnten die Verwirbelungen auch zu einem stärkeren Verschleiß der Schlauchaufnahme führen. Das kann allerdings nicht nachgewiesen werden.

Das Lavalrohr hat nach 5000 kg Fördermenge ebenfalls einen starken Abrieb erfahren. Der Innendurchmesser ist stark aufgeweitet. Ebenso der Innendurchmesser am Ausgang des Lavalrohres. Der Nenndurchmesser beträgt am schmalsten Querschnitt 9 mm. Der Nenndurchmesser am Austritt beträgt 16 mm.

In Abbildung 5.21 sind die Messungen des Durchmessers nach 5000 kg Fördermenge zu sehen. Der mittlere Durchmesser an der stärksten Verjüngung des Lavalrohres nach 5000 kg Fördermenge beträgt 11,996 mm. Daraus folgt, dass mit der Drehzahlvariation eine Aufweitung des kleinsten Durchmessers von 2,996 mm erfolgt.

Am Austritt beträgt der Mittlere Durchmesser nach 5.000 kg 18,33 mm. Hier beträgt die Durchmesserendifferenz 2,33 mm.

Der starke Verschleiß ist ebenfalls auf den erhöhten Impuls am kleinsten Durchmesser und am Ausgang zurückzuführen.

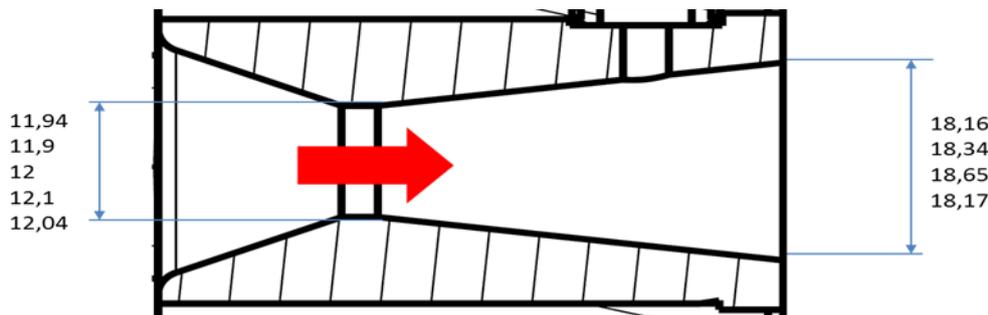


Abbildung 5.21 Verschleißmessungen an der Lavaldüse in mm

Die Einspritzdüse hat ebenfalls einen starken Verschleiß erlitten (siehe Abbildung 5.22). Sie hat auf der dem ZRS-Auslass zugewandten Seite 1,4 mm Wandstärke verloren. Die Wandstärke der Düse beträgt 1,65 mm. Also beträgt die verbliebene Wandstärke der Einspritzdüse 0,25 mm. Es wäre zu erwarten, dass spätestens während der nächsten 1000 bis 2000 kg geförderten Sandes der erste Durchrieb erfolgt wäre. Die Lebenserwartung der Einspritzdüse kann also ebenfalls mit maximal 5.000 kg angenommen werden. Allerdings stellt sich die Frage ob diese nicht durch konstruktive Anpassung erhöht werden kann.



Abbildung 5.22 Verschleiß an der Einspritzdüse

Der Kunststoffeinsatz hat nach 5000 kg keine sichtbaren Verschleißerscheinungen.

5.4 Vergleich zwischen einer pneumatischen Sandungsanlage und der mechanischen Sandungsanlage

In Kapitel 5 wurden die wichtigsten Spezifikationen an die Sandungsanlage, vor allem im Hinblick auf Fördermassenstrom und Streuung des Fördermassenstroms getestet. Um einen Vergleich zu den derzeit verwendeten Sandungsanlagen zu machen, wird ein Vergleich zwischen den Dosierkonzepten gemacht. Das ist aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Ausführungsformen von pneumatischen Sandungsanlagen nicht so einfach, da es acht verschiedene Typen von Sandungsanlagen gibt. Diese funktionieren jeweils nach dem Unter- oder Überdruckprinzip. Außerdem kann die Performance der pneumatischen Sandungsanlagen nicht allein auf den Serientyp reduziert werden.

Bei den pneumatischen Sandungsanlagen hat der Sandkasten im Hinblick auf seine Geometrie immer einen wesentlichen Einfluss. Einerseits wirkt sich der Sandkastenfüllstand auf die ausgebrachte Sandmenge aus. Wird ein bestimmter Sandkastenfüllstand unterschritten, kann nicht mehr gesandet werden. Andererseits wirkt sich die Bauform des Sandkastens auf die Sandausbringmenge aus. Weil beim pneumatischen Dosierer bereits im Sandkasten ein Massenstrom erzeugt wird, kann eine Veränderung der Geometrie nicht vorhersehbare Auswirkungen auf die ausgebrachte Sandmenge haben. Aufgrund der beschränkten Einbausituation am Wagen kommt es häufig zu Variationen des Sandkastens.

Außerdem wirkt sich bei den pneumatischen Sandungsanlagen der Sandschlauch auf die ausgebrachte Sandmenge aus. Dabei spielen sowohl die Schlauchlänge als auch die Schlauchführung eine wesentliche Rolle.

Je länger der Schlauch ist, desto größer sind die Druckverluste. Außerdem kann die Förderung problematisch sein, wenn ein Lagepotential überwunden werden muss, also wenn der Sand in einem gewissen Schlauchabschnitt aufwärts gefördert werden muss. Auch hier gilt: Sowohl Schlauchlänge als auch die Schlauchführung sind wesentlich von der Einbausituation am Wagen abhängig und variieren stark nach Einbausituation.

Um dennoch einen Vergleichswert zu haben, wurde eine Sandungsanlage herangezogen, bei der ein Systemintegrationstest für den Betrieb an einem Fahrzeug gemacht wurde. Bei dieser wurde eine fixe Schlauchführung vorgegeben und sowohl eine Sandaustragskennlinie (siehe Abbildung 5.24) als auch eine Entleerkurve (siehe Abbildung 5.25 & Abbildung 5.26) erstellt.

Derzeit werden die Sandungsanlagen an Zügen so ausgeführt, dass nur zwei Sandungsstufen auf einem Zug möglich sind. Diese werden spezifisch nach Anwendung festgelegt. Die Streuung wird deswegen auch nur an zwei Arbeitspunkten ermittelt. Als Vergleich wurde ein Versuch herangezogen, der im Versuch sehr kleine Streuungen aufweist.

Der Prüfaufbau der pneumatischen Sandungsanlage ist in Abbildung 5.23 ersichtlich. Die Schlauchlänge beträgt ca. 1,2 Meter. Es werden zwei Versuchsaufbauten gemacht, weil an die gleiche Sandungsanlage, an zwei Wagenenden verbaut wird, und an jedem Wagenende eine unterschiedliche Schlauchführung als auch ein unterschiedlicher Sandkasten im Einsatz ist.



Abbildung 5.23 Prüfaufbau pneumatische Sandungsanlage an Wagenende 1 (WE1) und Wagenende 2 (WE2)

Bei der Versuchsdurchführung wurden erst einzelne Sandungsvorgänge bei verschiedenen Druckstufen durchgeführt um eine Sandaustragskennlinie zu erhalten (siehe Abbildung 5.24).

Anschließend wurden für beide Versuchsaufbauten (WE1 & WE2) an zwei definierten Arbeitspunkten (bestimmte Druckstufen) jeweils 62 Sandungsvorgänge wiederholt, um die Streuung zu ermitteln (die waagrechten Balken in Abbildung 5.24). Die gemessenen Werte der Streuung sind Tabelle 5.6 ersichtlich.

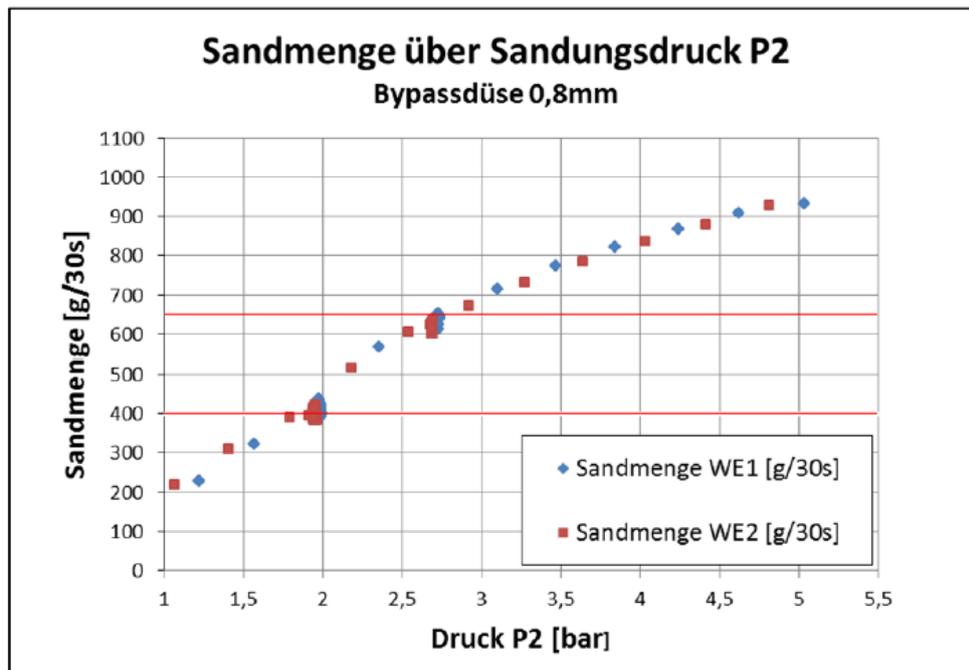


Abbildung 5.24 Sandaustragskennlinie der pneumatischen Anlage

Tabelle 5.6 Streuung der pneumatischen Sandungsanlage in den Arbeitspunkten

	P1 [bar]	P2 [bar]	Mittelwert [g/30s]	$\pm 3\sigma$ [g/30s]	Max [g/30s]	Min [g/30s]
Wagenende 1	2,52	1,99	408	± 34	437	392
	3,41	2,73	641	± 21	652	612
Wagenende 2	2,52	1,95	397	± 35	421	381
	3,41	2,69	611	± 29	633	598
	Max Druck P1 [bar]		Max Sandmenge [g/30s]			
Wagenende 1	6,15		934			
Wagenende 2	6,15		927			

Außerdem wurde der Einfluss des Sandkastenfüllstandes auf die ausgebrachte Sandmenge (in g/30s) erfasst. Aus den Abbildung 5.25 und Abbildung 5.26 geht hervor, dass bei beiden Sandkästen kein wesentlicher Einfluss des Füllstandes des Sandkastens auf die Sandfördermenge vorhanden ist.

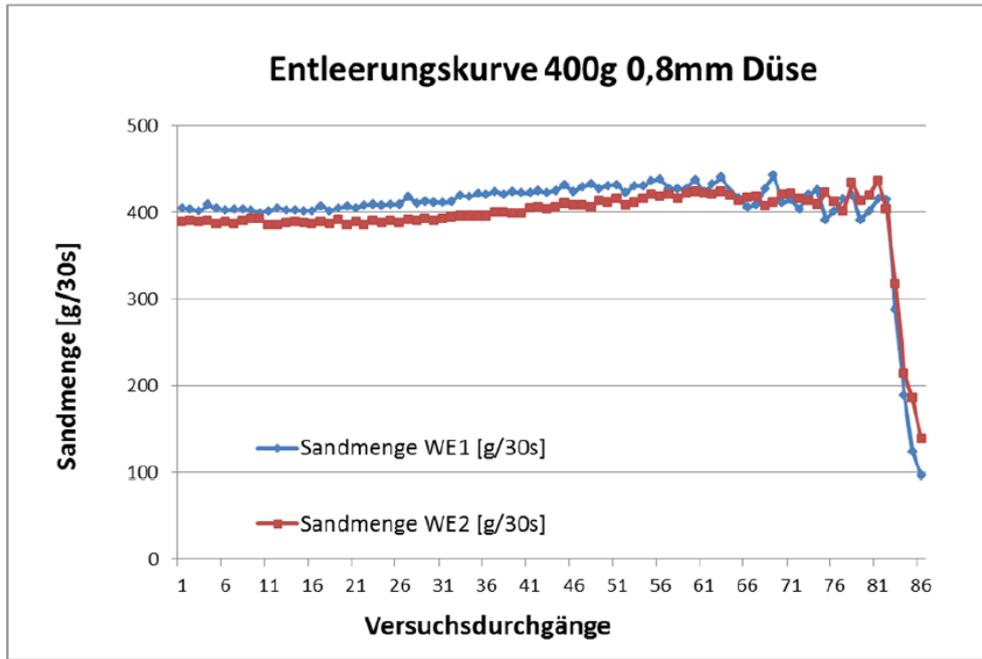


Abbildung 5.25 Entleerungskurve der pneumatischen Sandungsanlage bei Druck p1

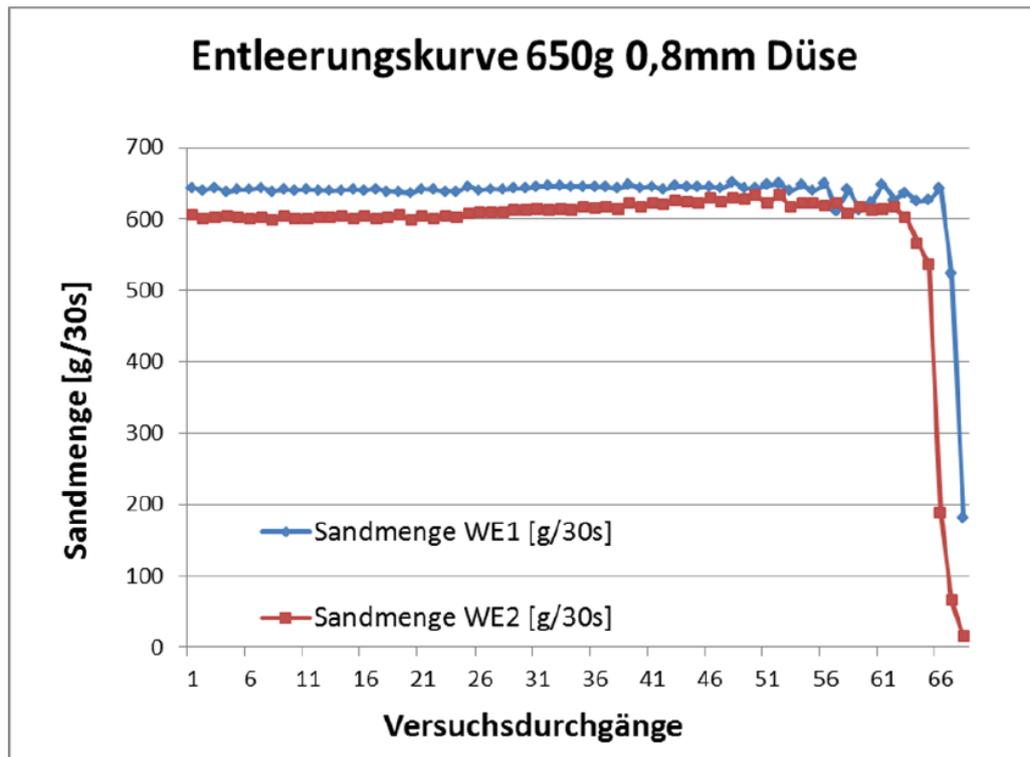


Abbildung 5.26 Entleerungskurve der pneumatischen Sandungsanlage bei Druck p2

Zur vergleichenden Bewertung der mechanischen und pneumatischen Sandungsanlage wurde eine technisch-wirtschaftliche Bewertung durchgeführt. Dazu wurden sieben vergleichbare technische Kriterien definiert und mithilfe der Methode des paarweisen Vergleiches gewichtet. Anschließend wurden der mechanische und der pneumatische Dosierer anhand der Kriterien nach der Bewertungsskala aus Tabelle 5.7 bewertet.

Tabelle 5.7 Punktbewertungsskala nach VDI 2225

Technisch-wirtschaftliche Bewertung (VDI 2225)	
4-Punkte-Schema	
Bedeutung	Punktzahl
sehr gute Lösung (ideal)	4
gute Lösung	3
ausreichende Lösung	2
gerade noch tragbare Lösung	1

Für die Bewertung der beiden Dosierkonzepte mit der technischen Wertigkeit ergeben sich folgende Werte (siehe Tabelle 5.8): für die Zellradschleuse ergibt sich die technische Wertigkeit 0,54 während der pneumatische Dosierer eine technische Wertigkeit von 0,71 erreicht, wobei das Ideal 1,00 entspricht.

Das bedeutet, dass der pneumatische Dosierer eine bessere technische Wertigkeit erreicht hat als die ZRS. Vor allem im Hinblick auf Geometrie und Gewicht schneidet die ZRS gegenüber der pneumatischen Sandungsanlage schlecht ab. Die Dosiergenauigkeit ist bei beiden Geräten ca. gleich hoch.

Allerdings ist das in diesem frühen Stadium nicht verwunderlich, weil auf vor allem auf Geometrie und Gewicht der ZRS noch kein Wert gelegt wurde. Die Versuche sollten erst zeigen, ob es grundsätzlich möglich wäre, die ZRS im Bahnbetrieb zu verwenden.

Bewertungskriterium								Ergebnis	Prozent	Rang
	1. Dosiergenauigkeit bei 400 g/ 30s	2. Dosierbereich	3. Förderung abhängig und Dosierung	4. Verschleiß	5. Gewicht	6. Geometrie	7. Abhängigkeit der Sandausbringung vom Sandkastenfüllstand			
1. Dosiergenauigkeit bei 400 g/ 30s	1	1	1	1	1	1	1	6	29%	1
2. Dosierbereich	0	0	0	0	0	1	1	2	10%	5
3. Förderung abhängig und Dosierung	0	1	0	0	0	1	1	3	14%	4
4. Verschleiß	0	1	1	0	1	1	1	5	24%	2
5. Gewicht	0	1	1	0	0	1	1	4	19%	3
6. Geometrie	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	7
7. Abhängigkeit der Sandausbringung vom Sandkastenfüllstand	0	0	0	0	0	1	0	1	5%	6
								21		

Abbildung 5.27 paarweiser Vergleich der technischen Kriterien

Tabelle 5.8 Bestimmung der technischen Wertigkeit von ZRS und pneumatischem Dosierer

Nr.	Kriterien	Gewichtung	mechanischer Dosierer			pneumatischer Dosierer			ideal	
			Eigenschaften	Wert	Wert x Gewichtung	Eigenschaften	Wert	Wert x Gewichtung	Wert	Wert x Gewichtung
1	K1: Dosiergenauigkeit bei 400 g/ 30s	29%	+ 49g/30s	2	0,57	+ 34g/30s	3	0,86	4	1,14
2	K2: Dosierbereich	10%	200 - 2700 g	4	0,38	200 - 900 g	3	0,29	4	0,38
3	K3: Förderung abhängig und Dosierung	14%	nein	4	0,57	ja	4	0,57	4	0,57
4	K4: Verschleiß	24%	stark	1	0,24	Mittel	2	0,48	4	0,95
5	K5: Gewicht	19%	12 kg	1	0,19	3 kg	3	0,57	4	0,76
6	K6: Geometrie	0%	groß	1	0,00	klein	3	0,00	4	0,00
7	K7: Abhängigkeit der Sandausbringung vom Sandkastenfüllstand	5%	Nein	4	0,19	Ja	2	0,10	4	0,19
Summe					2,14		2,86		4,00	
technische Wertigkeit = Wert x Gewichtung Komponente / Wert x Gewichtung ideal					0,54		0,71		1,00	

Andererseits wurde die wirtschaftliche Wertigkeit der ZRS und des pneumatischen Dosierers bestimmt, wobei hier nur die Herstellkosten berücksichtigt wurden (siehe Tabelle 5.9). Die Herstellkosten setzen sich aus den Materialkosten und den Fertigungs- und Montagekosten zusammen. Der pneumatische Dosierer wird aktuell für 250 Euro hergestellt. Die Herstellkosten des mechanischen Dosierers wurden mit 750 Euro geschätzt, genauere Informationen über die Herstellkosten waren noch nicht bekannt.

Auch hinsichtlich der Herstellkosten ist die Zellradschleuse schlechter bewertet als der pneumatische Dosierer.

Tabelle 5.9 Bestimmung der wirtschaftlichen Wertigkeit von ZRS und pneumatischem Dosierer

wirtschaftlich	Bewertungskriterien		mechanischer Dosierer			pneumatischer Dosierer			ideal	
	Nr.	Kriterien	Eigenschaften	Wert	Wert x Gewichtung	Eigenschaften	Wert	Wert x Gewichtung	Wert	Wert x Gewichtung
	1	Gesamtkosten	Zielkosten 750 Euro	1	1,00	Istkosten 250 Euro	2	2,00	4	4,00
	Summe				1,00				2,00	4,00
	technische Wertigkeit = Wert x Gewichtung Komponente / Wert x Gewichtung ideal				0,25				0,50	1,00

In Abbildung 5.28 wird die technische und die wirtschaftliche Bewertung der beiden Sandungsanlagen gegenübergestellt. Die ideale Sandungsanlage hat eine technische Wertigkeit von 1 und eine wirtschaftliche Wertigkeit von 1. Hier wird noch einmal deutlich, dass der mechanische Dosierer sowohl technisch als auch wirtschaftlich schlechter als der aktuelle pneumatische Dosierer bewertet wurde.

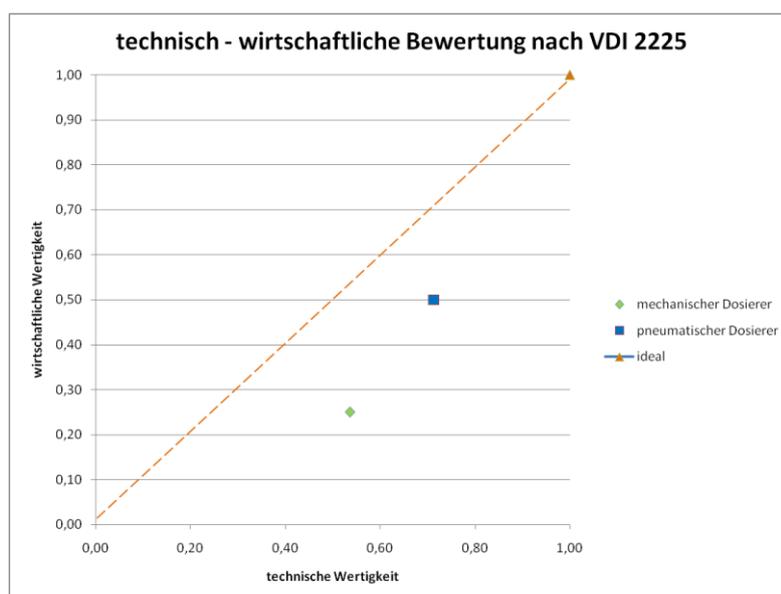


Abbildung 5.28 technisch- wirtschaftliche Bewertung nach VDI 2225

6 Verbesserungsvorschläge

Im letzten Kapitel wurden die Ergebnisse der Versuche präsentiert und mit den Spezifikationen der Sandungsanlage verglichen. Außerdem wurde ein kurzer Vergleich der mechanischen Sandungsanlage mit einer bereits bestehenden pneumatischen Dosiereinheit durchgeführt.

Nun wenden wir uns Verbesserungsmöglichkeiten des mechanischen Dosierers zu, vor allem in den Punkten, wo der mechanische Dosierer noch nicht die erforderlichen Spezifikationen erfüllt.

6.1 Verbesserungen hinsichtlich Sandfördermasse

Die Steuerung der Sandausbringmenge stellt sich beim mechanischen Dosierer wie erwartet als linear heraus und kann über ein 30-sekündiges Intervall sehr genau angesteuert werden.

Das größte Problem, das beim mechanischen Dosierer hinsichtlich ausgebrachter Sandmenge auftritt, ist das der un stetigen Förderung, allerdings gibt es noch deutliches Optimierungspotential. Es gibt drei Möglichkeiten, die Pulsation zu verringern. Eine Möglichkeit ist die Erhöhung der Frequenz, also die Anzahl an Pulsen pro Minute. Die Frequenz kann erhöht werden, wenn das Volumen der Zellen verkleinert wird. Bei 8 U/Min ist die Pulsation bereits recht gering und sollte bereits klein genug sein, dass die Streuung von $\dot{m}(t)$ keinen negativen Einfluss hat.

Die Pulsation ist abhängig von Drehzahl und von der Anzahl der Zellen. Wird die Zellenzahl z erhöht, erhöht sich die Anzahl an Pulsen pro Minute. Für eine ZRS gilt für die Pulsation p $\left[\frac{1}{\text{min}} \right]$:

$$p = n * z$$

n ist die Drehzahl des Zellrades und z ist die Anzahl der Zellen. Um die Pulsation zu verringern, kann das Fördervolumen verkleinert werden, was durch eine erhöhte Drehzahl ausgeglichen wird.

Eine weitere Möglichkeit zur Verringerung der Pulsation, ist die Konstruktion einer ZRS mit zwei Einlässen und zwei Auslässen. Diese können so angeordnet werden, dass sie die Pulsation weiter halbieren, indem sie um eine halbe Zellenbreite versetzt sind.

Die dritte Möglichkeit der Entleerung wäre eine konstruktive Anpassung des Auslasses. Wenn die Auslasskante, über die der Sand geschoben wird, nicht parallel zum ZRS-Steg ist,

sondern in einem Winkel, kommt es nicht zu einer abrupten Entleerung der ZRS. Allerdings stellt sich für diese Anpassung die Frage, ob sie einen signifikanten Einfluss hat. Weil der Sand durch den Ejektor aus dem Förderraum gesaugt wird, kann es bereits zur vollständigen Entleerung kommen, bevor der Sand den letzten Rand der Kante erreicht.

Im nächsten Prototyp der ZRS sollen die ersten beiden Varianten umgesetzt werden. Das Fördervolumen wird reduziert, indem Höhe und Durchmesser der ZRS verringert werden. Zusätzlich werden zwei Ein- und Auslässe konstruiert.

Ein Nachteil, der sich aufgrund der verkleinerten Geometrie und damit erhöhter Drehzahl ergibt, ist ein weitaus höherer Verschleiß.

6.2 Verringerung des Verschleißes

Der Verschleiß ist, wie bereits erwähnt, von den Spaltmaßen, der Drehzahl des Zellrades und der Materialien des Zellrades abhängig. Es wäre wünschenswert, den Verschleiß zu minimieren, sodass eine möglichst lange Lebensdauer der mechanischen Dosiereinheit gewährleistet werden kann.

Eine Möglichkeit, den Verschleiß zu verringern, wäre eine Anpassung des Materials. Eine Möglichkeit stellt die Verwendung von härteren Materialien dar. Allerdings hat dies bisher keine besseren Ergebnisse geliefert. Eine weitere Möglichkeit wäre die Verwendung von elastischen Materialien, wie es ja bereits mit dem Vulkollanzellrad (allerdings mit sehr mäßigem Erfolg) versucht wurde.

Eine weitere Möglichkeit stellt die Anpassung der Spaltgeometrie dar. Die Spaltgröße ist wesentlich für den Verschleiß verantwortlich. Unter Umständen würde der Verschleiß kleiner werden, wenn die Spaltgeometrie so angepasst wird, dass der Spalt zwischen Zellrad und Gehäuse breiter ist, als die größten geförderten Sandkörner. Wenn man diese geometrische Anpassung mit der Verschleißfestigkeit von elastischen Materialien gegen Sand verbindet, könnte es ermöglicht werden, den Materialabtrag über die Zeit weit zu verringern und dadurch ein konstanteres Betriebsverhalten zu erreichen.

6.3 Verringerung von Masse und Geometrie

Derzeit hat die mechanische Fördereinheit insgesamt 16,6 kg Masse (siehe Tabelle 3.1) und einer Gesamthöhe von bis zu 228 mm.

Laut Lastenheft sollte die Gesamtmasse des mechanischen Förderers 4 kg nicht überschreiten. Davon ist der derzeitige Prototyp allerdings noch weit entfernt. Am Motor als

zukaufteil lässt sich konstruktiv nicht viel einsparen, außer dass leichtere Motoren gefunden und gekauft werden. Die Masse des jetzigen Motors ist mit 2,8 kg allerdings nicht der größte Gewichtungsfaktor. Am Zellrad selbst kann noch sehr viel Masse verringert werden, indem es zu konstruktiven Anpassungen kommt. Derzeit ist das Gehäuse viel zu dick dimensioniert, hier ist es möglich, noch einiges an Material zu verringern. Außerdem soll im nächsten Prototypen das Fördervolumen der ZRS zumindest halbiert oder sogar geviertelt werden (um dem Problem der Pulsation entgegenzuwirken), wodurch sich sowohl die Bauhöhe der ZRS als auch die Masse der ZRS deutlich verringern würde. Erste Abschätzungen gehen von einer Masse der ZRS von ca. 4 kg aus (ohne Motor) was bereits eine Verringerung der Masse um 10 kg bedeutet. Allerdings entspricht es immer noch nicht der geforderten maximalen Masse von 4 kg.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der Arbeit war es, zu überprüfen, ob eine Zellradschleuse als Dosiergerät für Sandungsanlagen im Schienenverkehr in Frage kommt. Hierzu wurde ein Prototypentest gemacht. Es sollte überprüft werden, ob der Prototyp die im Lastenheft geforderten Spezifikationen erfüllt. Einerseits sollte eine Abschätzung der Lebensdauer gemacht werden, weil Sand aufgrund seines stark abrasiven Verhaltens ein sehr problematisches Fördermedium ist. Dazu wurde ein Versuchsaufbau entworfen, mit dessen Hilfe die Spezifikationen vor allem hinsichtlich Dosierbarkeit und Dosiergenauigkeit überprüft werden sollten. Außerdem sollte überprüft werden, ob der gewählte Motor für den Betrieb der Sandungsanlage in Frage kommt.

Mit Hilfe der Zellradschleuse wurden in Summe 10.000 kg Sand gefördert, was im Bahnverkehr einer Lebensdauer von ca. 10 bis 15 Jahren entspricht. Während der Sandförderung wurde die Drehzahl zwischen 1 und 14 U/Min variiert, um den Zusammenhang zwischen geförderter Sandmasse und Drehzahl der ZRS zu erhalten. Es konnte ein linearer Zusammenhang zwischen Drehzahl und Fördermenge festgestellt werden.

Außerdem wurde die Streuung der mittleren ausgebrachten Sandmasse in den jeweiligen Drehzahlbereichen analysiert. Diese liegt etwas über den zulässigen Streuungen. Bei der Betrachtung der mittleren Sandaustragsmenge über die insgesamt geförderte Sandmasse konnte keine Zu- oder Abnahme (also ein Trend) in eine Richtung festgestellt werden.

Der Verschleiß am Zellrad wurde sowohl durch Vermessen als auch mit Hilfe von Photographien erfasst. Nach 10.000 kg Sandfördermenge konnten deutliche Verschleißerscheinungen festgestellt werden, vor allem auf der Deckplatte der Zellradschleuse am Einlass, allerdings auch am Zellrad selbst, jedoch hat sich der Verschleiß an der Zellradschleuse nicht wesentlich auf den Betrieb ausgewirkt. Aus diesem Grund kann noch nicht bestätigt werden, ab welcher Fördermenge die Lebensdauer erreicht ist.

Der Motor ist während des Betriebs der Zellradschleuse mehrmals ausgefallen, was auf ein Verklemmen von Sandkörnern zwischen Zellrad und Gehäuse zurückzuführen ist. Der Motor war häufigen Lastspitzen ausgesetzt, die deutlich über dessen Nenndrehmoment lagen. Für eine serialisierte Zellradschleuse sollte die Wahrscheinlichkeit des Motorausfalls minimiert werden.

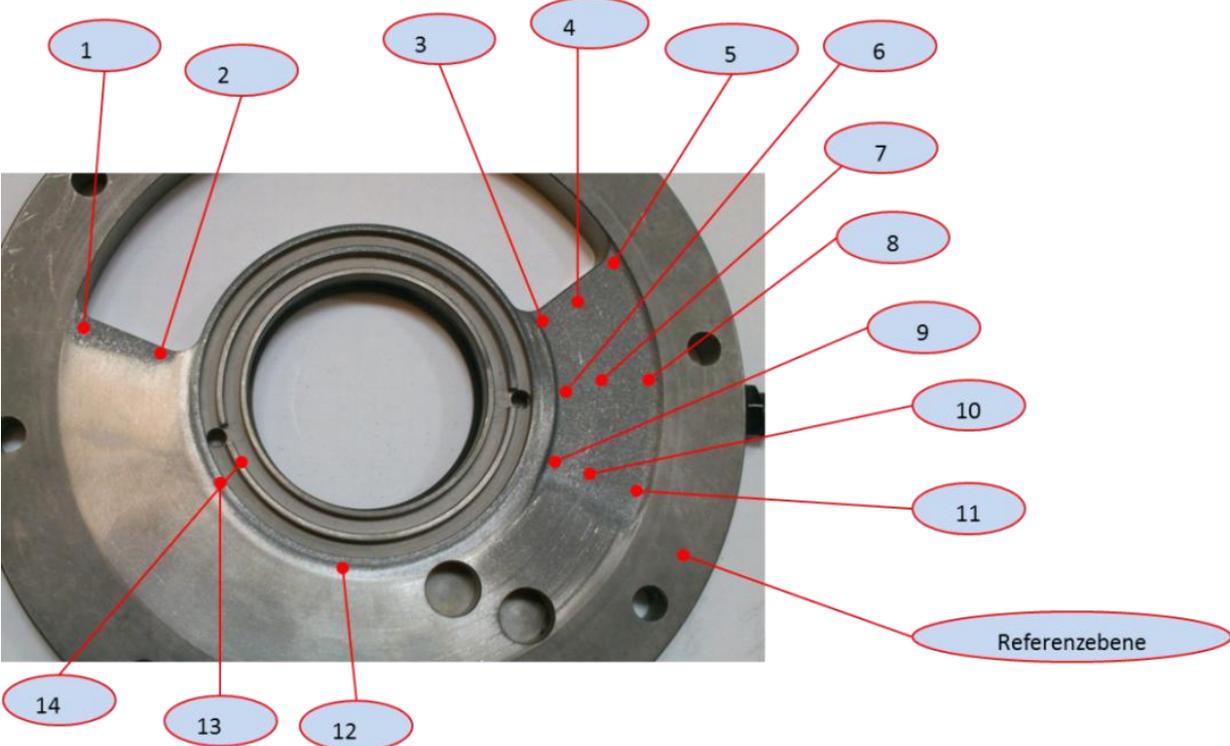
Die technisch-wirtschaftliche Bewertung des mechanischen Dosierers im Vergleich zu einem serienreifen Produkt hat gezeigt, dass der mechanische Dosierer aktuell weder technisch noch wirtschaftlich mit dem aktuellen Produkt konkurrieren kann.

Um die Zellradschleuse als Dosierkonzept konkurrenzfähig zu den derzeitigen pneumatischen Dosierern zu machen, müssen noch einige konstruktive Verbesserungen gemacht werden, die in weiteren Prototypen umgesetzt werden sollen. Wie in Kapitel 6 bereits erwähnt wird, gibt es einige konstruktive Möglichkeiten, die Pulsation der Zellradschleuse zu eliminieren. Allerdings ist die Dosiergenauigkeit auch mit der Zellradschleuse nicht höher als bei derzeit entwickelten pneumatischen Förderern.

Um zu überprüfen ob die ZRS konkurrenzfähig ist, müssen einerseits weitere Prototypen entworfen werden, an denen noch einige Verbesserungen durchgeführt werden können. Andererseits sollte neben der konstruktiven Betrachtung auch eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt werden um zu prüfen, ob die ZRS in der Serienproduktion zum pneumatischen Dosierer konkurrenzfähig ist.

Anhang

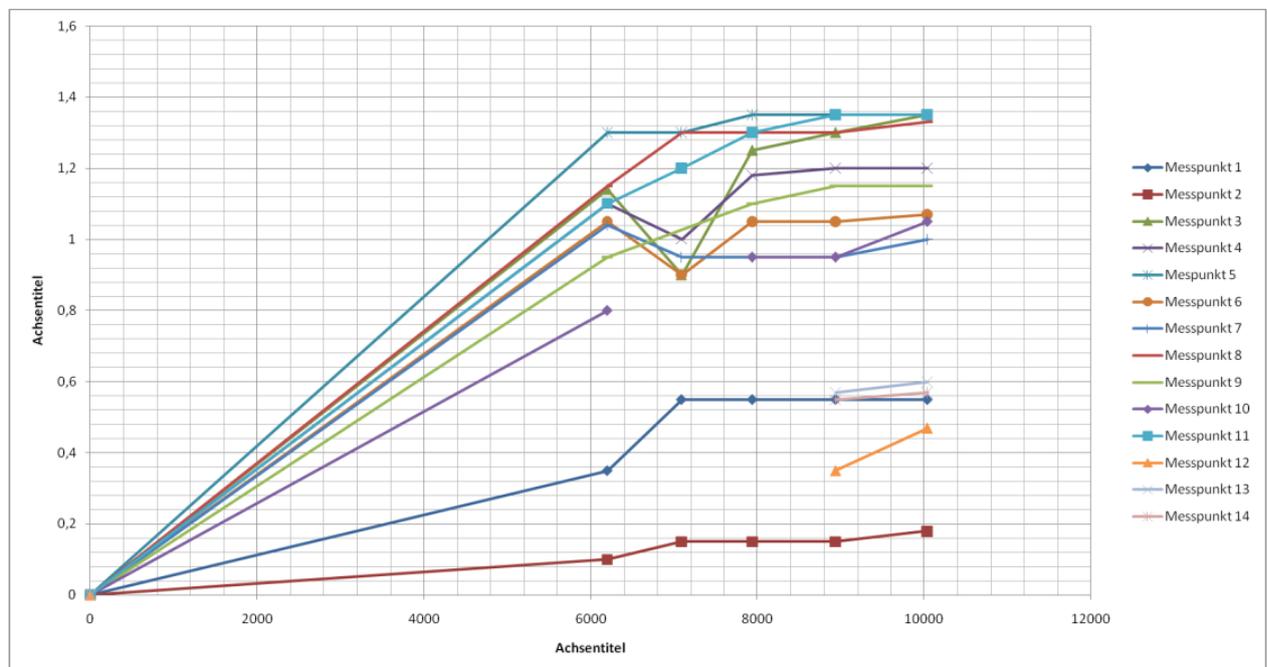
[A1] Verschleißmessungen



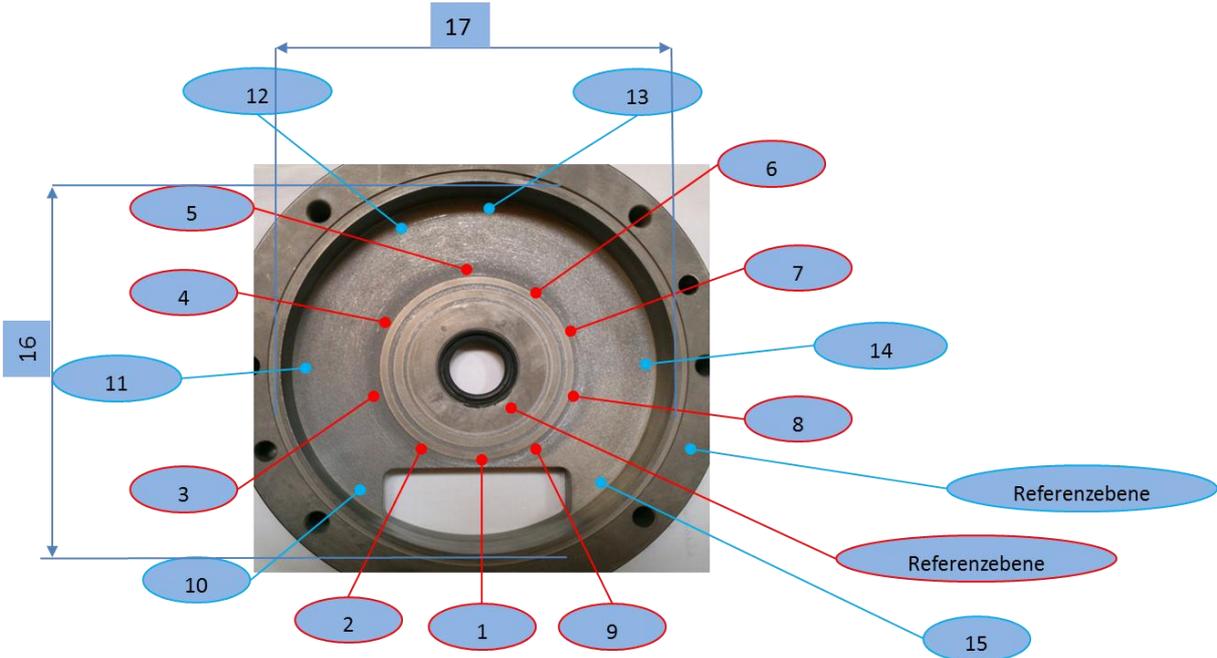
A. 1 Messpunkte Gehäusedeckplatte

Tabelle A. 1 Messungen Gehäusedeckplatte

Verschleißmessung nach geförderter Sandmenge [kg]						
Messpunkt	0	6200	7090	7940	8940	10040
1	0	0,35	0,55	0,55	0,55	0,55
2	0	0,1	0,15	0,15	0,15	0,18
3	0	1,14	0,9	1,25	1,3	1,35
4	0	1,1	1,1	1,18	1,2	1,2
5	0	1,3	1,3	1,35	1,35	1,35
6	0	1,05	0,9	1,05	1,05	1,07
7	0	1,04	0,95	0,95	0,95	1
8	0	1,15	1,3	1,3	1,3	1,33
9	0	0,95		1,1	1,15	1,15
10	0	0,8		0,95	0,95	1,05
11	0	1,1	1,2	1,3	1,35	1,35
12	0				0,35	0,47
13	0				0,57	0,6
14	0				0,55	0,57



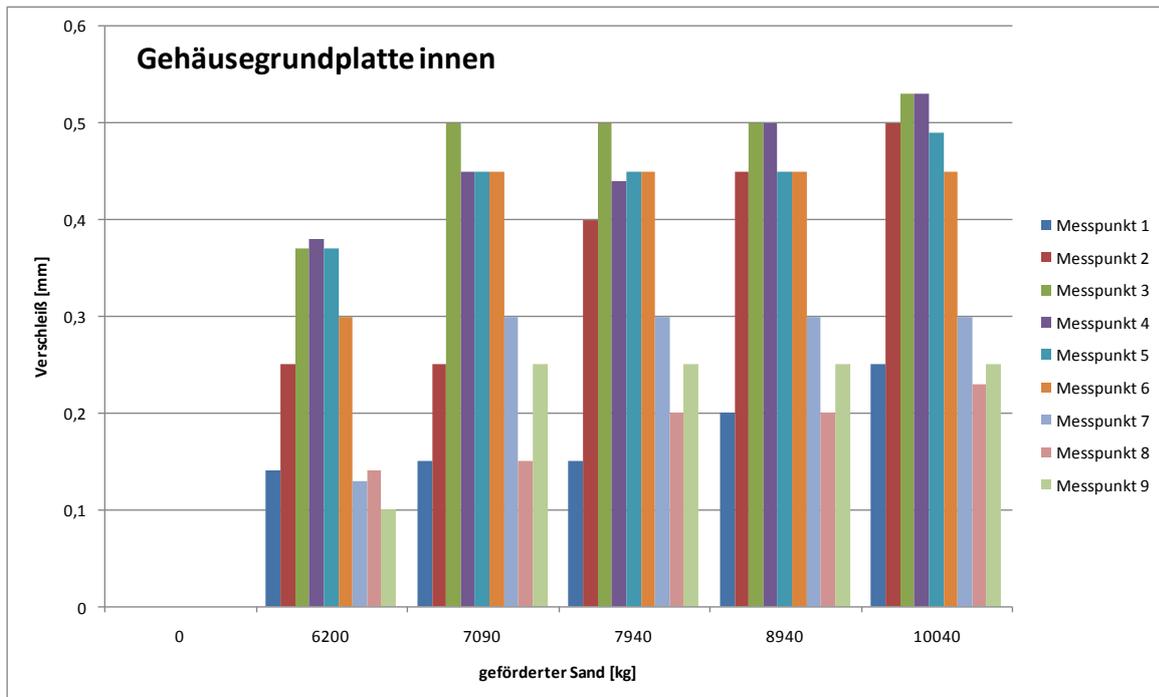
A. 2 Darstellung des Verschleißes Gehäusedeckplatte



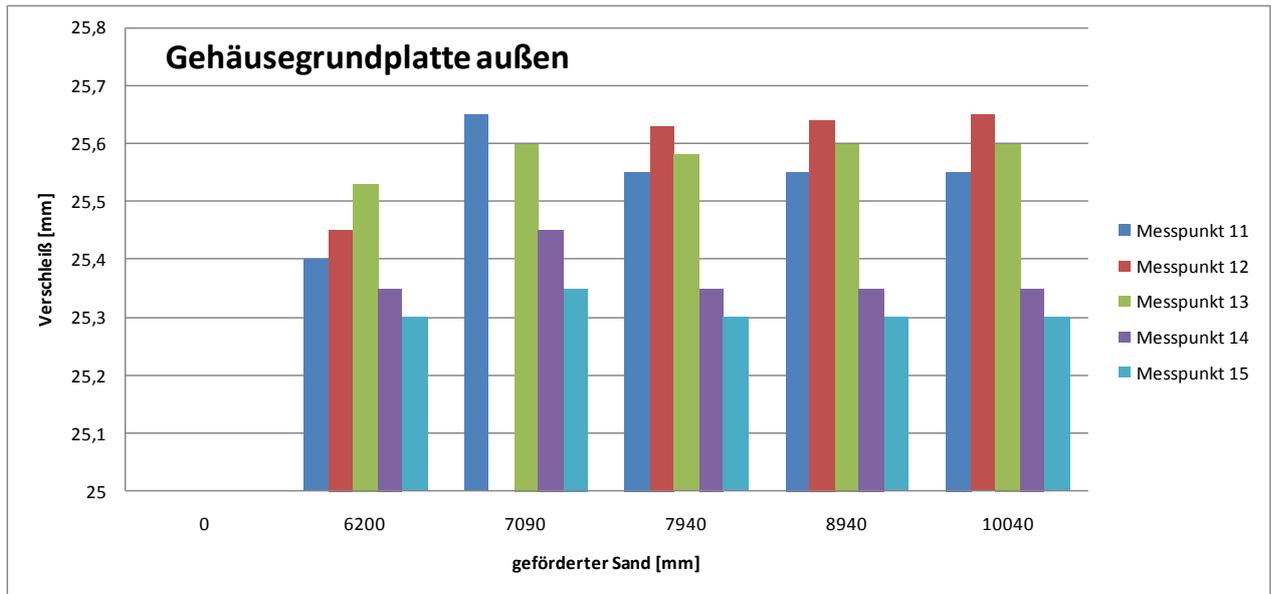
A. 3 Messpunkte Gehäusegrundplatte

Tabelle A. 2 Messungen Gehäusegrundplatte

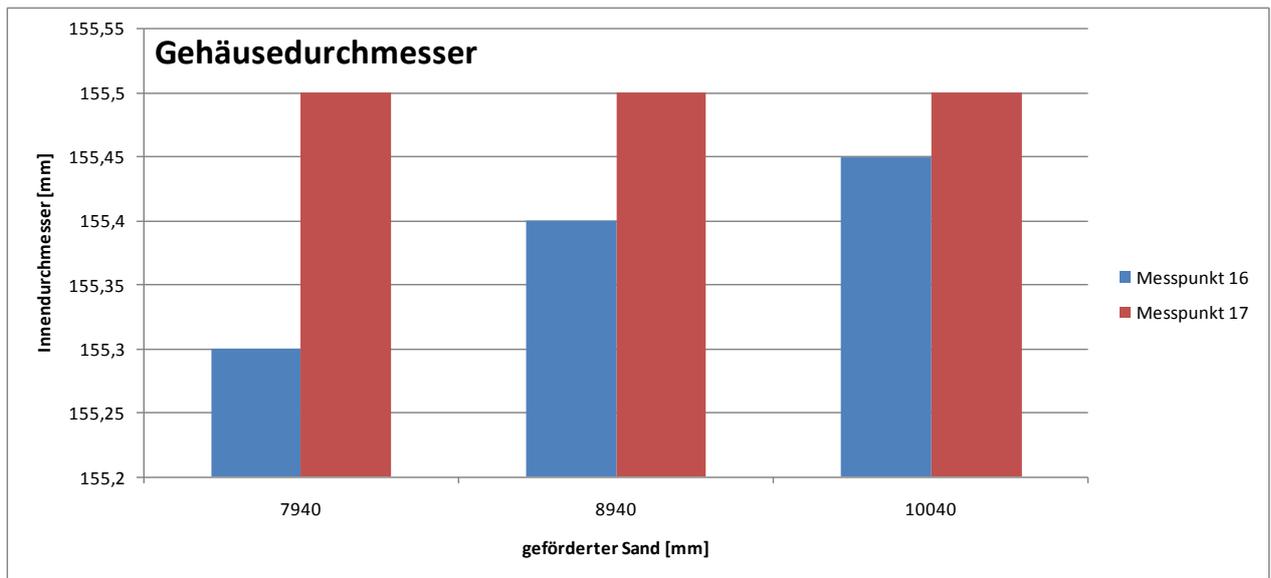
Messpunkt	Verschleißmessung nach geförderter Sandmenge [kg]					
	0	6200	7090	7940	8940	10040
1	0	0,14	0,15	0,15	0,2	0,25
2	0	0,25	0,25	0,4	0,45	0,5
3	0	0,37	0,5	0,5	0,5	0,53
4	0	0,38	0,45	0,44	0,5	0,53
5	0	0,37	0,45	0,45	0,45	0,49
6	0	0,3	0,45	0,45	0,45	0,45
7	0	0,13	0,3	0,3	0,3	0,3
8	0	0,14	0,15	0,2	0,2	0,23
9	0	0,1	0,25	0,25	0,25	0,25
10	0	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3
11	0	25,4	25,65	25,55	25,55	25,55
12	0	25,45		25,63	25,64	25,65
13	0	25,53	25,6	25,58	25,6	25,6
14	0	25,35	25,45	25,35	25,35	25,35
15	0	25,3	25,35	25,3	25,3	25,3
16	0			155,3	155,4	155,45
17	0			155,5	155,5	155,5



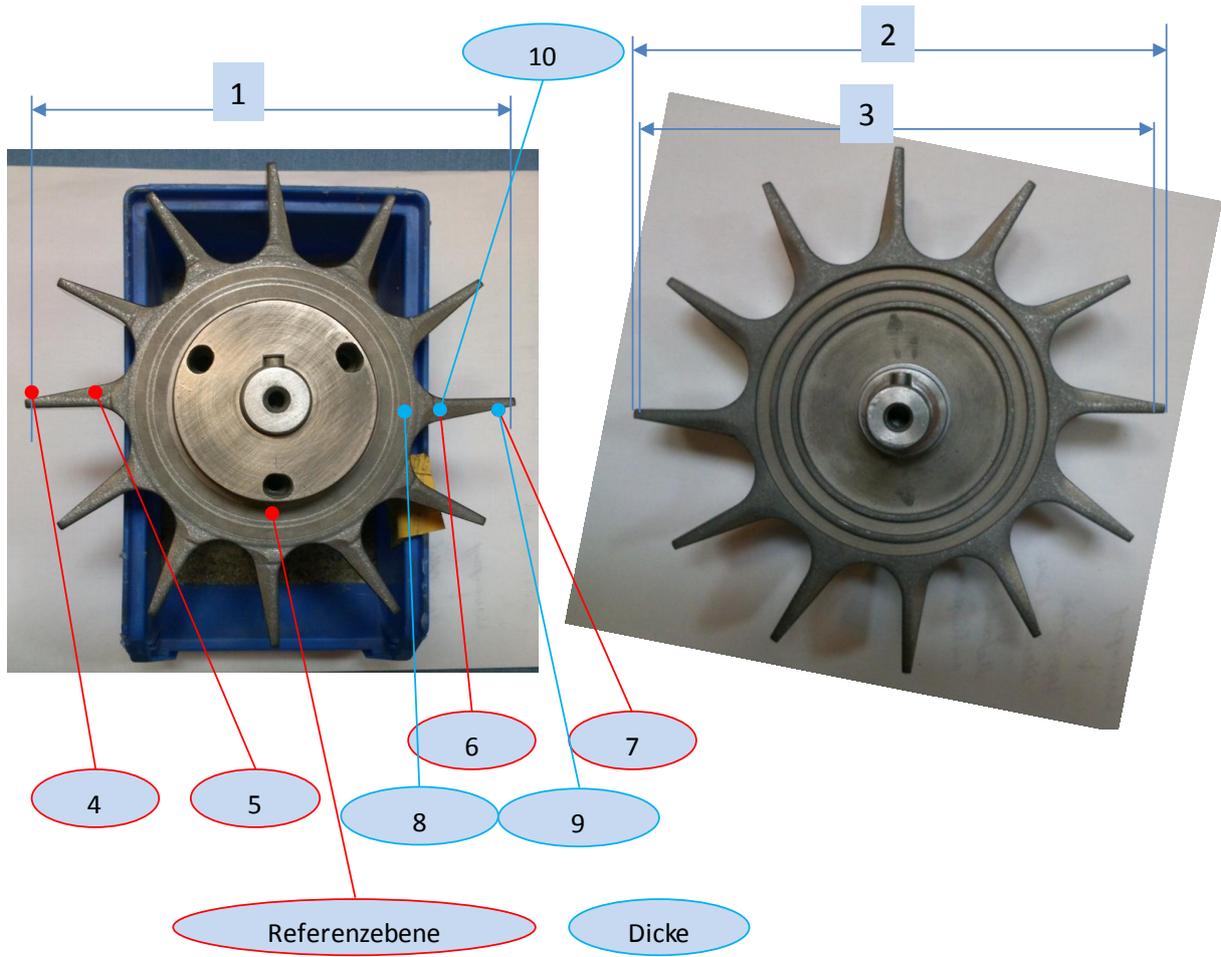
A. 4 Darstellung der Messungen Gehäusegrundplatte (Messpunkt 1 -9)



A. 5 Darstellung der Messungen Gehäusegrundplatte (Messpunkt 11 -15)



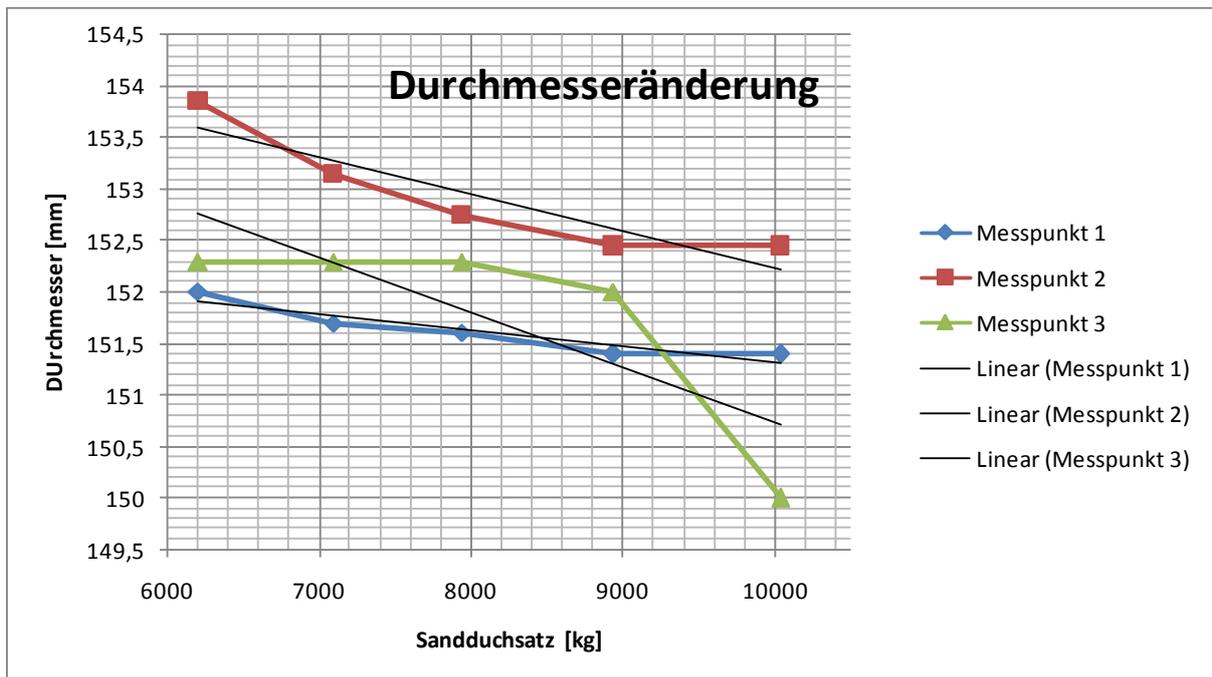
A. 6 Darstellung der Messungen Gehäusegrundplatte (Messpunkt 16 -17)



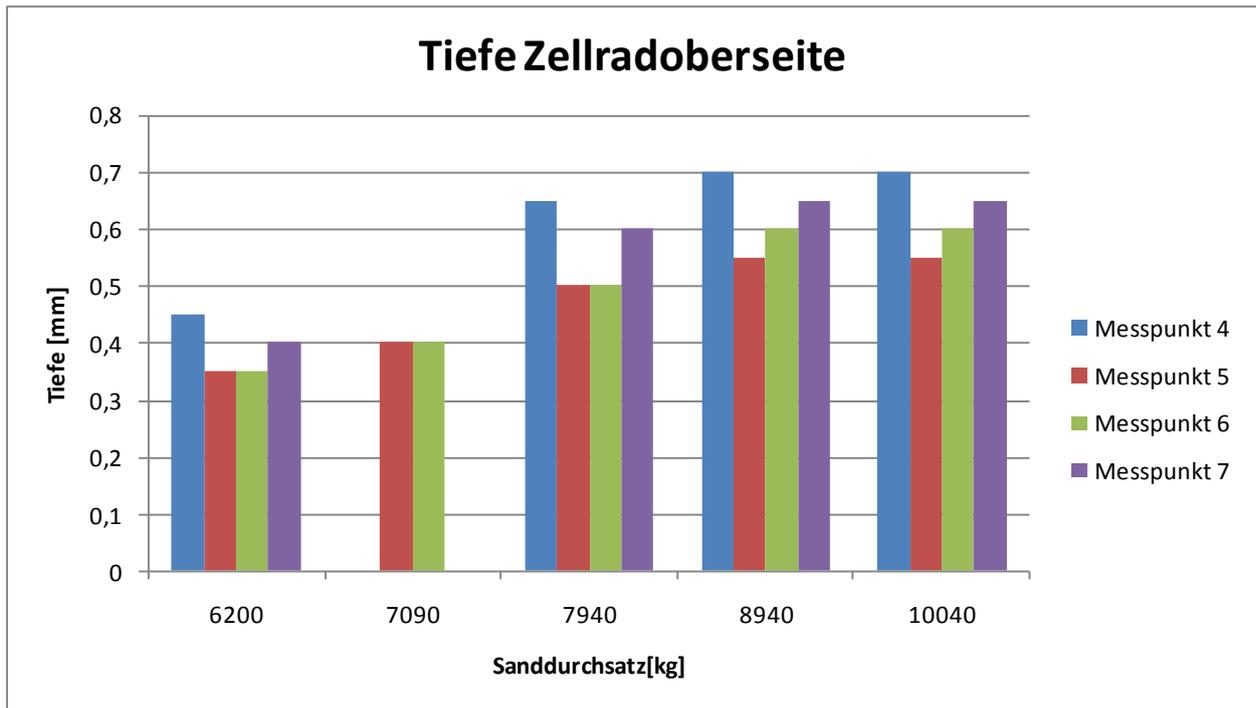
A. 7 Messpunkte Zellrad

Tabelle A. 3 Messungen Zellrad

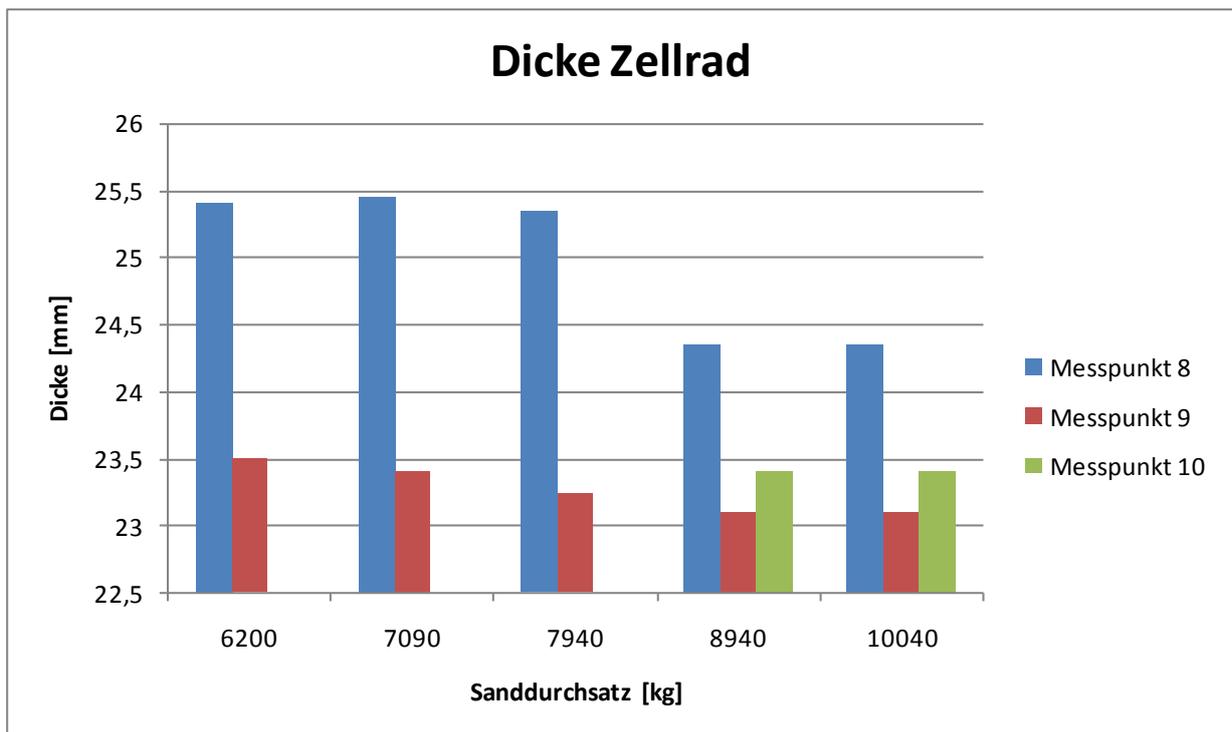
Messpunkt	Verschleißmessung [mm] nach geförderter Sandmenge [kg]				
	6200	7090	7940	8940	10040
1	152	151,7	151,6	151,4	151,4
2	153,85	153,15	152,75	152,45	152,45
3	152,3	152,3	152,3	152	150
4	0,45		0,65	0,7	0,7
5	0,35	0,4	0,5	0,55	0,55
6	0,35	0,4	0,5	0,6	0,6
7	0,4		0,6	0,65	0,65
8	25,4	25,45	25,34	24,35	24,35
9	23,5	23,4	23,24	23,1	23,1
10				23,4	23,4



A. 8 Darstellung Verschleißmessung Zellrad (Messpunkt 1 – 3)

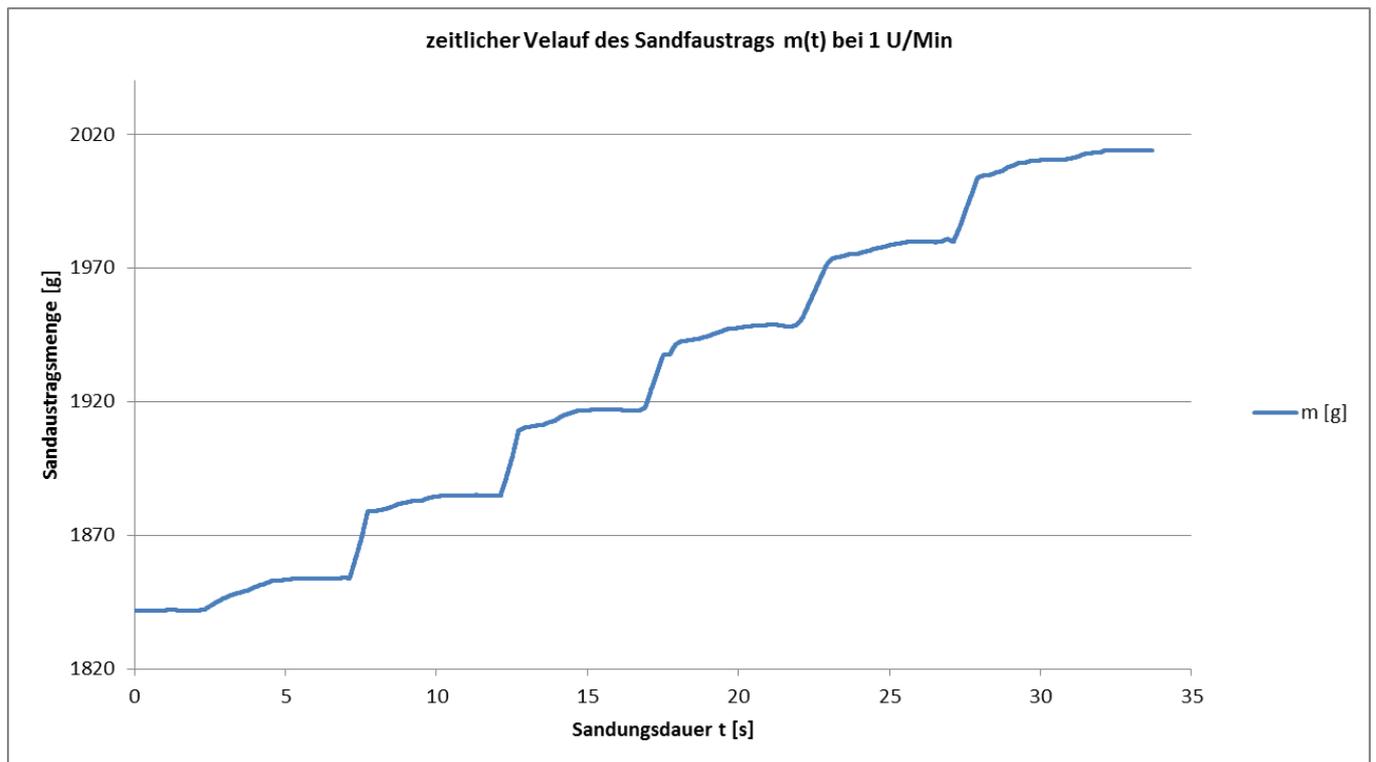


A. 9 Darstellung Verschleißmessung Zellrad (Messpunkt 4 – 7)

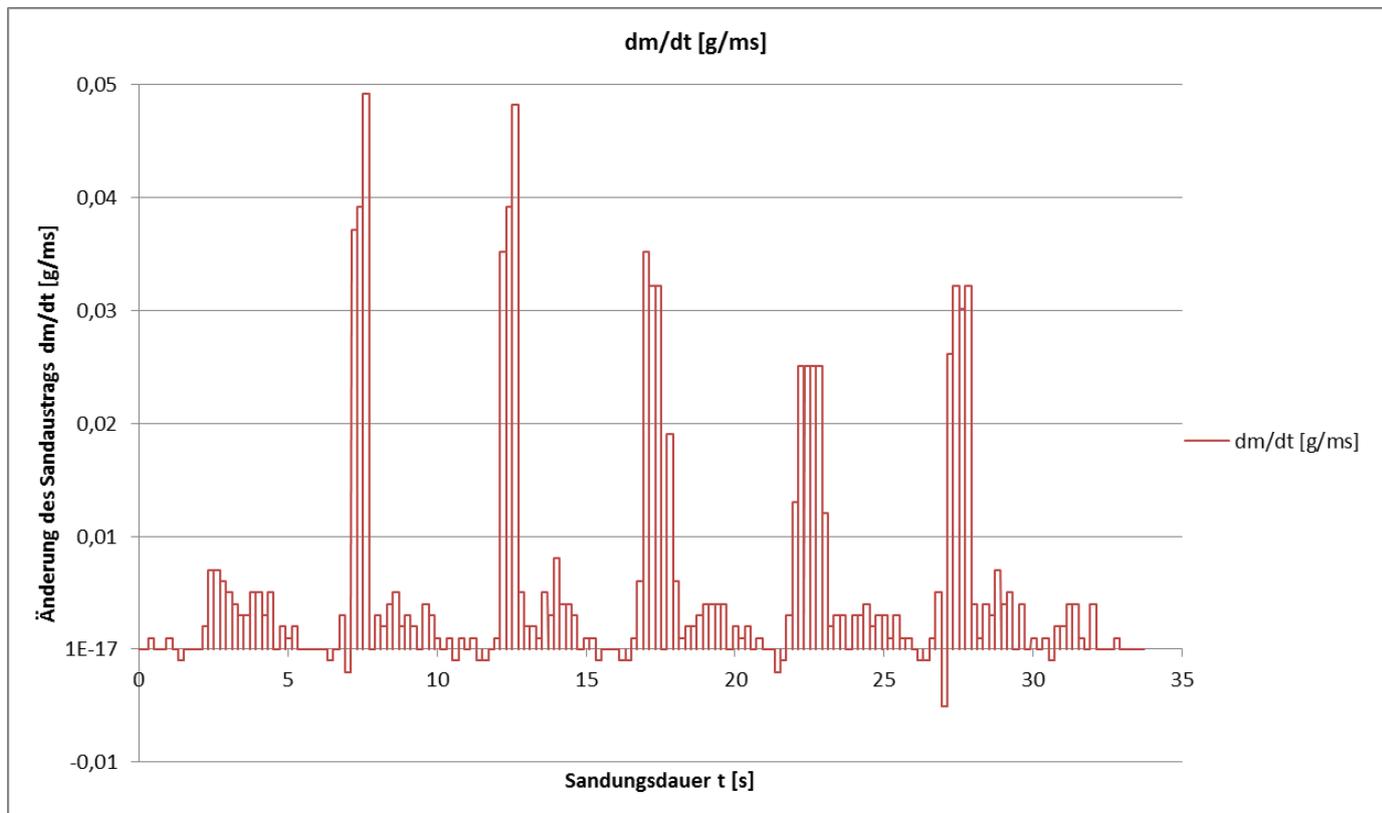


A. 10 Darstellung Verschleißmessung Zellrad (Messpunkt 8 – 10)

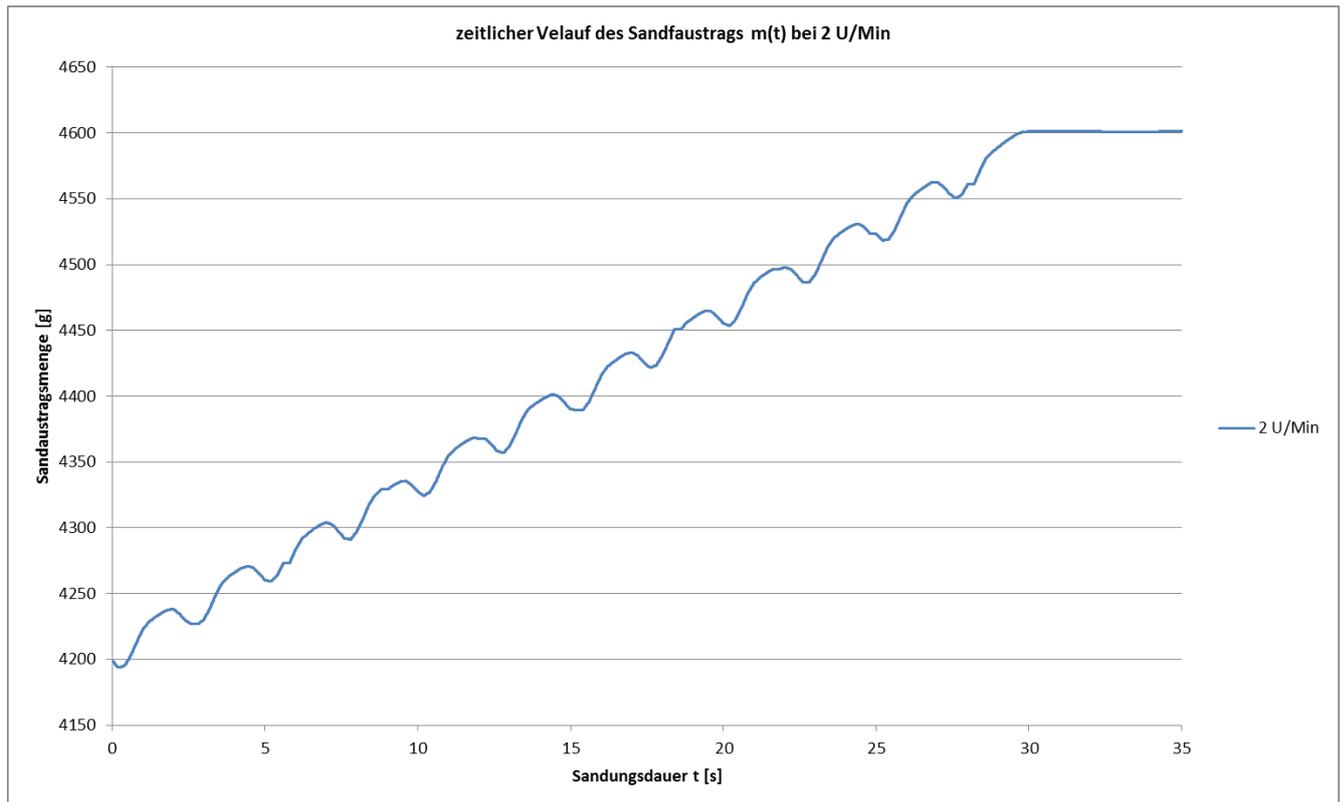
[A2] Massenstrom $\dot{m}(t)$ und $d\dot{m}(t)/dt$



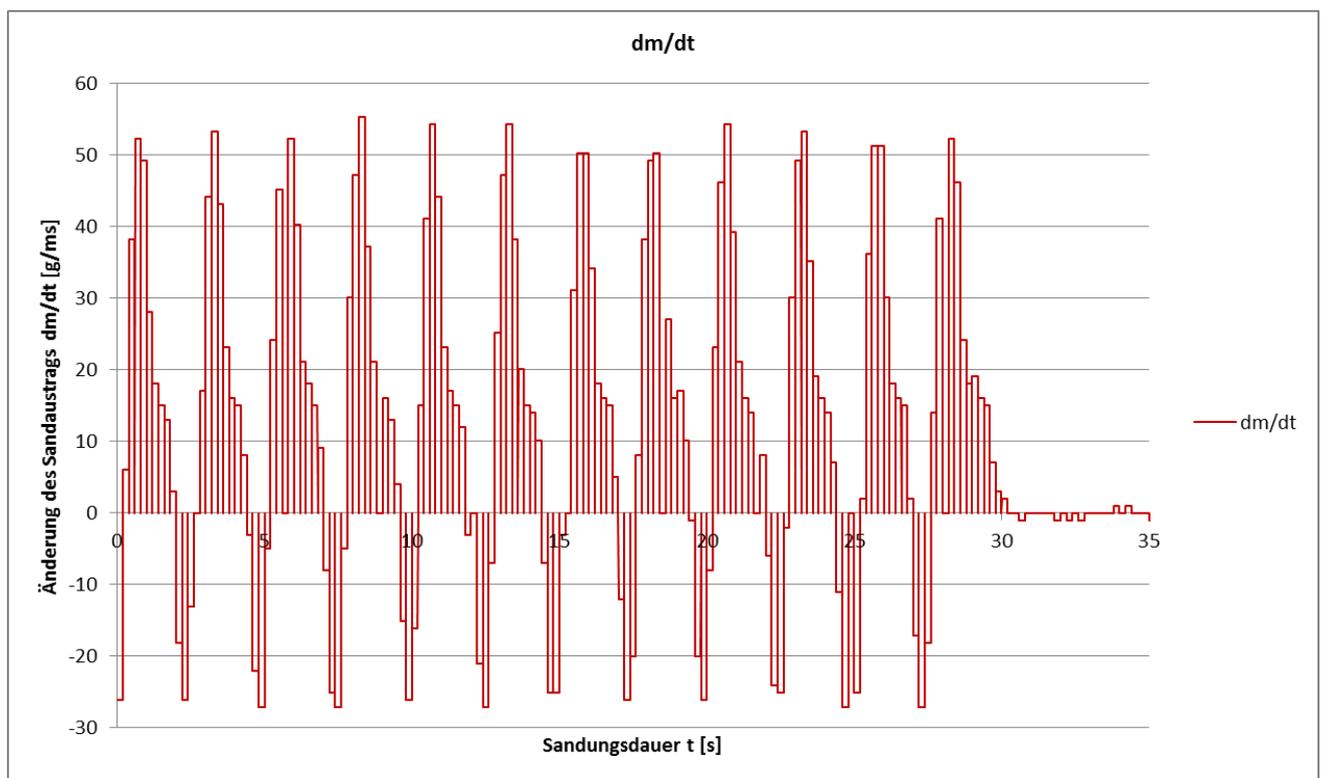
A. 11 $\dot{m}(t)$ während eines Sandungsvorgangs bei 1 U/Min



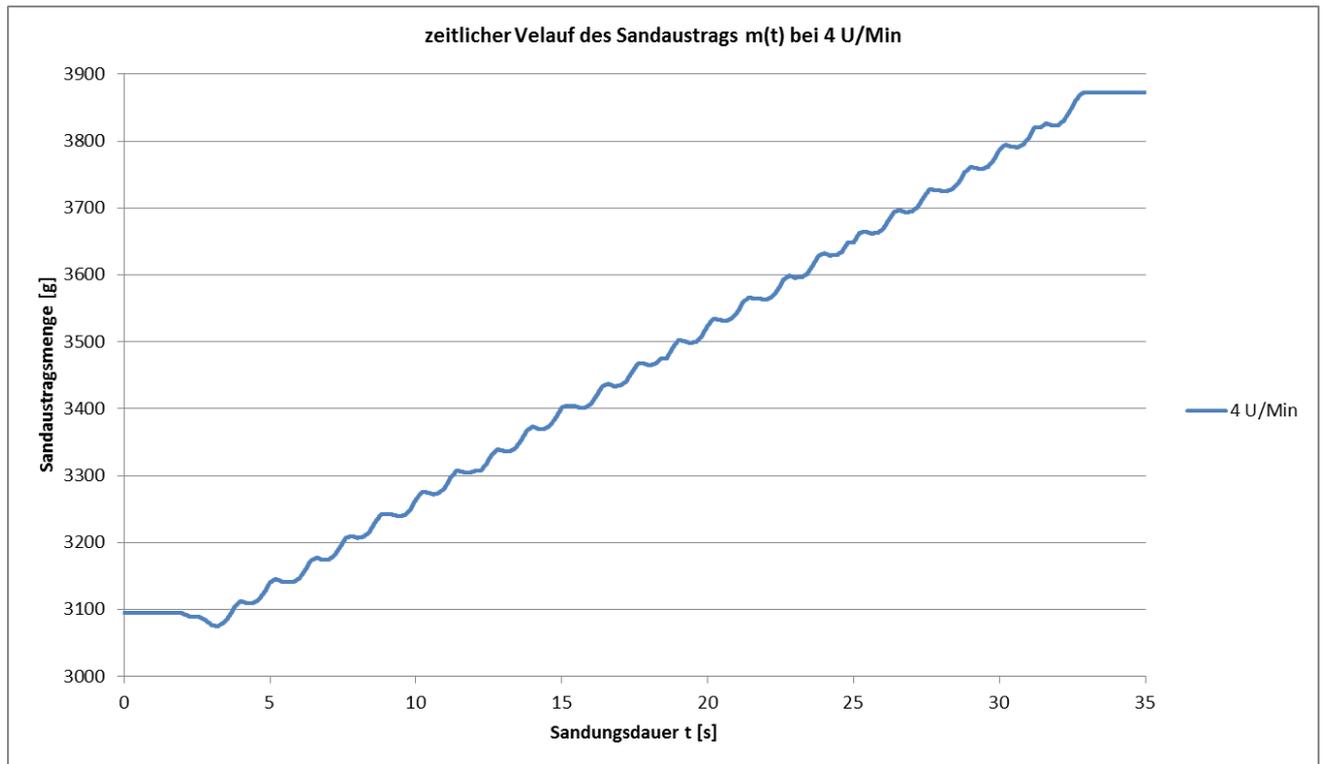
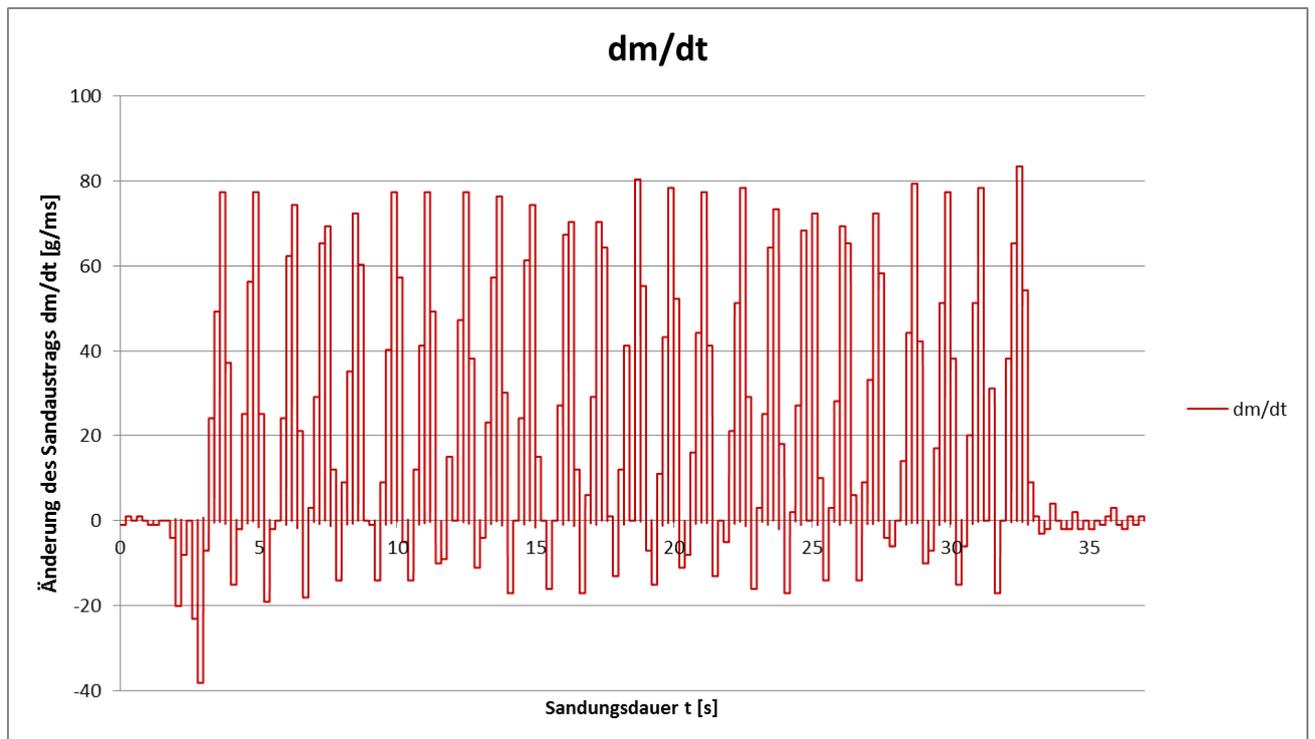
A. 12 $d\dot{m}(t)/dt$ während eines Sandungsvorgangs bei 1 U/Min

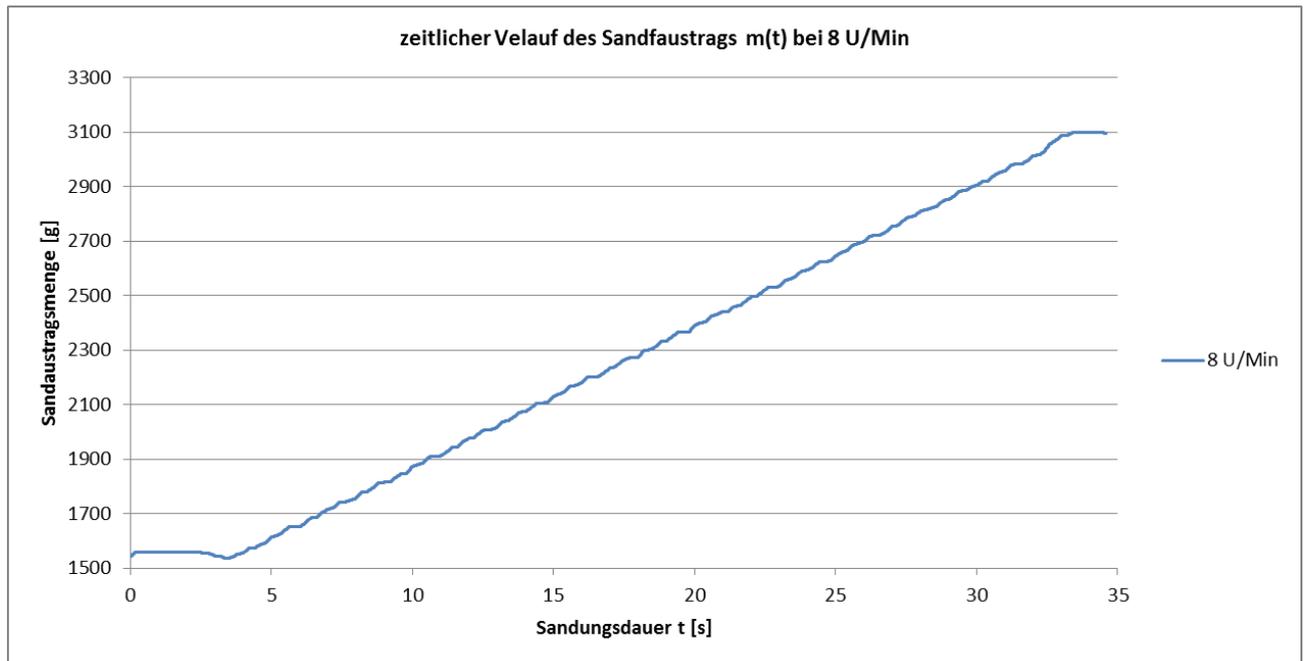


A. 13 $m(t)$ während eines Sandungsvorgangs bei 2 U/Min

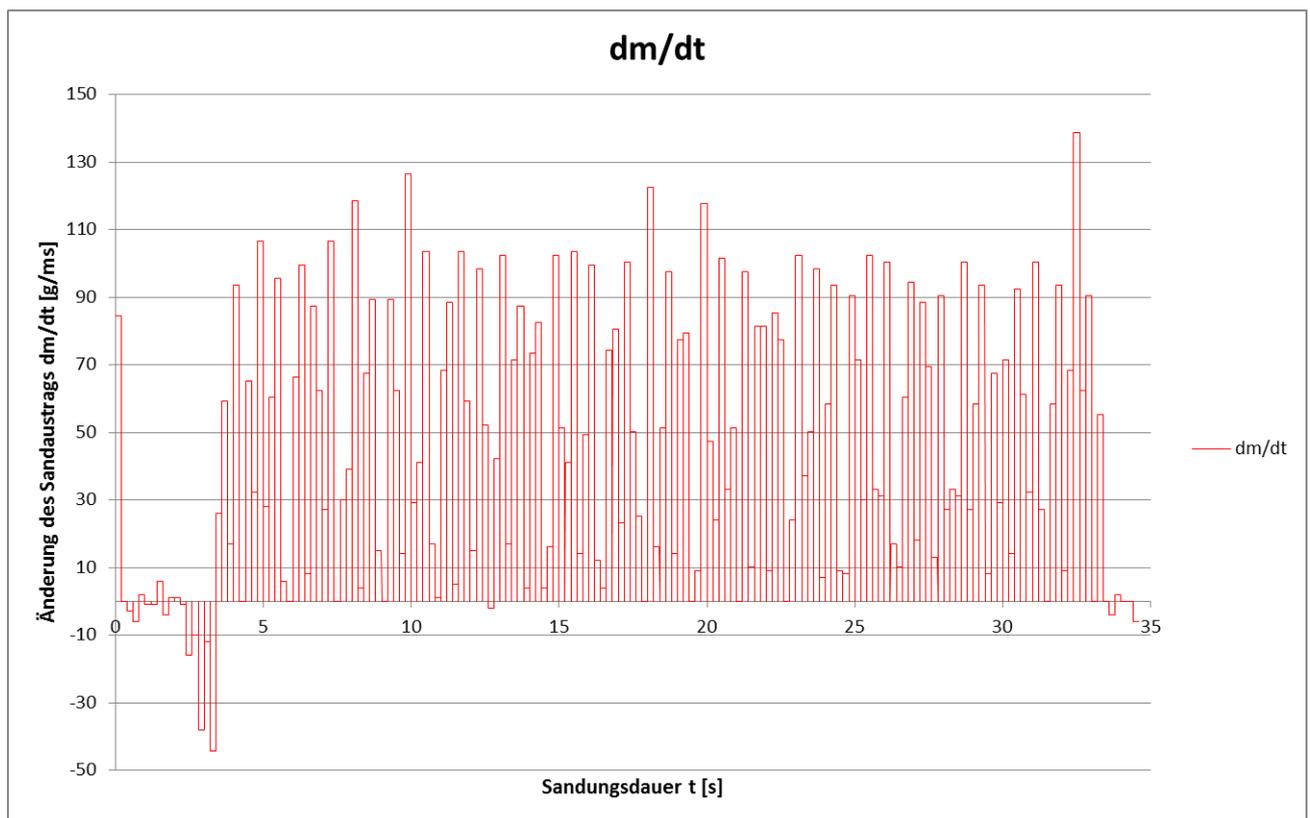


A. 14 $dm(t)/dt$ während eines Sandungsvorgangs bei 2 U/Min

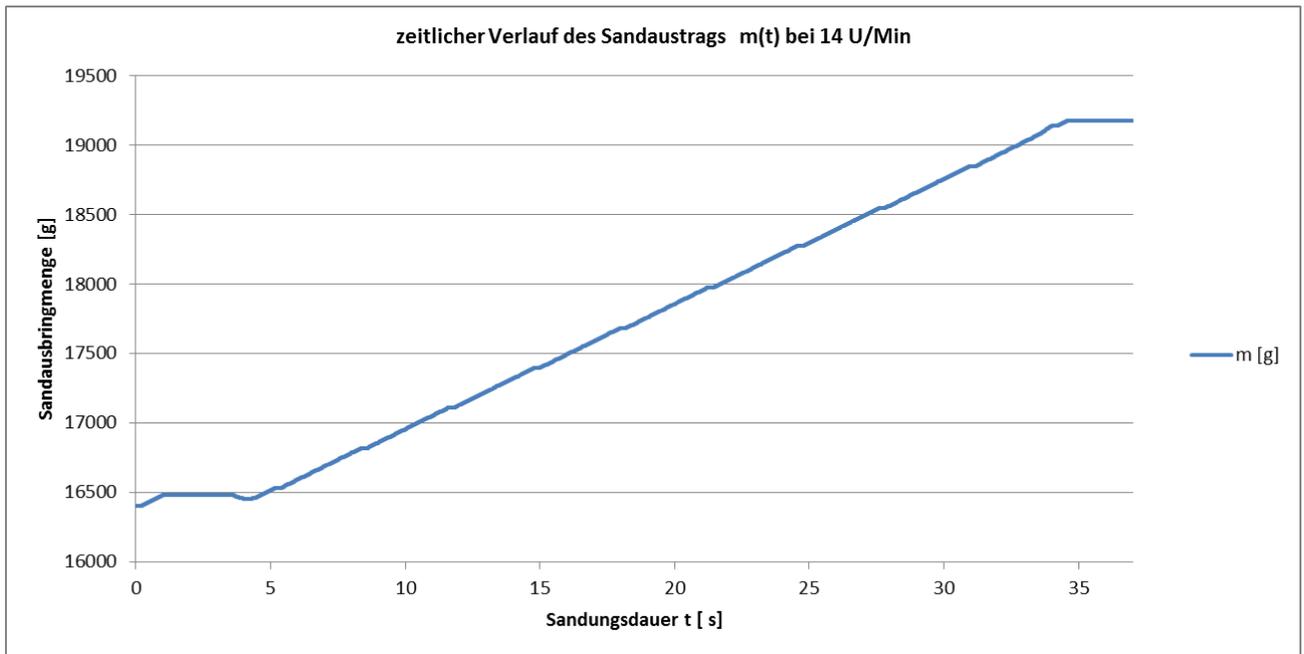
A. 15 $\dot{m}(t)$ während eines Sandungsvorgangs bei 4 U/MinA. 16 $\ddot{m}(t)/dt$ während eines Sandungsvorgangs bei 4 U/Min



A. 17 $\dot{m}(t)$ während eines Sandungsvorgangs bei 8 U/Min



A. 18 $dm(t)/dt$ während eines Sandungsvorgangs bei 8 U/Min



A. 19 $\dot{m}(t)$ während eines Sandungsvorgangs bei 14 U/Min



A. 20 $\dot{m}(t)/dt$ während eines Sandungsvorgangs bei 14 U/Min

[A3] Datenblätter



Datenblatt

Quarzsand ME 0,71 - 1,6 mm

Quarzsand ist ein aufbereiteter natürlicher Rohstoff. Der Quarzsand wird attritiert, gewaschen, hydroklassiert, gesiebt und ist von Kalk und organischen Verunreinigungen befreit. Durch laufende Kontrollen garantieren wir eine hohe und gleichmäßige Qualität.

Lieferform : trocken (feuertrocknet)
lose, abgesackt in PE Säcken, foliert auf Palette
Big Bags

Korngrößenverteilung

Körnung in mm	Siebrückstand in Gew.-%		Siebdurchgang in %
	Richtwert	Toleranz	Richtwert
2,00		max.5	100
1,60	3		97
1,40	13	min.90	84
1,25	3		81
1,00	48		33
0,90	12		21
0,80	13		8
0,71	4		4
0,50	3	max.5	1
<	1		

Chemische Analyse (Gew.-%)

SiO ₂	> 96,0
------------------	--------

Physikalische Eigenschaften

Schüttgewicht	1,5 t/m ³
Dichte	2,65 t/m ³
Härte	7 Mohs
Restfeuchte	< 0,2 %

Quarzsand ist ein aufbereiteter natürlicher Rohstoff. Alle Daten sind Richtwerte mit vorkommens- und produktionsbedingter Toleranz. Sie dienen nur zur Beschreibung und stellen keine zugesicherten Eigenschaften dar. Größere und feinere Anteile sind in Spuren möglich. Dem Benutzer obliegt es, die Tauglichkeit für seinen Verwendungszweck zu prüfen. Wir geben auf Wunsch gerne Auskunft über Toleranzbreiten und anwendungstechnische Erfahrungen. Verkäufe erfolgen gemäß uns Telefon (02752) 50040-0 Lieferbedingungen. Telefax (02752) 50040-30

QUARZWERKE Österreich GmbH
Wachbergstr. 1
A-3390 Melk
www.quarzwerte.at

0528

04/07

A. 21 Datenblatt des verwendeten Sandes

Technische Daten der Waage [12]:**Hersteller:** Kern**Typbezeichnung:** DS36k0.2

Ablesbarkeit	0,2 g
Wägebereich	36 kg
Reproduzierbarkeit	0,5 g
Linearität	+/- 1,5 g
Kleinstes Teilegew.	1,5 g
Wägeplatte	310 x 310 mm
Anzeigegerät	200 x 100 x 55 mm
Gewicht	7,5 kg

A. 22 Datenblatt der verwendeten Waage

Literaturverzeichnis

- [1] Knorr Bremse, Sandungssysteme, Mödling: Knorr- Bremse, 2002.
- [2] Knorr Bremse, Lastenheft: mechanischer Dosierer, Mödling: Knorr- Bremse, 2013.
- [3] D. Schulze, Pulver und Schüttgüter: Fließeigenschaften und Handhabung, Berlin: Springer- Verlag, 2006.
- [4] H. Martin, P. Römisch und A. Weidlich, Materialflusstechnik- Auswahl und Berechnung von Elementen und Baugruppen der Fördertechnik, 9. Hrsg., Wiesbaden: Vieweg- Verlag, 2008.
- [5] T. Finkbeiner, Der Mechanismus der Zellradschleuse für Schüttgut, Ditzingen: Verein deutscher Ingenieure, 1974.
- [6] H. Czichos und K.-H. Habig, Tribologie- Handbuch - Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik, 3. Edition Hrsg., Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2010.
- [7] K. Sommer, R. Heinz und J. Schöfer, Verschleiß metallischer Werkstoffe- Erscheinungsformen sicher beurteilen, Wiesbaden: Vieweg & Teubner Verlag, 2010.
- [8] Quarzwerke Österreich GmbH, Datenblatt Quazsand ME 0,71- 1,6 mm, Melk: www.Quarzwerke.at, 2014.
- [9] Oriental Motor, BLF- Series RoHS- Compliant Brushless DC Motor an Driver Package with Digital Operator, Dallas: Oriental Motor U.S.A. COORP. , 2005.
- [10] K. Siebertz, d. van Bebber und T. Holzkirchen, Statistische Versuchsplanung, Berlin: Springer Verlag, 2010.
- [11] „pkelektronik,“ Kern, [Online]. Available: <http://www.pkelektronik.com/kern-plattformwaage-ds-36k0-2-ablesbarkeit-0-2g-max-36-1kg.html>. [Zugriff am 30 12 2014].
- [12] H.-J. Mittag, Statistik- eine interaktive Einführung, Berlin: Springer- Verlag, 2011.
- [13] F. P. León und K. Uwe, Messtechnik- Systemtheorie für Ingenieure und Informatiker, 9. Hrsg., Heibelberg: Springer- Verlag, 2012.

- [14] Oriental Motor, Operating Manual- Brushless DC Motor and Driving Manual BLF Series, Oriental Motor LTD., 2010.
- [15] D. Muhs, H. Wittel, D. Jannasch und J. Voßiek, Roloff/Matek Maschinenelemente, 18.Edition Hrsg., Wiesbaden: Vieweg- Verlag, 2007.
- [16] A. Werske, „Hochgeschwindigkeitszüge.com,“ 2 5 2009. [Online]. Available: <http://www.hochgeschwindigkeitszuege.com>. [Zugriff am 5 10 2014].
- [17] Knorr Bremse AG, *internes Dokument*, Mödling, 2006.
- [18] B. Breuer, Bremsenhandbuch- Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik, 4. Edition Hrsg., Wiesbaden: Springer Vieweg- Verlag, 2012.
- [19] P. von Böckh und C. Saumweber, Fluidmechanik- Einführendes Lehrbuch, 3. Edition Hrsg., Berlin: Springer Vieweg- Verlag, 2013.
- [20] R. Pieber, Diplomarbeit - Konstruktion, Aufbau, Überprüfung und Verbesserung einer Sandförderanlage mit mechanischer Dosiereinheit, Mödling, 2012.
- [21] Knorr Bremse, Messprotokoll Versuchsentleerung mechanischer Dosierer, Mödling, 2014.
- [22] S. Schamberger, Diplomarbeit- die Wirkung von Sand auf den Kontakt zwischen Rad und Schiene, Mödling: Technische Universität Wien, 2012.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Veränderung des Reibkoeffizienten aufgrund von Witterungsbedingungen (1 S. 12)	4
Abbildung 2.1 Sandungsanlage am Drehgestell(1 S. 6).....	8
Abbildung 2.2 Aufbau einer Sandungsanlage.....	9
Abbildung 2.3 a. Brückenbildung durch Verkeilen einzelner Partikel; b. Brückenbildung des Schüttgutes aufgrund von Druckverfestigung; c. Schachtbildung(3 S. 302)	11
Abbildung 2.4 Größenverteilung des Korndurchmessers [mm] laut Bahnnorm BN918224:2000-5 (2 S. 7).....	12
Abbildung 3.1 pneumatische Sandungsanlage nach dem Unterdruckprinzip (1 S. 24)	15
Abbildung 3.2 Schema einer Überdruck- ZRS (1 S. 36).....	16
Abbildung 3.3 Schema eines Schneckenförderers(4 S. 241)	18
Abbildung 3.4: Schema einer Vertikal- ZRS (5 S. 6)	20
Abbildung 3.5: Schema einer Horizontal-ZRS (3 S. 353).....	20
Abbildung 3.6: Draufsicht und ISO- Ansicht der Horizontal- ZRS.....	23
Abbildung 3.7: Schnitt A-A Horizontal- ZRS.....	23
Abbildung 3.8 Drehmomentübertragung beim Vukollanzellrad	26
Abbildung 3.9 Vulkollanzellrad.....	26
Abbildung 3.10 Verschleiß der Mischerschaufelkante eines Modellbetonmischers in Abhängigkeit der Korngröße des Mischgutes (trockener Sand) bei konstantem Spalt (6 S. 402).....	31
Abbildung 3.11: Ausführungsmöglichkeiten der Passung Gehäuse- Zellrad	32
Abbildung 3.12 Materialverhalten eines Elastomers bei Drei-Körper-Abrasivverschleiß	33
Abbildung 3.13 Schnitt durch Fördereinheit.....	34
Abbildung 3.14 Anschlussmaße des verwendeten Motors (8 S. 14)	35
Abbildung 3.15 Zulässige Drehmomente in Abhängigkeit von der Betriebsgeschwindigkeit (8 S. 14)	35
Abbildung 4.1 Prüfstands Aufbau.....	38
Abbildung 4.2 Schematische Darstellung eines zu untersuchenden Systems	39
Abbildung 4.3 Ablauf einer Sandkastenentleerung	43
Abbildung 4.4 Erfassung der Messwerte eines Entleervorgangs	45
Abbildung 4.5 Motordrehmoment in Abhängigkeit des Lastfaktors (11 S. 66)	47
Abbildung 5.1 Sandaustragskennlinie.....	50
Abbildung 5.2 Reproduzierbarkeit der Sandausbringmenge in Abhängigkeit vom Sanddurchsatz	51

Abbildung 5.3 Streuung der ausgebrachten Sandmenge 3σ in Abh. Des Sanddurchsatzes bei 1U/Min.....	53
Abbildung 5.4 Streuung der ausgebrachten Sandmenge 3σ in Abh. Des Sanddurchsatzes bei 2U/Min.....	53
Abbildung 5.5 Streuung der ausgebrachten Sandmenge 3σ in Abh. Des Sanddurchsatzes bei 4U/Min.....	54
Abbildung 5.6 Streuung der ausgebrachten Sandmenge 3σ in Abh. Des Sanddurchsatzes bei 8U/Min.....	54
Abbildung 5.7 Streuung der ausgebrachten Sandmenge 3σ in Abh. Des Sanddurchsatzes bei 14U/Min.....	55
Abbildung 5.8 Reproduzierbarkeit der Sandausbringmenge in Abhängigkeit des Füllstandes [1 – 2 U/Min].....	56
Abbildung 5.9 Reproduzierbarkeit der Sandausbringmenge in Abhängigkeit des Füllstandes [1 – 2 U/Min].....	57
Abbildung 5.10 Boxplot Motordrehmoment.....	62
Abbildung 5.11 Drehmoment in Abhängigkeit des Sanddurchsatzes.....	63
Abbildung 5.12 Boxplotvergleich Motordrehmoment.....	64
Abbildung 5.13 Verschleißmuster Einlass Gehäusedeckplatte.....	66
Abbildung 5.14 Verschleißmuster Gehäusegrundplatte und Gehäuse.....	68
Abbildung 5.15 Verschleißmuster Zellrad.....	68
Abbildung 5.16 Verschleiß Vulkollanzellrad (links) und keramikbeschichtete Gehäusegrundplatte (rechts) nach 350 kg.....	70
Abbildung 5.17 Entladungsblitz zwischen Vulkollan-ZRS und Ejektor.....	71
Abbildung 5.18 Verschleißmuster Schlauchaufnahme nach 2000 kg Fördermenge.....	72
Abbildung 5.19 Sandsströmungsverlauf durch Lavalrohr.....	73
Abbildung 5.20 Abrieb Lavalrohrseitiger Innendurchmesser Schlauchaufnahme.....	73
Abbildung 5.21 Verschleißmessungen an der Lavaldüse in mm.....	74
Abbildung 5.22 Verschleiß an der Einspritzdüse.....	74
Abbildung 5.23 Prüfaufbau pneumatische Sandungsanlage an Wagenende 1 (WE1) und Wagenende 2 (WE2).....	76
Abbildung 5.24 Sandaustragskennlinie der pneumatischen Anlage.....	77
Abbildung 5.25 Entleerkurve der pneumatischen Sandungsanlage bei Druck p_1	78
Abbildung 5.26 Entleerkurve der pneumatischen Sandungsanlage bei Druck p_2	78
Abbildung 5.27 paarweiser Vergleich der technischen Kriterien.....	80
Abbildung 5.28 technisch- wirtschaftliche Bewertung nach VDI 2225.....	81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1 Stückliste der Stahl- ZRS.....	25
Tabelle 3.2 Stückliste Vulkollan- ZRS.....	27
Tabelle 4.1 Eine Drehzahlvariation: Dauer der Sandkastenentleerungen in Abhängigkeit von der Drehzahl.....	41
Tabelle 5.1 Werte der Sandaustragskennlinie	50
Tabelle 5.2 Ansprechverhalten der Stahl- ZRS.....	59
Tabelle 5.3 Ergebnisse der Schwingprüfung der ZRS	61
Tabelle 5.4 Spiel Gehäuse- Zellrad in Abhängigkeit des Sanddurchsatzes [kg].....	69
Tabelle 5.5 Spiel Deckplatte- Zellrad.....	69
Tabelle 5.6 Streuung der pneumatischen Sandungsanlage in den Arbeitspunkten.....	77
Tabelle 5.7 Punktbewertungsskala nach VDI 2225.....	79
Tabelle 5.8 Bestimmung der technischen Wertigkeit von ZRS und pneumatischem Dosierer	80
Tabelle 5.9 Bestimmung der wirtschaftlichen Wertigkeit von ZRS und pneumatischem Dosierer	81

Abkürzungsverzeichnis

Abh.	Abhängigkeit
Beschl.	Beschleunigung
bzw.	beziehungsweise
ca.	cirka
d.h.	das heißt
eff.	effektiv
etc.	et cetera
g	Gramm
HV	Härte nach Vickers
Kg	Kilogramm
Min.	Minute
Sek.	Sekunde
u.a.	unter anderem
U	Umdrehungen
vgl.	vergleiche
ZRS	Zellradschleuse