

Transport- und Verdichtungsprozesse des Sandes beim Vollformgießen

Von der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik

der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

Dr.-Ing.
(Kurzform)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Ljudmila Sacharuk

geboren am 28.10.1971 in Ratno, Ukraine

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Bast, Freiberg
Prof. Dr.-Ing. i. R. Wolfgang Schulle, Freiberg
Dr.-Ing. Carsten Kuhlgatz, Hannover

Tag der Verleihung: 19.12.2001

Die vorliegende Arbeit wurde am Institut für Maschinenbau der TU Bergakademie Freiberg, Lehrstuhl für Hütten-, Gießerei- und Umformmaschinen während des Graduiertenstudiums am Graduiertenkolleg „Transportvorgänge in porösen Systemen der Verfahrens- und Geotechnik“ angefertigt.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. J. Bast vom Lehrstuhl für Hütten-, Gießerei- und Umformmaschinen (HGUM) für die Betreuung sowie für seine ständige Unterstützung und Förderung dieser Arbeit.

Desweiteren danke ich allen Mitarbeitern des HGUM und des Gießerei-Institutes für die freundliche Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit und für die nützlichen Hinweise, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	5
1.1 Vollformgießverfahren und die wichtigsten Verfahrensschritte.....	5
1.2 Varianten des Vollformgießverfahrens	8
1.3 Vorteile des Vollformgießens in ungebundenem Sand	9
1.4 Nachteile des Vollformgießens in ungebundenem Sand	11
2 Problem- und Zielstellung.....	13
3 Literaturlauswertung.....	15
3.1 Vibrationsverdichtung der Formstoffe für das Vollformgießverfahren	15
3.2 Wichtige Einflussparameter bei der Vollformherstellung.....	20
3.2.1 Stoffparameter	21
3.2.2 Maschinenparameter.....	22
3.2.3 Prozessparameter.....	23
3.2.3.1 Vibrationsrichtung.....	24
3.2.3.2 Vibrationsdauer	24
3.2.3.3 Amplituden und Frequenzen	25
3.3 Messungen der Vibrationsparameter am Formbehälter und im Sand..	27
4 Entwicklung und Bau von Sensoren zur Untersuchung der Verdich- tungseigenschaften.....	29
4.1 Messprinzip der Sensoren.....	29
4.2 Bestandteile des Messsystems	30
4.3 Eichung der Sensoren.....	31
5 Grundlagenuntersuchungen zum Verhalten des Sandes unter Vibra- tionseinwirkung	37
5.1 Mathematische Beschreibung des Sandverhaltens unter Vibrations- einwirkung	40
5.1.1 Bewegung des Sandes im Zustand der Pseudoverflüssigung ...	41
5.1.2 Bewegung des Sandes im Zustand des Vibrokochens	44

5.2	Versuche mit der servohydraulischen Prüfmaschine.....	55
5.3	Untersuchung der Sandbewegungen unter Variation der Vibrationsparameter mit der Hochgeschwindigkeitskamera.....	61
5.3.1	Versuchsaufbau	61
5.3.2	Versuchsdurchführung	62
5.3.3	Versuchsauswertung.....	64
5.3.4	Zusammenfassung.....	72
5.4	Untersuchung der Sandfüllung bei zweidimensionaler Vibration.....	74
6	Betriebsuntersuchungen des Sandtransport- und Verdichtungsvermögens beim Vollformgießen	82
6.1	Untersuchungen im Unternehmen „A“ bei vertikaler Vibration und quaderförmigem Behälter.....	83
6.2	Untersuchungen im Unternehmen „B“ bei vertikaler Vibration und rundem Behälter.....	88
6.3	Untersuchungen im Unternehmen „C“ bei horizontaler Vibration	96
6.4	Diskussion der Ergebnisse	98
7	Zusammenfassung.....	101
8	Literaturverzeichnis.....	104

1 Einleitung

Bei der Herstellung von Gussteilen beobachtet man insbesondere in den USA, Japan, Frankreich und Italien einen verstärkten Einsatz des Vollformgießverfahrens, das für geometrisch komplizierte, kernreiche Gussteile bei der Serienproduktion angewendet wird. Es gibt heute 59 Vollform-Gießereien (inkl. der bis heute projektierten Anlagen) in Nordamerika, insgesamt 23 Vollform-Gießanlagen in Europa und 47 Vollform-Gießanlagen in Asien und Australien.

Der größte Teil der produzierten Vollformgusserzeugnisse wird in der Automobilindustrie eingesetzt. Weitere Abnehmer sind Armaturenhersteller und die Elektroindustrie sowie der Bootsmotoren- und Werkzeugbau und die sonstige Industrie [1].

In Deutschland besteht, bezogen auf das Verständnis der Technologie des Vollformgießens, in einigen Punkten noch Nachholbedarf. Dies betrifft nicht nur die Konzeption der Anlagen und der Werkzeuge für die Modellherstellung, sondern auch die Technologie selbst, da bei der Einführung des Verfahrens auf rein empirischem Wege hohes Ausschussrisiko gegeben ist, das die Wirtschaftlichkeit dieser Methode in Frage stellt. Aus diesem Grund macht sich eine wissenschaftliche Durchdringung zwingend erforderlich, um die Vielzahl von Einflussgrößen so einzustellen, dass qualitätsgerechte Gussteile produziert werden können.

1.1 Vollformgießverfahren und die wichtigsten Verfahrensschritte

Die Anwendung von Schaumstoffmodellen für die Herstellung von Kunstgussteilen wurde im Jahr 1958 von H.F. Shroyer erfunden und patentiert [2]. Das Verfahren bestand in der Anfertigung von Schaumstoffmodellen durch mechanische Bearbeitung von Polystyrolblöcken. Diese Modelle besitzen eine geringe Dichte und sie entstehen in einteiligen Formen. Das Einförmigen derartiger Modelle erfolgte in chemisch gebundenen Formstoffen meistens

von Hand. Die Modelle werden beim Gießen durch die Hitze des einströmenden Metalls zersetzt und vergast. Die ersten industriellen Anwendungen des Verfahrens beschränkten sich auf die Herstellung von Einzelteilen und Kleinserien.

In Deutschland wurde das Schroyerpatent vom Unternehmen Grünzweig & Hartmann übernommen und von Wittmoser, A. [3-4] für die industrielle Nutzung weiterentwickelt. Das Verfahren wurde unter dem Namen „Vollformgießen“ bzw. „Full Mold Casting“ bekannt. Herausragende Entwicklungsschritte waren die Verwendung von ungebundenem Sand zum Einformen der Schaumstoffmodelle (Trockensandverfahren) nach den unabhängigen voneinander angemeldeten Patenten von Nellen, H. (1960) [5] und Smith, T.R. (1964) [6] sowie das Unterdruck-Vollformgießverfahren nach Krzyzanowski, E.M. (1968) zur Verfestigung des Formstoffes während des Gießens [7].

Die technische Entwicklung dieses Verfahrens in Richtung Serienfertigung von komplizierten und qualitativ hochwertigen Gussteilen machte es möglich, größere Gussstückzahlen in einem Abguss durch den Zusammenbau mehrerer Modelle zu Modelltrauben zu erhalten. Diese Trauben werden mit einer speziellen, feuerfesten Schlichte umgeben und in einem Formbehälter mit ungebundenem Sand eingebettet. Das Einformen der Modelltraube erfolgt durch Vibrieren des Formbehälters.

Die wichtigsten Verfahrensschritte sind im Bild 1 gezeigt.

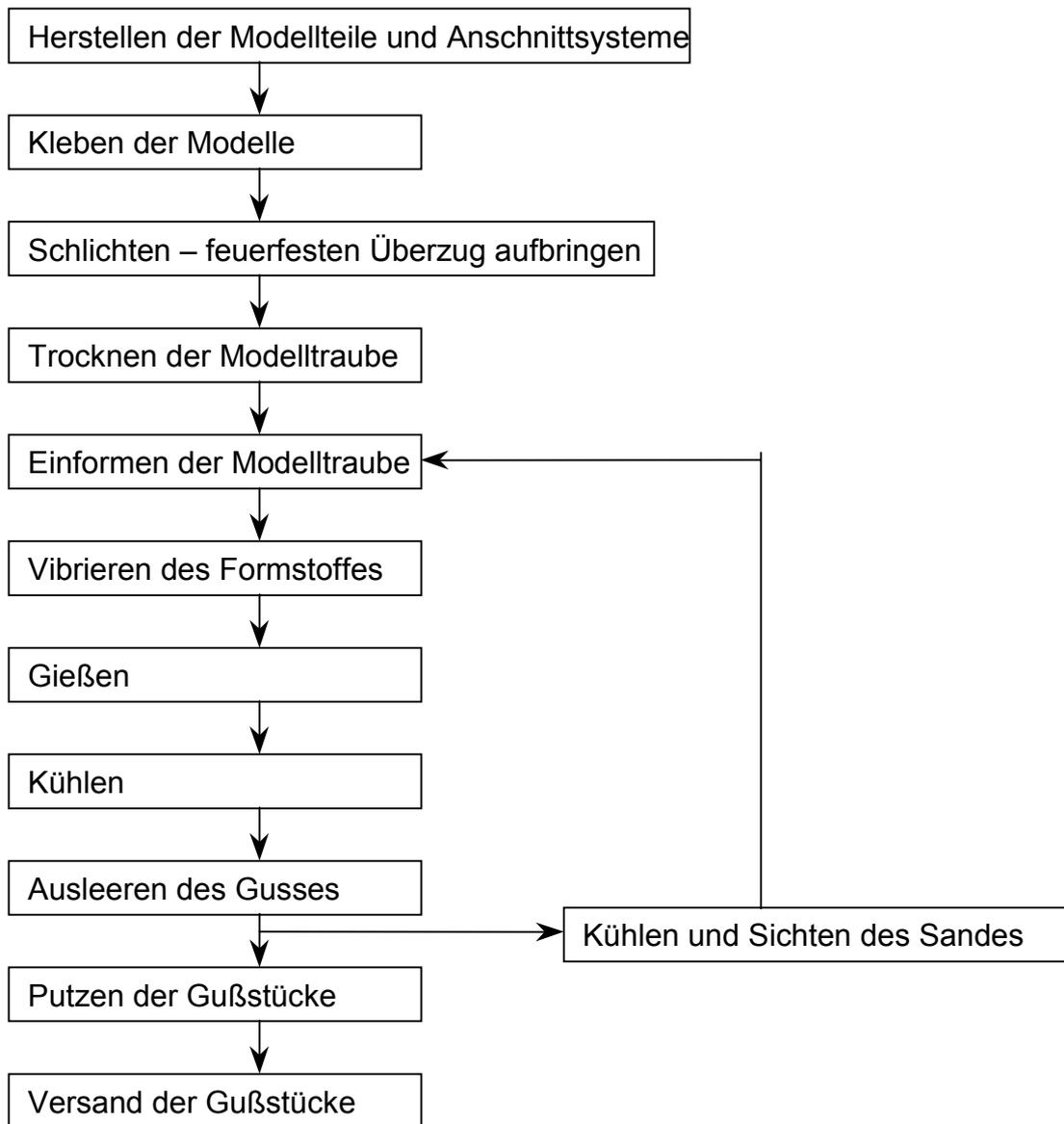


Bild 1. Die wichtigsten Verfahrensschritte beim Vollformgießverfahren nach [8]

1. Die vergasbaren Modelle oder Modellteile aus Schaumpolystyrol werden in Schäumformen hergestellt und durch Kleben meist zu Trauben mit dem Gießsystem zusammengefasst. Danach werden sie geschichtet und getrocknet.
2. Die Modelle werden in einen Formbehälter eingebracht und mit binderlosem, trockenem Quarzsand umhüllt.

3. Der Behälter wird in Vibration versetzt. Dadurch erreicht man ein Auffüllen der Hohlräume und Hinterschneidungen des Modells mit Sand. Gleichzeitig wird der Sand durch die eingeleitete Vibrationsenergie verdichtet.
4. Die fertige Vollform wird abgegossen. Die einströmende Schmelze vergast das Modell und nimmt den freiwerdenden Hohlraum ein.
5. Nach dem Abkühlen wird der Formbehälter entleert. Die Gussstücke lassen sich leicht vom Sand trennen. Ihre Nachbehandlung (Putzen) ist auf ein Minimum begrenzt.
6. Der Sand wird gekühlt und gesichtet. Nach diesen relativ einfachen Aufbereitungsoperationen kann er wieder verwendet werden.

1.2 Varianten des Vollformgießverfahrens

Um qualitätsgerechte Gussstücke, weniger Emissionen und Prozesssicherheit zu schaffen, wurde nach weiteren Varianten für das Vollformgießen gesucht. Einige Verfahrensvarianten werden mit Begriffen, wie Magnetform- [9, 10], Unterdruck-Vollformgießverfahren [7] sowie Replicast CS [11, 12], Polyform [13] und Castyral [14] bezeichnet.

Das *Magnetformverfahren* stellte Hofmann, R. im Jahr 1966 [9] vor. Bei diesem Verfahren verwendet man magnetisierbaren, rieselfähigen Formstoff, der durch ein Magnetfeld verfestigt wird. Bei dem von Krzyzanovsky [7] entwickelten *Unterdruck-Vollformgießverfahren* wird das Schaumstoffmodell mit binderfreiem, rieselfähigem Sand umhüllt und durch einen im Formbehälter erzeugten Unterdruck verfestigt. Das Magnetfeld beim Magnetformverfahren sowie der Unterdruck beim Unterdruck-Vollformgießverfahren werden während des Gießprozesses aufrecht erhalten.

Bei dem von der SCRATA (GB) entwickelten *Replicast CS* (Ceramic Shell-Prozess) wird die Modelltraube aus Schaumstoff mehrmals mit einem keramischen Schlicker umhüllt. Die Schale wird in einem Zwei-Stufen-Prozess gebrannt. Bei der ersten Stufe wird der Schaumstoff entfernt und anschließend die erhaltene Schale verfestigt. Die Schmelze wird in die hohle Formschale gegossen. Diese Verfahren sind durch niedrige Produktivität und hohe Prozesskosten gekennzeichnet.

Beim *Polyform-Verfahren* wird eine speziell entwickelte Schlichte in mehreren Schichten, durch Tauchen oder Sprühen, auf die fertiggestellte Modelltraube ähnlich dem Lost Foam-Verfahren aufgetragen. Die an Luft getrocknete Modelltraube wird in ein fluidisiertes Sandbett getaucht, das von einem gasförmigen Medium auf 427 bis 593 °C erwärmt wurde. Der Schaumstoff wird unter dem Einfluss der Wärme innerhalb weniger Minuten zersetzt. Die Zersetzungsprodukte werden aufgefangen und umgewandelt. Anschließend wird die Schmelze in die saubere Hohlform gegossen.

Beim *Castyral-Prozess*, der für das Vollformgießen von Aluminiumlegierungen entwickelt wurde, wird die aufgrund der Zersetzungsmechanismen des Schaumstoffs mögliche erhöhte Porosität im Gefüge minimiert. Hierbei wird der Formbehälter nach dem Gießen mit einem Deckel druckdicht verschlossen und mit einem Absolutdruck von 11 bar beaufschlagt. Während der Erstarrung wird dieser Druck konstant gehalten.

1.3 Vorteile des Vollformgießens in ungebundenem Sand

Das Vollformgießverfahren besitzt einige Vorteile gegenüber den konventionellen Formverfahren, die seine Anwendung für geometrisch komplizierte, kernreiche Gussteile fördern [8, 15-17].

1. Gussteildesign

- Es entstehen neue konstruktive Möglichkeiten, und die Wettbewerbsfähigkeit der Gussverbraucher wird verbessert.

- Mehrere Baugruppen können in einem Gussteil integriert werden.
2. Umweltbelastung
- Durch den Wegfall von Formstoff- und Kernbindern entstehen weniger Schadstoffe beim Gießen und Auspacken.
 - Nach dem Abkühlen, Sichten und teilweise Klassieren ist der Formsand fast vollständig wieder verwendbar - es entstehen wenig Abprodukte.
 - Emissionen können durch Biofilter gereinigt werden.
3. Wirtschaftlichkeit
- Werkzeugverschleiß ist gering.
 - Investitionsaufwand wird geringer durch Einsparung von Prozessstufen (d. h. keine Formstoffaufbereitung, keine Kernfertigung und keine Formstoffrestfestigkeit bzw. problemlose Entfernung).
 - Geringerer Platzbedarf wegen der einfacheren Prozessgestaltung.
 - Fertigteil ist nach der Bearbeitung preisgünstiger als bei den anderen Urformverfahren.
4. Gussteilqualität
- Es kann auf Modellaushebeschrägen verzichtet werden.
 - Durch endabmessungsnahes Giessen können die Bearbeitungszugaben kleiner gestaltet werden.
 - Gusstoleranzen sind besser als beim Kokillen- oder Sandguss.
 - Weniger Nacharbeit (keine Gratbildung und kein Versatz durch geteilte Form).
 - Oberflächenrauigkeit ist besser als beim Sandguss.
5. Arbeitsbedingungen
- Staub-, Lärm-, und Hitzebelastungen am Arbeitsplatz werden verringert.
 - Hohe Mechanisierung und Automatisierung sind möglich. Damit werden auch hohe Arbeitsproduktivität und Prozessstabilität gewährleistet.
 - Körperlich schwere Arbeit beim Gussputzen wird minimiert.

Die Vorteile des Vollformgießverfahrens gegenüber den konventionellen Formverfahren können nur dann genutzt werden, wenn eine stabile Qualität der Serienproduktion in ausreichend hohem Maß gewährleistet ist. Die hohe Flexibilität des Verfahrens sollte nicht durch lange und teure Vorversuche für die empirische Ermittlung der optimalen Prozessparameter bei einem Sortimentswechsel beeinträchtigt werden.

1.4 Nachteile des Vollformgießens in ungebundenem Sand [8, 16, 18]

1. Gussteildesign

- Reproduzierbare Genauigkeit ist derzeit noch ungenügend untersucht.
- Wandstärken unter 2,5 mm sind schwierig realisierbar.
- Ungünstiges Verhältnis von Länge zu Breite des Gussteils bereitet Probleme.

2. Umweltbelastung

- Entstehung von Kohlenwasserstoff-Verbindungen bei der Schaumstoffzersetzung.

3. Wirtschaftlichkeit

- Werkzeugkosten sind vergleichbar mit denen beim Kokillen- und Druckguss, jedoch höher als beim Sandguss.
- Werkzeugänderungen sind teuer.
- Gussteil ist in der Regel teurer als bei anderen Form- und Gießverfahren.

4. Verfahrensbedingte Gussfehler

- Glanzkohlenstoffeinschlüsse bei Gusseisen mit Lamellengraphit (GG) bzw. Gusseisen mit Kugelgraphit (GGG) aufgrund der Schaumstoffzersetzung.
- Aufkohlung bei Stahlguss und Gasporosität bei Nichteisenmetallguss aufgrund der Schaumstoffzersetzung.
- Mögliche Deformation des Modells bei falscher Vibrationstechnik.

Die verfahrensbedingten Gussfehler können durch neu entwickelte Schaumstoffsorten und Vibrationstechniken vermieden werden, die eine Minimierung dieser Gussfehler ermöglichen. Die Kohlenwasserstoffemissionen können durch Biofilter geleitet werden. Für die Pilotphase können günstige Werkzeuge aus Kunststoff-Aluminium-Werkstoffen eingesetzt werden, die aber keine hohe Lebensdauer aufweisen.

Das Gussteil ist zwar teurer als bei anderen Verfahren, der wirtschaftliche Vorteil liegt aber in der Betrachtung des Fertigteilpreises. Durch Einsparungen bei der Nacharbeit, Bearbeitung und Montage liegt der Fertigteilpreis sehr viel niedriger als bei anderen Gießverfahren.

2 Problem- und Zielstellung

Die Qualität der hergestellten Gussteile wird in entscheidendem Maße von der Formherstellung beeinflusst. Sie umfasst das Füllen des Formbehälters mit Sand und dessen Vibrationsverdichtung. Die Form soll fest und stabil in allen Formbereichen sein, um dem metallstatischen Druck während des Gießens Widerstand zu leisten. Die Stabilität der ungebundenen Form hängt entscheidend von der erreichten Packungsdichte des Quarzsandes ab.

Folgende Probleme können bei der Vibrationsverdichtung des Sandes auftreten:

1. Während der Vibrationsverdichtung entstehen immer mehr oder weniger ausgeprägte Sandströmungen im Formbehälter. Sie können zu Modellverzug oder Modellzerstörung und damit zum Ausschuss des Gussstücks führen. Die Sandströmungen können auch die Schichten-schicht des Modells beschädigen und damit die Penetrationsgefahr erhöhen. Es existieren keine zuverlässigen Hinweise darauf, wie die Sandströmungen minimiert werden können.
2. Es gibt Schwierigkeiten beim Hinterfüllen von komplizierten Hohlräumen und Hinterscheidungen des Modells. Dabei kommt es oftmals zu langen Vibrationszeiten, die eine nachteilige Auswirkung auf die Effektivität des ganzen Produktionsprozesses haben. Zu langen Vibrationszeiten führen zu Modellbeschädigung.
3. Bei zu intensiver Vibration kommt es zu einer Auflockerung des Sandes statt zur Verdichtung. Die aufgelockerten Stellen der Form sind Ursache für nicht reparable Gussfehler, wie starke Penetration oder Auswüchse am Gussteil.

Eine Theorie, die die Vorgänge bei der Vibrationsverdichtung von ungebundenen Sanden beschreibt, ist noch nicht entwickelt worden. Eine systematische wissenschaftliche Untersuchung zu dieser Problematik fehlt. In der

Praxis werden die Prozessparameter bei der Formherstellung auf empirischer Weise nach dem „Versuch und Fehler-Prinzip“ ermittelt. Dabei kommt es zu langen und teureren Vorversuchen bei jedem Wechsel im Produktionsprogramm.

3 Literaturlauswertung

3.1 Vibrationsverdichtung der Formstoffe für das Vollformgießverfahren

Die Formherstellung beim Vollformgießverfahren umfasst zwei Teilschritte. Beim ersten wird eine Sandschicht, bei gleichzeitigem Vibrieren in einen Formkasten eingefüllt. Beim zweiten Schritt wird auf die verdichtete Sandschicht eine Modelltraube aufgesetzt und der Formkasten wird mit binderlosem, trockenem Sand gefüllt. Während des Füllens wird der Sand durch Vibration verdichtet. Die Vibration soll zwei Wirkungen auf den binderlosen Sand ausüben:

1. Fluidisieren und Transport des Sandes in alle Hinterschneidungen und Hohlräume des Modells, um dessen allseitiges Umhüllen mit Sand von gleichmäßiger und hoher Dichte zu erreichen [19].
2. Verdichten des eingeschütteten Sandes, um einen hohen Widerstand der Gießform gegen Deformation (Treiben der Form) unter der Einwirkung des metallstatischen Druckes zu gewährleisten. Durch eine höhere Formstabilität wird neben der Verhinderung des Formkollapses beim Gießen die Penetration der Schmelze in den Sand verhindert [20].

Am Institut für Gießereiprobleme von der Akademie der Wissenschaften der Ukraine (IPL AN der Ukraine) wurden Untersuchungen des Einflusses der Vibrationszeit, der Sandsäulenhöhe, der Formgeometrie auf die Druckspannungen im Formstoff und auf die Formstofffüllung von Innenbereichen der vergasbaren Modelle durchgeführt [21].

Die Untersuchungen der Verdichtung der Formen, die aus trockenem Quarzsand bestehen, wurden in Formkästen mit den Abmessungen 500×450×450 mm durchgeführt. Der vertikale und seitliche Druck im Sand wurden mit einem Drucksensor gemessen. Diese Drucksensoren wurden im Zentrum des Formkastens in verschiedenen Höhen aufgestellt.

Der Formkasten wurde mit einer Schwingungsamplitude von 0,6 mm und einer Frequenz von 160 Hz bei der Leistung des Vibrators von 1 kW vibriert.

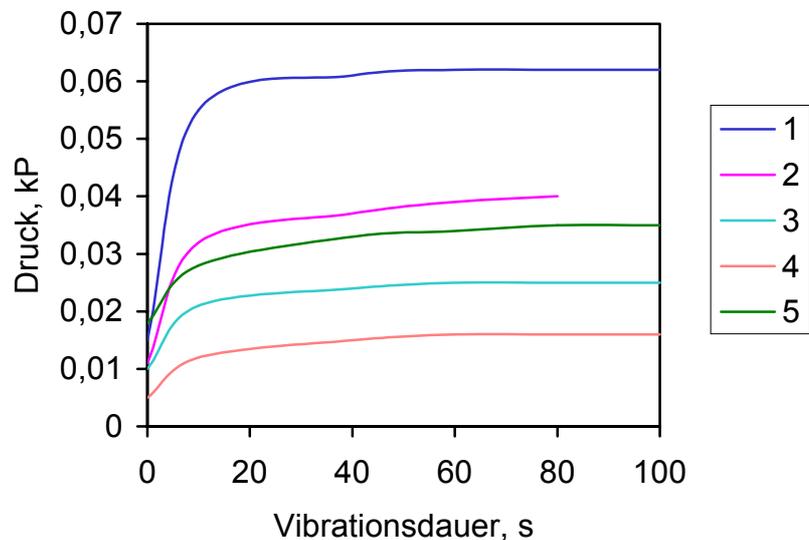


Bild 2. Abhängigkeit des vertikalen (1 und 2) und seitlichen (3, 4, 5) Druckes von der Vibrationszeit und der Höhe der Sandsäule

1, 3 - Höhe der Sandsäule 430 mm;

2, 4 - Höhe der Sandsäule 200 mm;

5 - Höhe der Sandsäule 430 mm mit einer zusätzlichen Belastung, die einen zusätzlichen Druck von $0,06 \text{ kP/cm}^2$ bewirkt.

Wie man aus dem Bild 2 erkennt, strebt die Größe des vertikalen und zusätzlichen Drucks im Sand einem bestimmten Grenzwert zu. Der maximale Druck wird in 10 - 20 s erreicht.

Die Belastung des Sandes, die einen zusätzlichen Druck von $0,06 \text{ kP/cm}^2$ schafft, vergrößert den seitlichen (Kurve 5) und vertikalen Druck, aber dabei sinkt die spezifische Leistung des Vibrators.

Die Änderung des seitlichen Drucks im trockenen Quarzsand ist in Abhängigkeit vom Verhältnis des hydraulischen Radius des Formkastens (R) zur Höhe der Sandsäule (H) unbedeutend. Bei einer Höhe der Sandsäule von

430 mm ist der seitliche Druck für das Verhältnis $R/H = 0,1$ gleich $0,0225 \text{ kP/cm}^2$, und für $R/H = 0,5$ gleich $0,0275 \text{ kP/cm}^2$.

Für die Untersuchung der Sandfüllung von Vertiefungen im Modell durch die Vibration (Frequenz: 160 Hz, Amplitude: 0,6 mm Formkasten mit einer Größe von $200 \times 200 \times 200$ und einer durchsichtigen Wand) wurde Sand eingefüllt und in einer Entfernung vom Punkt B des Modells bis zum oberen Punkt A der Berührung des Sandes mit dem Modell im Innenbereich (Bild 3) gemessen. Der Wegverschiebung der Sandsäule wurde nach der Vibration im Laufe einer bestimmten Zeit mit Hilfe der geeichten Skala, die auf dem Modell angebracht ist, gemessen.

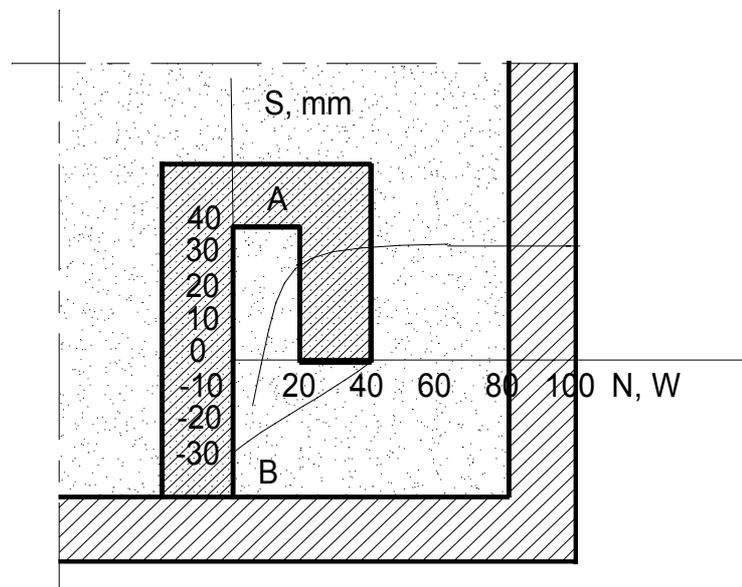


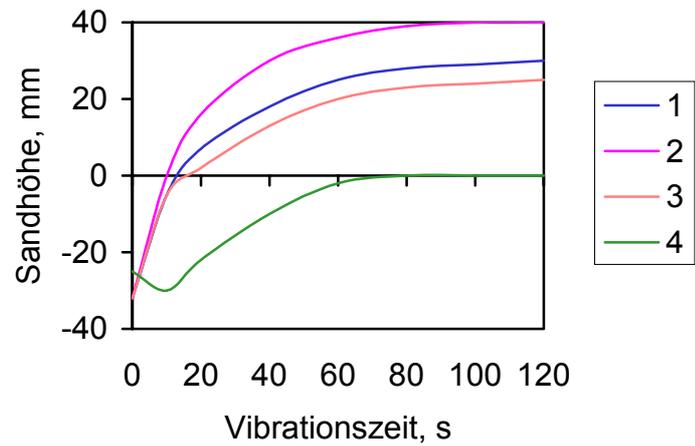
Bild 3. Abhängigkeit der Verschiebung des trockenen Sandes in den Innenbereichen des Modells mit einer Höhe von 40 mm von der Erregerkraft

Die Fähigkeit zur Füllung der Innenbereiche mit dem Sand sinkt mit Verringerung der Erregerkraft auf 20 - 25 N.

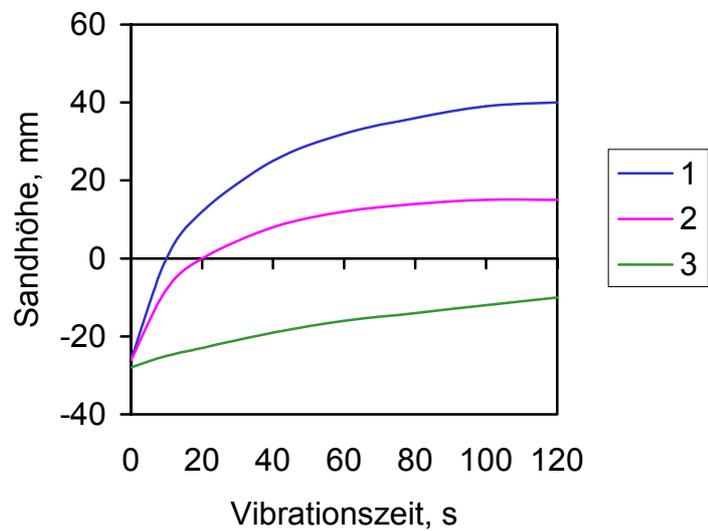
Durch die Vergrößerung der Sandsäule und das Auflegen einer spezifischen Belastung wird das Ausfüllen der Innenbereiche (Bild 4, a) gesenkt, da die größere Antriebskraft für die Überwindung der Reibungskraft zwischen den

Körner des Sandes infolge der Vergrößerung des statischen Drucks benötigt wird. Bei einer konstanten Leistung, die dem Vibrator zugeführt wird, und der Beibehaltung der Vibrationsparameter wird die Beweglichkeit der Sandkörner gegeneinander und im Modell gesenkt.

a)



b)



c)

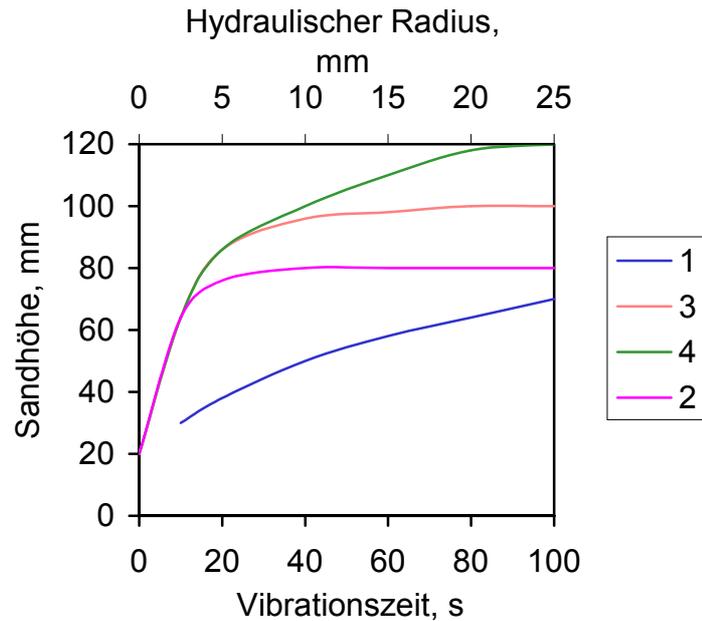


Bild 4. Abhängigkeit der Verschiebung der schüttfähigen Formstoffe von der Vibrationszeit

a) bei verschiedenen Höhen (H) der Quarzsandsäule

1 - H = 400 mm

2 - H = 200 mm

3 - H = 200 mm beim Formkasten, der befestigt war, und einer Belastung von 0,001 kP/cm²

4 - H = 200 mm beim Formkasten, der nicht befestigt wird

b) 1 - Quarzsand

2 - Stahlschrot

3 - Eisenpulver

c) Quarzsand:

1 - bei der Änderung des hydraulischen Radius R

2 - bei der Höhe des Innenbereiches h = 40 mm

3 - bei der Höhe des Innenbereiches h = 60 mm

4 - offener Hohlraum

Das Ausfüllen der Innenbereiche wird von der Teilchenform der Mischung beeinflusst (Bild 4, b).

Die Geschwindigkeit der Verschiebung des Sandes in die Hohlräume und Innenbereiche des Modells hängt nicht von der Geometrie des Innenbereichs aber vom hydraulischen Radius R ab (Bild 4, c).

Eine wichtige Rolle bei der Vibrationsverdichtung der Formstoffe spielt die Schwingrichtung. Die industriellen und experimentellen Prüfungen zeigten, dass am meisten die vertikalgerichteten Schwingungen vorkommen. Ihre Verwendung sichert die gleichmäßige Verdichtung des Formsandes im gesamten Querschnitt des Formkastens.

Kreisschwingungen sind ungünstiger, da sie eine horizontale Verschiebung des Formsandes im Behälter in Wirkrichtung der Antriebskraft des Vibrators hervorrufen. Dadurch entsteht auf der Fläche des vibrierten Formsandes „eine Drehinstabilität“, die zur Dopplung führt.

3.2 Wichtige Einflussparameter bei der Vollformherstellung

Die Formherstellung für das Vollformgießverfahren ist wie die meisten gießereitechnischen Verfahrensschritte von den Komponenten **Stoff** (Quarzsand), **Maschine** (Vibrotisch) und deren beider Zusammenführung im unmittelbaren **Prozess** (Einbetten) gekennzeichnet (Bild 5), wobei im Ergebnis dieser Wechselwirkungen eine abgussbereite und qualitätsgerechte Form hergestellt werden soll.

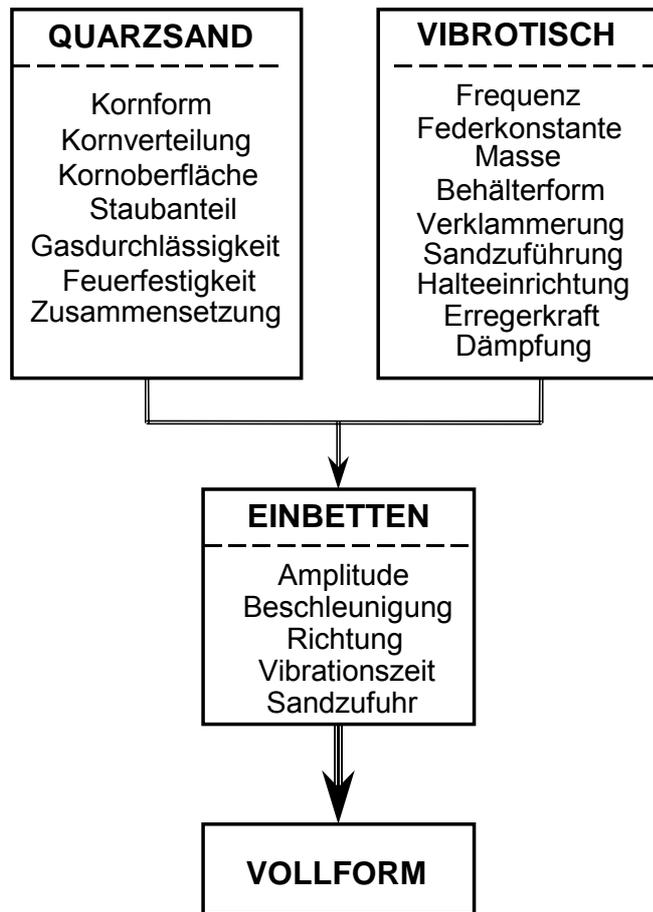


Bild 5. Einflussparameter und Komponenten der Vollformherstellung

3.2.1 Stoffparameter

Die bei der Formherstellung zu berücksichtigende Werkstoffe sind zum einen der Quarzsand und zum anderen der mit der Schlichte überzogenen Modellwerkstoff. In dieser Arbeit wird nur auf die Problematik des Quarzsandes eingegangen.

Der zur Herstellung von Formen für das Vollformverfahren verwendeten Quarzsand sollte trocken und binderfrei sein. Außerdem muss er bestimmte Anforderungen hinsichtlich Kornform, Kornverteilung, Kornoberfläche, Staubanteil, Gasdurchlässigkeit, Feuerfestigkeit und chemischer Zusammensetzung erfüllen [22].

Die dichteste Packung der Sandkörner lässt sich bei einer Kornverteilung erreichen, bei der neben großen Körnern auch ein entsprechender Feinkornanteil vorliegt, der die Poren des großen Körnerverbandes ausfüllt. Leider steht dieser für die Erzielung einer hohen Dichte positiver Erscheinung eine gleichlaufende Verringerung der Gasdurchlässigkeit gegenüber, die für das Abströmen der gasförmigen Modellzersetzungsprodukte unerlässlich ist. Hier kann ein Kompromiss gefunden werden, der beiden Anforderungen gerecht wird. Als geeignet haben sich grobkörnige, runde Sande (AFS-Feinheits-Nr. 25 bis 45) [23] erwiesen, die auch ein gutes Fließvermögen aufweisen. Dabei ist es notwendig, den umlaufenden Sand zu entstauben, um entstandene Feinanteile zu entfernen. Feuerfestigkeit und chemische Zusammensetzung sind in Übereinstimmung mit dem zu vergießenden Metall auszuwählen.

3.2.2 Maschinenparameter

Zur Formherstellung für das Vollformverfahren sind folgende Parameter des Vibrotisches wichtig: Frequenz, Federkonstante, Masse, Behälterform, Verklammerung, Sandbunkerauslaß, Halteeinrichtung, Erregerkraft und Dämpfung.

Durch eine Kombination der Drehzahl, der Unwuchtmassen und ihrer Winkelverschiebung sowie Wellendrehrichtung können die für das Einbetten erforderlichen Prozessparameter realisiert werden. Die Behälterverklammerung schafft die Voraussetzungen, dass der Behälter fest mit der Grundplatte verbunden ist und so die Schwingungen des Vibrationsantriebes über den Behälter in den Sand gelangt. Damit die Grundplatte und der darauf befindliche Behälter überhaupt in Schwingungen versetzt werden können, muss die Grundplatte auf elastischen Federelementen abgestützt werden.

Um den Sandbedarf, den Energieaufwand bei der Verdichtung, das Auftreten von Sandströmen sowie die Umhüll- und Verdichtungszeiten zu minimieren, sollte der Behälter so klein wie möglich sein.

Die Sandzufuhr aus dem Vorratsbunker in den Formbehälter soll zügig und gleichmäßig vorgenommen werden. Die Fallhöhe des Sandes ist auf einen minimal möglichen Wert zu beschränken, um das Abreiben der Schichte von der Modelloberfläche zu vermeiden. Der Sand kann mit Hilfe von flexiblen Rohren, über Rutschen oder nach dem „Regenfallprinzip“ aus mehreren Bunkerauslauföffnungen in den Behälter einfließen. Dabei ist darauf zu achten, dass der Quarzsand das Modell gleichmäßig von allen Seiten umschließt. Bei nur einseitiger Sandzufuhr besteht die Gefahr des Kippens und Verziehens der Modelle [23].

Das Halten des Modells ist von großer Wichtigkeit, da durch die während des Umhüllens auftretenden Sandströme eine Bewegung des Modells nicht ausgeschlossen ist.

3.2.3 Prozessparameter

Durch das Zusammenführen der Komponenten Stoff und Maschine lässt sich der Einbettprozess vollziehen.

Die richtige Einstellung der Vibrationsparameter ist von entscheidender Bedeutung für die Qualität der Gießform und damit für den Erfolg des gesamten Herstellungsprozesses [15, 19-20, 22, 24-27]. Bei der Formherstellung sind folgende Vibrationsparameter wichtig:

- Vibrationsrichtung und Zahl der Schwingungsachsen
- Frequenz
- Amplitude
- Dauer der Vibration.

In der Literatur gibt es relativ wenige vollständige Angaben über die optimalen Vibrationsparameter. Sie werden empirisch ermittelt und individuell jedem Gussteil angepasst [27]. Es fehlt eine theoretische Erklärung für nachteilige Erscheinungen wie z. B. Sandströmungen im Formkasten oder Auflockerung des Sandes während der Vibration.

3.2.3.1 Vibrationsrichtung

Es existieren insgesamt sechs mögliche Schwingungsarten - drei lineare Achsen und drei Drehschwingungsachsen. Die handelsüblichen Vibrationstische schwingen meistens gleichzeitig in allen sechs Achsen in einer komplizierten Mischung von Vibrationsbewegungen, die nicht immer reproduzierbar sind. Oftmals generieren solche Systeme ungleichmäßige Schwingungen in mehrere Richtungen auch dann, wenn Schwingungen in nur einer Richtung eingestellt wurden [25].

Zur optimalen Vibrationsrichtung existieren widersprüchliche Meinungen. Es werden Vibrationstische angewendet, die vertikal, horizontal oder gleichzeitig in mehreren Achsen vibrieren. Dabei zeigt sich, dass mit den unterschiedlichsten Vibrationstischen qualitätsgerechte Gussteile produziert werden, so dass scheinbar keine eindeutig bevorzugte Vibrationsrichtung definiert werden kann [22, 23, 26].

Dreidimensionale Vibration bewirkt höhere Verdichtung des Sandes als ein-dimensionale Vibration. Deshalb wird sie oftmals bevorzugt [28].

3.2.3.2 Vibrationsdauer

Es wird einheitlich die Meinung vertreten, dass 90 % der Sandverdichtung in ersten 30 s stattfinden, so dass Vibrationszeit über diesen Wert nicht sinnvoll ist [29]. Die Auswahl der Vibrationsdauer wird in erster Linie vom Ausfüllen der Hohlräume und Hinterschneidungen des Modells bestimmt. Dieser Vorgang läuft langsamer als die Verdichtung ab. Bei längeren Verdichtungszeiten wird die Produktivität der gesamten Formlinie beeinträchtigt.

Die Vibration bewirkt eine Verdichtung des Sandes um etwa 10 bis 20 % [23, 24]. Dabei fällt der Sand in sich zusammen und es entsteht eine ausgeprägte relativ schnelle Abwärtsbewegung. Die Abwärtsbewegung des Sandes kann zu Modelldeformation führen. Deshalb wird vorgeschlagen, den Sand schichtweise einzufüllen und nach dem Einfüllen jede Schicht zu vibrie-

ren [30]. Dabei wird die Einformzeit stark erhöht. Das Vibrieren bei einem kontinuierlichen Füllen ist die bevorzugte Methode [23].

3.2.3.3 Amplituden und Frequenzen

Nach der Schwingungstheorie hängen Frequenz, Beschleunigung und Amplitude zusammen. Die in der Praxis üblichen Werte für Amplituden und Frequenzen lassen sich laut Literaturangaben [19, 31, 32] in drei Bereiche einordnen (Bild 6).

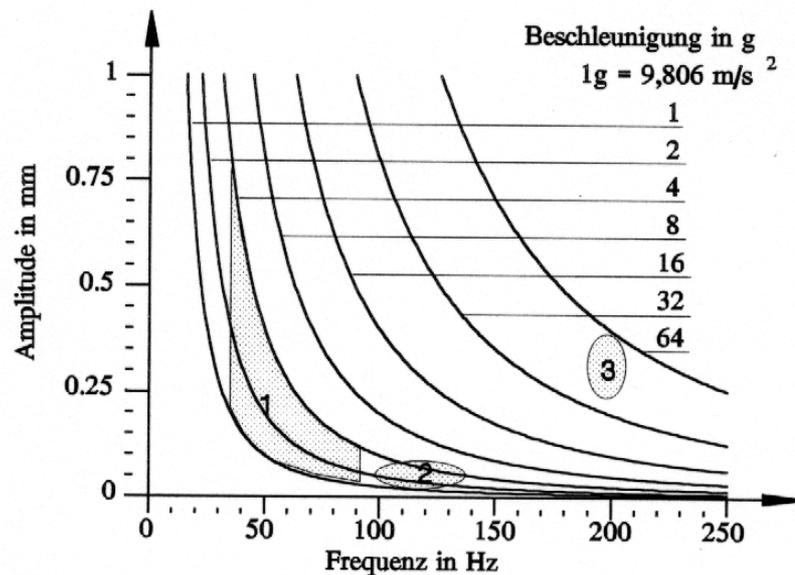


Bild 6. In der Praxis übliche Amplituden und Frequenzen der Vibrationsverdichtung

Amplitude und Frequenz bestimmen die bei der Vibration auftretende Beschleunigung:

$$b_{\max} = a_{\max} * (2 * \pi * f)^2 \quad (1)$$

b_{\max} - maximaler Wert der Vibrationsbeschleunigung [m/s²]

a_{\max} - maximaler Wert der Amplitude [m]

f - Vibrationsfrequenz [Hz]

Die niederfrequenten Vibrationsverdichtungen arbeiten mit Frequenzen von 30 bis 70 Hz bei Beschleunigungen zwischen 1g und 4g (Bereich 1) [19, 31-

33]. Andere Veröffentlichungen [15, 24, 34, 35] enthalten nur Angaben zur Frequenz, die zwischen 30 und 100 Hz liegen sollte. Als Ergebnis einer umfangreichen amerikanischen Untersuchung werden Frequenzen zwischen 100 und 125 Hz bei Beschleunigungen zwischen 2g und 4g empfohlen (Bereich 2) [25].

In der Veröffentlichung [33] werden Vibrationsbeschleunigungen zwischen 1g und 3g empfohlen. Wichtigste Voraussetzung für eine ausreichende Verdichtung und Modellhinterfüllung ist, dass der Sand nur teilweise in den obersten Schichten in Bewegung gebracht wird, während die unteren Schichten keine Verschiebung der Körner zueinander aufweisen sollten. Dadurch werden die Sandströmungen im Behälter und damit die Gefahr eines Modellverzugs wesentlich reduziert [33].

Bei einer Vibrationsbeschleunigung von 0,8g ist die Sanddichte zu klein und bei Beschleunigungen über 2g werden die Modelle oft verformt. Übliche Vibrationsparameter sind Vibrationsbeschleunigungen zwischen 0,9 und 1,0g bei Frequenzen zwischen 50 und 60 Hz. Der Verdichtungsgrad des Sandes erhöht sich mit steigender Frequenz [28].

Um den Sand zu verdichten, braucht man nach [23] eine Vibrationsbeschleunigung über 1,2g. Über 5g tritt zunehmend eine Auflockerung des Sandes auf.

In der Arbeit [36] wird eine Vibrationsanlage vorgestellt, die mit einer Frequenz von 200 Hz und Amplituden zwischen 0,3 und 0,4 mm arbeitet (Bereich 3). Diese Angaben über die Vibrationsparameter unterscheiden sich wesentlich von den anderen Literaturangaben. Bei den in [36] angegebenen Vibrationsparametern sollte die Vibrationsbeschleunigung sehr hoch (40 - 60g) sein. Die maschinentechnische Realisierung solcher hohen Beschleunigungen erfordert bei den relativ hohen Massen des schwingenden Systems sehr hohe Erregerkräfte, deren technische Realisierung in betrieblichen Verhältnissen praktisch unmöglich ist.

Über einen Omni-Axis-Vibrationstisch, der mit einer Frequenz von 500 Hz arbeitet, berichtet Creed, P.S. [19]. Die unwahrscheinlich hohe Frequenz von 500 Hz kann auch sehr schwer mit der herkömmlichen Vibrationstechnik realisiert werden.

Dabei ist die Frage nach dem dominierenden Einfluss entweder der Frequenz oder der Amplitude auf die Sandverdichtung nicht geklärt (Bild 7).

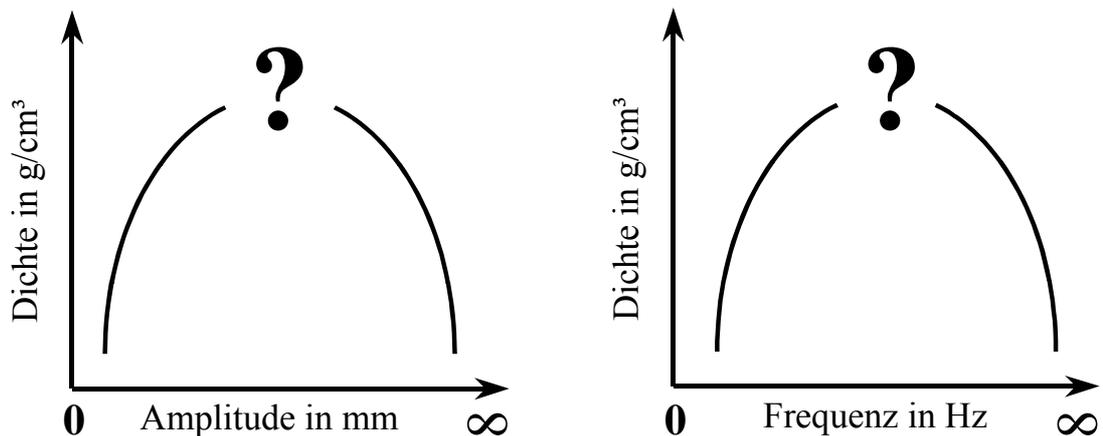


Bild 7. Fragestellung nach einer maximaleffektiven Amplitude und Frequenz

3.3 Messungen der Vibrationsparameter am Formbehälter und im Sand

Zur Klärung der Vorgänge, die im Sand während der Verdichtung ablaufen, benötigt man direkte Informationen über den zeitlichen Verlauf der Vibrationsparameter (Amplitude, Geschwindigkeit und Beschleunigung) sowohl des Formbehälters, als auch des Sandes. Die ersten Messeinrichtungen wurden von italienischen Forschern [20] beschrieben. In dieser Veröffentlichung wird eine Untersuchung der erzeugten Schwingungen durch Messungen mit Beschleunigungsaufnehmern an unterschiedlichen Positionen im Formkasten und im Sand vorgestellt. Die Versuchseinrichtung erzeugt die Vibrationen mittels gegeneinander rotierenden Unwuchten, die unterschiedlich in Abhängigkeit von der Modellgeometrie synchronisiert werden. Der Formbehälter ist am Vibrationstisch durch hydraulische Ankopplung verbunden. Die am Behälter angekoppelte Beschleunigungsaufnehmer liefern Spannungssignale,

die direkt proportional der Vibrationsbeschleunigung sind. Die erste Integration dieser Signale liefert die Vibrationsgeschwindigkeit und die zweite Integration die auftretenden Amplituden. Durch Messungen an unterschiedlichen Stellen des Formkastens und des Sandes in verschiedenen Richtungen und Integration der erhaltenen Messwerte wird eine räumliche Darstellung der auftretenden Schwingungen erstellt [20].

Es existiert ein ausgeprägter Zusammenhang zwischen den Vibrationsparametern des Formkastens und des Sandes, aber die in den Sand übertragene Schwingungen sind nicht mit den Behälterschwingungen vollkommen identisch [20]. Deshalb müssen die Vibrationsparameter auch direkt im Sand gemessen werden.

4 Entwicklung und Bau von Sensoren zur Untersuchung der Verdichtungseigenschaften

Um die Transportvorgänge und Verdichtbarkeit des Sandes zu bewerten, wurden Messsensoren an der TU Bergakademie Freiberg entwickelt. Sie beruhen auf der kapazitiven Messung eines sich verändernden Dielektrikums zwischen zwei Kondensatorplatten. Der Aufbau des Sensors ist im Bild 8 dargestellt. Die Elektrodenflächen sind dabei so gestaltet, dass eine Elektrode gleichzeitig als Schirmung gegen alle nicht vom Sand hervorgerufene Einflüsse wirkt. Die Länge des Sensors kann an das jeweilige Messvolumen angepasst werden. Die konstruktive Gestaltung der Elektrodengeometrie macht es möglich, den Sensor an den erforderlichen Stellen direkt in die Schäumung einzubauen. Damit wird eine Messung selbst in kleinsten Räumen ohne störende Rückwirkungen durch das Messsystem möglich.

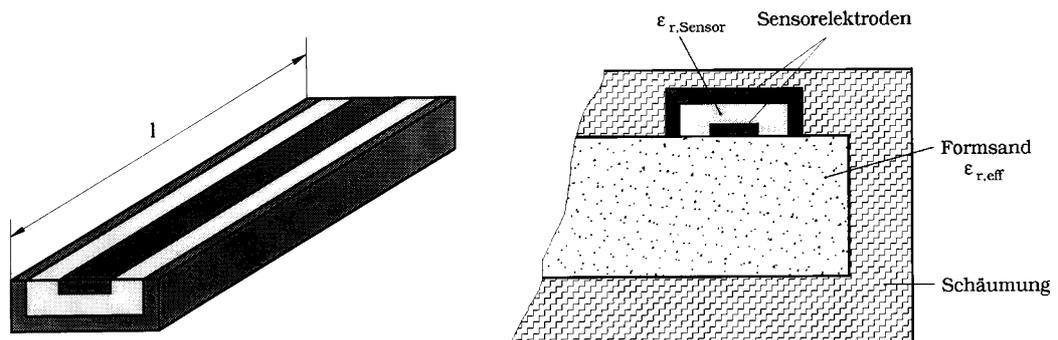


Bild 8. Sensorgestaltung und -einbau ins Modell

4.1 Messprinzip der Sensoren

Die Kapazität des Elektrodenpaares wird von der Geometrie und damit vom elektrischen Feldbild sowie von den relativen Dielektrizitätskonstanten der Isolation im Sensor $\epsilon_{r,Sensor}$ und des Formsandes $\epsilon_{r,Sand}$ beeinflusst (Bild 8). Für den Messeffekt wiederum ist maßgebend, dass die effektiv wirksame Dielektrizitätskonstante des Formsandes $\epsilon_{r,eff}$ vom Füllungsgrad und von der

Sanddichte abhängt. Der formelmäßige Zusammenhang ist in der Gleichung (2) dargestellt:

$$C=A*\epsilon/d \quad (2)$$

Hier in bedeuten:

- C – Kapazität [pF]
- A – Fläche [m²]
- d – Abstand [m]
- ε – Dielektrizitätskonstante [pF/m]

Die wirksame Gesamtkapazität der Messanordnung enthält neben der Sensorkapazität in Summe noch die wesentlichen größeren Schaltkapazitäten der Elektronik und der Zuleitungen C_L . Damit wird die durch den Messeffekt hervorgerufene Kapazitätsänderung ΔC außerordentlich klein:

$$\Delta C = (C_{S,Sand} + C_L) - (C_{S,Luft} + C_L) \quad (3)$$

Es ist deshalb notwendig, die Anordnung bei leerem Behälter elektrisch auf Null abzugleichen. Zusätzlich ist vor den Messungen eine Kalibrierung des Messsystems erforderlich.

4.2 Bestandteile des Messsystems

Das kapazitive Messsystem enthält folgende Komponenten:

- kapazitive Messsensoren
- Sekundärgerät – Messbrücke
- Anzeige bzw. Datenerfassungssystem.

Für die meisten Sensoren beträgt die Kapazität nur einige Picofarad. Für die Messung einer solch geringen Kapazität muss man zum Erreichen einer ausreichenden Genauigkeit Resonanzschaltungen verwenden.

4.3 Eichung der Sensoren

Um den gemessenen Spannungswerten auch äquivalente Dichtewerte zuzuordnen zu können, erfolgte eine Eichung der Sensoren.

Der Versuchsaufbau entspricht der schematischen Darstellung im Bild 9. Auf einer Siebmaschine wurde ein Eichgefäß so befestigt, dass es ungehindert befüllt werden konnte. Die Befestigung des Sensors erfolgte in der Art, dass stets eine ausreichende Bedeckung während der Versuche gewährleistet war. Der Trichter sichert eine gleichbleibende Fließgeschwindigkeit des Sandes beim Befüllen.

Die während des Messvorganges vom Sensor über die Messbrücke abgegebene Spannung wurde über ein Anschlusspanel einer A/D-Wandlerkarte zugeführt und gelangte von dort in das Anzeige- und Auswertesystem des Rechners. Die ermittelten Spannungswerte wurden dann den aus den Volumina und dazugehörigen Massen errechneten Dichtewerten gegenübergestellt.

Das benutzte Eichgefäß hatte einen Durchmesser von 50 mm und eine Höhe von 100 mm. Von dem daraus errechneten Volumen wurde das jeweilige Sensorvolumen abgezogen.

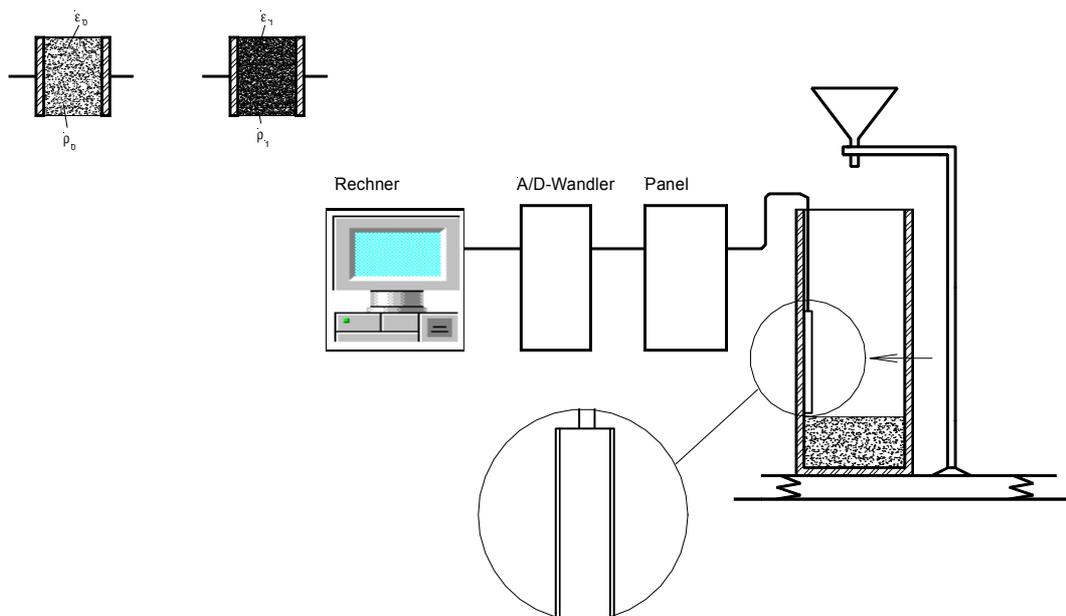


Bild 9. Versuchsaufbau zur Sensoreichung

Die Eichung wurde in folgenden Schritten durchgeführt:

- Einfüllen der abgemessenen Sandmenge in den mit einem Stopfen verschlossenen Trichter
- Öffnen des Trichters und Start der Messwertaufnahme
- Einschalten der Siebmaschine nach Befüllen des Eichbehälters
- Ausschalten der Maschine und Beenden der Messwertaufnahme
- Bestimmen der Höhenabnahme an der im Gefäß angebrachter Millimeterskala.

Im Bild 10 ist ein typischer Kurvenverlauf dargestellt. Das nach dem kontinuierlichen Anstieg folgende Niveau entspricht der Schüttdichte. Das sich anschließende obere Niveau ist der Vibrationsdichte gleichzusetzen.

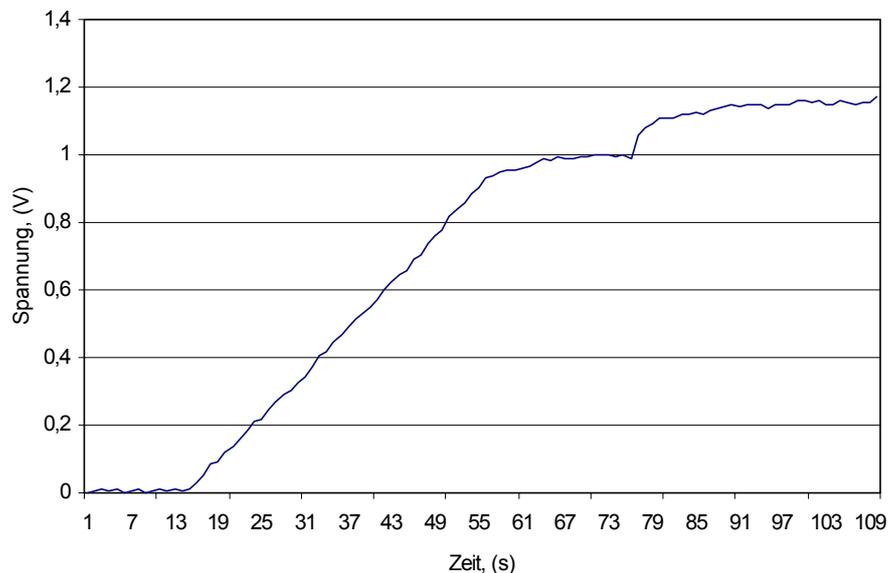


Bild 10. Einfüll- und Verdichtungsvorgang

Der formelmäßige Zusammenhang zwischen der Spannung und der Dichte ist in der Gleichung (4) dargestellt:

$$D = f(U) = a * U \quad (4)$$

Für jeden Sensor wurden 8 Eichversuche durchgeführt und ausgewertet. Die gemessenen und umgerechneten Schüttdichtewerte sind in der Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 Schüttdichtewerte

Messpunkt	Niveau 1, (V)	Dichte 1, (g/cm ³)
1	1,02	1,51
2	1,03	1,51
3	0,99	1,51
4	0,99	1,51
5	1,00	1,51
6	0,98	1,51
7	1,00	1,51
8	0,98	1,51
Mittelwert	1,00	1,51
Standartabweichung	± 0,0181	0,000

Die Schüttdichte als Funktion der Spannung ist in der Gleichung (5) dargestellt:

$$D_S = f(U) = a_0 \cdot U \quad (5)$$

Hierin bedeuten:

D_S – Schüttdichte als Funktion der Spannung

U – Spannung, [V]

a_0 – Anstieg der Geraden

Wobei:

$$a_0 = (D_S - D_0) / (U_S - U_0) = D_S / U_S \quad (6)$$

Hierin bedeuten:

D_S – Mittelwert der Schüttdichte (Dichte 1)

D_0 – Schüttdichte zu Beginn des Versuchs (Zeitpunkt: 0), hier: $D_0 = 0$

U_S – Mittelwert von bei erreichter Schüttdichte gemessenen Spannungen (Niveau 1)

U_0 – Spannung zu Beginn des Versuchs (Zeitpunkt: 0), hier: $U_0 = 0$

$$a_0 = 1,51 \text{ g/cm}^3 / 1,0 \text{ V} = 1,51 \text{ g/(cm}^3\text{V)}$$

Aus diesem Grund ergibt sich eine Geradengleichung für die Berechnung der Schüttdichte:

$$D_S = 1,51 \cdot U_S \quad (7)$$

Die Zusammenhänge zwischen den Spannungs- und Schüttdichtewerten sind im Bild 11 grafisch dargestellt.

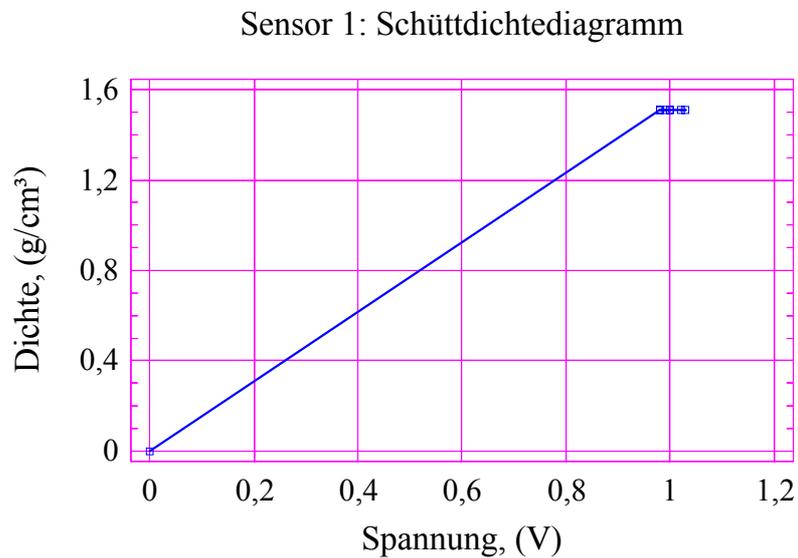


Bild 11. Schüttdichtediagramm

Die gemessenen und umgerechneten Vibrationsdichtewerte sind in der Tabelle 2 zu sehen.

Tabelle 2 Vibrationsdichtewerte

Messpunkt	Niveau 2, (V)	Dichte 2, (g/cm³)
1	1,23	1,67
2	1,20	1,67
3	1,20	1,69
4	1,20	1,71
5	1,20	1,67
6	1,17	1,69
7	1,17	1,69
8	1,19	1,65
Mittelwert	1,20	1,68
Standartabweichung	± 0,0193	± 0,0185

Die Vibrationsdichte als Funktion der Spannung ist in der Gleichung (8) dargestellt:

$$D_V = f(U) = a_1 * U + b_0 \quad (8)$$

Hierin bedeuten:

D_V – Vibrationsdichte als Funktion der Spannung

a_1 – Anstieg der Geraden ($\neq a_0$)

b_0 – fiktiver Nulldurchgang, hier: $b_0 = D_S$

Wobei:

$$a_1 = (D_V - D_S) / (U_V - U_S) \quad (9)$$

Hier in bedeuten:

D_V – Vibrationsdichte als Funktion der Spannung

U_V – Mittelwert von bei erreichter Vibrationsdichte gemessenen Spannungen (Niveau 2)

U_S – Mittelwert von bei erreichter Schüttdichte gemessenen Spannungen (Niveau 1)

D_S – Mittelwert der Schüttdichte (Dichte 1)

$$a_1 = (1,68 - 1,51) \text{ g/cm}^3 / (1,2 - 1,0) \text{ V} = 0,85 \text{ g}/(\text{cm}^3\text{V})$$

Die Geradengleichung für die Berechnung der Vibrationsdichte lautet damit:

$$D_V = 0,85 * (U_V - U_S) + D_S \quad (10)$$

Die Zusammenhänge zwischen den Spannungs- und Vibrationsdichtewerten sind im Bild 12 grafisch dargestellt.

Sensor 1: Verdichtungsdiagramm

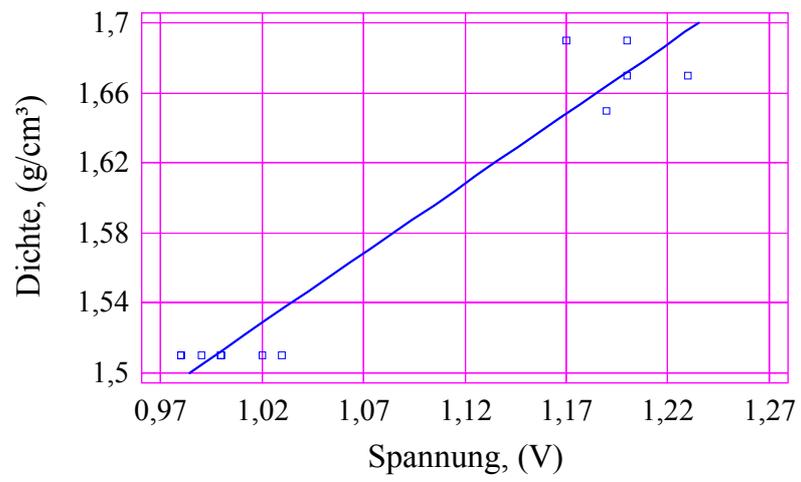


Bild 12. Verdichtungsdiagramm

5 Grundlagenuntersuchungen zum Verhalten des Sandes unter Vibrationseinwirkung

Das Verhalten des Schüttkörpers bzw. des Sandes unter Vibrationseinwirkung wird von der Intensität der Vibration beeinflusst. Mit der Zunahme der Vibrationsintensität im Rahmen der Amplitudenbeschleunigungen, die kleiner als die Erdbeschleunigung sind, bekommt der Sand eine Beweglichkeit, eine sogenannte Pseudofließbarkeit. Bei der Pseudoverflüssigung werden die innere Reibung und Zahl der Lücken zwischen den Sandkörnern kleiner und deshalb wird der Sand dichter. Eine maximale Sandverdichtung wird bei Amplitudenbeschleunigungen erreicht, die nah zur Erdbeschleunigung liegen.

Bei der weiteren Vergrößerung der Vibrationsintensität erfolgt eine Trennung der Sandkörner vom Formbehälter (kraftschlüssig mit dem Vibrationstisch verbunden). Dabei wird der Sand durch die Verringerung und periodische Störung der Kohäsion zwischen den Sandkörnern aufgelockert und die Sandkörner zirkulieren verstärkt. Dieser Zustand des Sandes wird als ein Zustand des Vibrokochens bezeichnet.

Ein Übergang von der Pseudoverflüssigung zum Vibrokochen findet bei den Beschleunigungen statt, die Erdbeschleunigung übersteigen. Die Beschleunigungen hängen unter anderen von den Sandeigenschaften, der Schichtgröße und der inneren Reibung ab.

Eine Energiedissipation in den Schüttkörpern stellt eine sehr komplizierte Erscheinung dar. Dies kann unter anderen bei Reibung von den trockenen oder feuchten Teiloberflächen miteinander, beim Bewegungswiderstand von Festkörpern in flüssigen oder gasförmigen Phasen, wenn die unterschiedlichen Adhäsionskräfte vorhanden sind, auftreten. Normalerweise wirken einige Dissipationsarten gleichzeitig. Das Vorhandensein von Dissipationskräften bedingt das Auftreten von nichtlinearen Effekten in den vibrationsbehandelten Schüttkörpern. In der Praxis werden die komplizierten Widerstands-

arten normalerweise auf den zähflüssigen und trockenen Widerstand zurückgeführt.

Der Verlauf von Stoffaustauschprozessen in Schüttkörpern unter Einwirkung von Vibration beim Übergang von den grobverteilten zu den hochkonzentrierten mikroheterogenen Systemen hängt wesentlich von der Oberflächenerscheinung auf der Zwischenphasengrenze und den Adhäsionskräften zwischen den Teilchen ab.

Die Eigenschaften der Oberflächenstruktur von hochkonzentrierten mikroheterogenen Schüttkörpern werden durch die Oberflächenerscheinungen auf der Zwischenphasengrenze und die Kontaktarten zwischen den Teilchen der festen Phase bestimmt. Die Koagulationskontakte mit der geringsten Festigkeit entstehen zwischen den Teilchen der festen Phase, die durch die Zwischenschicht vom flüssigen Dispersionsmittel getrennt ist. Die festeren Kontakte haben die Strukturen mit den unmittelbaren punktbezogenen Wechselwirkungen, die sich üblicherweise in den feinverteilten Pulvern entwickeln.

Unter der Vibrationseinwirkung werden Deformationswellen in den Körpern hervorgerufen. Eine Monoschicht, die im Kontakt mit der Vibrationsquelle tritt, erhält Kraftimpulse. Die Impulse werden von unteren zu den oberliegenden Monoschichten übertragen. Infolge sowohl der Trägheit und des Vorhandenseins von Reibungskräften, als auch von den irreversiblen Deformationen, werden die Impulse je nach ihrer Übertragung von einer Monoschicht zur anderen nach und nach schwächer. Dabei wird der Grad ihrer Schwächung sowohl durch die Mediumseigenschaften, als auch durch den Charakter und die Größe der Kraftimpulse bestimmt. Die Energie der Schwingungsbewegung von der Vibrationsquelle wird im Prozess der Wellendurchdringung auf die Beschleunigung des behandelnden Mediums und Ergänzung von Verlusten bei irreversiblen Deformationen aufgewendet.

Bei der Vibrationsbehandlung von Schüttkörpern beobachtet man eine Phasenverschiebung in der Bewegung von benachbarten Monoschichten. Beim Zusammenführen von Vibrationsbehandlung und Transportprozess beo-

bachtet man eine Reduzierung der mittleren Verschiebungsgeschwindigkeit je nach Entfernung von der Vibrationsquelle. Beim Vibrationsregime mit einem Wurf des Schüttkörpers beginnt die untere Monoschicht mit der Zeit, wenn sie ihre ganze kinetische Energie an darüber liegenden Schichten übertragen hat, sich zurück zu bewegen. Die oberen Monoschichten können dabei ihre Bewegung nach oben fortsetzen. Zu diesem Zeitpunkt tritt eine Auflockerung der Schüttkörper auf.

Das beschriebene Vibrationsbehandlungsregime, das nur bei einer genügenden Schichthöhe realisierbar ist, wird dadurch charakterisiert, dass es sich in zwei Zonen teilen lässt. In einer zur Vibrationsquelle naheliegenden Zone finden die intensiven Schwingungen des Schüttkörpers statt. In der weiter von der Vibrationsquelle entfernten Zone befindet sich der Schüttkörper im Zustand des Schwebens.

Die Phasenverschiebung in der Bewegung der Schüttkörperschicht und des Vibrationstisches kann sehr bedeutend sein. Durch die Phasenverschiebung wird der Energieaufwand während der Vibrationsbehandlung von Schüttkörper und dem Nacheilen der Trennungsmomente des Sandes von der Vibrationsoberfläche festgestellt.

Der Prozess der Vibrationsbehandlung von feinverteilten Schüttkörpern wird hauptsächlich von der Einwirkung der gasförmigen und flüssigen Phase beeinflusst. Infolge einer schlechten Luftdurchlässigkeit wird der Schüttkörper einer großen aerodynamischen Belastung ausgesetzt. Die aerodynamischen Widerstände entstehen dadurch, dass eine Phasenverschiebung zwischen den Druckpulsen der Gasphase und der Bewegung der Festphase stattfindet. Infolge dessen bilden sich die aerodynamischen Kräfte, die eine Bewegung der Festphase hindern. Im Bereich zwischen dem Behälterboden und der unteren Monoschicht des Schüttkörpers entsteht bei einem Wurf eine Druckverringerng und beim Fallen – eine Druckerhöhung in bezug auf den Luftdruck. Ein Ausgleich dieser periodischen Druckschwankungen wird infolge eines periodischen Abflusses der überschüssigen Luftmenge und eines Zuflusses der fehlenden Luftmenge beim Durchströmen durch die Poren, die

in der Schicht des Schüttkörpers vorhanden sind, erreicht. Deshalb wirkt auf die Teilchen eines feinverteilten Körpers ein pulsierender aerodynamische Druck, der mit einiger Verschiebung der Phasen in Gegenrichtung ihrer Bewegung gerichtet ist. Die auf die Teilchen wirkenden aerodynamischen Kräfte sind hauptsächlich eine Funktion der Schüttkörpermasse und der spezifischen Gasdurchlässigkeit.

Bei Vibrationseinwirkung auf mikroheterogenen hochgefüllten Schüttkörper ist es notwendig, wegen der erheblichen Adhäsionskräfte zwischen den Teilchen bedeutend stärkere Vibrationsregime als für die grobverteilten Medium einzusetzen, um die feinverteilte Schüttkörper in den Zustand des Vibrokochens zu bringen, braucht man eine Vibrationsbeschleunigung, die etwas größer als die Erdbeschleunigung ist. Dabei muss der Energiezufluss wesentlich vergrößert werden.

5.1 Mathematische Beschreibung des Sandverhaltens unter Vibrationseinwirkung

Um das Sandverhalten unter Vibrationseinwirkung mathematisch zu beschreiben, müssen bestimmte Annahmen getroffen werden. Dies lässt das Verhältnis zwischen dem Wahrheitsgehalt des Modells und dem Aufwand seiner Erarbeitung in vertretbaren Grenzen zu halten. Im vorliegenden Fall werden folgende Annahmen getroffen:

1. Die Kohäsion zwischen den Sandkörner ist vernachlässigbar klein. Dies trifft für einen binderfreien, trockenen Sand zu [37]. Dasselbe gilt auch für die Kohäsion zwischen dem Sand und den Behälterwänden.
2. Der Sand zeigt ein vollkommen plastisches Verhalten beim Zusammenstoß mit dem Behälterboden, d.h. es gibt keine elastische Rückfederung des Sandes [38].

Der Behälter (kraftschlüssig mit dem Vibrationstisch verbunden) und die Sandmasse sind zwei Körper, die sich im Schwerfeld der Erde bewegen.

Wenn die Beschleunigung des Vibrationstisches größer als die Erdbeschleunigung ist, erfolgt eine Trennung der beiden Körper. Der Sand befindet sich im Zustand des Vibrokochens und bewegt sich ohne Kontakt zum Behälterboden nach dem Gesetz des freien Vertikalwurfes eine bestimmte Zeit eigenständig. Wenn das Verhältnis der Beschleunigung des Vibrationstisches zur Erdbeschleunigung kleiner oder gleich 1 ist, bewegen sich der Sand und der Behälter immer gemeinsam. Der Sand ist im Zustand der Pseudoverflüssigung. Deshalb muss man das Verhalten des Sandes unter der Vibrationseinwirkung in zwei unterschiedlichen Bereichen betrachten: Bereich 1 – der Sand befindet sich im Zustand der Pseudoverflüssigung und Bereich 2 – der Sand nah den Zustand des Vibrokochens.

5.1.1 Bewegung des Sandes im Zustand der Pseudoverflüssigung

Es wird ein einfachstes Model betrachtet: die Bewegung vom kugelförmigen Teilchen mit der Masse M in einer nach dem Gesetz $\zeta(t)$ vibrierenden Flüssigkeit [39]. Wenn das Teilchen völlig vom Medium bewegt wird, so wirkt auf das Teilchen die Kraft $m \cdot d^2\zeta$, wobei m die Masse des Mediums im Volumen ist, das dem Teilchenvolumen gleich ist. Bei unterschiedlichen Bewegungen des Teilchens und des Mediums bewegt sich eine bestimmte Masse des Mediums (m_0) zusammen mit dem Teilchen. Deshalb lautet die Gleichung der Teilchenbewegung folgend:

$$M d^2x = m \cdot d^2\zeta - m_0 (d^2x - d^2\zeta) \quad (11)$$

Nach dem Integrieren bei den Bedingungen $t = 0$, $x = 0$, $dx = 0$ in der Abhängigkeit vom Gesetz der Flüssigkeitsbewegung bekommen wir folgende Gleichung:

$$x(t) = \frac{m + m_0}{M + m_0} \cdot \zeta(t) \quad (12)$$

Die einbezogene Masse für eine Kugel mit dem Radius r wird nach der Gleichung 13 bestimmt:

$$m_0 = \frac{2}{3} \pi \rho r^3 \quad (13)$$

Hierin bedeutet:

ρ - Dichte des Mediums.

Damit wird

$$x(t) = \frac{3\rho}{2\rho_M + \rho} * \zeta(t) \quad (14)$$

Hierin bedeutet:

ρ_M – Dichte des Teilchens.

Aus der Gleichung 14 lässt sich ableiten, dass eine relative Bewegung vom Verhältnis der Dichten und nicht von der Teilchengröße abhängt.

In den Gleichungen (11) – (14) wurde kein Bewegungswiderstand Φ und keine Erdanziehungskraft in Betracht gezogen. Wenn dies berücksichtigt wird, wird die Bewegungsgleichung des Teilchens wie folgt aussehen:

$$M (d^2x + g) = m (d^2\zeta + g) - m_0 (d^2x - d^2\zeta) + \Phi \quad (15)$$

Wenn die Widerstandskraft den Charakter einer Trockenreibung hat, betrachtet man folgende Abhängigkeiten:

$$\Phi = \begin{cases} -F_+ & \text{bei } dx > d\zeta \\ F_- & \text{bei } dx < d\zeta \end{cases} \quad (16)$$

Üblicherweise ist der Widerstand des Aufsteigens ($dx > d\zeta$) kleiner als der Widerstand bei der Bewegung in Bodenrichtung, d. h. $F_- > F_+$. Wenn die Trockenreibung vorhanden ist, bewegt sich das Teilchen zusammen mit dem Medium ($x \equiv \zeta$) so lange, bis folgende Ungleichung gilt:

$$-F_+ \leq (M - m) (d^2\zeta + g) \leq F_- \quad (17)$$

D. h., dass sich die Mischung, die aus den Teilchen mit den Massen M und dem Medium besteht, als eine Gesamtmasse verhalten wird, solange die Ungleichung (17) gilt. Die Zusammenbewegen (Zustand der Pseudoverflüs-

sigung) wird beobachtet, wenn die Ungleichung (17) für bestimmte Zeiträume ihre Gültigkeit verliert. Je länger die Ungleichung (17) nicht gilt, desto stärker wird der Effekt der Pseudoverflüssigung.

Die leichtere als Medium Teilchen ($M < m$) steigen auf, wenn eine Verflüssigung bei symmetrischen Schwingungen vorhanden ist. Wenn die maximale Amplitudenbeschleunigung der symmetrischen Schwingung so groß ist, dass die Ungleichung (17) ungültig wird, dann werden nicht nur das Absinken, sondern das Aufsteigen der schwereren Teilchen ($M > m$) möglich.

Wenn die relative Teilchenbewegung $z(t) = x(t) - \zeta$ und die ganze als $M_0 = M + m_0$ bezeichnete Masse, die an der relativen Bewegung teilnimmt, in die Abhängigkeiten (16) eingezogen wird, kann man folgende Beziehung aufschreiben:

$$M_0 \cdot d^2z = - (M - m) (d^2\zeta + g) - \Phi \quad (18)$$

Bei der relativen Bewegung nach oben ($dx > d\zeta$) wirkt auf das Teilchen eine maximale Kraft:

$$P_0 = - (M - m) (g - a) - F_+ \quad (19)$$

und bei der Bewegung nach unten eine Kraft:

$$P_u = - (M - m) (a + g) + F_- \quad (20)$$

Hierin bedeuten:

P_0 – Kraft bei der Bewegung nach oben in N

P_u – Kraft bei der Bewegung nach unten in N

g – Erdbeschleunigung in m/s^2

a – Amplitudenbeschleunigung in m/s^2

Das Aufsteigen kann stattfinden, wenn $P_0 + P_u > 0$ gilt, d. h.

$$F_- - F_+ > 2 (M - m) g \quad (21)$$

Die Bewegung nach oben kann nur dann stattfinden, wenn die folgende Bedingung gilt:

$$(M - m) (g - a) \leq F_+ \quad (22)$$

Ausgehend aus (21) und (22) kann das Aufsteigen nur unter folgender Bedingung stattfinden:

$$\frac{F_- - F_+}{F_+} > \frac{2g}{a - g} \quad (23)$$

Das Aufsteigen eines schwereren Teilchens als das umgebende Medium ist eine Folge einer Differenz der Widerstandskräfte beim Aufsteigen und Absinken. Der Unterschied muss dabei genügend groß sein. Dieses Ergebnis bestätigt den Umstand, dass sich unter Vibrationseinwirkung auf Partikel mit gleicher Dichte aber unterschiedlicher Größe die größeren Teilchen bei bestimmten Bedingungen über den kleineren Teilchen befinden. Dies trifft zu, weil ihre Masse im selben Volumen größer als die Masse kleinerer Teilchen ist ($M > m$).

Einen bedeutenden Einfluss auf die Teilchenbewegung übt die Vibrationsintensität aus. So kann bei unterschiedlichen Beschleunigungen ein und dasselbe schweres Teilchen sowohl aufsteigen als auch absinken.

5.1.2 Bewegung des Sandes im Zustand des Vibrokochens

Zur mathematischen Beschreibung des Sandverhaltens unter Vibrationseinwirkung im Zustand des Vibrokochens wird als Beispiel ein mathematisches Modell nach [40] genommen, das das Arbeitsprinzip eines exzentrischen Ausleerschwingrostes (Schubkurbel) beschreibt. Die Bewegung eines exzentrischen Ausleerschwingrostes ist genau so wie beim Vibrationstisch sinusförmig und harmonisch. Deshalb werden weiter nur die vertikalen Komponenten der Schwingungsbewegung berücksichtigt.

Bei den maximalen Vibrationsbeschleunigungen über $1g$ lässt sich die Sandbewegung in drei Phasen aufteilen:

1. Berührungsphase: Die Beschleunigung des Vibrationstisches ist gleich oder kleiner als Erdbeschleunigung. Der Sand hat dabei einen Kontakt zum Behälterboden.

2. Wurfphase: Der Sand trennt sich vom Behälterboden und bewegt sich im Raum nach dem Gesetz des freien vertikalen Wurfes.
3. Stoßphase: Eine kurze Zeitspanne, in der der Sand auf die Geschwindigkeit des Vibrationstisches beschleunigt wird.

Um die Vibrationsparameter des Vibrationstisches und des Sandes während dieser drei Phasen beschreiben zu können, müssen die Wurfparameter – Abwurfgeschwindigkeit, Amplitude und Geschwindigkeit des Vibrationstisches beim Abwurf und Wurfdauer bestimmt werden. Folgende Randbedingungen werden eingeführt:

1. Der Zeitpunkt, in dem die Trennung zwischen dem Sand und den Behälterboden erfolgt (Abwurfzeitpunkt), wird als zeitlicher Nullpunkt $t_z = 0$ definiert.
2. Als räumlicher Nullpunkt ($a = 0$) wird der Nulldurchgang der Amplitude des Vibrationstisches durch die Zeitachse markiert.

Die Verschiebung des Vibrationstisches x von der mittleren Position zu einem bestimmten Zeitpunkt beträgt:

$$x = a \cdot \sin \omega t \quad (24)$$

Hierin bedeuten:

a – Amplitude in m

ω - Kreisfrequenz in 1/s

Die Trägheitsbeschleunigung dieser Schwingungen wird nach der Gleichung 25 bestimmt:

$$-\frac{d^2x}{dt^2} = \omega^2 a \sin \omega t \quad (25)$$

In der ersten Schwingungsperiode sind die auf den Vibrationstisch wirkende Trägheitskräfte nach oben gerichtet. Sobald die Trägheitskräfte des Vibrationstisches und die Schwerkraft des Sandes gleich sind, wird der Sand vom Behälterboden getrennt. Damit lässt sich die Abwurfsbedingung gemäß aufschreiben:

$$-\frac{d^2x}{dt^2} = \omega^2 \sin \varepsilon = g \quad (26)$$

Hierin bedeutet:

ε - Abwurfswinkel

Der Abwurfswinkel kann man wie folgt ermitteln:

$$\varepsilon = \arcsin \frac{g}{\omega^2 a} \quad (27)$$

Der Abwurfswinkel entspricht einem gewissen Punkt A auf der Schwingungskurve des Tisches. Eine Ordinate des Abwurfspunktes lässt sich nach der Gleichung 28 berechnen:

$$x_A = a \sin \varepsilon = \frac{g}{\omega^2} \quad (28)$$

Die Geschwindigkeit des Vibrationstisches und des Sandes im Abwurfspunkt kann aus (29) bestimmt werden:

$$V_A = \omega a \cos \varepsilon \quad (29)$$

Nach der Trennung vom Behälterboden im Punkt A bewegt sich der Sand selbstständig nach dem Gesetz des freien vertikalen Wurfes mit der Geschwindigkeit V_A nach oben. Die Gleichung der Parabelbewegung des Sandes kann wie folgt dargestellt werden:

$$x_1 = V_A t - \frac{g t^2}{2} \quad (30)$$

Ein Zusammenstoßen des Sandes mit dem Behälterboden erfolgt dann, wenn ihre Vertikalkoordinaten gleich sind, d. h., wenn die Gleichung 31 gilt:

$$x = x_1 \quad (31)$$

Unter Vorgabe bestimmter Prozessgrößen lassen sich die Bewegungsparameter vom Sand und Vibrationstisch berechnen.

Es wurden die Bewegungsparameter im Frequenzbereich von 40 bis 95 Hz berechnet. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3 Berechnungsergebnisse

Fre- quenz in Hz	Maximale Amplitu- de in mm	Beschleu- nigung in mm/s ²	b / g	Abwurfs- winkel in grad	Abwurfsge- schwindig- keit in mm/s	Maximaler Wurf in mm	Wurf- dauer in s
40	0,1541	9,739	0,99	-	-	-	-
41	0,1496	9,930	1,01	81,09	5,97	0,0001	0,0024
42	0,1453	10,118	1,03	75,82	9,39	0,0006	0,0038
43	0,1412	10,304	1,05	72,19	11,66	0,0015	0,0046
44	0,1372	10,487	1,07	69,30	13,41	0,0026	0,0053
45	0,1334	10,667	1,09	66,87	14,79	0,0040	0,0058
46	0,1298	10,845	1,11	64,76	15,98	0,0054	0,0062
47	0,1264	11,021	1,12	62,89	17,02	0,0070	0,0065
48	0,1231	11,194	1,14	61,21	17,90	0,0087	0,0068
49	0,1199	11,364	1,16	59,69	18,64	0,0104	0,0070
50	0,1168	11,532	1,18	58,28	19,30	0,0121	0,0072
55	0,1033	12,332	1,26	52,70	21,65	0,0203	0,0078
60	0,0919	13,068	1,33	48,65	22,90	0,0272	0,008
65	0,0824	13,740	1,40	45,56	23,57	0,0323	0,008
70	0,0741	14,348	1,46	43,14	23,81	0,0358	0,0079
75	0,0671	14,891	1,52	41,21	23,77	0,0389	0,0077
80	0,0608	15,371	1,57	39,66	23,54	0,0389	0,0075
85	0,0553	15,786	1,61	38,42	23,13	0,0411	0,0072
90	0,0505	16,137	1,64	37,44	22,66	0,0382	0,007
95	0,0461	16,423	1,67	36,68	22,08	0,0369	0,0067

Einige der berechneten zeitlichen Verläufe von Amplitude und Geschwindigkeit des Sandes und des Vibrationstisches bei Frequenzen von 50, 70 und 90 Hz sind in den Bildern 13 – 18 dargestellt.

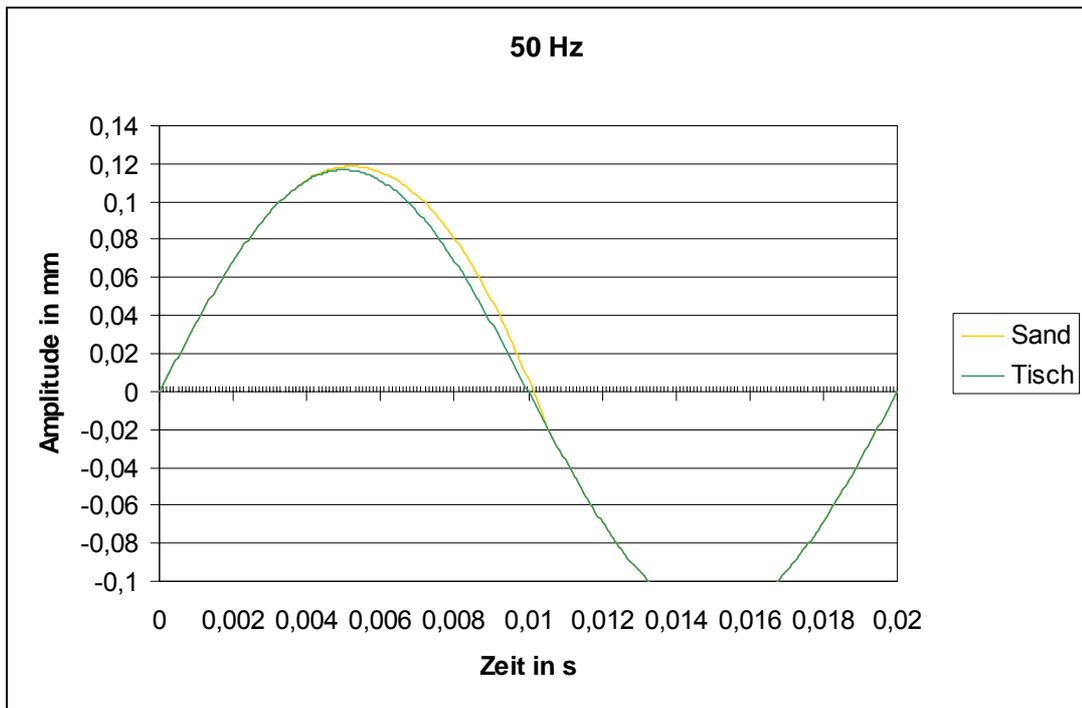


Bild 13. Amplituden des Sandes und des Tisches bei 50 Hz

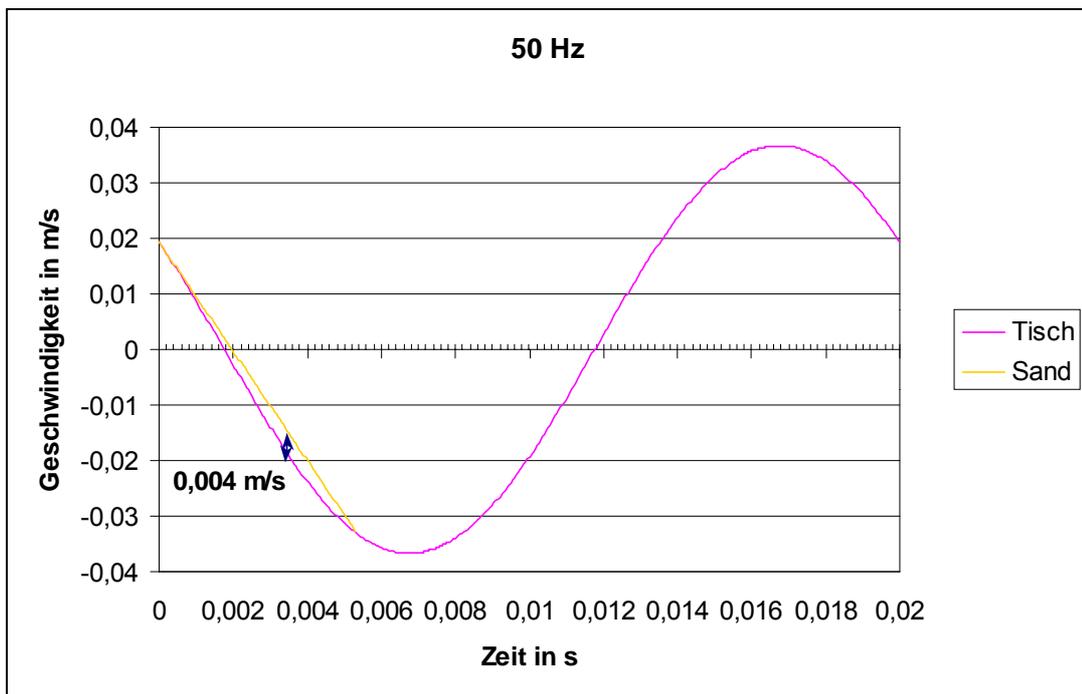


Bild 14. Geschwindigkeiten des Sandes und des Tisches bei 50 Hz

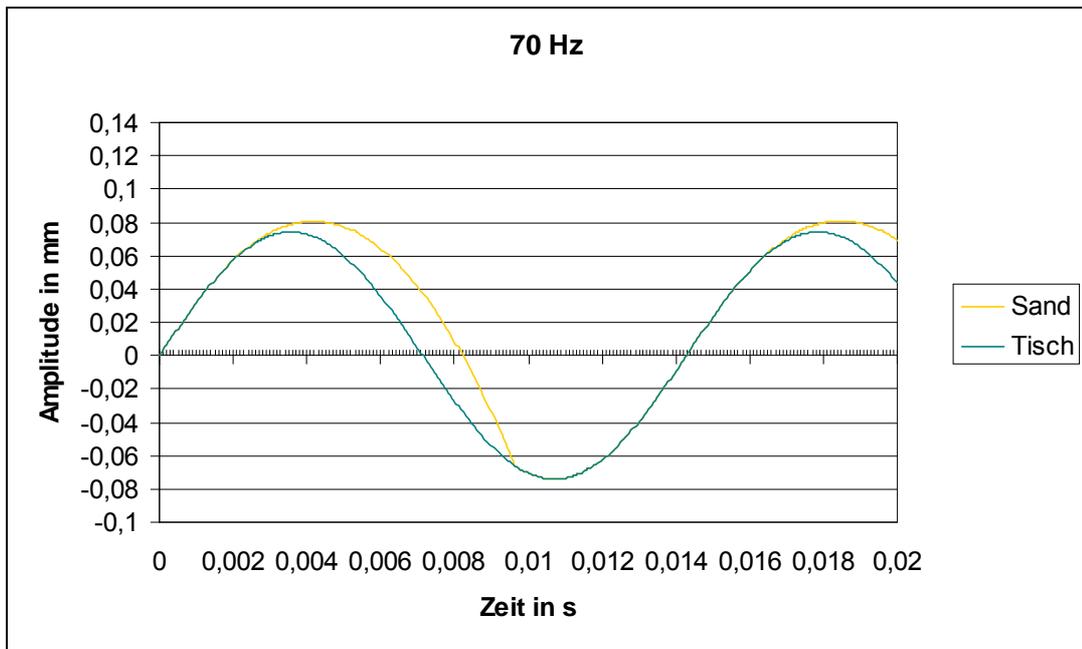


Bild 15. Amplituden des Sandes und des Tisches bei 70 Hz

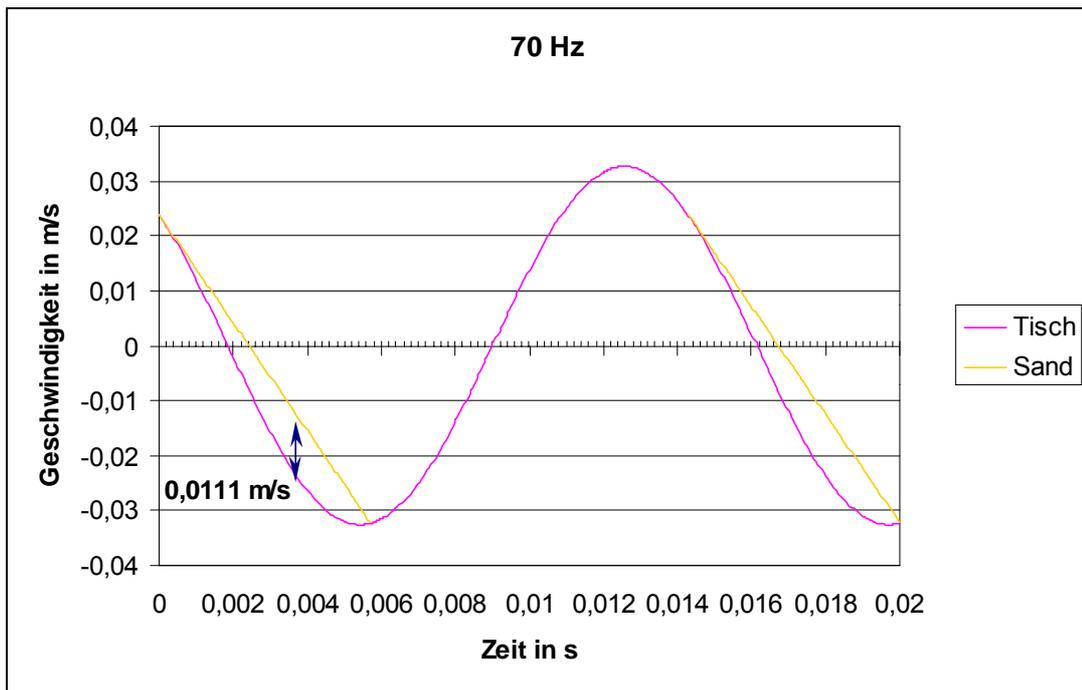


Bild 16. Geschwindigkeiten des Sandes und des Tisches bei 70 Hz

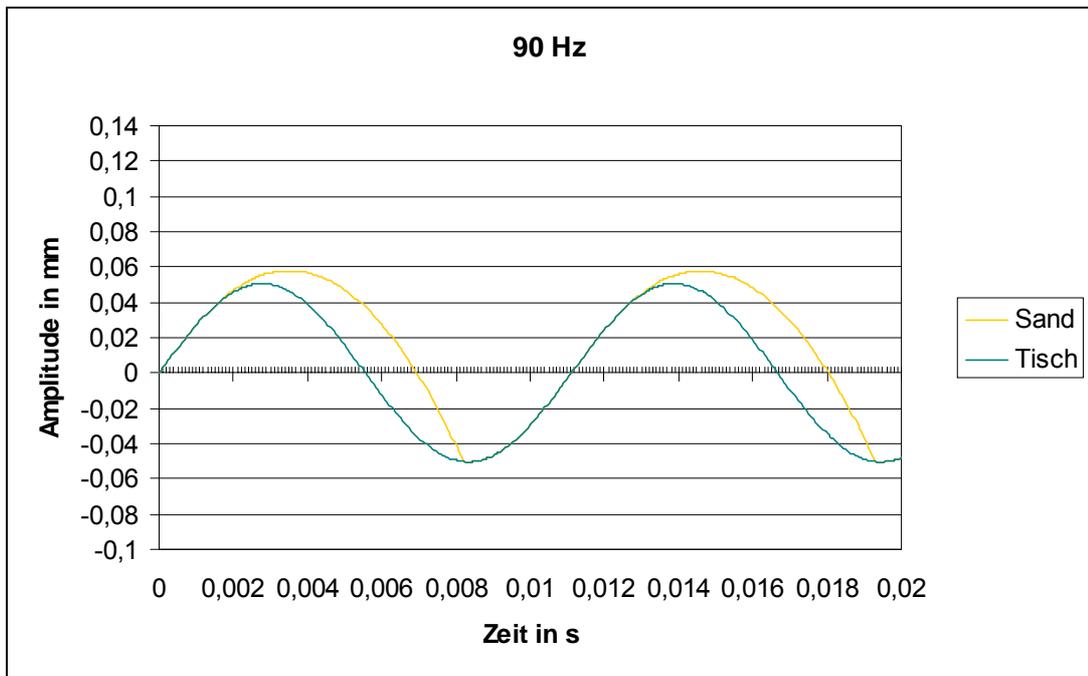


Bild 17. Amplituden des Sandes und des Tisches bei 90 Hz

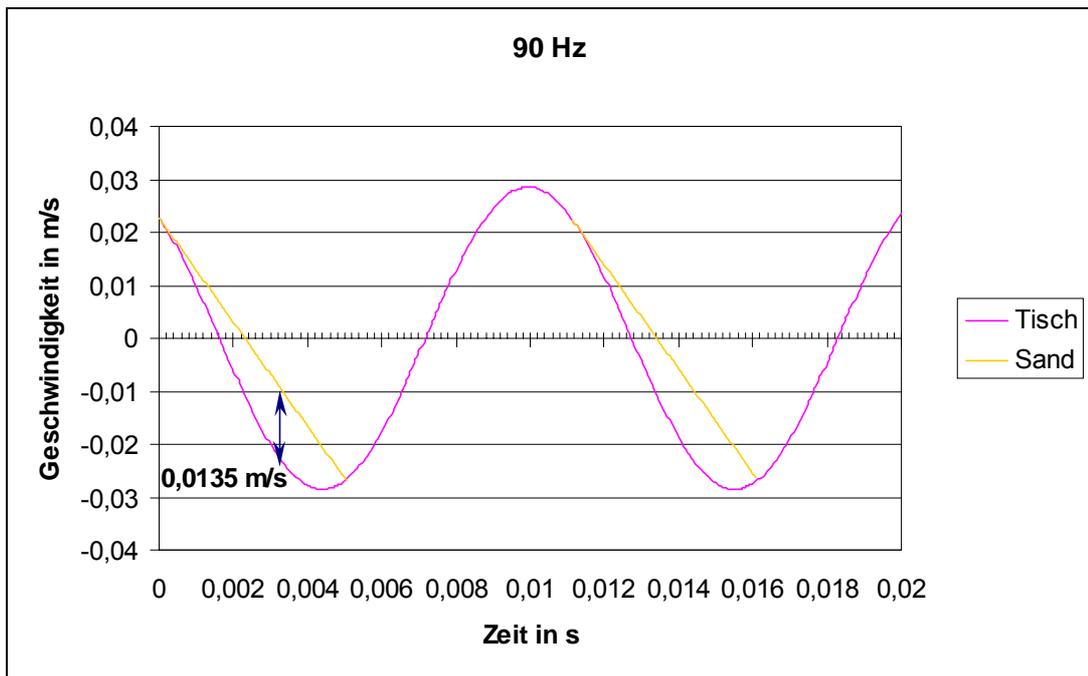


Bild 18. Geschwindigkeiten des Sandes und des Tisches bei 90 Hz

Eine Änderung der Abwurfgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz ist im Bild 19 dargestellt.

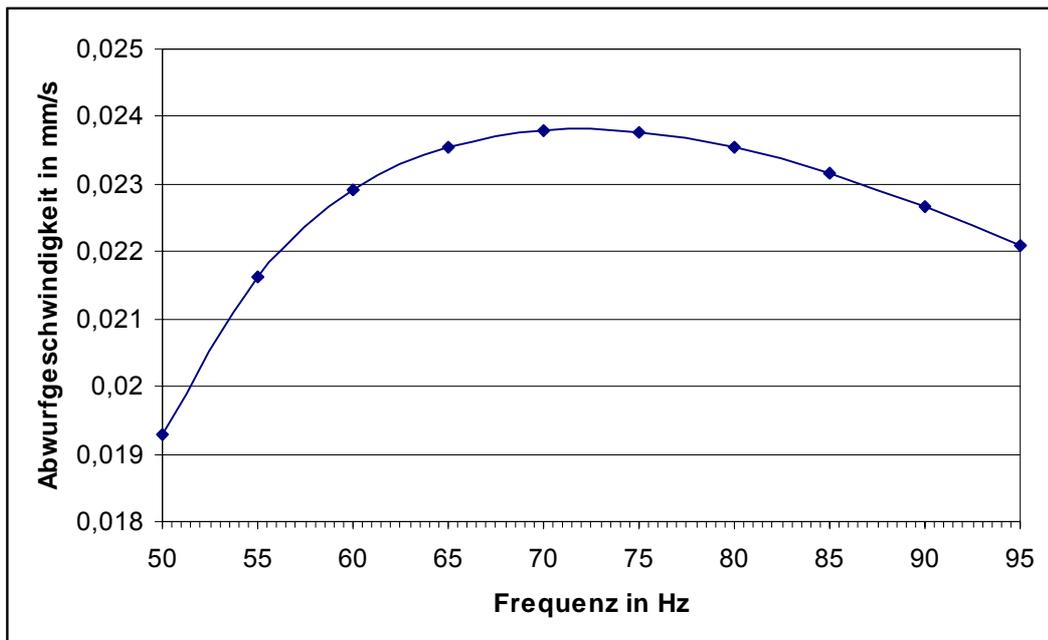


Bild 19. Abwurfgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Frequenz

Aus Bild 19 kann man entnehmen, dass man unter einer bestimmten Frequenz eine maximale Abwurfgeschwindigkeit beobachtet.

Wenn der Sand abgeworfen wird, entsteht ein Spalt zwischen ihm und dem Behälterboden (s. Bilder 13, 15 und 17). Der Spalt soll mit der Luft gefüllt werden, die aus dem Sand abgesaugt wird. Da der Sand keine unendlich hohe Gasdurchlässigkeit besitzt und dieser Vorgang schnell abläuft, entsteht im Spalt und in der Sandmasse während des Abwurfes ein Unterdruck [38]. In der Sandsäule ist dieser Unterdruck nicht gleichmäßig über die Höhe verteilt. Es existiert ein Druckgradient, wobei der größte Unterdruck am Behälterboden auftritt, während sich an der Sandoberfläche kein Unterdruck aufbaut. Die Existenz eines Druckgradienten im Sand bedeutet ein Abbremsen des Wurfes, das nicht gleichmäßig über die Sandhöhe verteilt ist. Die oberliegenden Sandschichten sollten größere Wurfhöhen als die tieferen Schichten erreichen. Dies kann zum Aufbau von neuen Sandbrücken führen, die eine Auflockerung des Sandes bedeuten.

Beim Zusammentreffen des Sandes mit dem Vibrationstisch bzw. Behälterboden findet der umgekehrte Vorgang statt. Die Luft, die aus dem Sand eingesaugt wurde, soll in den Sand zurückgedrängt werden. Im Luftspalt und in der Sandsäule entsteht ein Überdruck.

Die Spaltbreite ΔS als Differenz zwischen den Amplituden des Sandes und des Vibrationstisches kann nach der Gleichung 32 berechnet werden:

$$\Delta S = -9,81 \cdot 0,5 (t_0 - t_A)^2 + V_A (t_0 - t_A) + a (\sin \omega t_A - \sin \omega t_0) \quad (32)$$

Hierin bedeuten:

- t_0 – Zeitpunkt des maximalen Abstandes in s
- t_A – Zeitpunkt des Abwurfes in s
- V_A – Abwurfgeschwindigkeit in m/s
- a – Amplitude des Vibrationstisches in m
- ω – Kreisfrequenz in 1/s ($\omega = 2 \cdot \pi f$)

Die maximalen Spaltbreiten zwischen dem Sand und dem Vibrationstisch und die Wurfdauer bei unterschiedlichen Vibrationsfrequenzen sind im Bild 20 dargestellt.

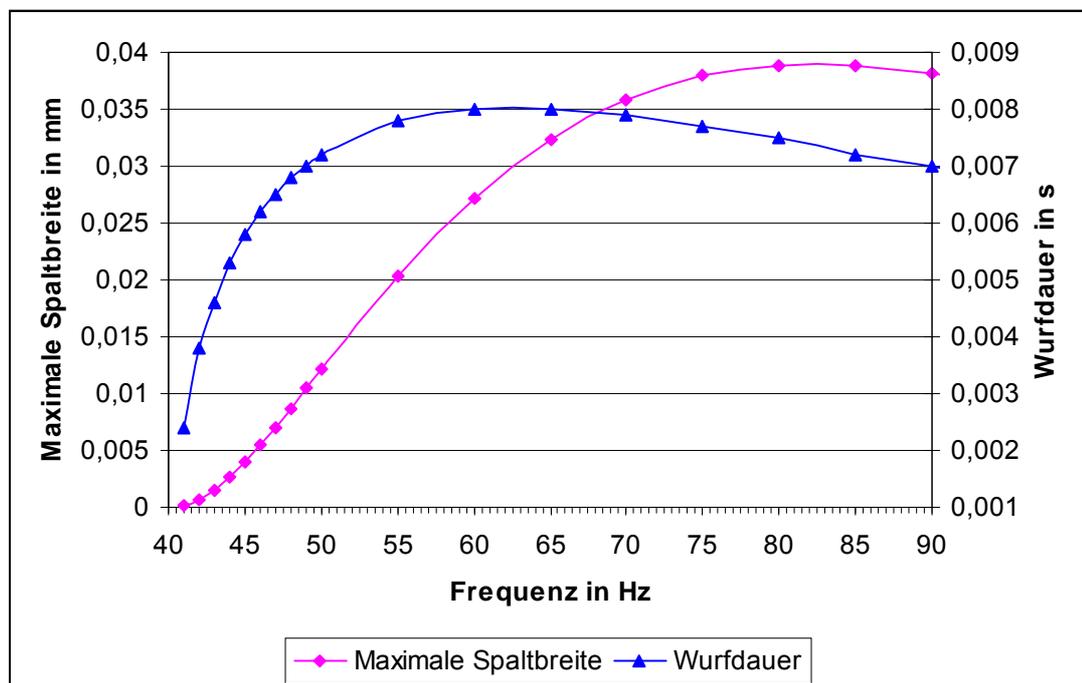


Bild 20. Die maximalen Spaltbreiten und die Wurfdauer in Abhängigkeit von der Frequenz

Wie im Bild 20 zu sehen ist, steigt die maximale Spaltbreite und die Wurfdauer bis zur bestimmten Frequenz sehr stark an. Deshalb ist auch eine Er-

höhung der Luftdruckschwankungen im Sand zu erwarten. Bei einem überkritischen Wert der Luftdruckschwankungen beginnt eine Blasenbildung im Sand [38]. Dies führt zu einer verstärkten Auflockerung des Sandes.

Während der Wurfphase existieren im Sand keine Druckspannungen und während der Berührungsphase sind sie bedeutend niedriger als während der Stoßphase. Deshalb wird angenommen, dass dabei keine bedeutende Verdichtung des Sandes erfolgt. Die Verdichtungsenergie wird in den Sand während der Stoßphase übertragen. Beim Zusammenstoß weist der Sand die Geschwindigkeit V_{SZ} auf. Er wird in die Richtung der Tischbewegung beschleunigt, und das Gesamtsystem nimmt die Geschwindigkeit des Vibrationsstisches an. Die Stoßenergie kann durch die Geschwindigkeitsdifferenz ermittelt werden:

$$E_Z = \frac{m_S * (V_{TZ} - V_{SZ})^2}{g} \quad (33)$$

Hierin bedeuten:

- m_S – Masse des Sandes in kg
- V_{TZ} – Tischgeschwindigkeit beim Zusammenstoß in m/s
- V_{SZ} – Sandgeschwindigkeit beim Zusammenstoß in m/s

Die Differenz zwischen den Geschwindigkeiten des Sandes und des Vibrationsstisches während der Stoßphasen ist für die Größe der in den Sand eingeleiteten Stoßenergie entscheidend. Die lässt sich wie folgend berechnen:

$$\Delta V = -9,81 * (t_Z - t_A) + V_A - a * \omega \cos(\omega t_Z) \quad (34)$$

Hierin bedeuten:

- ΔV – Geschwindigkeitsdifferenz in m/s
- t_Z – Zeitpunkt des Zusammenstoßes in s
- t_A – Zeitpunkt des Abwurfes in s
- V_A – Abwurfgeschwindigkeit in m/s

Die Geschwindigkeitsdifferenz ist von der Frequenz abhängig. Mit steigender Frequenz bis zum 90 Hz nimmt diese zu (Bild 21).

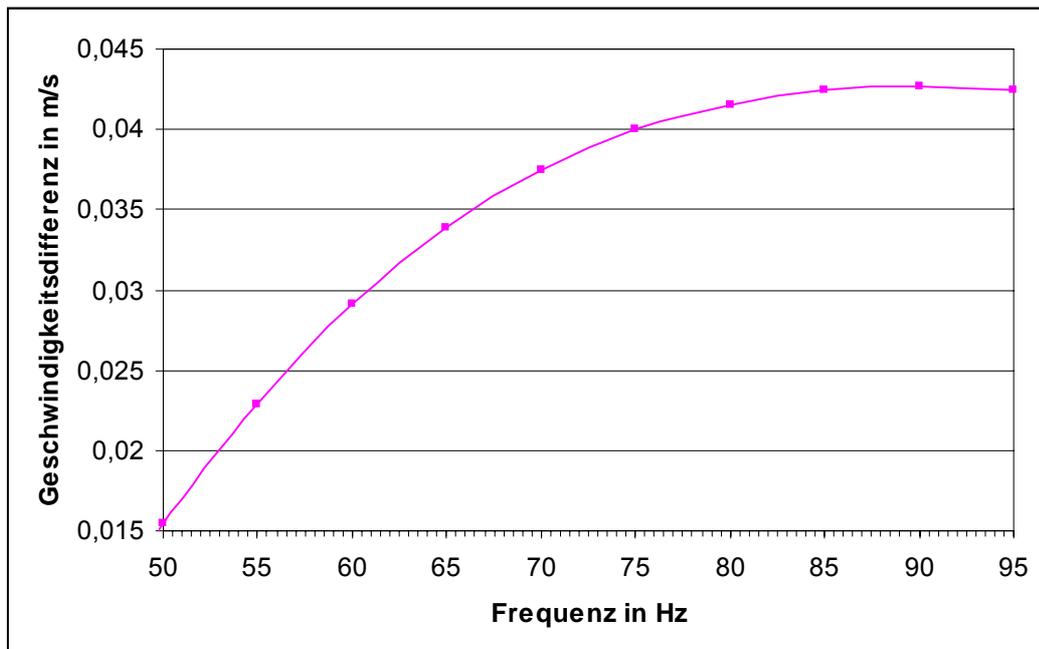


Bild 21. Geschwindigkeitsdifferenz in Abhängigkeit von der Frequenz

Ausgehend von den mathematischen Berechnungen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Um den Transport des Sandes in die Vertiefungen von Modellen zu gewährleisten, soll der Sand im Zustand des Vibrokochens sein. Dies tritt bei Beschleunigungen über 1g auf. Bei der Auswahl der Frequenz soll ein Kompromiss zwischen der Auflockerungswirkung der Luftdruckschwankungen, die mit der steigender Frequenz zunehmen, und der Stoßenergie, die sich bei höheren Frequenzen ebenfalls vergrößert, gefunden werden.
2. Im Beschleunigungsbereich unter 1g ist der Sand im Zustand der Pseudoverflüssigung. Die Vibrationsintensität hat dabei ein bedeutendes Einfluss auf die Sandbewegung.

5.2 Versuche mit der servohydraulischen Prüfmaschine

Um die Sandverdichtungsänderung unter Variation der Amplitude und der Frequenz zu beobachten, wurden Versuchen mit einer servohydraulischen Vibrationsprüfmaschine MTS 880 bei vertikaler Schwingungserregung durchgeführt.

Neben der hohen Genauigkeit und Reproduzierbarkeit besitzt diese Anlage den Vorteil, dass man in einem bestimmten Bereich die Frequenz bei konstanter Amplitude bzw. die Amplitude bei konstanter Frequenz ändern kann. Dies lässt sich mit den üblicherweise eingesetzten Vibrationssystemen (Unwuchtvibratoren, Freikolbenschwingern, Exentervibratoren) nicht realisieren.

Auf diese Weise sollte versucht werden, die ausgesagten Vermutungen zu bestätigen.

Bei den Versuchsdurchführungen stand ein Vibrationsbehälter mit kreisförmigem Querschnitt (Zylinder) mit der Abmessung von $\varnothing 150 \times 300$ mm zur Verfügung. Die experimentelle Überprüfung der vorgenommenen Aussagen kann mit Hilfe von an der TU Bergakademie Freiberg entwickelten Sensoren vorgenommen werden. Ein Sensor wurde an einer Stange in der Behältermitte in zwei Positionen befestigt: einmal unten (ca. 2 cm vom Boden) - **Position 1** und dann oben (ca. 5 cm von der Oberkante) - **Position 2**. Die Bedienungseinrichtung (a) und der Versuchsaufbau (b) sind im Bild 22 dargestellt. Die Versuche wurden 2 bis 4 mal wiederholt. Die Dichte eines jeden Versuches wurde umgerechnet und als Mittelwert dargestellt.

Der mit Quarzsand vollgefüllte Behälter wurde starr mit der Vibrationsprüfmaschine angekoppelt und vertikal durch einen servohydraulischen Vibrator in Schwingungen 2 min/Messung lang versetzt.



a



b

Bild 22. Bedienungseinrichtung (a) und Versuchsaufbau (b)

Es wurde die Sandverdichtung bei Frequenzen von 10 bis 90 Hz und deren maximalen Amplituden untersucht. Die Vibrationsparameter sind in der Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4 Vibrationsparameter

Frequenz, Hz	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Amplitude, mm	0,71	0,35	0,22	0,15	0,12	0,09	0,07	0,06	0,05
Beschleunigung b , m/s^2	2,82	5,53	7,69	9,47	11,84	12,79	13,54	15,16	15,99
b/g	0,29	0,56	0,78	0,96	1,21	1,30	1,38	1,54	1,63

Einige der gemessenen zeitlichen Verläufe von relativen Sanddichten bei Frequenzen von 20 Hz und 70 Hz sind in den Bildern 23 und 24 dargestellt. Dabei wurde der Sensor in der Position 1 unten in der Behältermitte befestigt. Die Messwerte wurden mit einer Abtastrate von 400 Hz aufgenommen.



Bild 23. Kurvenverlauf der relativen Dichte bei der Frequenz von 20 Hz (Position 1)

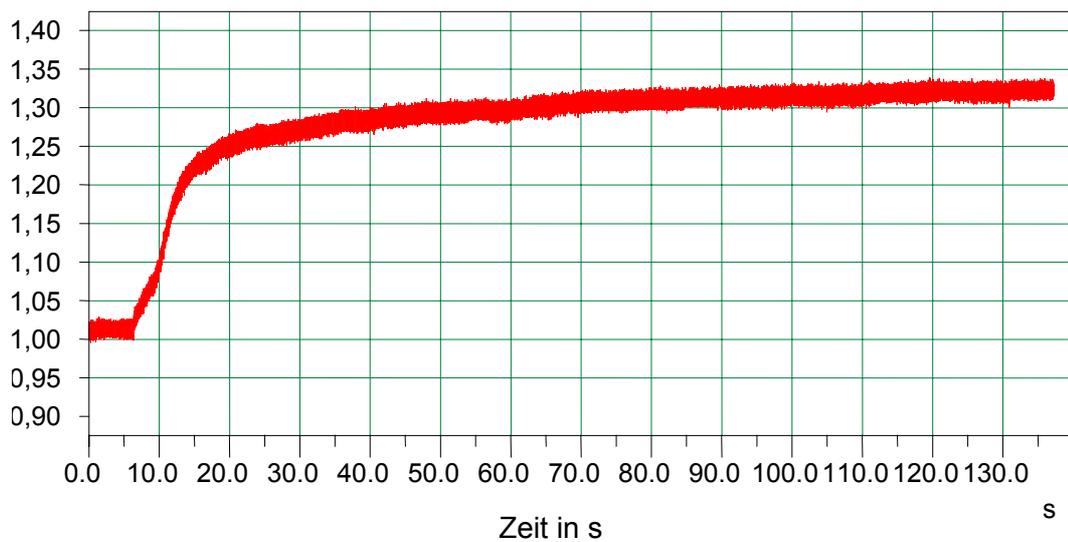


Bild 24. Kurvenverlauf der relativen Dichte bei der Frequenz von 70 Hz (Position 1)

Wie man aus den Bildern erkennt, unterscheiden sich die Kurvenverläufe erheblich. Bei der Frequenz von 20 Hz beobachtet man eine kontinuierliche Änderung der Sanddichte ohne relativ schnellen Anstieg am Anfang wie bei der Frequenz von 70 Hz. Dies weist darauf hin, dass der Sand bei Frequenz von 20 Hz während der Beschleunigung unter 1g liegt, sich kaum bewegt

und den Zustand der Pseudoverflüssigung aufweist. Dagegen zeigt der schwankende Kurvenverlauf der Sanddichte bei einer Frequenz von 70 Hz und einer Beschleunigung über 1g (Tabelle 4) eine intensive Sandbewegung, d. h. der Sand ist im Zustand des Vibrokochens.

Die relativen Sanddichten wurden nach der Gleichung 10 berechnet. Im Bild 25 sind die berechneten Endergebnisse der Sanddichte des unten in der Behältermitte befestigten Sensors bei Frequenzen von 10 bis 90 Hz dargestellt.

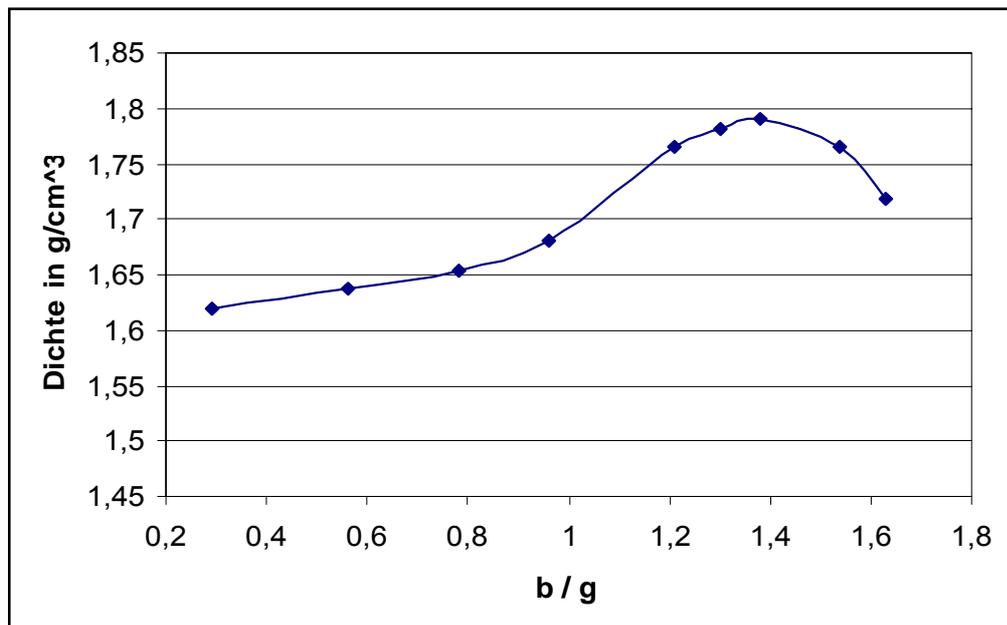


Bild 25. Dichteänderung in Abhängigkeit von den Vibrationsparametern (Position 1)

Wie im Bild 25 zu sehen ist, steigt die Sanddichte bei den Beschleunigungen unter 1g leicht an, während sie im Beschleunigungsbereich über 1g bis zur Frequenz von 70 Hz stärker zunimmt. Bei weiterer Frequenzerhöhung von 80 auf 90 Hz beobachtet man eine Reduzierung der Sanddichte von 1,78 auf 1,72 g/cm³. Dies lässt sich damit erklären, dass bei 70 Hz ein überkritischer Wert der Luftdruckschwankungen erreicht wird, und deshalb beginnt eine Blasenbildung im Sand, was zu einer Auflockerung des Sandes führt.

Einige Messergebnissen zur Sensorsposition 2 bei Frequenzen von 20 und 70 Hz sind in den Bildern 26 und 27 dargestellt.

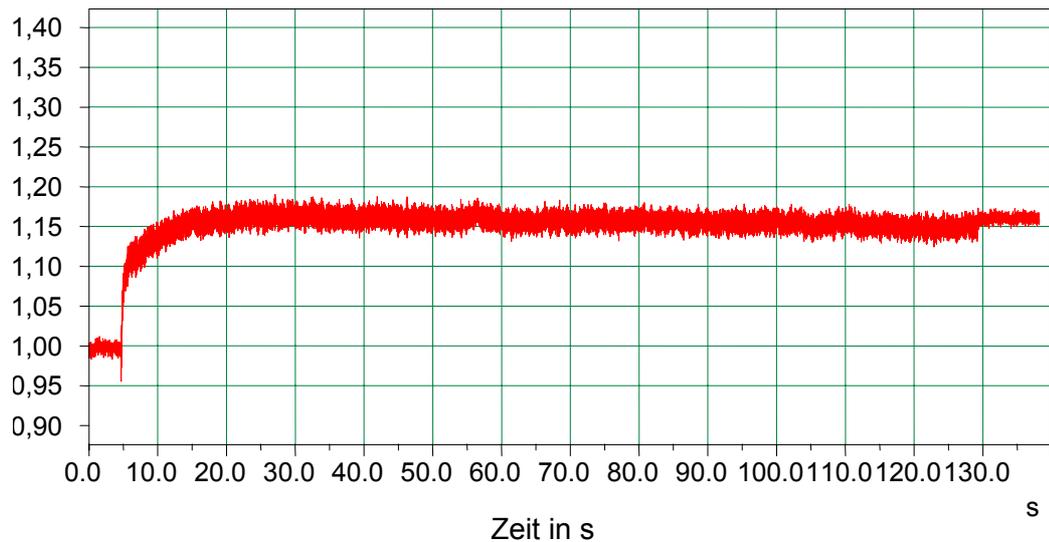


Bild 26. Kurvenverlauf der relativen Dichte bei der Frequenz von 20 Hz (Position 2)

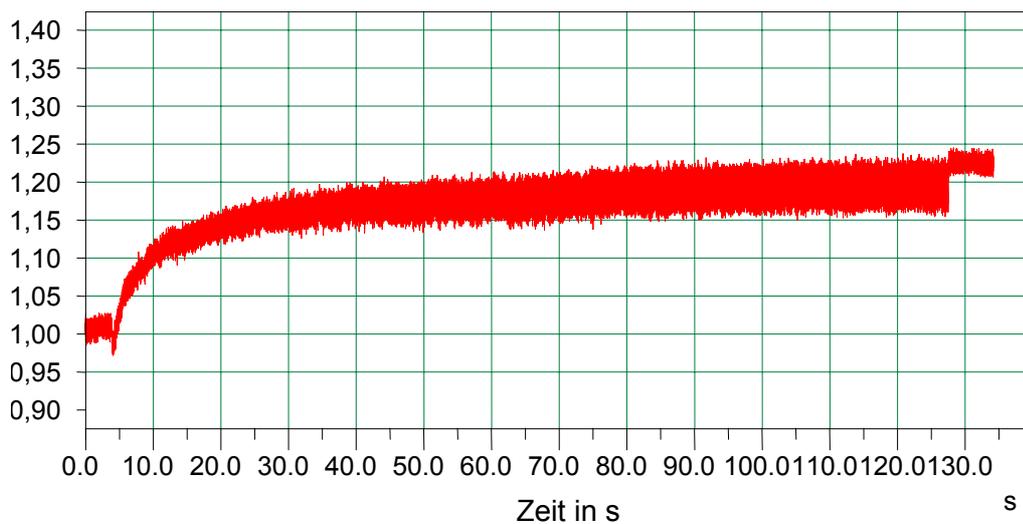


Bild 27. Kurvenverlauf der relativen Dichte bei der Frequenz von 70 Hz (Position 2)

Aus den Bildern erkennt man, dass sich der Sand in beiden Beschleunigungsbereichen (unter und über 1g) stärker bewegt. Dabei wurde er weniger als unten in der Behältermitte verdichtet (Bild 28). Dies ist auf den Druckgradient im Sand zurückzuführen, da der Wurf abgebremst wird und das Abbremsen des Wurfes nicht gleichmäßig über die Sandhöhe verteilt ist. Die

obenliegenden Sandschichten erreichen größere Wurfhöhen als die tieferen Schichten, was zur Auflockerung des Sandes führt.

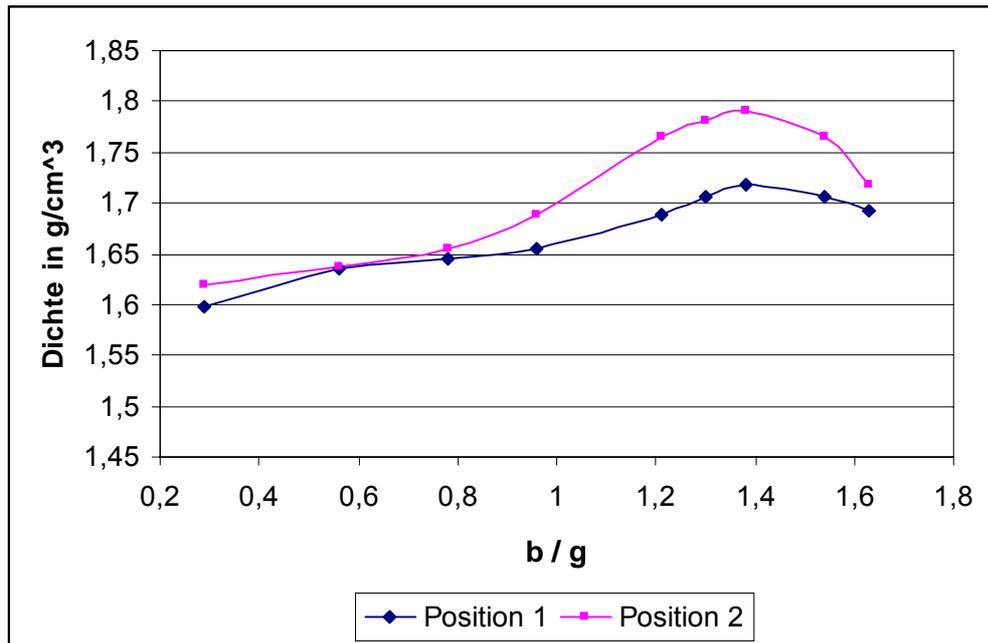


Bild 28. Dichteänderung in Abhängigkeit von Vibrationsparametern

Aus der Analyse der Messergebnisse kann folgendes zusammengefasst werden:

1. Die Vibrationsparameter haben einen großen Einfluss auf die Sandverdichtung unter Vibrationseinwirkung. Es existieren zwei Bereiche (Beschleunigungen unter und über 1g), in denen sich der Sand unterschiedlich verhält.
2. Bei Beschleunigungen über 1g bewegt sich der Sand sehr intensiv mit einer Trennung vom Behälterboden. Solche Parameter werden für den Sandtransport und das Sandfüllen von Vertiefungen in Modellen empfohlen. Dabei muss beachtet werden, dass Frequenzen über 70 Hz zur Sandauflockerungen führen.
3. Bei Beschleunigungen unter 1 g ist der Sand im Zustand der Pseudoverflüssigung und bewegt sich nicht intensiv. Dies wird für die Nachverdichtung des Sandes empfohlen.

5.3 Untersuchung der Sandbewegungen unter Variation der Vibrationsparameter mit der Hochgeschwindigkeitskamera

Um die Sandbewegungen während der Vibration genauer untersuchen und auch quantitativ bewerten zu können, wurde eine Reihe von Versuchen mit ein- und zweidimensionalen Schwingrichtungen durchgeführt und die Sandbewegungen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera festgehalten.

Wie die bereits im Vorfeld durchgeführte Tests gezeigt haben, ist es generell problematisch, die Bewegungen einzelner Sandkörner in einer homogenen Masse zu verfolgen. Die Schwierigkeit besteht im wesentlichen darin, dass der Sand in seiner Bewegung hinter einer Glasscheibe durchaus beobachtet werden kann, aber ein einzelnes Korn sich einmal von der Scheibe in die Masse hinein- oder aus der Masse an die Scheibe heranbewegen kann und sich nur im für den Betrachter günstigen Fällen entlang der Glasscheibe bewegt.

Deshalb musste eine Lösung gefunden werden, die diesem Umstand Rechnung trägt und die Verfolgung der Sandbewegungen in unterschiedlichen Höhen sowie deren quantitative Bewertung zulässt.

5.3.1 Versuchsaufbau

Für die Versuchsdurchführung wurde der kleine im vorherigen Abschnitt erwähnten Vibrationsbehälter (310×340×550 mm) benutzt. Seine Vorderseite ist verglast und ermöglicht somit eine Verfolgung der Sandbewegungen über den gesamten Behälterquerschnitt.

In einem Abstand von ca. 3 Metern wurde die Hochgeschwindigkeitskamera vom Typ „SpeedCam 2000“ in die entsprechende Aufnahmeposition gebracht. Die Kamera ist mit einem Rechner gekoppelt, der mittels einer speziellen Aufnahmesoftware deren Steuerung realisiert. Weiterhin gehört dazu

auch noch ein Kontrollmonitor, mit dessen Hilfe die Kameraeinstellungen vor der Aufnahme überprüft und korrigiert werden können.

Die Kamera selbst verfügt über einen Ringspeicher, der während der Aufnahme ständig be- und überschrieben wird, und erst nach Bestätigung eines Triggers wird dieses Be- und Überschreiben beendet. Die auf dem Speicher verbliebenen Daten stehen dann zur Abspeicherung auf dem Rechner zur Verfügung. Die „überschreibungsfreie“ Aufnahmedauer kann über die Aufnahmefrequenz (Bilder pro Sekunde) und die Bildpunkte eingestellt werden. Auf der Grundlage des im Vorfeld durchgeführten Tests wurden für die Versuche 100 Hz und 128x512 Pixel ausgewählt, das entspricht in etwa einer Aufnahmedauer von 20 s.

Die für die Aufnahmen erforderliche Ausleuchtung des Objektes wurde mittels starker Scheinwerfer, die aus unmittelbarer Nähe den Behälter anstrahlten, realisiert.

5.3.2 Versuchsdurchführung

Zuerst wurde vor jedem Versuch der Behälter manuell befüllt. Um einen gut sichtbaren Kontrast zu erzeugen, wurde abwechselnd regenerierter (dunkler) und neuer (fast weißer) Sand in den Behälter gefüllt, so dass stets acht weiße Schichten entstanden. Das Behälterfüllen geschah unter größter Vorsicht, um dabei möglichst keine Vorverdichtung des Sandes zu erzeugen. Im Bild 29 ist das Ergebnis dieser Befüllung dargestellt, in die Grenzflächen zwischen „Hell“ und „Dunkel“ wurden für die Auswertung dann die Messpunkte gelegt. Denn nicht die Bewegungen des einzelnen Sandkornes bildeten die Grundlage für die Versuche, sondern die Bewegungen dieser Grenzflächen im Behälter.

Nach dem Befüllen des Behälters wurden die Scheinwerfer und die Kamera mit dem Zubehör eingeschaltet. Über den Kontrollmonitor wurde die Ausleuchtung des Objektes (Sandschichten im Behälter – hinter der Glasschei-

be) begutachtet und entsprechend korrigiert. War die richtige Einstellung gefunden, wurde die Kamera auf Aufnahme gestellt und mit dem voreingestellten Druck (Drücken) die Vibration gestartet. Nach knapp 20 s wurde über den Triggerschalter die Kameraaufnahme gestoppt, und eine Zeitspanne von 5 s vom Versuchsbeginn abgewählt und im Rechner abgespeichert.

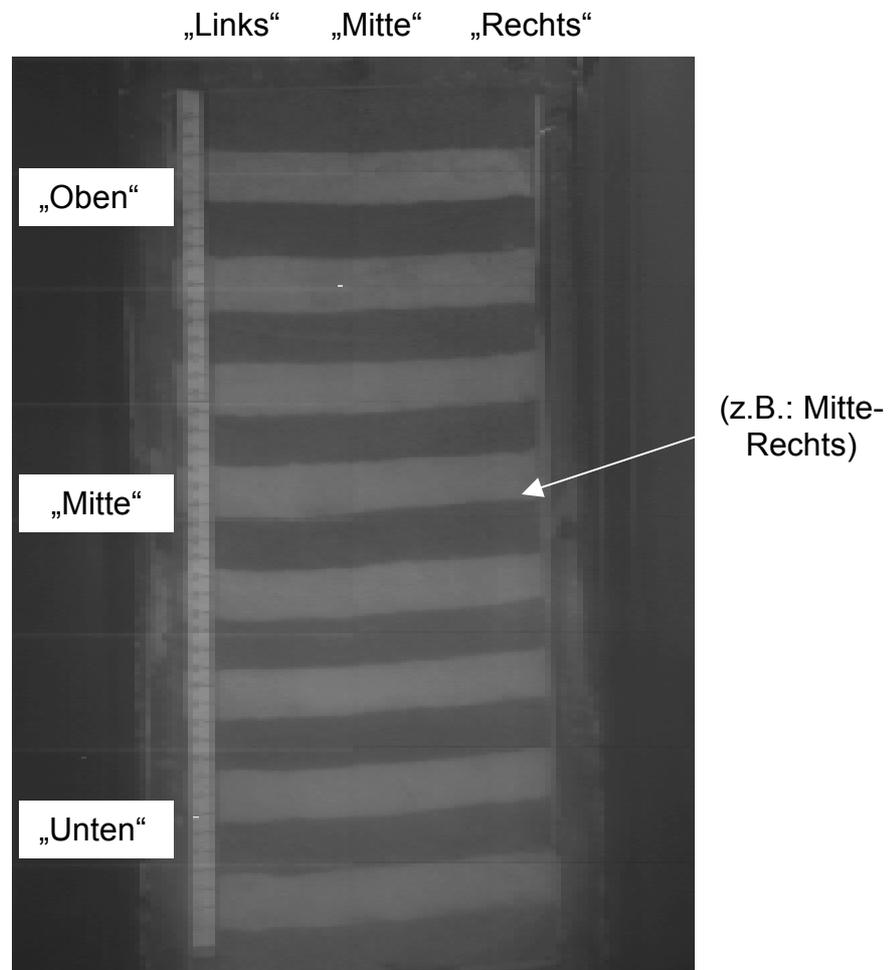


Bild 29. Lage der Messpunkte

Der Zeitraum von 5 s wurde allgemein als ausreichend angesehen, weil auch die im Vorfeld durchgeführte Tests gezeigt haben, dass in diesem Zeitraum das Wesentlichste vor sich geht und die folgenden Veränderungen in größeren Zeitabständen, die einen Einsatz einer Hochgeschwindigkeitskamera nicht erfordern, ablaufen.

Die Vibration wurde bei jedem Versuch insgesamt ca. 1 min durchgeführt und das „Schlussbild“ visuell begutachtet und handschriftlich festgehalten,

um evtl. zusätzliche/ergänzende Aussagen für die Auswertung der Kameraaufnahmen zur Verfügung zu haben.

Um für die eindimensionale horizontale bzw. vertikale Vibration vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wurde der Kolbenvibrator NTS 50/20 nicht nur für die vertikale, sondern auch für die horizontale Erregung benutzt. Bei der zweidimensionalen Vibration wurde der horizontale Teil von einem Kolbenvibrator NTS 54/02 ausgeführt.

5.3.3 Versuchsauswertung

Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt mit Hilfe eines speziellen „Analyse“ Programms. Aufgrund der bereits beschriebenen Spezifik der Sandbewegung ist es jedoch nicht möglich, die automatische Verfolgung der ausgewählten Punkte ausführen zu lassen; sondern die Bewegung muss manuell verfolgt werden, aber nur in vertikaler Richtung. Die Verfolgung und Auswertung der horizontalen Bewegungen entlang der Grenzlinien sind nicht möglich.

Der Koordinatenursprung liegt im Auswertesystem in der linken oberen Ecke, d. h., die Bewegung der Linien nach unten ergibt positive und nach oben negative Höhenänderungen. In den Diagrammen sind dann auch diese Änderungen der jeweils acht Punkte eines Versuches in leicht entzerrter Form, d. h., nicht jede Kurve beginnt im Nullpunkt, dargestellt.

Ein vorzeitiger Abbruch einer Kurve zeigt an, dass hier die Grenzlinie verwischt, d. h., der helle Sand beginnt sich mit dem dunklen zu mischen bzw. umgekehrt. Das bedeutet also nicht, dass die Bewegungen aufhören, sondern sie sind stärker, aber nun nicht mehr zweifelsfrei zuordenbar; weil jetzt ein Durchmischungsvorgang an dieser Stelle einsetzt.

Bei einigen Versuchen traten diese Verwirbelungen bereits unmittelbar nach Versuchsbeginn auf, so dass hier für die betreffenden Punkte keine auswertbaren Kurven verfügbar sind.

Ein vorzeitiges Ende des Diagramms vor dem letzten Auswertepunkt von 4,75 s bedeutet, dass hier keine Bewegung mehr stattfand und somit eine weitere Auswertung uneffektiv war.

Bei der eindimensionalen horizontalen Vibration wurde die Erregung von 30 Hz über 38 auf 54 Hz gesteigert. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Frequenz die Bewegungen in allen untersuchten Schichten zunehmen (s. Bilder 30 bis 32). In der oberen und mittleren Lage setzen die Verwirbelungstendenzen eher ein. Die Höhenänderung in der unteren Lage ist bei Frequenz von 54 Hz größer als in der oberen Lage bei einer Frequenz von 30 Hz.

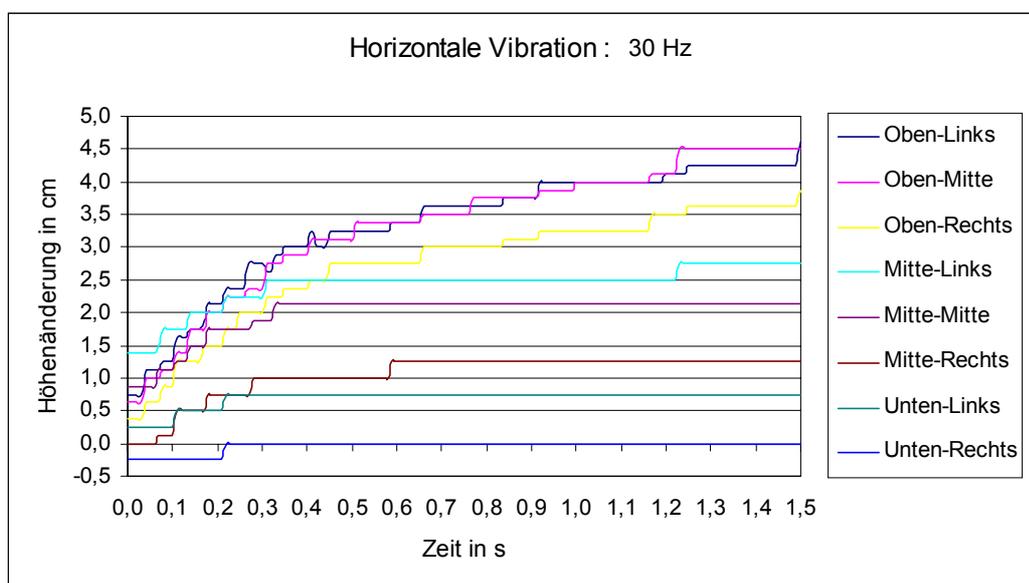


Bild 30. Sandbewegungen bei horizontaler Vibration mit 30 Hz

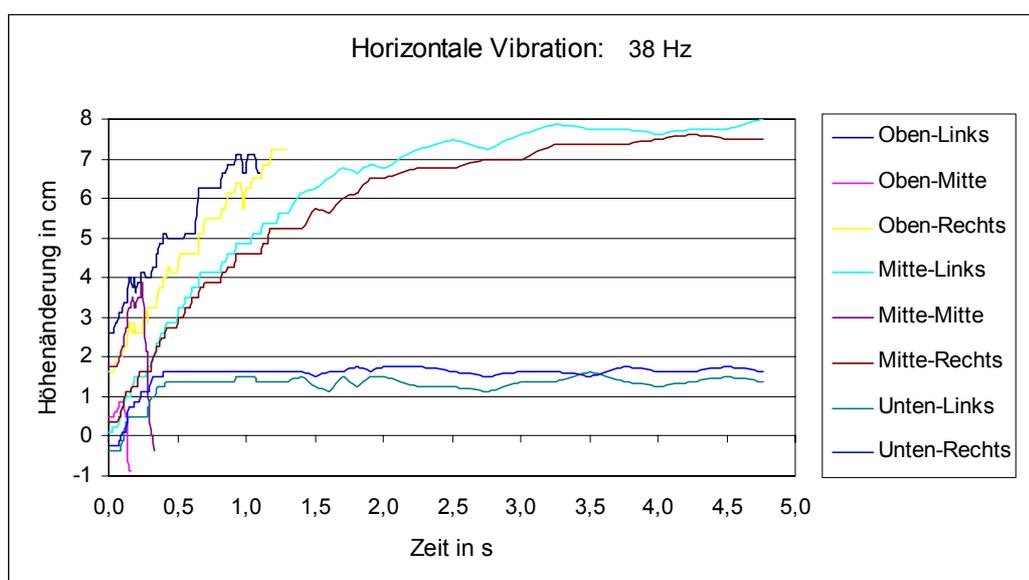


Bild 31. Sandbewegungen bei horizontaler Vibration mit 38 Hz

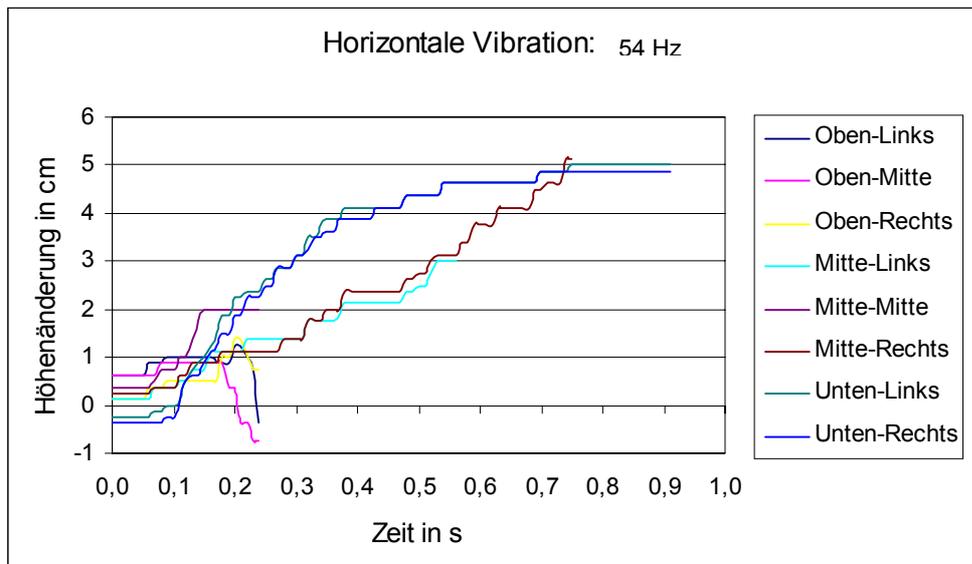


Bild 32. Sandbewegungen bei horizontaler Vibration mit 54 Hz

Wie die Bilder 33 bis 35 zeigen, stellen sich bei der eindimensionalen vertikalen Vibration unter ansonsten gleichen Versuchsbedingungen ähnliche Ergebnisse ein. Dabei setzen die Verwirbelungen später ein und die Höhenänderungen der vergleichbaren Punkte sind ebenfalls niedriger, wobei sie aber hier bei einer Frequenz von 32 Hz die höchsten Werte erreichen. Die Höhenänderungen in der unteren Lage erreichen auch bei Frequenz von 38 Hz nicht die mit den anderen Lagen vergleichbaren Werte. Innerhalb der Schichten werden die Höchstwerte von den mittleren Messpunkten erreicht.

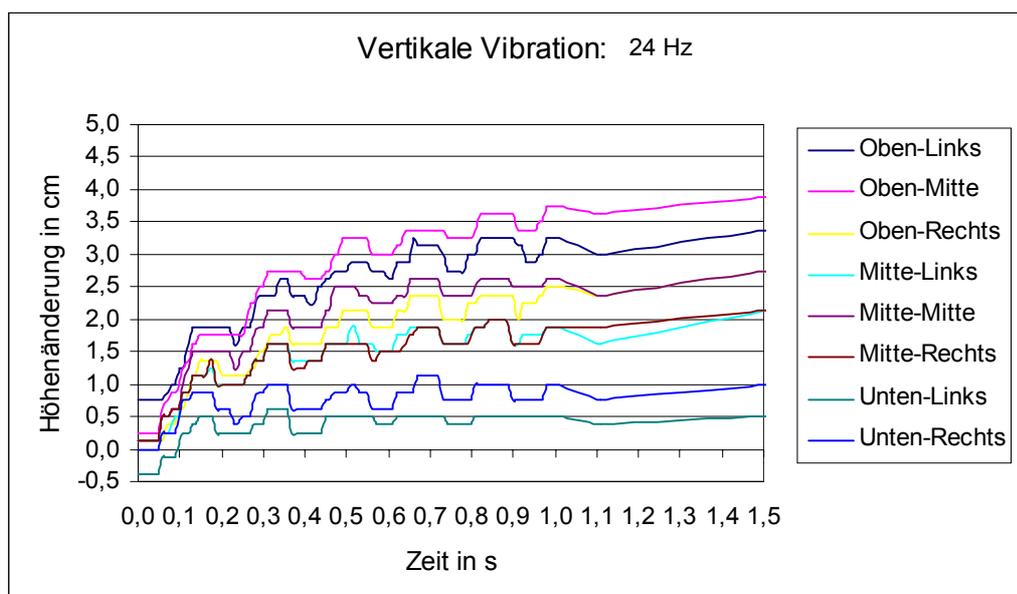


Bild 33. Sandbewegungen bei vertikaler Vibration mit 24 Hz

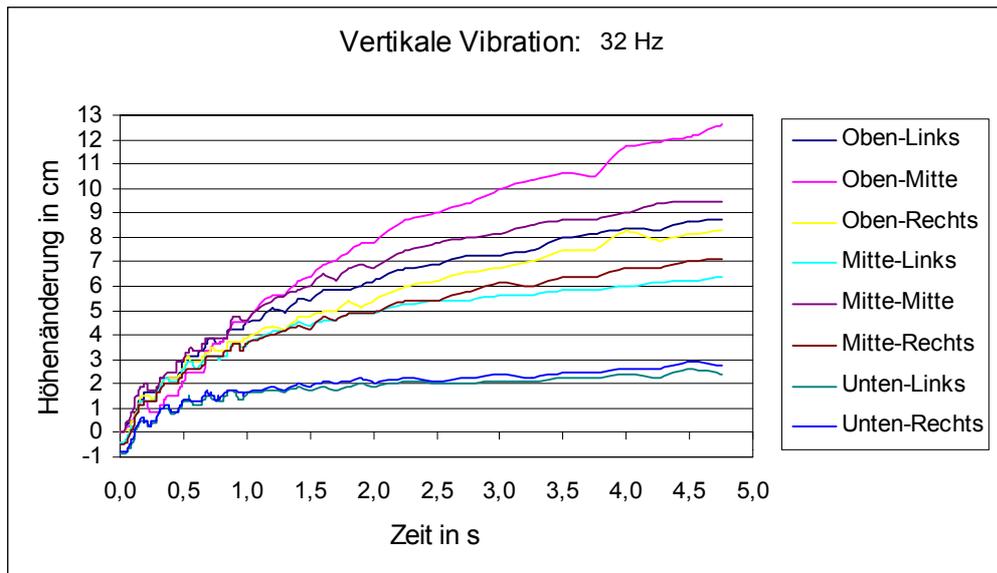


Bild 34. Sandbewegungen bei vertikaler Vibration mit 32 Hz

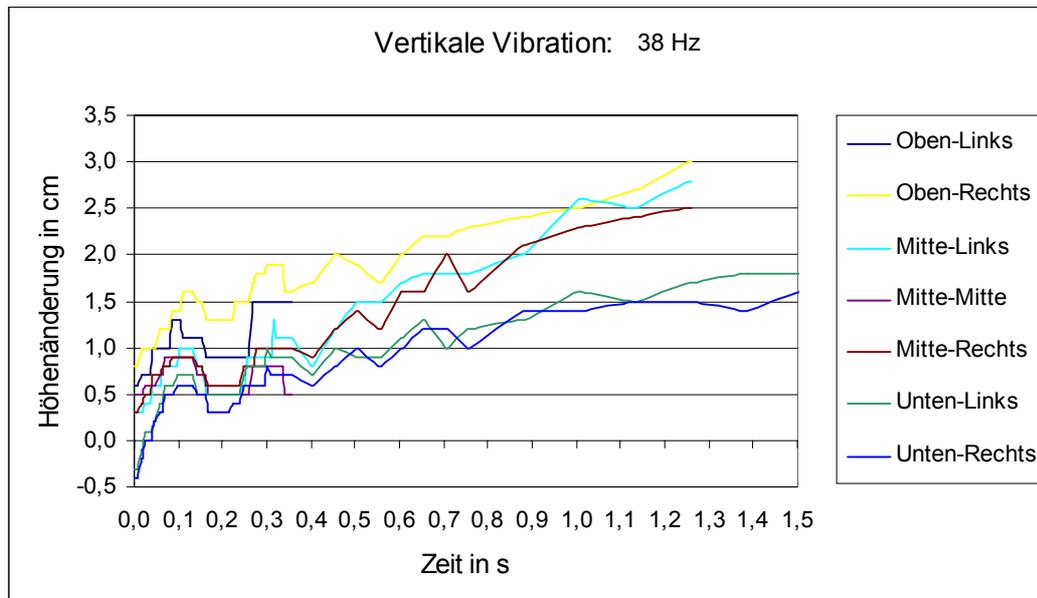


Bild 35. Sandbewegungen bei vertikaler Vibration mit 38 Hz

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde bei der zweidimensionalen Vibration der Schwerpunkt der Untersuchungen auf die horizontale Erregung gelegt. D. h., bei einer konstanten vertikalen Erregung von 24 Hz wurde die horizontale Erregung von 30 auf 41 Hz erhöht. Diese Versuchsserie wurde bei 30 und 34 Hz vertikaler Frequenz wiederholt, um auch einen Vergleich zum Einfluss der vertikalen Vibration zu haben.

Bei der Vertikalerregung von 24 Hz führt die Erhöhung der horizontalen Erregung analog zur eindimensionalen Erregung zu einer zunehmenden Bewegung der untersuchten Schichten und ab 30 Hz zu wachsenden Verwirbelungstendenzen, beginnend mit den Messpunkten in der oberen Lage. Desweiteren sind zunehmende Messwertdifferenzen zwischen linker und rechter Seite, wobei letztere stets die größeren Höhenänderungen aufweist, zu beobachten. Die Höchstwerte innerhalb der Schichten werden von den mittleren Messpunkten erreicht, wenn bei diesen keine Verwirbelungen zum Kurvenabbruch führen (Bilder 36 und 37).

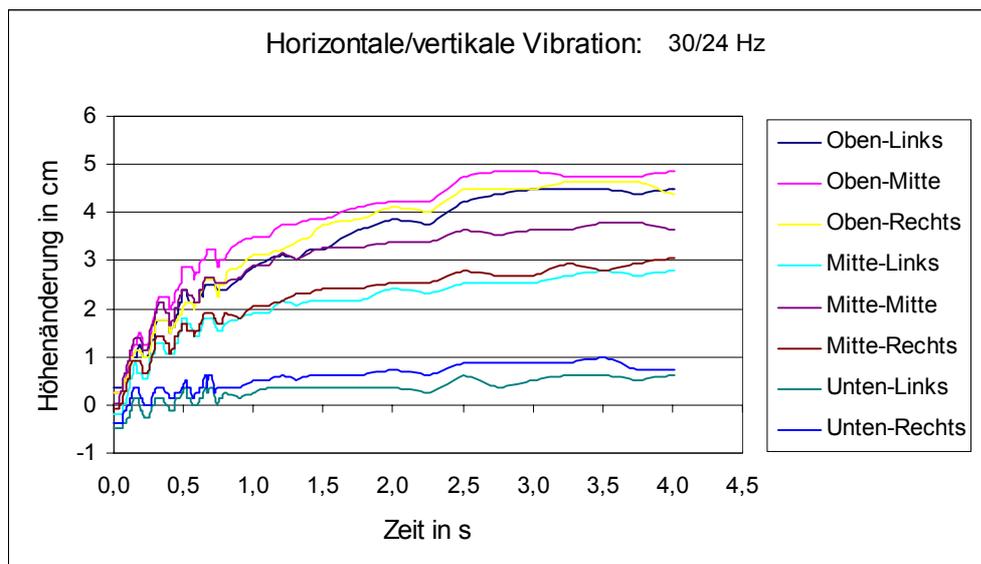


Bild 36. Sandbewegungen bei horizontal/vertikaler Vibration (30/24 Hz)

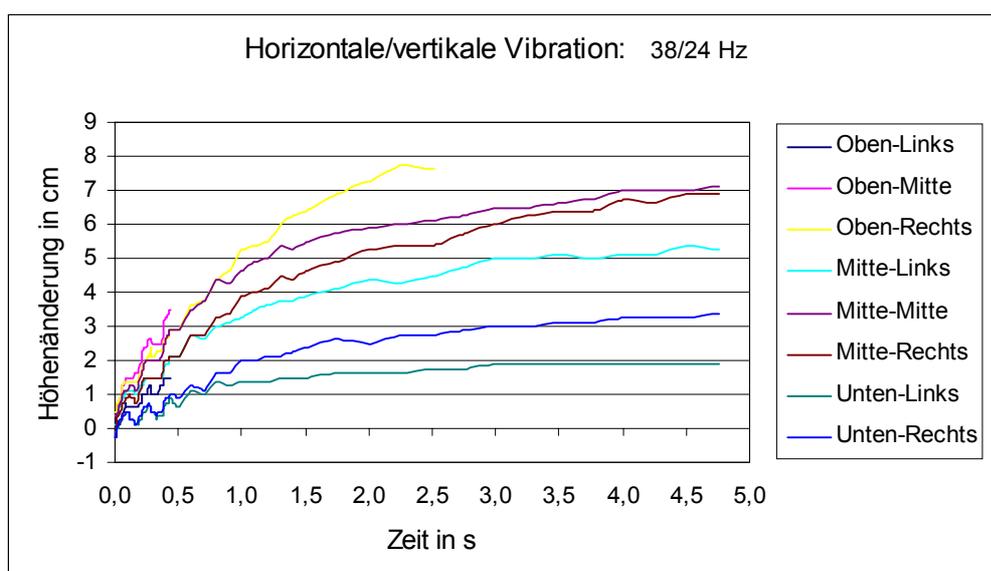


Bild 37. Sandbewegungen bei horizontal/vertikaler Vibration (38/24 Hz)

Bei einer Vertikalfrequenz von 30 Hz stellt sich bereits bei 30 Hz horizontaler Erregung eine Verwirbelung der oberen Schicht ein und die Höhenänderung erreicht in allen Schichten im Vergleich zur 24-Hz-Serie in etwa den doppelten Wert (Bilder 36 und 38).

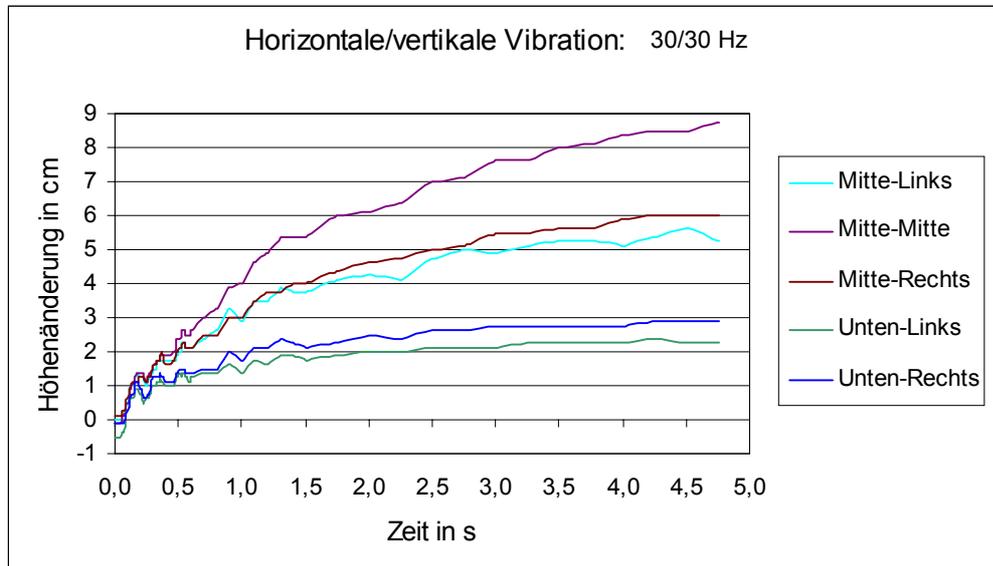


Bild 38. Sandbewegungen bei horizontal/vertikaler Vibration (30/30 Hz)

Wider Erwarten bringt die Erhöhung der horizontalen Erregung keine Steigerung mehr, sondern die Werte „pendeln“ sich auf dem erreichten Niveau ein (Bilder 38 und 39). Einzig der Messpunkt „Mitte – Rechts“ bringt mit der Frequenzerhöhung eine Zunahme in der Höhenänderung; das deckt sich durchaus mit den an den Versuchsenden gemachten visuellen Beobachtungen, dass sich die Sandschichten in der rechten Ecke verstärkt nach unten bewegen.

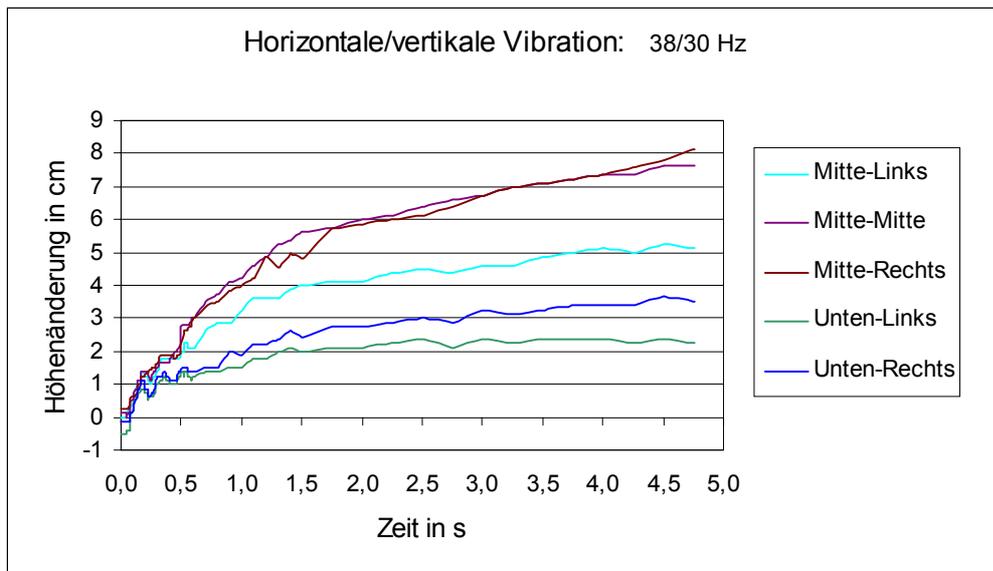


Bild 39. Sandbewegungen bei horizontal/vertikaler Vibration (38/30 Hz)

Bei einer Vertikalfrequenz von 34 Hz sind die oberen Schichten ebenfalls von Beginn an verwirbelt, die Höhenänderungen jedoch sind wesentlich niedriger als bei der 30-Hz-Serie und in der mittleren Lage noch niedriger als bei der 24-Hz-Serie, jedoch in der unteren Lage sind sie im Vergleich dazu höher (Bilder 40 und 41). Mit der Erhöhung der horizontalen Erregung nimmt die Höhenänderung zu.

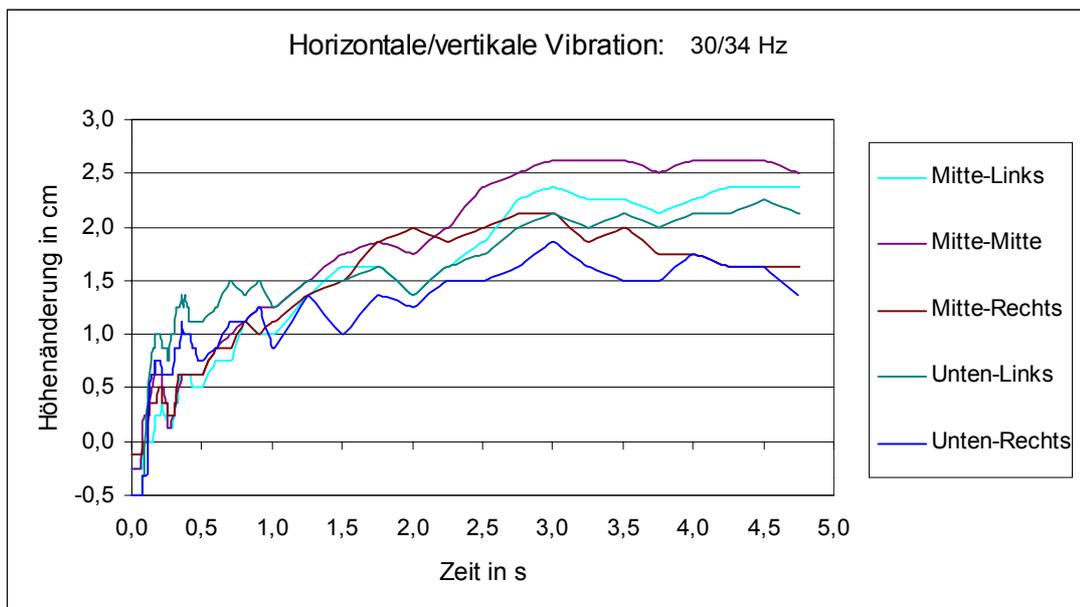


Bild 40. Sandbewegungen bei horizontal/vertikaler Vibration (30/34 Hz)

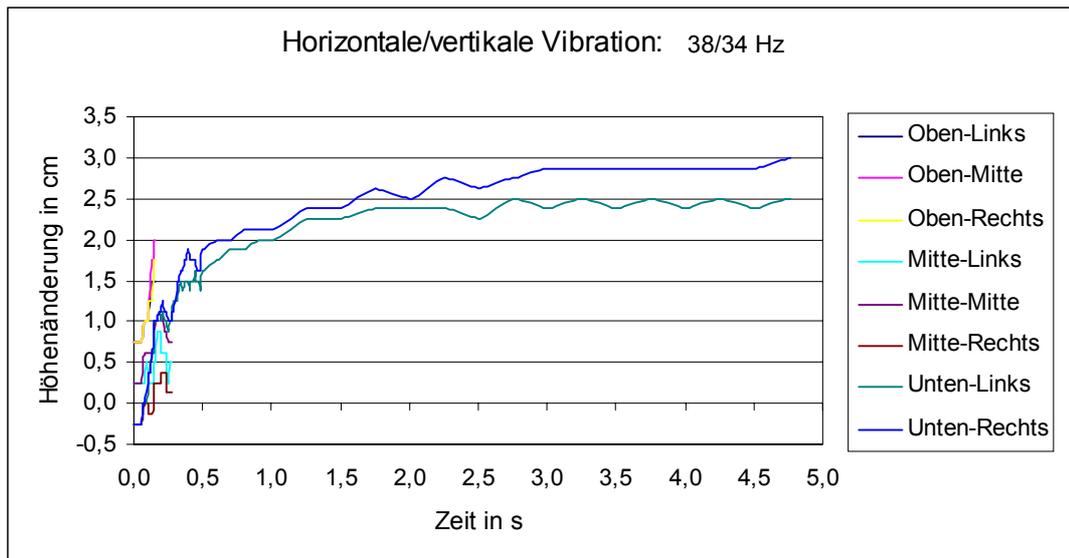
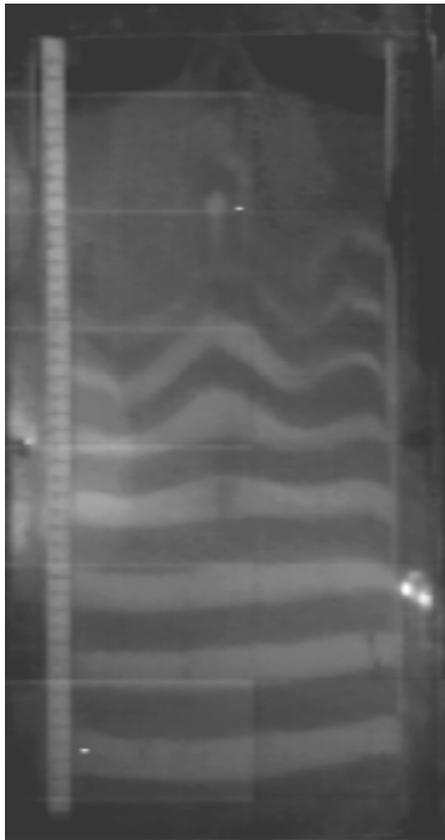


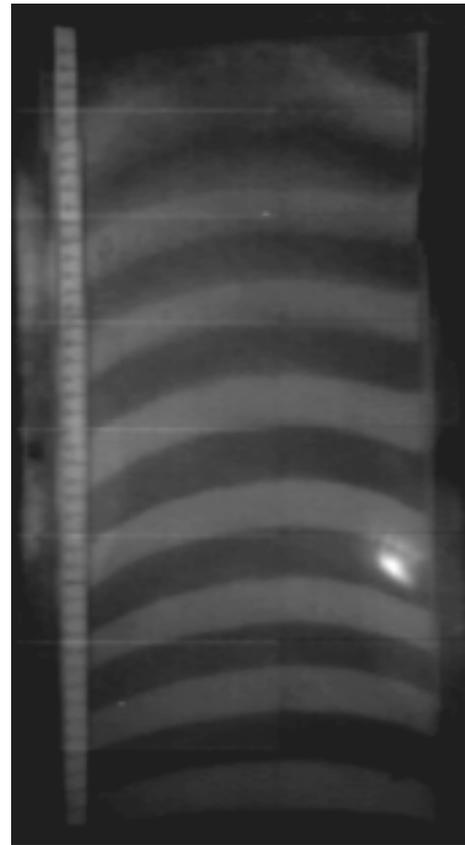
Bild 41. Sandbewegungen bei horizontal/vertikaler Vibration (38/34 Hz)

Damit wird augenscheinlich, dass bei der zweidimensionalen Vibration eine vertikale Frequenz von 30 Hz einen optimalen Wert darstellt bzw. in unmittelbarer Nähe zum Optimum liegt. Das bestätigt sich auch in den zum jeweiligen Versuche festgehaltenen Beobachtungen, wo bei 30 Hz stets der durchmischte Bereich am größten war und die noch sichtbaren hellen Sandschichten sich am weitesten nach unten bewegt hatten.

Im Bild 42 sind als Beispiel Sandbewegungen bei horizontaler (a) und vertikaler (b) Frequenz von 30 Hz dargestellt. Im Bild 42 (a) sind starke Sandbewegungen sehr gut erkennbar. Dabei zeigt das Bild 42 (b) die Sandbewegungen bei vertikaler Vibration im Zustand des Vibrokochens in der Anfangsphase. Man sieht, dass die oberen Schichten in beiden Fällen sich stärker bewegen. Damit wurden die Vermutungen bestätigt.



(a)



(b)

Bild 42. Vergleich der Sandbewegungen bei horizontaler (a) und vertikaler (b) Frequenz von 30 Hz

5.3.4 Zusammenfassung

Die Untersuchungen mit der Hochgeschwindigkeitskamera haben den Nachweis erbracht, dass sich der Sand in einem Behälter beim Vibrieren an der Behälterwand (Glasscheibe) grundsätzlich erst einmal nach unten bewegt, wenn er in seiner Bewegung nicht behindert wird. Mit zunehmender Frequenz treten jedoch Turbulenzen, beginnend in den oberen Schichten, auf. Der Sand bewegt sich hier ungeordnet, der „Helle“ mischt sich mit dem „Dunklen“ und einzelne Körner bewegen sich „gegenläufig“. Bei beginnenden Verwirbelungen konnten diese gegenläufigen Bewegungen teilweise eindeutig beobachtet werden.

Es bestätigt sich, dass mit zunehmender Sandsäule die Beweglichkeit des Sandes abnimmt. Recht augenscheinlich wird das bei der unteren Lage mit

einer durchschnittlichen Sandsäule von ca. 40 cm. Während bei der oberen Lage mit ca. 5 cm und der mittleren Lage mit ca. 20 cm Sandsäule teilweise die oben angeführten Verwirbelungen auftreten, werden unten keine ungeordneten Bewegungen beobachtet. Und hier betragen die Höhenänderungen nur ca. 1/3 - 1/4 der oberen Lage (teilweise noch weniger).

Bei den Untersuchungen zum Verdichtungsverhalten des Sandes wurden eine geringe Verdichtbarkeit und ungenügende Füllung von Hohlräumen und Hinterschneidungen im unteren Bereich gefunden. Diese Ergebnisse können damit auf die geringe Beweglichkeit des Sandes in dieser unteren Lage zurückgeführt werden.

In den der oberen und mittleren Lage entsprechenden Schichten wurde hingegen bei den Verdichtungsversuchen eine gute Füllung von Hohlräumen und Hinterschneidungen festgestellt. Diese Lagen neigen bei höheren zweidimensionalen Erregungen zu Verwirbelungen, die durch starke, ungerichtete Bewegungen der einzelnen Sandkörner entstehen, so dass durchaus ein Zusammenhang zwischen den auftretenden Turbulenzen und der Füllbarkeit der Hohlräume und Hinterschneidungen denkbar ist.

5.4 Untersuchung der Sandfüllung bei zweidimensionaler Vibration

Ausgehend von im Abschnitt 5.3 beschriebenen Versuchsergebnissen wurde das Sandfüllvermögen von Modellvertiefungen bei zweidimensionaler Vibration genauer untersucht. Für diese Versuche wurde ein Modell angefertigt, das im Bild 43 dargestellt ist. Die Vertiefungshöhe wurde in den Werten 10, 8,6 und 6,6 cm variiert. Das Modell wurde an die durchsichtige Vorderseite des Behälters geklebt, um die Sandfüllung im Innenbereich zu beobachten. Es wurde ein Sensor für die Verdichtungsmessung im Modell angebracht und ein Beschleunigungsaufnehmer am Behälterrand befestigt. Die Sanddichte und die Vibrationsparameter wurden gleichzeitig gemessen.

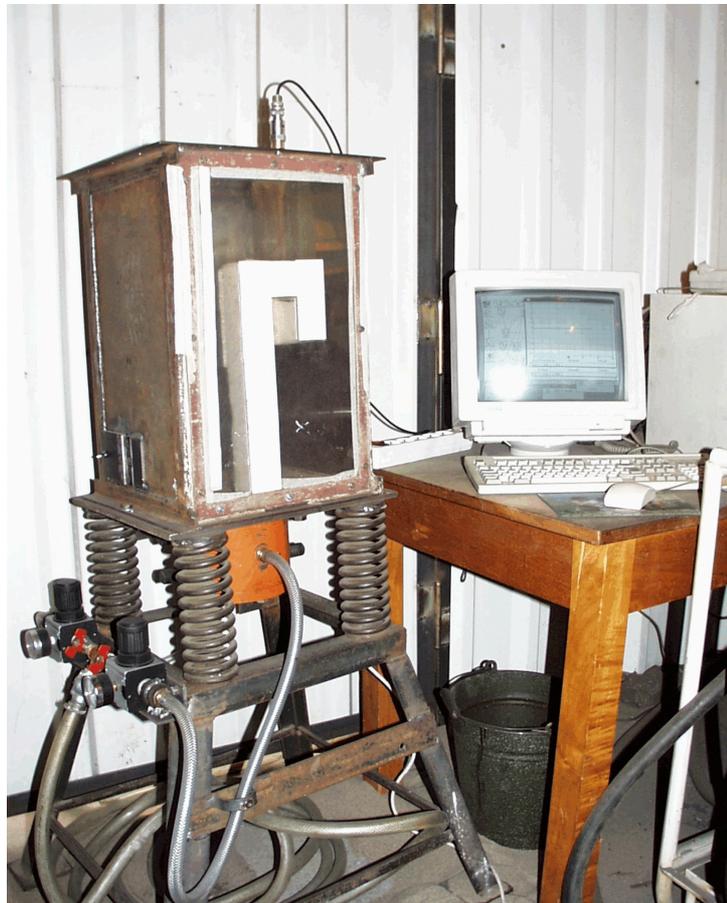


Bild 43. Versuchsaufbau

Zum Einsatz stand ein Behälter mit der Innenabmessung von 340×310×550 mm entsprechend Länge×Breite×Höhe. Der Vibrationstisch mit Quarzsand gefülltem Behälter wurde horizontal durch einen druckluftgetriebenen Vibra-

tor vom Typ NTS 54/02 und vertikal durch den druckluftgetriebenen Vibrator vom Typ NTS 50/20 gleichzeitig in Schwingungen versetzt.

Zunächst wurde der Behälter mit Sand vollgefüllt und bei unterschiedlichen Vibrationsparametern vibriert. Anschließend wurde der Behälter nachgefüllt und weitervibriert. Die Sandfüllung wurde bei gleichzeitig horizontaler und vertikaler Schwingungserregung gemessen. Die Nachfüllzeit des Sandes wurde variiert. Er wurde entweder in der Pause zwischen oder während der Vibration nachgefüllt. Die Verschiebung der Sandsäule wurde nach einer bestimmten Zeit (ca. 60 s) mit Hilfe einer auf dem Modell angebrachten, gezeichneten Skala gemessen. Der Versuchsverlauf und -ergebnisse sind in der Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5 Versuchsverlauf und -ergebnisse

H = 10 cm

N	Vibrationsrichtung und -frequenz, Hz		Erreichte Sandhöhe, cm	Vibrationszeit, s	Dichte, g/cm ³	Bemerkungen
	Vertikale	Horizontale				
1	2	3	4	5	6	7
1	34	41	4	425	0,359	Nach 90 s – Nachfüllen des Sandes beim weiteren Vibrieren gibt es keine Verdichtung mehr
	34	38				
	32	38				
	30	34				
	30	30				
	30	30				
	34	30				
	30	30				
	27	-				
	32	-				
	27	-				
24	-					
2	37	41	6,5	480	0,826	Nach 25 s – Nachfüllen des Sandes beim weiteren Vibrieren gibt es keine Verdichtung mehr
	34	30				
	30	-				
	24	-				
	34	-				
	30	-				
	30	30				
	32	30				
	32	34				
	32	30				
	30	30				
30	-					

1	2	3	4	5	6	7
3	37	38	9	390	1,206	Nach 60 s – Nachfüllen des Sandes, beim weiteren Vibrieren gibt es keine Ver- dichtung mehr
	32	38				
	34	34				
	32	34				
	34	30				
	34	-				
	32	30				
	30	30				
4	37	38	9,5	480	0,702	Nachfüllen des Sandes während der Vibration in ca. 40 s beim weiteren Vibrieren gibt es keine Ver- dichtung mehr
	37	34				
	37	30				
	37	-				
	34	30				
	34	30				
	37	25				
	34	25				
	32	30				
	32	34				
	30	34				
	34	34				
	32	-				
	30	-				
	30	34				
	30	38				
	32	38				
	37	30				
34	30	9,8				

H = 8,6 cm

1	2	3	4	5	6	7
5	37	30	8,4	400	1,523	Nachfüllen des Sandes während der Vibration in ca. 60 s beim weite- rem Vibrieren wurde ein Wert von ca. 1,68 g/cm ³ erreicht
	37	38				
	34	38				
	34	34				
	34	-				
	34	34				
	37	34				
	37	38				
	38	34				
	37	34				
	37	38				
	37	38				
	32	38				
	30	38				
27	34	8,6	1,68			
24	30	8,4	375	1,612	Nachfüllen des Sandes während der Vibration in	
6	37	38				
	38	38				
	37	38				
	34	34				

	34	38				ca. 45 s
	37	38				
	34	38				
	34	34				
	37	34				
	37	38				
	37	34				
	34	38				beim weite- rem Vibrieren wurde ein Wert von etwa 1,734 g/cm ³ in ca. 300 s er- reicht
	32	34				
	30	38				
	27	38				
	27	34				
	24	34				
	24	30	8,6		1,734	

H = 6,6 cm

1	2	3	4	5	6	7
7	37	38	6,4	310	1,546	Nachfüllen des Sandes während der Vibration in ca. 45 s
	34	38				
	32	38				
	32	34				
	30	34				
	27	34				
	27	30				
	24	30				
	34	30				
	32	30				
	32	38				
	30	38				
	27	38				
	27	34				
24	30	6,6		1,73	beim weiteren Vibrieren in ca. 170 s wurde ein Wert von etwa 1,73 g/cm ³ erreicht	
8	37	38	6,5	90	1,671	Nachfüllen des Sandes während der Vibration in ca. 40 s; in ca. 170 s wurde ein Wert von ca. 1,74 g/cm ³ erreicht
	38	38				
	34	34				
	32	34				
	30	34				
	27	34				
	24	34				
	24	30				
9	37	38	6,5	75	1,535	Nachfüllen des Sandes während der Vibration in ca. 30 s; in ca. 100 s wurde ein Wert von ca. 1,66 g/cm ³ erreicht
	38	38				
	30	34				
	27	34				
	27	30				
	24	30				

Basierend auf den vorherigen Versuchsergebnissen, wurde der Sand zuerst mit den hohen (maximal möglichen für diese Anlage) Frequenzen und anschließend mit den kleinen Frequenzen vibriert.

Bei der Vertiefung von 10 cm konnte der Sand auf einen Wert von 9,5 cm angehoben werden. Im Innenbereich war aber keine Verdichtung möglich. Bei der Modellvertiefung von 8,6 cm wurde eine Schüttdichte von $1,612 \text{ g/cm}^3$ nach einer Zeit von ca. 375 s erreicht und eine gute Verdichtung von $1,734 \text{ g/cm}^3$ war nach ca. 675 s vorhanden. Im letzten Versuch bei der Vertiefung von 6,6 cm wurde eine Schüttdichte von $1,535 \text{ g/cm}^3$ nach ca. 75 s und eine Vibrationsdichte von $1,66 \text{ g/cm}^3$ nach ca. 175 s erreicht.

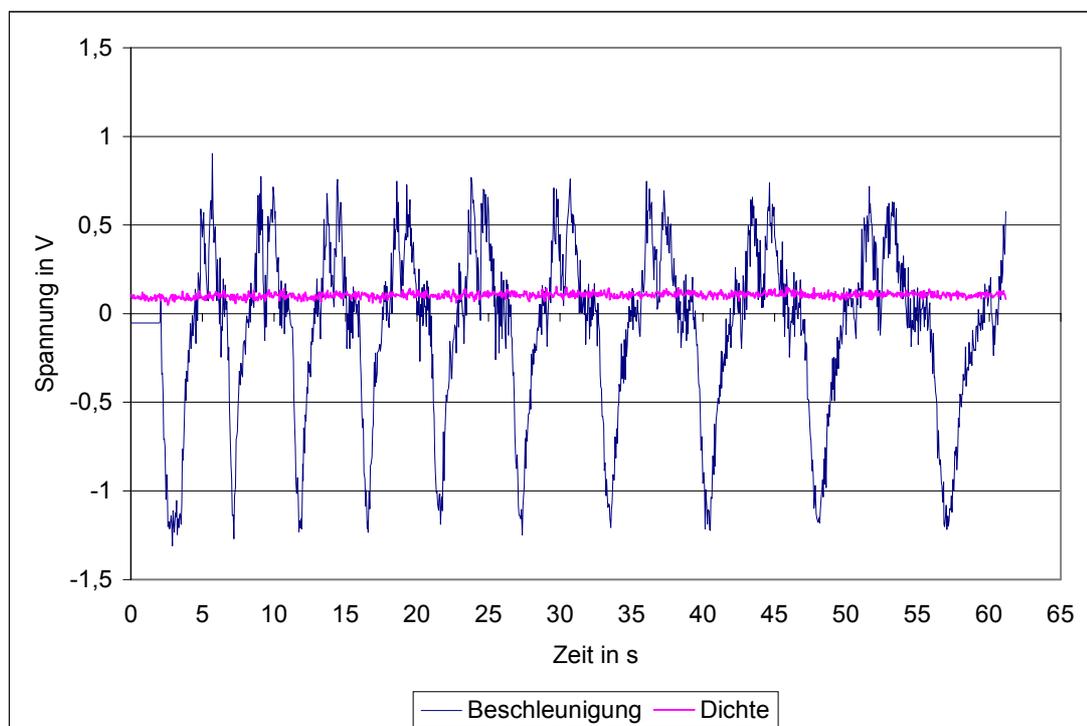


Bild 44. Kurvenverlauf, wenn im Innenbereich kein Sand vorhanden ist

Im Bild 44 ist der Kurvenverlauf des Versuchs dargestellt, bei dem im Innenbereich noch kein Sand vorhanden ist. Wenn im Innenbereich eine Sandsäule von ca. 9 cm in der Modellvertiefung vorhanden ist, dann ergibt sich ein Kurvenverlauf, wie er im Bild 45 zu sehen ist.

Der Sand wurde bei beiden Versuchen mit einer Frequenz von 37 Hz für die vertikale Vibration und von 38 Hz für die horizontale Vibration verdichtet. Bei

einer Frequenz von 37 Hz für die vertikale und von 34 Hz für die horizontale Vibration wird der Innenbereich der 8,6 cm tiefen Modellvertiefung mit einer Sandsäule von 8,4 cm gefüllt, wobei der Dichtesensor starke Schwankungen anzeigt (Bild 46).

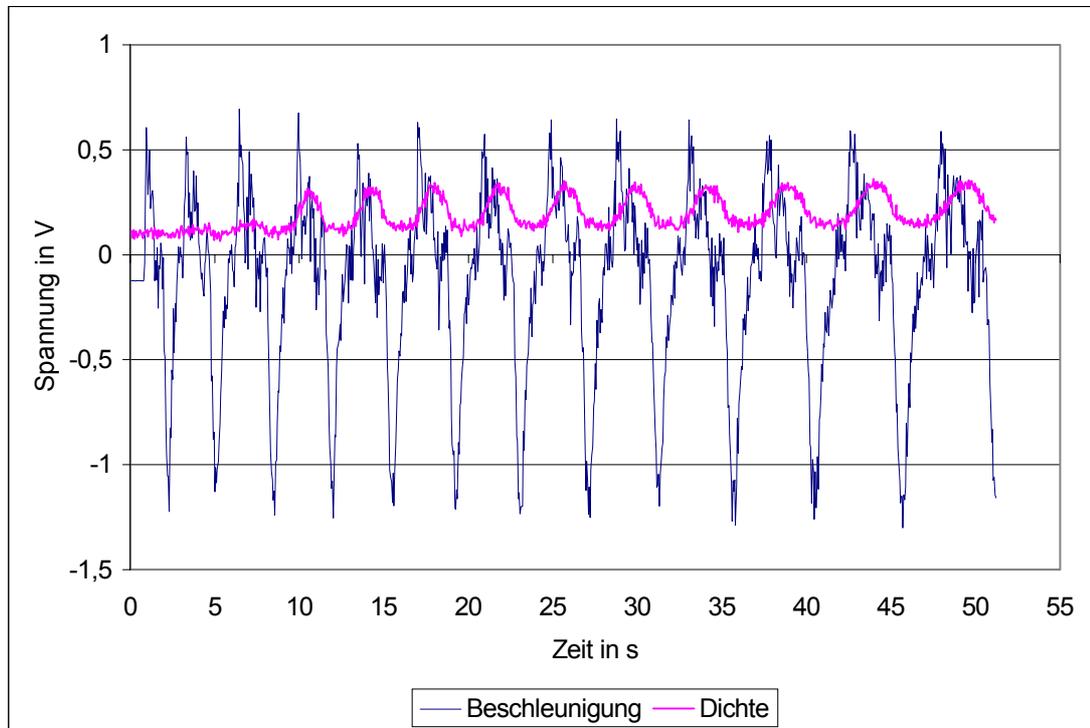


Bild 45. Kurvenverlauf bei einer Sandsäule im Innenbereich von ca. 9 cm bei einer Modellvertiefung von 10 cm

Die starken Schwankungen der relativen Dichte, die im Bild als Spannungswert eingegeben ist (Kapitel 4, Abschnitt 4.3), weisen darauf hin, dass sich der Sand im Zustand des Vibrokochens befindet. Die Sandbewegung erfolgt nach dem im Abschnitt 5.1.2 beschriebenen Wurfprinzip.

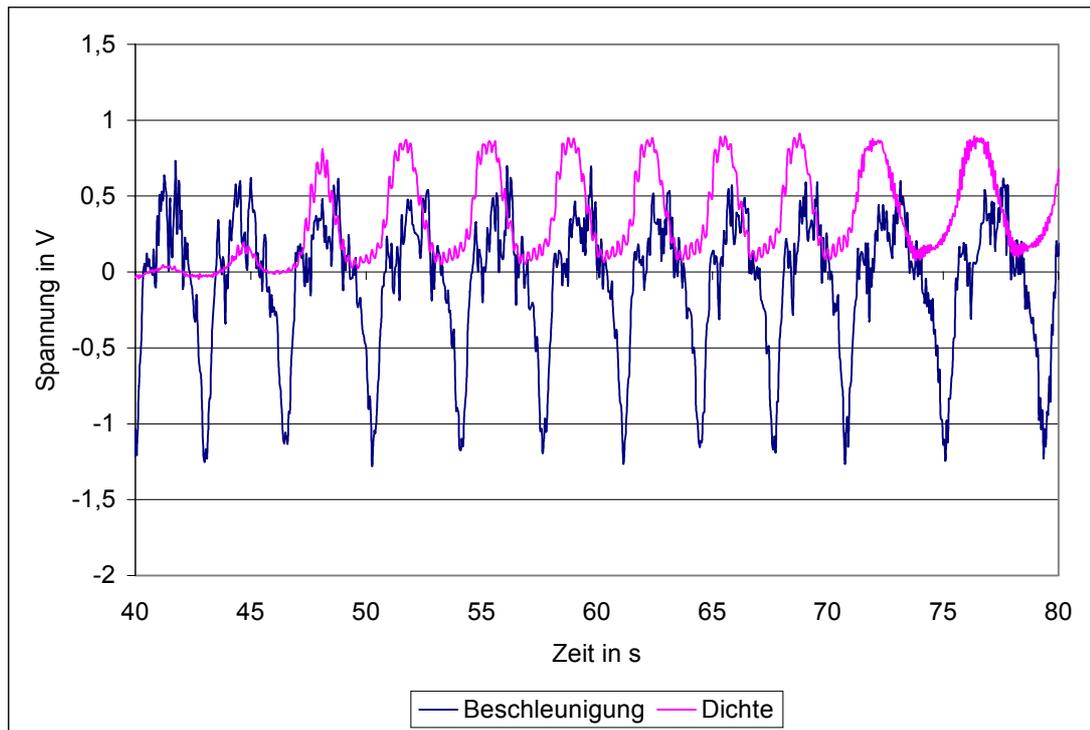


Bild 46. Kurvenverlauf bei einer Modellvertiefung von 8,6 cm

Im Bild 47 ist der Versuch mit der Modellvertiefung von 6,6 cm dargestellt. Der Sand wurde bei sechs verschiedenen Kombinationen der Vibrationsparameter verdichtet. Zunächst wurde der Behälter vollgefüllt und mit 37 Hz vertikal und 38 Hz horizontal ca. 75 s lang vibriert. Nach 25 s wurde der Behälter während des Vibrierens nachgefüllt und weiter vibriert. Gleich nach dem Nachfüllen beobachtete man eine starke Schwankung des Sandes. Der Innenbereich wurde mit Sand auf eine Höhe von 6,5 cm gefüllt. Im Bereich 2 (Bild 47) wurde der Sand mit Frequenzen von 38/37 Hz (V/H) verdichtet. Bei der Verringerung der Frequenzen auf 30/34 Hz (V/H) beobachtete man eine Abnahme der Sanddichte. Beim nächsten Vibrieren mit 30/34 Hz (V/H) wurde der Sand wieder verdichtet (Bereich 3) und bei weiterer Vibration mit abnehmenden Frequenzen gab es keine Reduzierung der Sanddichte (Bereiche 4–6).

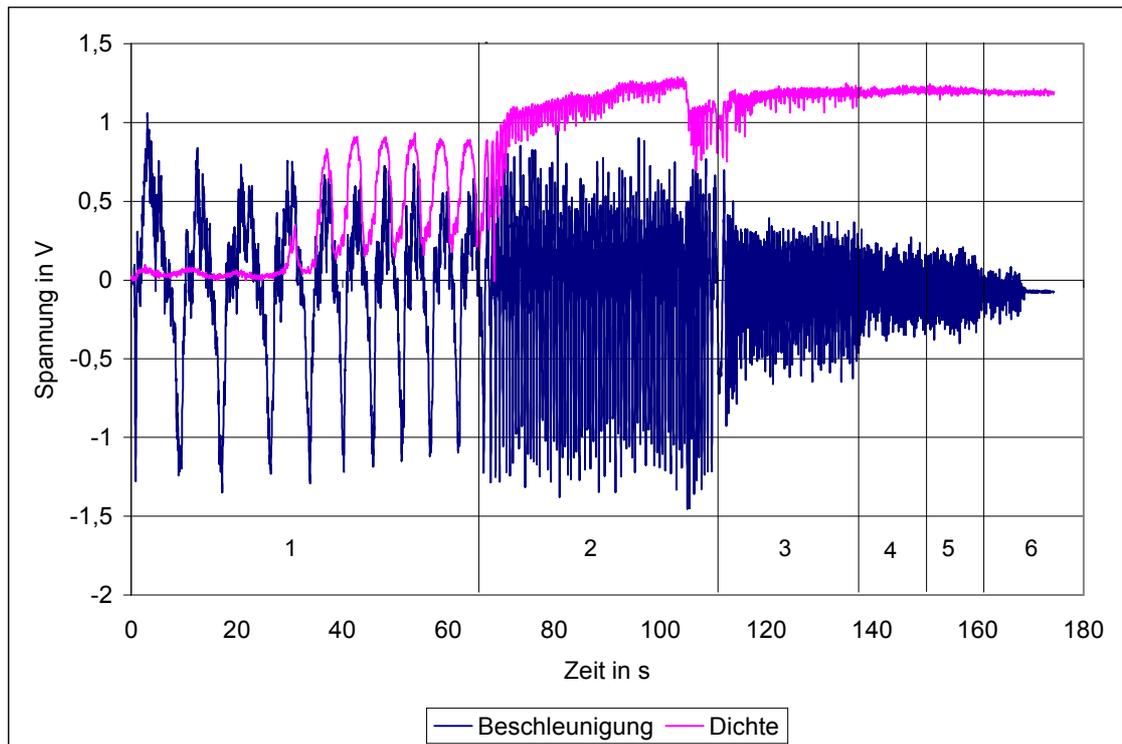


Bild 47. Kurvenverlauf bei einer Modellvertiefung von 6,6 cm

Es wurde bestätigt, dass, wenn der Sand den Innenbereich nicht sofort maximal füllt, große Schwierigkeiten mit der weiteren Verdichtung des Sandes auftreten. Um den Transport des Sandes in die Modellvertiefungen zu gewährleisten, sollte der Sand am Anfang mit einer hohen, gleichzeitig horizontalen und vertikalen Schwingungserregung vibriert werden.

6 Betriebsuntersuchungen des Sandtransport- und Verdichtungsvermögens beim Vollformgießen

Um die Einflüsse der Vibrationsrichtung, der Amplituden und Frequenzen sowie der Vibrationsdauer und der Behälterform auf die Sandverdichtung unter Betriebsbedingungen zu untersuchen, wurden Versuchsreihen an Lost-Foam-Anlagen in drei verschiedenen Unternehmen durchgeführt, die durch Unternehmen „A“, „B“ und „C“ bezeichnet sind. Die technischen Daten dieser Lost-Foam-Anlagen sind in der Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6 Technische Daten der Lost-Foam-Anlagen

	Unternehmen „A“	Unternehmen „B“	Unternehmen „C“
Vibrationsrichtung	vertikal	horizontal	vertikal
Frequenzbereich	30 bis max. 75 Hz	30 bis max. 55 Hz	17 bis max. 67 Hz
Vibratortyp	Unwucht	Unwucht	Unwucht
Federung	Luftkissen	Luftkissen	Luftkissen
Behälterbefestigung	ohne (Schwerkraft)	Halteklammern	ohne (Schwerkraft)
Behälterabmessungen (innen)	800 x 800 x 920	Ø 813 x 1016	Ø 845 x 900
Leermasse [kg]	950	1035	1020
Masse - Voller Behälter [kg]	1600	1835	1750

6.1 Untersuchungen im Unternehmen „A“ bei vertikaler Vibration und quaderförmigem Behälter

Es wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, bei der die Befestigung der Sensoren vertikal an einer Stange erfolgte, die in der Behältermitte angeordnet war – die Positionen der Messsensoren sind schematisch im Bild 48 der Anlage dargestellt.

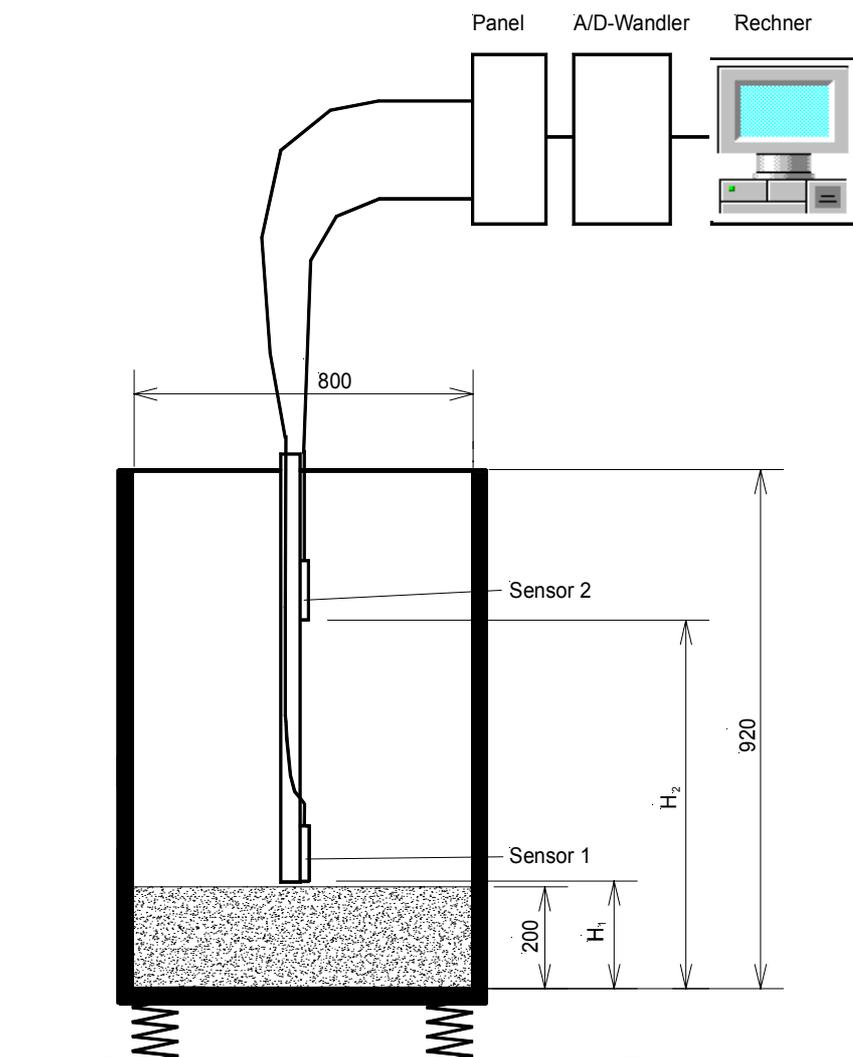


Bild 48. Versuchsanordnung

Es galt, die Veränderung der Sanddichte beim Sandeinfüllen (Schüttdichte) und bei der Vibration (Vibrationsdichte) mittels der Sensoren anzuzeigen bzw. nachzuweisen. Mit der unterschiedlichen Sensorhöhe sollte der Einfluss

der Sandschichthöhe auf das Verdichtungsverhalten untersucht werden. In Anlehnung an die übliche Versuchsdurchführung wurde vor dem eigentlichen Versuch jeweils eine ca. 20 cm starke Sandschicht als Grundsicht eingefüllt.

Beim ersten Versuch waren die Sensoren gemäss Bild 48 positioniert, der Sensor 1 war 25 cm und der Sensor 2 55 cm vom Behälterboden entfernt. Es wurden 36 cm Sand zur Grundsicht eingefüllt, wobei zur Befüllung generell zu vermerken ist, dass sich in der Mitte stets ein kleiner Schüttkegel ausgebildet hat. Anschließend wurde mit 65 Hz 40 s lang vibriert.

Wie im Bild 49 zu sehen ist, wurde der Sensor 2 teilweise freigelegt, was danach auch im Behälter zu beobachten war. Der Sensor 1 zeigt einen Anstieg der relativen Dichte über die Schüttdichte und bestätigt damit die vorangegangenen Untersuchungen.

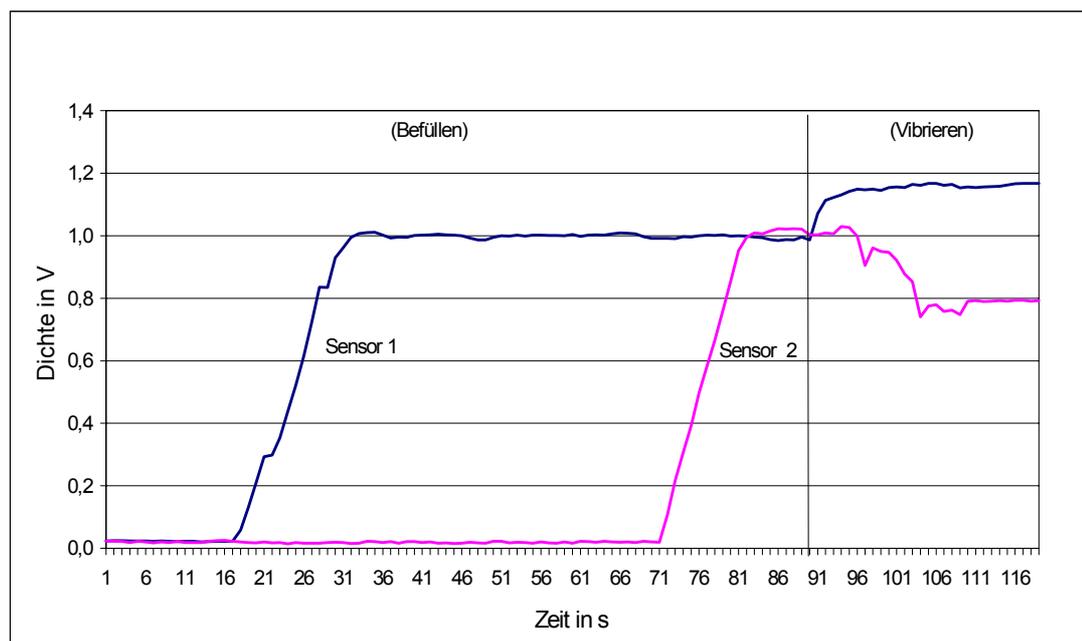


Bild 49. Füll- und Verdichtungsvorgang bei einer Frequenz von 65 Hz

Beim nächsten Versuch wurden beide Sensoren 5 cm tiefer gesetzt, um das Freilegen des Sensors 2 zu umgehen. Die Sandeinfüllung und Frequenz wurden beibehalten, nur die Vibrationszeit auf 60 s erhöht. Im Bild 50 ist zu sehen, dass der Sensor 1 in einer Sandschicht angelangt ist, in der man bei

dieser Frequenz keine wesentliche Verdichtung mehr erwarten kann. Der Sensor 2 in der obersten Sandschicht zeigt das erwartete Verhalten, Sandauflockerung während der Vibration und einen Dichtewert knapp unter der Schüttdichte; er war am Versuchende nur eben knapp bedeckt.

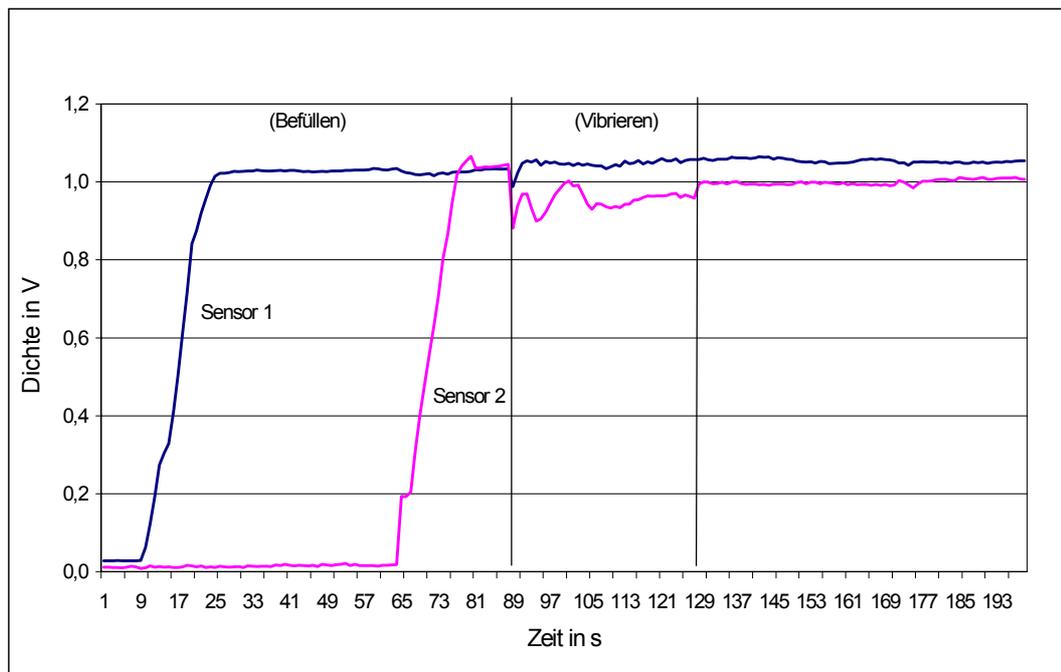


Bild 50. Füll- und Verdichtungsvorgang mit tiefer gesetztem Sensors 2

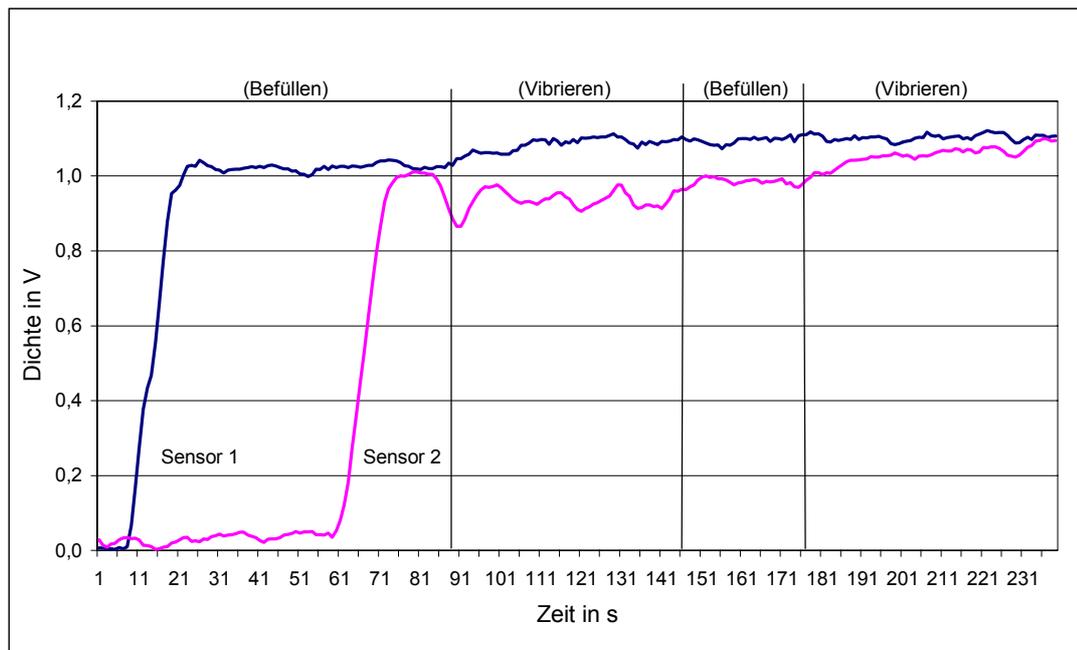


Bild 51. Füll- und Verdichtungsvorgang

Um den Einfluss einer zusätzlichen Sandschicht auf den weiteren Verdichtungsverlauf zu prüfen, wurde in den Folgeversuchen nach der ersten Vibration 15 cm Sand zugefüllt und dann ebenfalls 60 s weitervibriert. Wie im Bild 51 zu erkennen ist, werden die vorangegangenen Ergebnisse im Trend bestätigt. Der Sensor 1 zeigt bei der ersten Vibration eine geringe Verdichtung und die nachfolgende Befüllung und Vibration brachten keine Resultatsverbesserung. Beim Sensor 2 ist das Ergebnis eine Bestätigung der instabilen Verhältnisse in der oberen Sandschicht (bis etwa 10 - 15 cm). Nach der Sandauflockerung während der ersten Vibration ist bei der zweiten Vibration eine weitere Verdichtung über die Schüttdichte zu erkennen.

Den Einfluss der Frequenz auf die erzielbaren Ergebnisse wird bei der Betrachtung des Bildes 52 deutlich. Denn hier wurde unter Beibehaltung der übrigen Parameter mit 50 Hz vibriert.

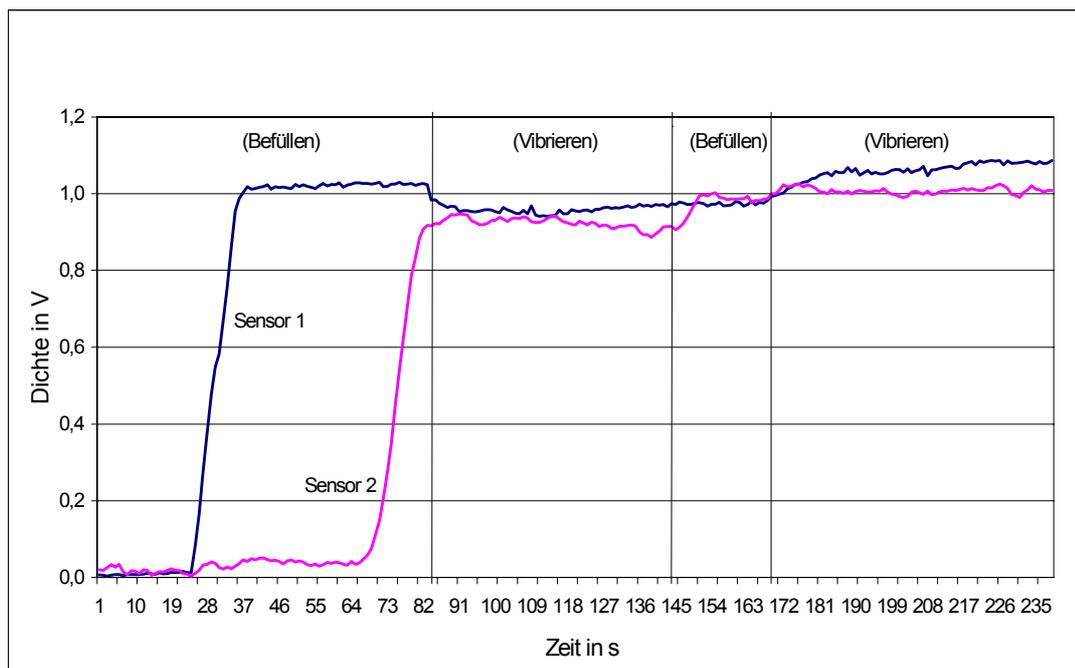


Bild 52. Füll- und Verdichtungsvorgang bei einer Frequenz von 50 Hz

Der Sensor 1 zeigt bei der ersten Vibration eine Auflockerung des Sandes. Dabei wird nach der zweiten Befüllung und Vibration eine weitere Verdichtung erreicht. Der Sensor 2 wurde nur knapp bedeckt und bei der ersten Vibration noch geringfügig freigelegt. Bei der Zweitfüllung wurde die Schütt-

dichte erreicht und die nachfolgende Vibration brachte nur eine geringe bis gar keine weitere Verdichtung.

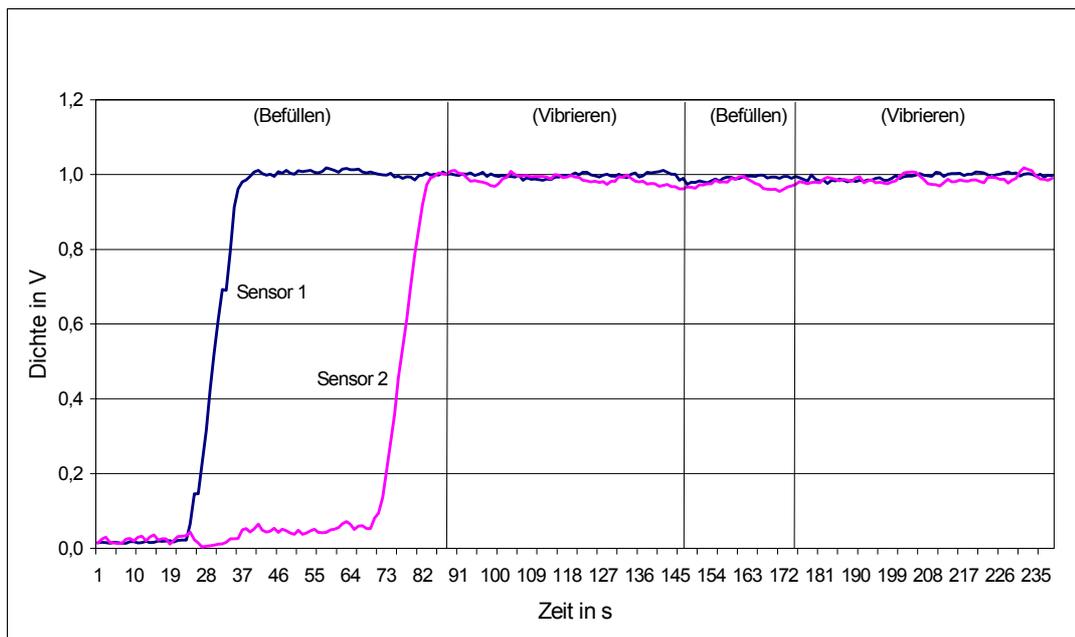


Bild 53. Füll- und Verdichtungsvorgang bei einer Frequenz von 30 Hz

Bei der weiteren Frequenzsenkung auf 30 Hz (Bild 53) wird ersichtlich, dass diese Frequenz für die Anlage zu gering ist, um überhaupt eine Dichteänderung zu bewirken. Die Schüttdichte wurde bei beiden Sensoren erreicht und danach passierte nichts mehr, d. h. weder die Zweitbefüllung noch die anschließende Vibration brachten keine Veränderung.

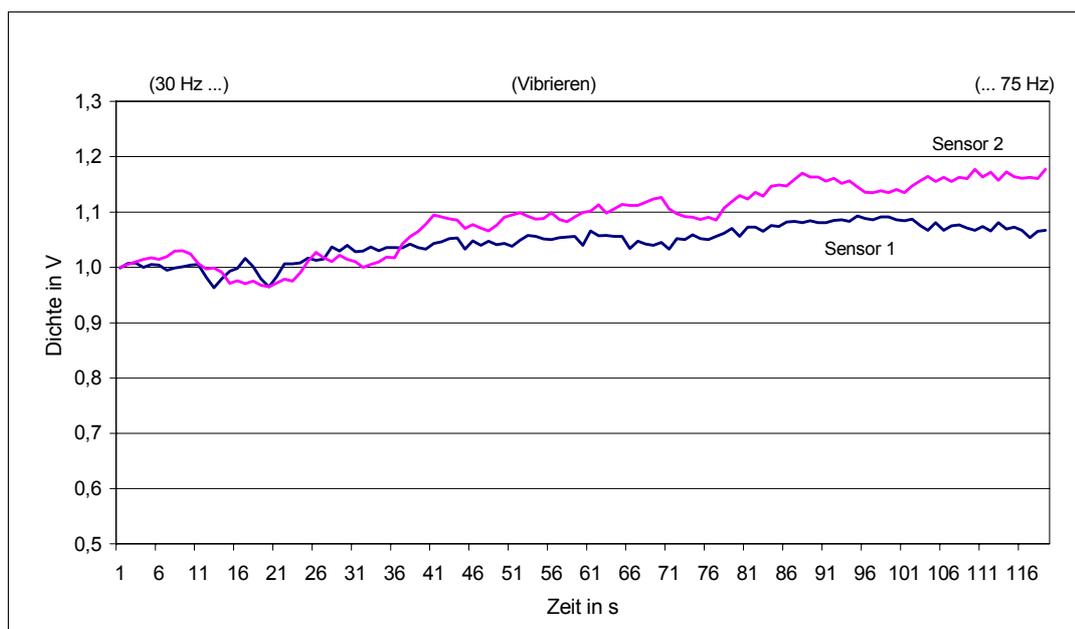


Bild 54. Verdichtungsvorgang bei den Frequenzen von 30 bis 75 Hz

Beim weiteren Versuch wurde die Frequenz beginnend bei 30 Hz manuell in einer Zeitspanne von 120 s auf 75 Hz hochgeregelt. Die Versuchsergebnisse sind im Bild 54 dargestellt. Bis zum Beginn des letzten Drittels zeigen die Sensoren einen Anstieg über die Schüttdichte, wobei der Sensor 2 mehr steigt als Sensor 1. Ein einigermaßen kontinuierliches Hochfahren der Frequenz vorausgesetzt, könnte das ein Bereich von 60 bis 65 Hz sein.

6.2 Untersuchungen im Unternehmen „B“ bei vertikaler Vibration und rundem Behälter

Um den Einfluss vertikaler Vibration auf die Sandverdichtung im runden Behälter unter Betriebsbedingungen zu untersuchen, wurde eine Versuchsreihe im Unternehmen „B“ durchgeführt. Bei den Versuchen wurden zwei plattenförmige Sensoren verwendet, die an verschiedenen Stellen des Behälters angebracht wurden.

Zunächst wurden die Sensoren in verschiedenen Höhen (Sensor 2 - 30 cm und Sensor 1 - 60 cm vom Boden) am Behälter innen senkrecht befestigt (Bild 55), um den Einfluss der Sandschichthöhe auf den Verdichtungsverlauf festzustellen. Es wurden zuerst 40 cm Sand zur Grundsicht (10 cm über Sensor 2 in ca. 40 s) eingefüllt und bei den verschiedenen Vibrationsparametern ($8 \times 17 \times 25 \times 33$ Hz) vibriert. Die Versuchsergebnisse sind im Bild 56 dargestellt.

Wie im Bild 56 zu sehen ist, zeigt der Sensor 2 die Veränderung der Sanddichte beim Sandeinfüllen (Schüttdichte) – Bereich 1 und bei der Vibration (Vibrationsdichte) – Bereiche 2 – 5. Im Bereich 2 passiert fast nichts, deshalb wurde bei der Frequenz von ca. 8 Hz der Sand nicht mehr verdichtet. Bei Frequenzen von ca. 17 und 25 Hz tritt ein deutlicher Anstieg der Sanddichte (Bereiche 3 und 4) auf, während man bei weiterer Vibration von ca. 33 Hz ein Absinken der Sanddichte beobachtet. Das lässt sich damit erklären, dass der Sensor 2 teilweise freigelegt wurde und eine Auflockerung wegen der kleinen Schichthöhe und der starken Sandbewegung eintritt. Es wurde

dann Sand in ca. 45 s bis 10 cm über den Sensor 1 weitergefüllt (Bereich 6) und mit 17×25×33×42 Hz (Bereiche 7 – 10) weitervibriert.

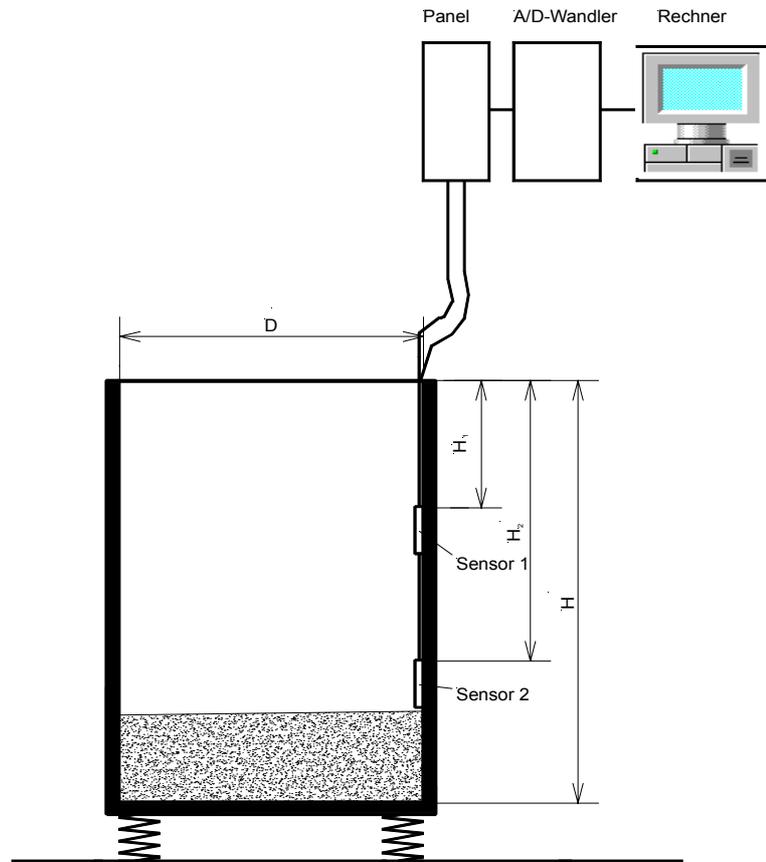


Bild 55. Versuchsanordnung 1

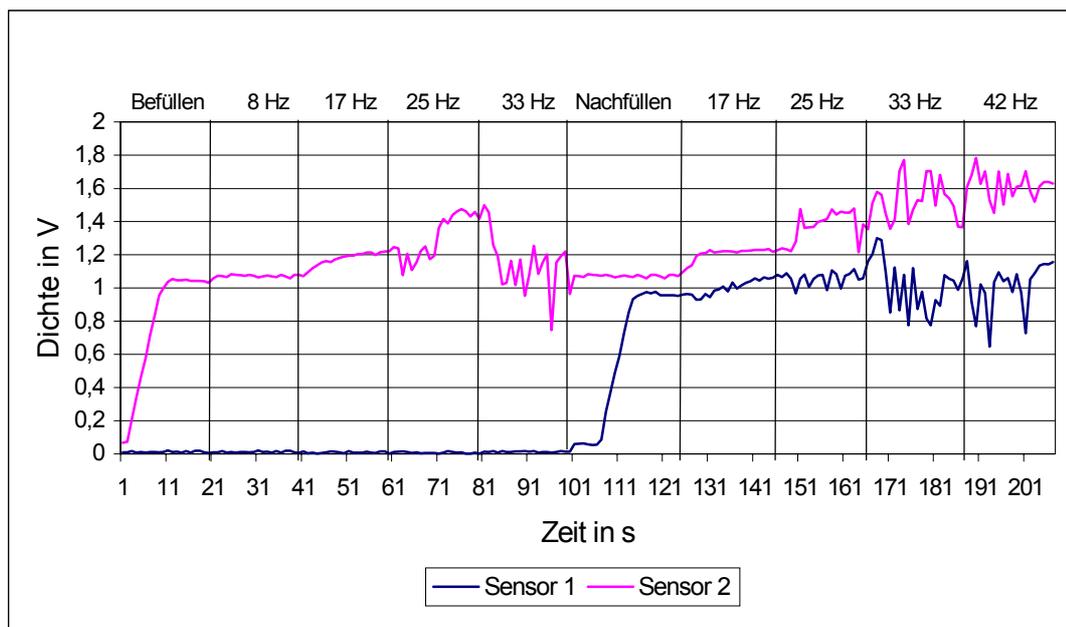


Bild 56. Füll- und Verdichtungsvorgang

Bei hohen Frequenzen (mehr als 25 Hz) beobachtet man erhebliche Sandauflockerungen. Auf diese Weise wurden die vorangegangenen Untersuchungen bestätigt. Im unteren Behälterbereich beobachtet man trotz der erheblichen Sandbewegungen eine Tendenz zur Verdichtung, während im oberen Bereich ebenfalls eine starke Sandbewegung vorliegt, die aber nicht zur Verdichtung führt. Das weist auf die Abhängigkeit der Sanddichte von der Sandschichthöhe hin.

Beim nächsten Versuch (Bild 57) wurde anschließend der Behälter voll gefüllt und in ca. 40 s noch einmal bei Frequenzen von ca. 17 bis ca. 42 Hz weitervibriert. Dabei sind die Kurven mit dem vorangegangenen Versuch identisch, aber die Sandauflockerungen sind kleiner und die Sanddichten sind am Ende größer.

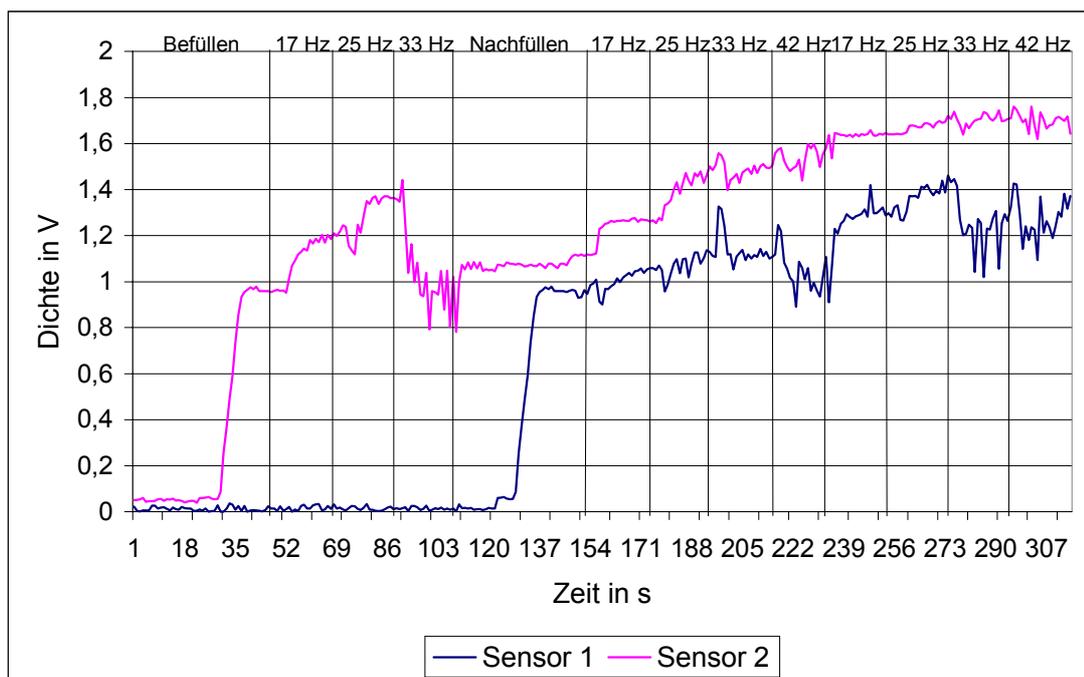


Bild 57. Füll- und Verdichtungsvorgang

Beim weiteren Versuch (Bild 58) wurden 60 cm Sand in ca. 60 s ein- und 20 cm in ca. 20 s nachgefüllt (10 cm über den oberen Sensor 1). Weiter wurde Sand bei den Frequenzen von ca. 17 bis ca. 42 Hz vibriert, anschließend der Behälter voll gefüllt und noch mal bei diesen Frequenzen weiter verdichtet. Der Kurvenverlauf ist den vorherigen Versuchen ähnlich.

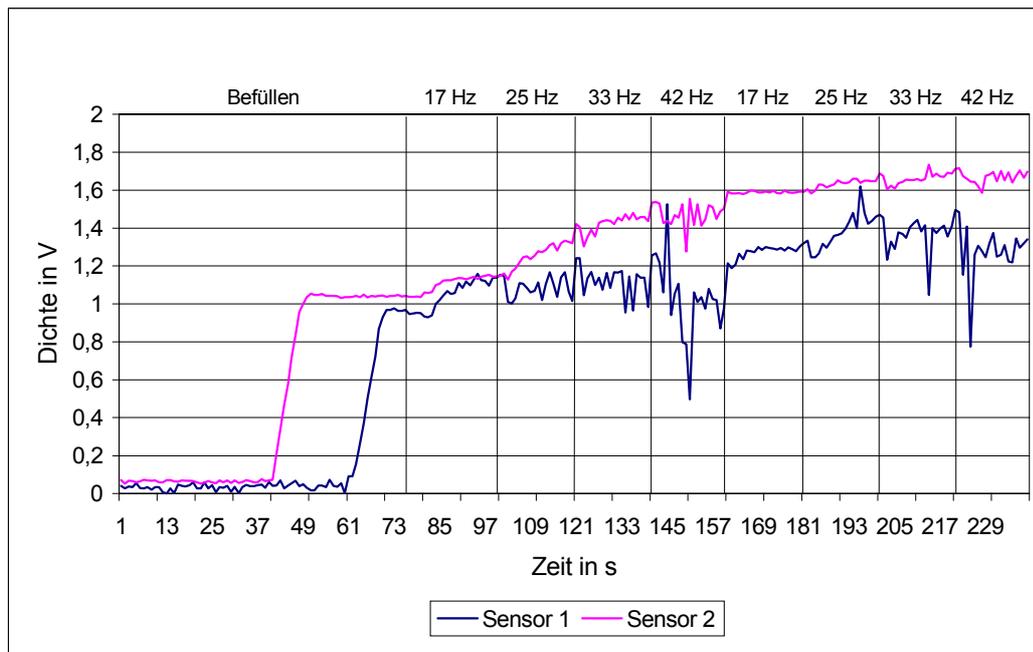


Bild 58. Füll- und Verdichtungsvorgang

Im Bild 59 sind die Ergebnisse eines Versuchs dargestellt, bei dem zunächst 90 cm Sand in den Behälter gefüllt wurden. Anschließend wurde diese Schicht mit einer sich von ca. 17 auf 50 Hz steigender Frequenz vibriert. Nach dem Erreichen des letztgenannten Wertes wurde der Behälter mit dem Sand vollgefüllt und die Frequenz von ca. 50 auf ca. 17 Hz verringert. Jede neue Frequenzstufe hatte eine Wirkzeit von 20 s.

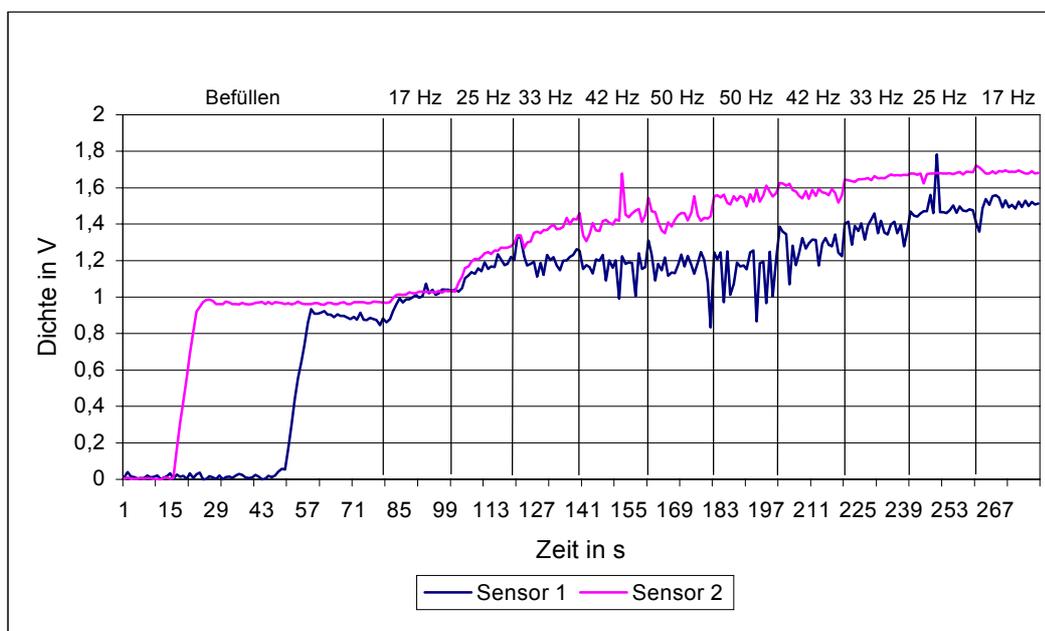


Bild 59. Füll- und Verdichtungsvorgang

Dabei beobachtete man im Frequenzbereich von ca. 33 bis 50 Hz eine Verringerung der Sanddichte im oberen Behälterbereich, während diese Erscheinung bei niedrigen Frequenzen (von ca. 17 bis 25 Hz) nicht auftrat. Dies weist auf eine starke Auflockerung in den oberen Sandschichten, während der Sand im Zustand des Vibrokochens ist, hin.

Um die Vorgänge zu beobachten, die in der Behältermitte bei vertikaler Frequenz ablaufen, wurden die Sensoren in der gleichen Höhe sowohl in der Behältermitte (an einer Stange) – Sensor 1 als auch an der Behälterwand – Sensor 2 befestigt (Bild 60).

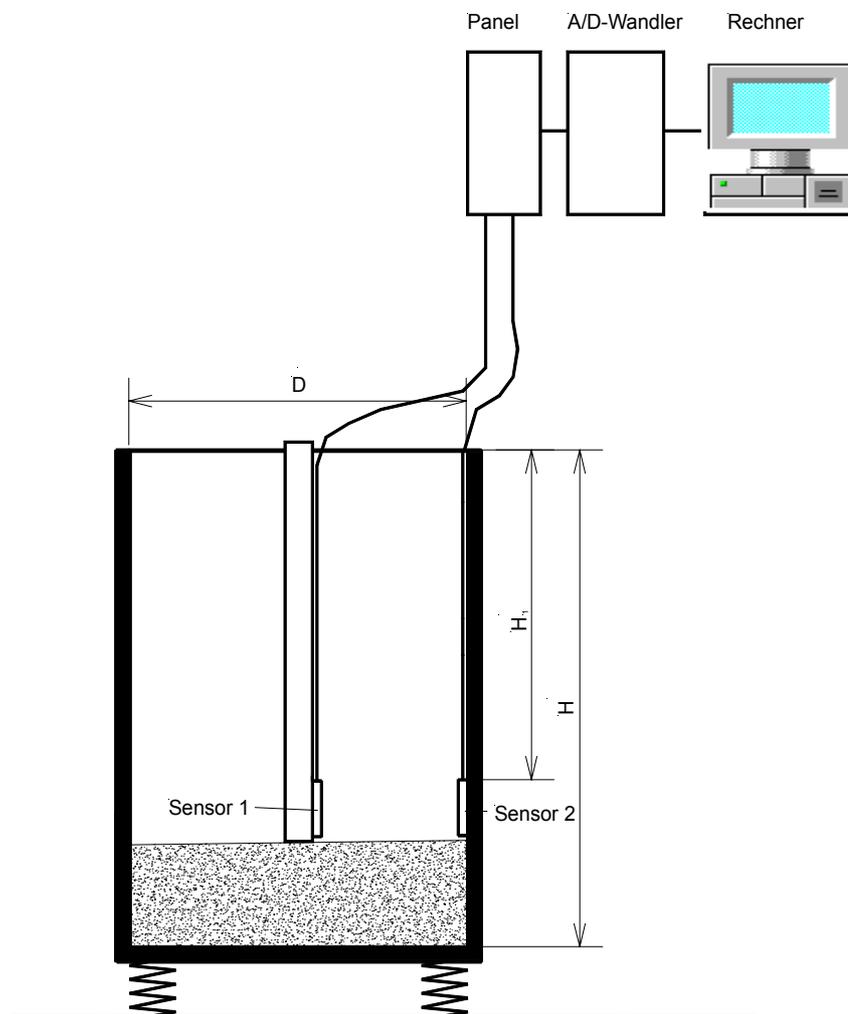


Bild 60. Versuchsanordnung 2

Es wurden zuerst 20 cm Sand über beiden Sensoren eingefüllt und bei den Frequenzen ca. 17 und 25 Hz vibriert. Nach dem ersten Vibrieren bei der

Frequenz von ca. 25 Hz wurden 20 cm Sand nachgefüllt und bei ca. 25 und 33 Hz 40 s lang weitervibriert. Dann wurden noch 20 cm Sand aufgefüllt und weiter bei den Frequenzen von ca. 33 bis 50 Hz vibriert. Die Versuchsergebnisse sind im Bild 61 dargestellt.

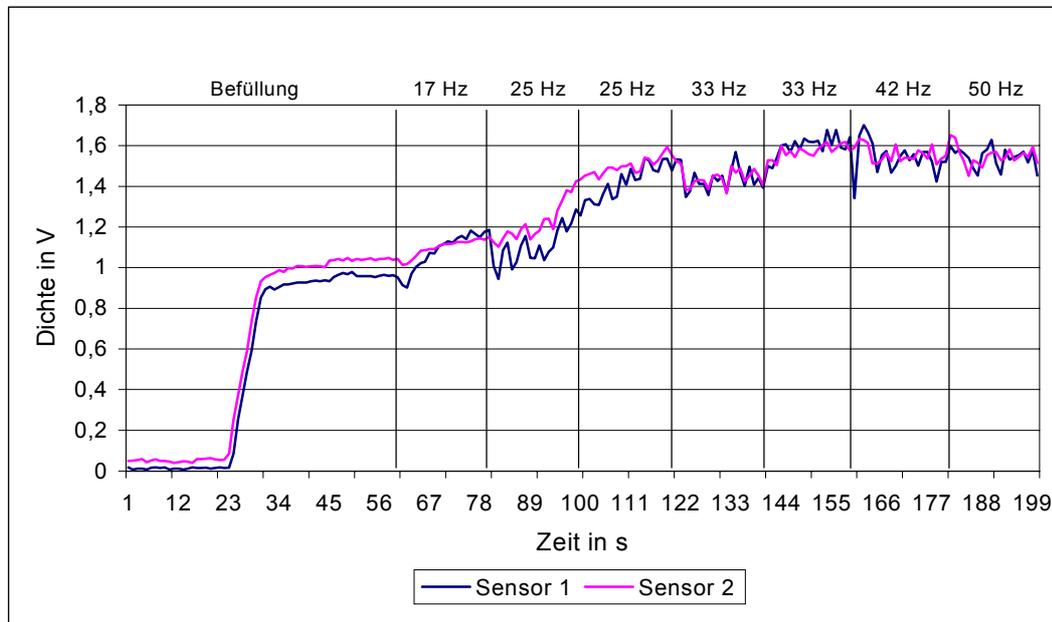


Bild 61. Füll- und Verdichtungsvorgang

Bei diesem Versuch wurde beobachtet, dass der Sand in der Behältermitte und an der Behälterwand fast gleich verdichtet wurde. Dabei sind die Sandbewegungen völlig identisch.

Um die Verdichtungsprobleme beim Sandtransport in den Hohlraum eines „Kolben-Modells“ zu lösen, wurden weitere Versuche realisiert. In deren Ergebnis wurden optimale Parameter gefunden. Das Modell mit den daran befestigten Sensoren ist im Bild 62 schematisch dargestellt. Zur Verdichtungsmessung wurden zwei plattenförmige Sensoren verwendet, die am Modell fixiert waren. Der Sensor 1 befand sich in einer für das Befüllen unproblematischen Lage während der Sensor 2 in einer Problemzone angeordnet war.

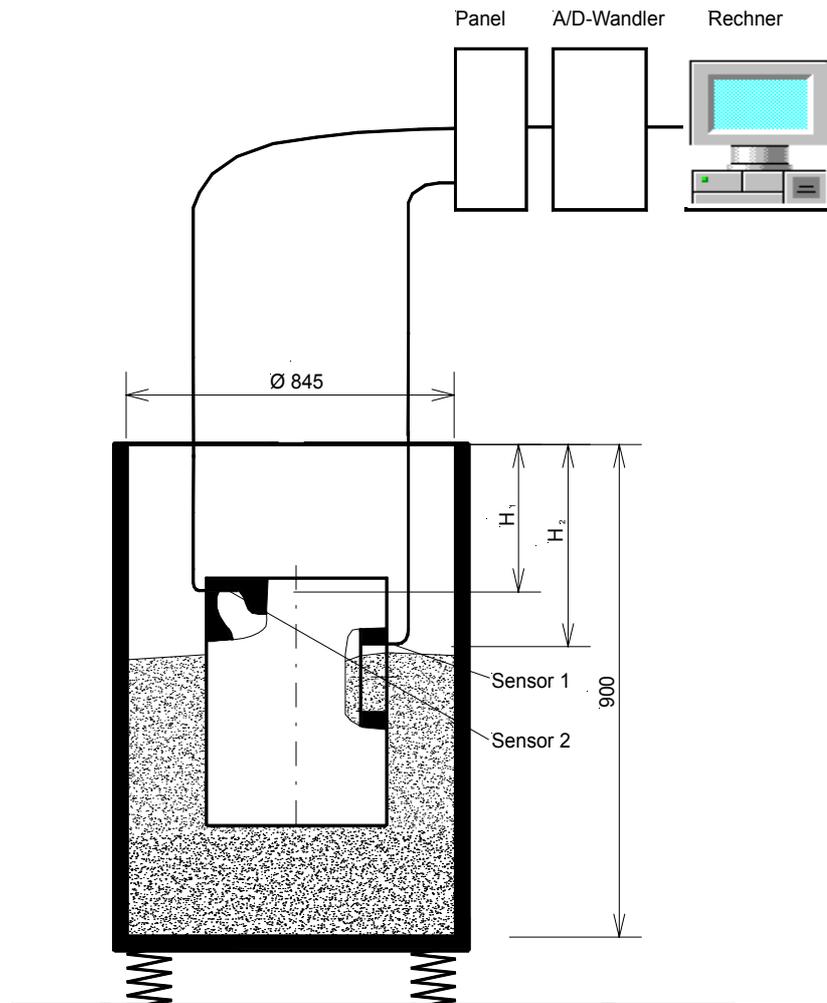


Bild 62. Versuchsanordnung 3

Zunächst wurde der Versuch nach dem internen Betriebsprogramm durchgeführt. Es wurde der Behälter vollgefüllt und bei Frequenzen von ca. 42 bis 58 Hz vibriert. Die Ergebnisse dieses Versuches sind im Bild 63 zu sehen.

Man erkennt, dass der Sand in der unproblematischen Lage verdichtet wurde, während in der Problemzone die Schüttdichte (ca. 1 V - entspricht $1,51 \text{ g/cm}^3$) nicht erreicht wurde. Das lässt sich damit erklären, dass der Sand in der unproblematischen Zone bereits so stark verdichtet wurde, dass bei niedrigen Frequenzen kein Nachfließen des Sandes durch die Öffnung für die Problemzone stattfinden konnte, d. h. nur die hohe Vibrationsfrequenz führte zur Sandverdichtung in der Problemzone aufgrund der starken Sandbewegungen. Deshalb wurde der Sand weiter am Anfang bei einer hohen Frequenz, entsprechend vorherigen Untersuchungen, vibriert.

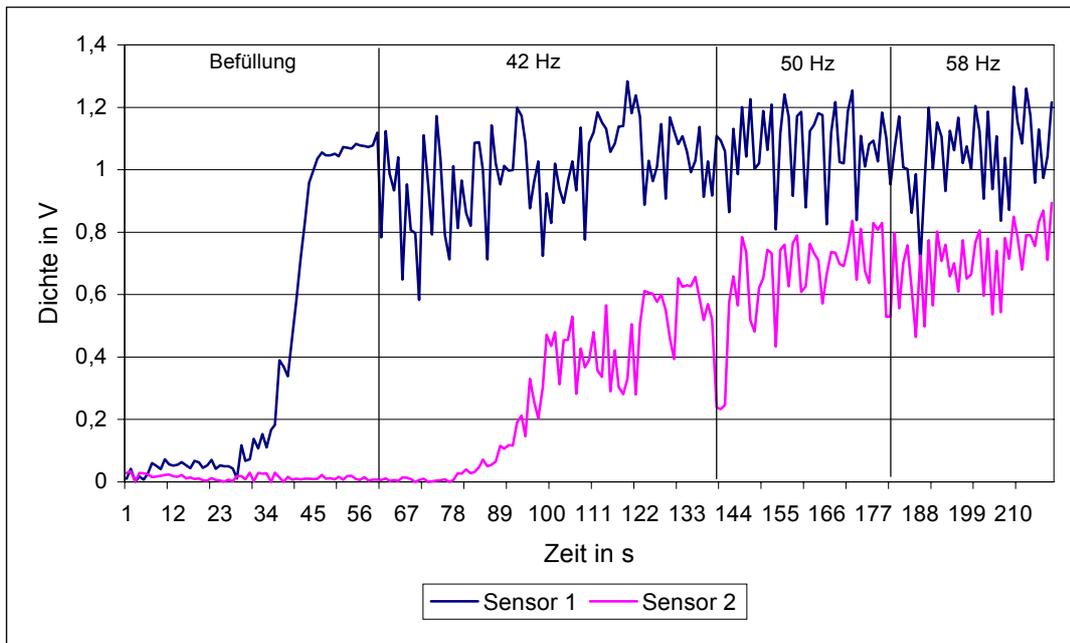


Bild 63. Versuchsergebnisse nach dem internen Betriebsprogramm

Beim nächsten Versuch (Bild 64) wurde der Behälter mit 50 cm Sand gefüllt und mit ca. 50 Hz 60 s lang vibriert, um den Transport des Sandes in die Hohlräume zu gewährleisten. Danach wurde der Behälter mit dem Sand vollgefüllt und zunächst 60 s lang mit ca. 42 Hz, dann 60 s lang mit ca. 33 Hz und 30 s lang mit ca. 25 Hz und anschließend 30 s lang mit ca. 17 Hz vibriert.

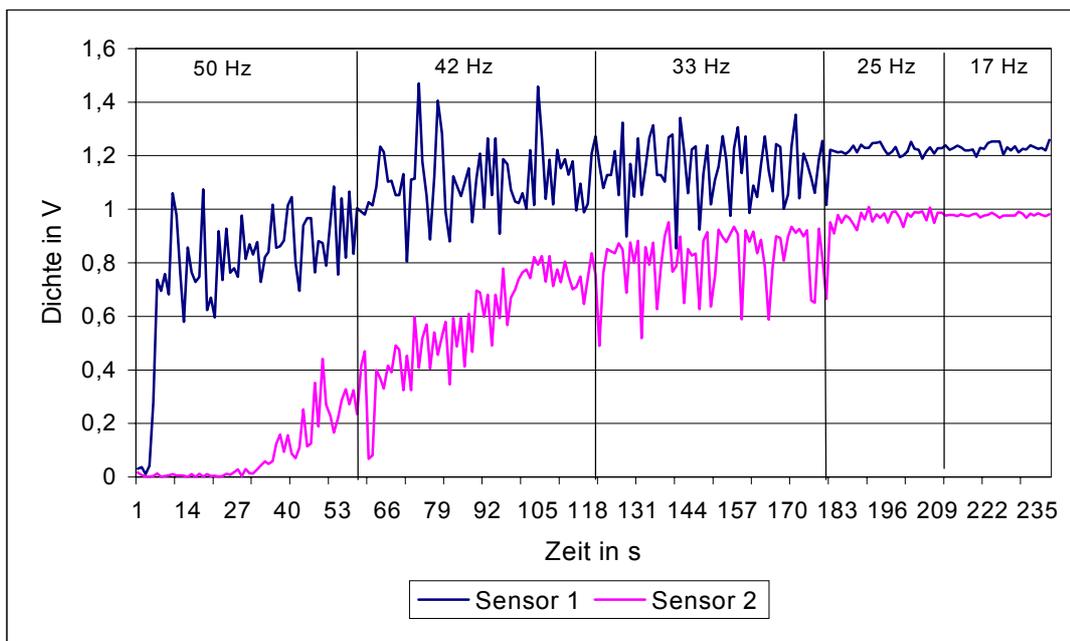


Bild 64. Füll- und Verdichtungsvorgang nach dem optimierten Ein-sandprogramm

An der unproblematischen Stelle wurde die Schüttdichte bei der ersten Vibrationsstufe erreicht und bei den weiteren Vibrationen wurde der Sand gut verdichtet. Im ersten Bereich zeigte der Sensor 2 eine anteilige Schüttdichte, und nach der Nachfüllung und den Vibrationen von ca. 42 Hz und ca. 33 Hz wurde der Sand verdichtet. Die sprungartigen Kurven weisen auf eine starke Sandbewegung hin.

6.3 Untersuchungen im Unternehmen „C“ bei horizontaler Vibration

Um den Einfluss horizontaler Vibration auf die Sandverdichtung unter Betriebsbedingungen zu untersuchen, wurden Versuchsreihen im Unternehmen „C“ durchgeführt.

Die Versuchsbedingungen wurden wie folgend ausgewählt:

- Bereich 1 - Sandeinfüllen bis 25 cm über den ersten Sensor
- Bereich 2 - Vibrieren mit ca. 52 Hz
- Bereich 3 - Sandeinfüllen bis 25 cm über den zweiten Sensor
- Bereich 4 - Vibrieren mit ca. 52 Hz
- Bereich 5 - Sandeinfüllen bis zum Behälterrand und anschließend Vibrieren mit ca. 52 Hz
- Bereich 6 - Vibrieren des vollen Behälters mit zunehmender Frequenz Beginnend ab 31 Hz (Minimalwert der Anlage) bis zum Maximalwert (55 Hz) und anschließend wieder Absenken auf 31 Hz (bei manueller Frequenzregelung)

Zunächst wurden die Sensoren in verschiedenen Behälterhöhen angeordnet, um den Einfluss der Sandschichthöhe auf den Verdichtungsverlauf festzustellen. Die Positionen der Messsensoren sind die Gleichen wie bei dem im Unternehmen „B“ durchgeführten Versuch 1 (s. Bild 55).

Die Versuchsergebnisse sind im Bild 64 dargestellt. Man erkennt, dass in den Bereichen 2 und 4 erhebliche Veränderungen der Sanddichte auftreten.

Das lässt sich damit erklären, dass bei der hochfrequenten Vibration der Sand einer starken Bewegung unterzogen wird, so dass eine Auflockerung eintritt. Die Größe der Sandauflockerung hängt von der Sandschichthöhe ab. Wenn die Sandschicht ausreichend groß ist, dann beobachtet man nur kleine Veränderungen der Sanddichte (Bereich 4, Bild 65, Kurvenverlauf vom Sensor 2).

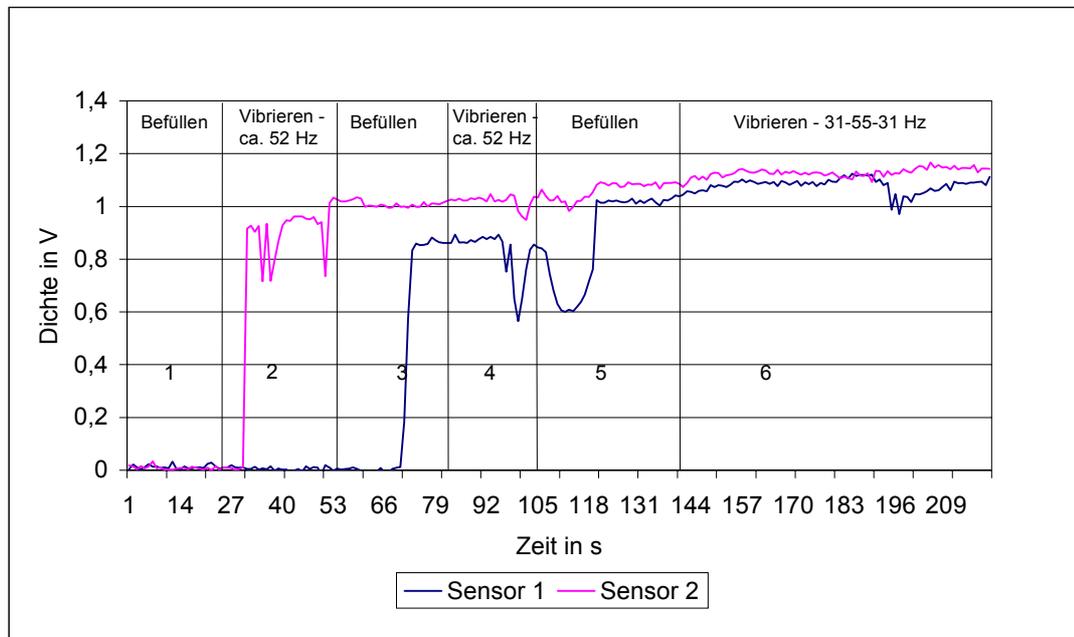


Bild 65. Füll- und Verdichtungsvorgang

Bei der Erhöhung der Frequenz von 31 auf 55 Hz und dem erneuten Absenken auf 31 Hz (Bereich 6, Bild 65) beobachtet man im Frequenzbereich von 55 Hz ein Absinken der Sanddichte, während diese Erscheinung bei niedrigen Frequenzen (von 31 bis 40 Hz) nicht auftrat.

Um die Vorgänge zu beobachten, die in der Behältermitte ablaufen, wurden die Sensoren in der gleichen Höhe sowohl in der Behältermitte (mittels einer Stange) als auch an der Behälterwand befestigt (s. Bild 60).

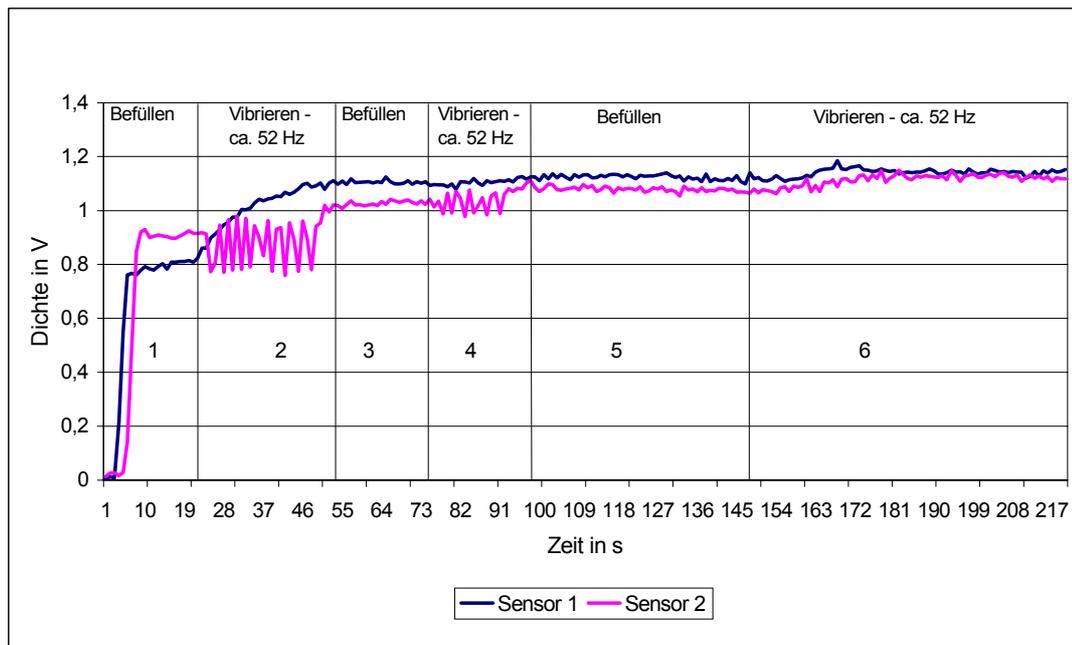


Bild 66. Füll- und Verdichtungsvorgang

In der Behältermitte wurde eine starke Sandverdichtung (Bereich 2, Bild 66) beobachtet, während am Rand des Behälters erhebliche Sandauflockerungen vorhanden sind (Sensor 2). Man kann daraus schlussfolgern, dass innerhalb des Behältervolumens erhebliche Differenzen im Verhalten des Sandes bei seiner Vibration auftreten. Diese Aussage ist für die Anordnung der Modelltrauben von entscheidender Bedeutung, um gegebenenfalls Verzug der Modelle beim Einformen zu vermeiden. Weitere Untersuchungen müssten klären, ob es möglich ist, einen Frequenzbereich zu finden, in dem diese Erscheinungen nicht auftreten. Man erkennt aus Bild 66 (Bereich 6 ansteigende und wieder abfallende Frequenz bei vollem Behälter), dass aufgrund der großen Sandschicht, die über den Sensoren liegt, die Maximalfrequenz von ca. 55 Hz fast keine Veränderungen der Sanddichte bewirkt.

6.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Untersuchungen im Unternehmen „A“ haben einen guten Beitrag zur Vertiefung bereits gewonnener Erkenntnisse und zur Bestätigung von bisher vermuteten Zusammenhängen geleistet. Insbesondere bestätigte sich, dass

die Frequenz von 65 Hz, mit der im Unternehmen „A“ üblicherweise die Versuche gefahren werden, ein für diese Anlage optimaler Wert ist.

1. Bei niedrigeren Frequenzen, wie zum Beispiel 50 Hz, wird der Sand erst in tieferen Schichten (ca. 35 - 40 cm) und nur geringfügig verdichtet, während in höheren Schichten (ca. 20 - 25 cm) Auflockerungen wegen der starken Sandbewegungen eintreten. In der oberen Schicht (ca. 10 - 15 cm) findet keine oder nur eine geringe Verdichtung statt. Die Erscheinung einer geringen Verdichtung der oberen Schicht ist auch noch bei 55 Hz zu finden, während bei höheren Frequenzen sich hier instabile Verhältnisse (bis hin zu Auflockerungen) einstellen.
2. Bei der Frequenz von 65 Hz existiert eine mittlere Schicht (20 - 35 cm) in der eine mittlere bis gute Verdichtung stattfindet, während in der darunterliegenden Schicht (bis 50 cm) keine (weitere) oder nur eine äußerst geringe Verdichtung erzielt werden kann. Allerdings findet hier auch keine nachträgliche Auflockerung statt, sondern die erreichte Dichte bleibt stabil, was insbesondere die Versuche mit der zweifachen Befüllung augenscheinlich bewiesen haben.
3. Der Versuch bei 75 Hz bestätigt den allgemeinen Trend der besseren Verdichtbarkeit mit zunehmender Frequenz. Da aber in diesem Bereich die Beschleunigung 1g erreicht wird und der Behälter vom Vibrationstisch abhebt, sind hier im Ergebnis keine wesentlich höheren Verdichtungswerte als bei 65 Hz erzielt worden. Im Regelfall ist diese Frequenz nicht zu empfehlen, weil wegen der zu erwartenden hohen Amplituden die Wahrscheinlichkeit einer Modellschädigung groß ist.

Bei den Untersuchungen im Unternehmen „B“ wurde der Einfluss der Sand-schichthöhe und der Frequenz auf die Veränderungen der Sanddichte bei vertikaler Vibration bestätigt.

1. Im unteren Behälterbereich wurde der Sand besser als im oberen Behälterbereich verdichtet. Das lässt sich damit erklären, dass die Sand-

schicht im oberen Behälterbereich gering war, wobei die Sandbewegungen sehr stark waren.

2. Es wurde praktisch nachgewiesen, dass, um Transport des Sandes in die Hohlräume und seine Verdichtung zu gewährleisten, der Sand mit hohen Frequenzen bzw. Beschleunigungen vibriert werden muss.

Bei den Untersuchungen im Unternehmen „C“ wurde der Einfluss der Sandschichthöhe und der Frequenz auf die Veränderungen der Sanddichte bei horizontaler Vibration weiter bestätigt.

1. Im unteren Behälterbereich wurde der Sand besser als im oberen Behälterbereich verdichtet, genau so, wie bei den Versuchen im Unternehmen „B“, dass die Theorie bestätigt.
2. Beim Maximalwert der Vibration von ca. 55 Hz tritt eine Auflockerung des Sandes ein. Es gibt aber auch Frequenzbereiche, in denen durch eine zweckentsprechende Abstimmung zwischen Frequenz und Sandschichthöhe Auflockerungen des Sandes vermieden werden können.
3. Weiterhin spielt auch die Messstelle (Behälterrand oder Behältermitte) eine wesentliche Rolle. In der Behältermitte wird der Sand schneller verdichtet. Am Behälterrand finden starke Sandbewegungen und deshalb Auflockerungen statt.
4. Langandauernde Vibration bringt keine wesentlich bessere Sandverdichtung.

Es wurde erkannt, dass die Sandverdichtung von der Vibrationsrichtung und der Behälterform abhängt. Bei der horizontalen Vibration wurde bessere Sanddichte als bei der vertikalen Vibration erreicht. Der Sand wird bei der vertikalen Vibration im runden Behälter besser als im quaderförmigen Behälter verdichtet.

7 Zusammenfassung

Das Vollformgießverfahren ist ein relativ neues Gießverfahren, das in den industrialisierten Ländern bei der Herstellung von geometrisch komplizierten, kernreichen Gussteilen in letzter Zeit verstärkt eingesetzt wird.

Die technische Entwicklung dieses Verfahrens in Richtung Serienfertigung von komplizierten und qualitativ hochwertigen Gussteilen machte es möglich, größere Gussstückzahlen in einem Abguss durch den Zusammenbau mehrerer Modelle zu Modelltrauben zu erhalten. Diese Trauben werden mit einer speziellen, feuerfesten Schlichte umgeben und in einem Formbehälter mit ungebundenem, trockenem Sand eingebettet. Das Einformen der Modelltraube erfolgt durch Vibrieren des Formbehälters. Der Sand wird durch die Vibrationen fluidisiert, so dass er in die Hohlräume und Hinterschneidungen des Schaumstoffmodells fließen und sich dort verdichten kann. Die Form soll fest und stabil in allen Formbereichen sein, um dem metallstatischen Druck, der beim Gießen auftritt, Widerstand zu leisten. Die Stabilität der ungebundenen Form hängt entscheidend von der erreichten Packungsdichte des Quarzsandes ab. Wenn die Sanddichte nicht ausreichend hoch ist, kommt es beim Gießen zu Schüttfehlern, Auswüchsen und Penetrationen am Gussteil, die in der Regel nicht ausbesserbar sind und damit zum Ausschuss des Gussstücks führen.

Die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit befassen sich mit den Prozessen, die im Sand während der Vibration stattfinden. In einer Literaturrecherche wurde der Stand der Technik auf dem Gebiet der Formherstellung beim Vollformgießen erfasst. Die Formherstellung hängt von den Sandeigenschaften, Vibrationstischparametern und deren Zusammenführung ab.

Die Vibrationsparameter haben einen großen Einfluss auf das Sandverhalten unter Vibrationseinwirkung. Es existieren zwei Bereiche (Beschleunigungen unter und über 1 g), in denen sich der Sand unterschiedlich verhält.

1. Bei Beschleunigungen unter 1 g (Bereich 1) ist der Sand im Zustand der Pseudoverflüssigung und bewegt sich nicht intensiv gemeinsam mit dem Behälter. Die innere Reibung und Zahl der Lücken zwischen den Sandkörnern werden dabei kleiner und deshalb wird der Sand dichter.
2. Bei Beschleunigungen über 1 g (Bereich 2) bewegt sich der Sand sehr intensiv mit einer Trennung vom Behälterboden. Dieser Zustand des Sandes wird als ein Zustand des Vibrokochens bezeichnet.

Das Verhalten des Sandes im Zustand der Pseudoverflüssigung ist auf der Grundlage der Gesetze vibrierender Flüssigkeit mathematisch beschrieben worden. Eine maximale Sandverdichtung in diesem Bereich wird bei Amplitudenbeschleunigung erreicht, die nah zur Erdbeschleunigung liegen. Dies wird für die Nachverdichtung des Sandes empfohlen.

Um den Transport des Sandes in die Vertiefungen von Modellen zu gewährleisten, soll der Sand im Zustand des Vibrokochens sein. Die Bewegungsparameter des Tisches und des Sandes sind mathematisch berechnet worden. Die Anwendung der existierenden mathematischen Modelle für Übertragung von vertikalen Schwingungen in den Sand auf die Problematik der Sandverdichtung ermöglicht eine Erklärung für die Dichteverteilung des Sandes im Formbehälter und das Auftreten von Auflockerungserscheinungen während der Vibration, was mit den experimentellen Untersuchungen nachgewiesen wurde. Die Auflockerungswirkung nimmt mit steigender Vibrationsintensität zu, wobei die Stoßenergie, die die Sandverdichtung beeinflusst, sich bei höheren Frequenzen ebenfalls vergrößert. Eine maximale Sandverdichtung wird bei einem b/g -Verhältnis von 1,4 erreicht.

Die messtechnische Erfassung des Füll- und Verdichtungsvorganges wurde mit Hilfe von einem rechnergestützten Messsystem realisiert. Die Messsensoren sind auf dem kapazitiven Prinzip gebaut worden. Zur Berechnung der Sanddichte wurden Sensoren geeicht und die mathematischen Zusammenhänge erstellt.

Die Sandsäule bzw. Sandschichthöhe Transport- und Verdichtungsprozesse des Sandes beeinflusst. Mit zunehmender Sandsäule nehmen die Beweglichkeit und die Dichte ab.

Durch die Auswertung der gewonnenen Messdaten konnte der Einfluss einzelnen Prozessparameter auf die Sandverdichtung ermittelt werden:

- Langandauernde Vibration bringt keine wesentlich bessere Verdichtung.
- Sandverdichtung hängt von der Vibrationsrichtung ab. Bei horizontaler Vibration erreicht man bessere als bei vertikaler Vibration Sanddichte. Die zweidimensionale Vibration übt bessere Sandbeweglichkeit aus.
- Der Sand wird im runden besser als im quaderförmigen Behälter verdichtet.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Fahrig, M.: Vollformgießen im Wandel der Zeit, Tagungsband zum Paderborner Symposium Vollformgießen, 14-15 März 2000, S. 11-25
- [2] Shroyer, H. F.: Cavityless Casting Mold and Method of making same, US-Patent Nr. 830 343, 12.04.1958
- [3] Wittmoser, A.: Über das Vollformgießen mit vergasbaren Modellen, Gießerei 50, 1963, Nr. 17, S. 506-517
- [4] Wittmoser, A.: Ind.-Anz. 89, 1976, Nr. 33, S. 669-672
- [5] Nellen, H.: DBP Nr. 1 203 390, 07.07.1960
- [6] Smith, Tr.: US-Patent Nr. 3 157 924, 24.11.1964
- [7] Krzyzanowski, E.: DBP Nr. 1 301 440, 03.02.1968 und Nr. 1 758 521, 19.01.1968
- [8] Schaarschmidt, E.: Vollformgießen von qualitativ hochwertigen Serienteilen, Gießerei-Rundschau, 1988, Nr.7/8
- [9] Hofmann, R.: DBP Nr. 1 301 439, 11.11.1966
- [10] Wittmoser, A., Hofmann, R.: In: 35. Internat. Gießerei-Kongress, Vortrag 2, Kyoto 1968
- [11] Brown, J. R.: Foundry Practice Nr. 205, 1982, S. 3-5
- [12] Ashton, M. C., Sharman, S. G., Brookes, A. J.: The Replicast FM (Full Mold) and CS (Ceramic Shell) Process. Transactions of the American Foundrymen's Society 88, 1984, S. 271-280
- [13] Easwaran, J.: An alternate Approach to Conventional Evaporative Pattern Casting. In: Proceedings of the Expendable Pattern Casting: Managing the Technology. AFS-Kongress, Vortrag 14, Birmingham, Alabama, USA, 1993
- [14] Breuer, N., Garat, M.: Suspension Arm Component w/Pressure solidified EPS Method. In: Proceedings of the Expendable Pattern Casting: Managing the Technology. AFS-Kongress, Vortrag 12, Birmingham, Alabama, USA, 1993
- [15] Standtke, W. Seriengußteilerfertigung nach dem Vollformgießverfahren mit Schaumstoffmodellen, Gießerei 74, 1987, Nr.1, s. 7-15

- [16] Kuhgatz, C.: Lost Foam Verfahren. HA-Informationdienst VOLLFORM (Nr. 1) Firmenschrift, Hüttenes-Albertus Chemische Werke GmbH, Düsseldorf, 1994
- [17] Kuhgatz, C.: Zum Stand der Technik des Vollformgießens von Serien-
gußteilen in binderfreiem Sand (Lost Foam Verfahren) am Beispiel der
SATURN-Gießerei. Giesserei 81, 1994, Nr. 22, S. 803-808
- [18] Kuhgatz, C.: Beitrag zum Vollformgießen von Gusseisen mit Kugel-
graphit in binderfreiem Sand. Clausthal, Technische Universität, Dis-
sertation, 1995
- [19] Creed, P. S.: Sand Fill and Compaction: Getting Them Right. Modern
Castings 1989, Nr.11, s. 50-51
- [20] Gorla, C. A., Magistrali, G., Serramoglia, G.: Recent Innovations in the
Development of the „Policast“ Evaporative Pattern Process, Metallurgi-
cal Science and Technology, 1986, s. 59-69
- [21] Semënov, V. I.: Issledovanie formovki gazificiruemyh modelej v
syučih formovočnih smesâh. In: Lit'e po gazificiruemyh modelâm.
Kiev, IPL AN USSR, 1973, S. 92-96
- [22] Autorenkollektiv: In: Proceedings of the Expendable Pattern Casting
Technology, Vortrag 4, September 1990
- [23] Monroe, R. W.: Expendable Pattern Casting, AFS Inc., 1992
- [24] McMellon, B. A.: Design and Operation of Production Lost Foam
Casting Systems, AFS Transactions 1988, S. 27-36
- [25] Wegscheid, E. L.: Sand Vibration for the Lost Foam Process, AFS
Transactions 1990, S. 631-640
- [26] Clegg, A. J.: Evaporative Pattern Casting - a Review of Recent Devel-
opments and Progress, Foundry Trade J., Juni 1991, S. 72-83
- [27] Clegg, A. J.: Expanded-polystyrene Moulding - a Status Report, Foun-
dry Trade Journal Int. 9, 1986, Nr.30, S. 51-69
- [28] Tamura, K.: Mass Production by Evaporative Pattern Casting Process,
Transaction of the Japan Foundrymen's Society 8, 1989, Nr.4, S. 2-6
- [29] Nikolov, K.: Beitrag zur Formherstellung durch Vibrationsverdichtung
beim Vollformgießen, Freiberg, Technische Universität Bergakademie,
Dissertation, 1996
- [30] Yoshida, Y.: U. K. Patent Nr.2 209 277, 1989

- [31] Paar, T.: Beitrag zum Vollformgießen von Eisen- und Stahlguss, Gießerei 78, 1991, Nr.21, S. 750-754
- [32] Wilhelmi, H.: Stand und Technik des Vollformgießens von Serienteilen, Gießerei Verlag Düsseldorf 1988, S. 168-184
- [33] Littleton, H., Bates, C.: Fill and Compaction Control, In: AFS Proceeding of EPC Conference, Vortrag 7, September 1993
- [34] Medana, R.: Stand und Technik des Vollformgießens von Serienteilen. Gießerei-Verlag, Düsseldorf, 1988, S. 91-116
- [35] Schaarschmidt, E.: Stand und Technik des Vollformgießens von Serienteilen. Gießerei-Verlag, Düsseldorf, 1988, S. 119-136
- [36] Mabilais, P., Soulier, R., Beauvais, P.: Moulage avec modèles en polystyrène et sable sans liant, Fonderie 78, Oktober 1988, S. 19-29
- [37] Hoffmann, F., Szatmari, F.: Anwendung erdbaumechanischer Prinzipien in der Formstoffprüfung, Gießereiforschung 27, Nr. 4, 1974, S. 149-157
- [38] Sabel, G.: Theoretische und experimentelle Untersuchung des Schwingfördervorganges nach dem Wurfprinzip bei feinkörnigen Fördergütern, Fortschrittsberichte VDI, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1985
- [39] Lavendel, É. É.: Vibracii v tehnikе. Taschenbuch, Mašinostroenie, Moskva, 1981, Band 4, S. 107-108.
- [40] Aksënov, P. N.: Oborudovanie litejnyh cehov, Mašinostroenie, Moskva, 1977, S. 408-415