

Einfluss von Unterlagsplatten auf die Verdichtung in Betonsteinfertigern

Betonwaren sind weit verbreitete Produkte zur Gestaltung im Verkehrsflächen-, Garten- und Landschaftsbau. Sie werden in einer großen Vielfalt in Form und Farbe hergestellt. Der Hauptanteil der in Deutschland und Europa gefertigten Betonwaren wird in Betonsteinfertigern produziert, die die Produkte auf Unterlagsplatten formen und verdichten. Auf diesen Unterlagsplatten werden die Produkte dann weitertransportiert und in Hochregalen gelagert.

Die Formgebung und Verdichtung des Betongemenges erfolgt in den Betonsteinfertigern durch das sehr intensive Schockvibrationsverfahren. Dabei werden durch koordinierte Bewegungen von bestimmten Baugruppen des Fertigungssystems – den Arbeitsmassen – periodische Stoßvorgänge bestimmter Intensität erzeugt, die über die formgebende Baugruppe in das zu verdichtende Betongemenge eingeleitet werden. Die Unterlagsplatten gehören zu den Arbeitsmassen des Vibrationsverbandes eines Steinfertigers.

■ Dr.-Ing. Jörg-Henry Schwabe,
Dipl.-Ing. Jürgen Martin, IFF Weimar, Deutschland ■

Der Vibrationsverband ist ein komplexes Schwingungssystem, das für die erreichbare Qualität der Betonwaren von wesentlicher Bedeutung ist.

Das Zusammenspiel der Arbeitsmassen (Elemente)

- Vibrationstisch
- Form
- Unterlagsplatte
- Auflast.

entscheidet neben der Qualität des Betongemenges über das Ergebnis des Formgebungs- und Verdichtungsprozesses und damit über die Produkteigenschaften.

Abb. 1 zeigt ein vereinfachtes diskretes

Mehrmassemodell des Vibrationsverbandes eines Steinfertigers mit seinen Arbeitsmassen.

Der rot gekennzeichnete Bereich zeigt die Arbeitsmasse „Unterlagsplatte“. Das Schwingungsverhalten der Unterlagsplatte im Vibrationsverband wird durch seine Masse (m^2), sowie Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften ($c_2, k_2, c_3, k_3, c_7, k_7$) bestimmt.

Unterlagsplatten werden in verschiedenen Werkstoffen, Werkstoffkombinationen und Baustrukturen hergestellt und genutzt. In Abhängigkeit von den Material- und Struktureigenschaften werden sich die schwingungstechnischen Eigenschaften zwischen den Unterlagsplatten und damit

ihr Einfluss auf die Verdichtungswirkung unterscheiden.

Aus der Sicht des Anwenders sind dabei folgende Kenntnisse zur Unterlagsplatte und deren Eigenschaften wichtig für die Sicherung einer qualitätsgerechten Herstellung der Betonwaren:

- Welche schwingungstechnischen Eigenschaften (Kenngrößen) der Unterlagsplatte beeinflussen den Verdichtungsvorgang?
- Welche quantitativen Zusammenhänge existieren zwischen den verdichtungsrelevanten Eigenschaften (Kenngrößen) und der Verdichtungsqualität?
- Welche schwingungstechnischen Eigenschaften (Kenngrößen) haben die verschiedenen Plattenkonstruktionen?

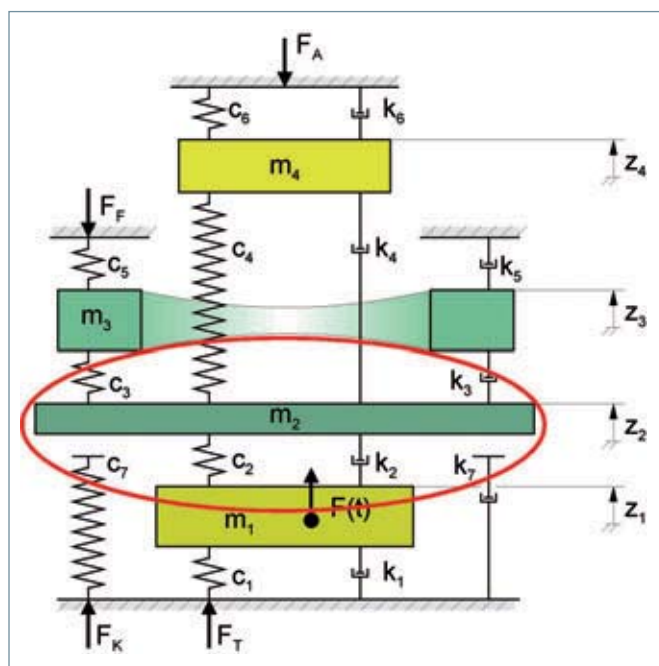


Abb. 1: Diskretes Mehrmassenmodell des Vibrationsverbandes eines Steinfertigers [1]

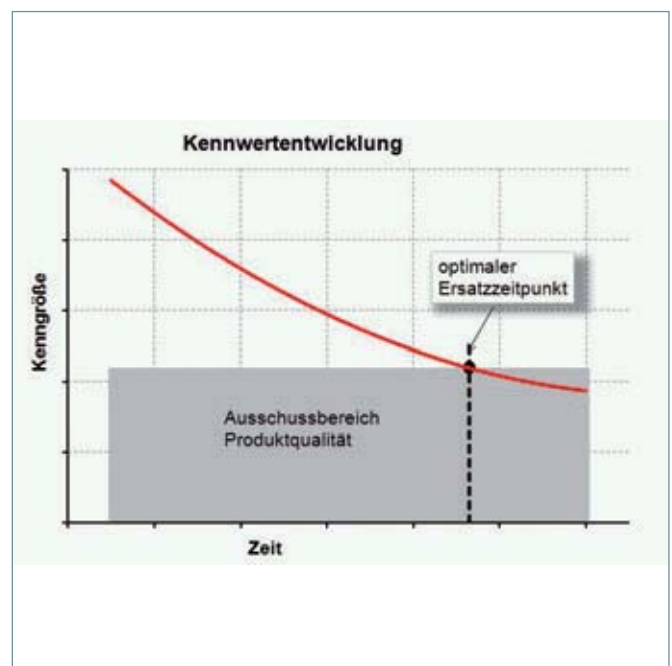


Abb. 2: Kennwertentwicklung (Annahme eines qualitativen Verlaufes)

- Wie verändern sich die schwingungstechnischen Eigenschaften während der Nutzungsdauer?

Ein wichtiges Beispiel ist für Betreiber von Umlaufanlagen mit Betonsteinfertigern die Bestimmung des günstigsten Zeitpunktes für den Ersatz des kompletten Plattenbestandes der Anlage.

Unterlagsplatten unterliegen prozessbedingt einem starken Verschleiß und einer Alterung. Es ist davon auszugehen, dass sich die schwingungstechnischen Eigenschaften während der Nutzungszeit verändern.

Häufig verschlechtert sich die Qualität der Produkte bei sonst gleichen Maschineneinstellungen und unverändertem Betongemenge aufgrund veränderter Schwingungsübertragung und Verdichtungswirkung der Unterlagsplatte. Ein Ersatz der Unterlagsplatten würde die Fertigungssituation wieder verbessern.

Andererseits ist der Plattenbestand einer Umlaufanlage mit Mengen von ca. 3.000 bis 5.000 Stück eine kostenintensive Investitionsposition, die möglichst lange genutzt werden sollte.

Vorteilhaft wäre die Kenntnis der zeitlichen Kennwertentwicklung (siehe Annahme in Abb. 2) zur Prognose des optimalen Ersatzzeitpunktes des Plattenbestandes für die bestmöglich Nutzung des Investitionsgutes und die Vermeidung einer unerwünschten Qualitätsverschlechterung.

Obwohl zwischen dem Werkstoff bzw. der Werkstoffart einer Unterlagsplatte, ihrem Alterungs- und Verschleißzustand und der zu erwartenden Produktqualität ein Zusammenhang offensichtlich ist, sind bisher keine Kenngrößen bekannt, die

- den schwingungstechnisch relevanten Zustand von Unterlagsplatten objektiv beschreiben,
- die leicht messbar sind und
- die eine hinreichend sichere Prognose auf die zu erwartende Produktqualität ermöglichen.

Die Zielstellung der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen war es, Kenngrößen der Unterlagsplatten zu erarbeiten, die die Verdichtung des Gemenges beeinflussen. Auf dieser Basis sollen werkstückspezifische Kennwerte bestimmt werden.

Neben der Bestimmung geeigneter Kenngrößen bestand die Aufgabe in der Be-



■ Dr.-Ing. Jörg-Henry Schwabe, 1988 bis 1993 Studium Maschinenbau/ Angewandte Mechanik, 2002 Promotion an der Technischen Universität Chemnitz. Seit 1993 am Institut für Fertigertechnik und Fertigungsbau Weimar e. V. tätig. Tätigkeit auf dem Gebiet der Maschinendynamik bei Baustoffmaschinen, Mitglied im Technical Committee „Simulation of fresh concrete flow“ in RILEM
j-h.schwabe@iff-weimar.de



■ Dipl.-Ing. Jürgen Martin, 1975 bis 1979 Studium Elektronik-Technologie und Feingerätetechnik, Fachrichtung Gerätetechnik, an der Technischen Universität Dresden. Seit 1997 am Institut für Fertigertechnik und Fertigungsbau Weimar e. V. tätig. Seit 04/2006 stellvertretender Leiter des Forschungsbereiches Fertigertechnik am Institut für Fertigertechnik und Fertigungsbau Weimar e. V. Arbeitsschwerpunkte: Konstruktion und Auslegung von Maschinen für die Herstellung von Bauelementen, insbesondere von Vibrationsformen und Erregersystemen.
j.martin@iff-weimar.de

stimmung des Zusammenhanges zwischen Kenngröße und Verdichtungswirkung bzw. Produktqualität.

Mit der Kenntnis des Zusammenhangs zwischen bestimmbar, zeitlich sich ändernden Plattenkennwerten und dem Verdichtungsergebnis soll ein Messgerät für die prozessnahe Anwendung entwickelt werden, das den Betonwerker in die Lage versetzt schnell und unkompliziert den Zustand der Unterlagsplatten zu prüfen.

Verdichtungsrelevante Kenngrößen

Die effektive Verdichtungswirkung beim Schockvibrationsverfahren basiert auf den periodischen Stoßvorgängen zwischen der Unterlagsplatte und den bewegten Tischleisten in der Aufwärtsbewegung bzw. der Unterlagsplatte und den gestellfesten Klopfleisten in der Abwärtsbewegung sowie gegebenenfalls Stößen zwischen Unterlagsplatte und Form.

Aufgrund der Dynamik dieses Vorganges sind bei der Erfassung geeigneter Kenngrößen solche Eigenschaften der Unterlagsplatte zu betrachten, die einen Zusammenhang zu Bewegungs- und Kraftgrößen herstellen lassen.

Auswahl Kenngrößen

Bei der Auswahl geeigneter Kenngrößen wurde der räumliche Bereich des prozess-typischen Stoßvorganges näher untersucht (siehe Abb. 3).

Aus der Sicht der Verformung sind örtliche Bereiche mit Materialdehnung, Material-scherung und Materialkompression visuell ableitbar, wobei keine Aussagen über die quantitativen Anteile der Belastungsarten an den Verformungen möglich sind.

Für die Anwendung als verdichtungsrelevante Kenngrößen bieten sich zunächst die Werkstoffkenngrößen.

Es wurde deshalb die Idee entwickelt, eine angepasste Kenngröße für die Steifigkeitseigenschaft der Unterlagsplatte bei Stoßeinwirkung zu schaffen, die

- die komplexen Verformungen (Kompression, Dehnung) des Stoßvorganges berücksichtigt,
- die unter prozessnahen Messbedingungen in den dynamischen Wechselwirkungen zwischen Kraft, Verformung und Verformungsgeschwindigkeit bestimmt wird und

- die als Bewegungs- und/oder Kraftgröße gemessen wird.

Für diese angepasste Kenngröße wird nachfolgend die Bezeichnung Stoßsteifigkeit S_K eingeführt.

Als weitere Kenngröße bietet sich die Dämpfung D an, die ein Maß für die Umwandlung von Schwingungsenergie in eine andere Energieform – meist Wärme – ist und aus zeitabhängigen Bewegungsgrößen berechnet wird.

Beschreibung der Kenngrößen

Für die Ermittlung dieser angepassten Kenngrößen

- Stoßsteifigkeit S_K und
- Dämpfung D

wurde folgender Lösungsansatz für ein Messprinzip entwickelt.

Auf die Funktionsflächen der Unterlagsplatte (Messobjekt) werden dynamische Einwirkungen in einer Größe ausgeübt, die Verformungen und Verformungsgeschwindigkeiten wie bei der Schockvibration erzeugen. An der Kontaktstelle oder in unmittelbarer Nähe werden zeitabhängige Kraft- bzw. Bewegungsgrößen messtechnisch erfasst und gespeichert. Die Unterlagsplatte wird so gelagert, dass lokale Verformungen (z. B. Plattenbiegung) sicher behindert werden.

Aus diesem Messprinzip wurden mehrere Lösungen eines Messverfahrens erarbeitet, von denen das Messverfahren „Fallhammer“ zunächst in einer labortechnischen Variante untersucht und in der weiteren Bearbeitung in einem Funktionsmuster eines prozessnahen Messgerätes entwickelt, gebaut und erprobt wurde.

Das Messverfahren „Fallhammer“ orientiert sich in seiner Funktionsweise stark an das Fertigungsprinzip der Schockvibration

(siehe Abb. 4). Dazu wird die Unterlagsplatte mit der der Messstelle gegenüberliegenden Fläche auf eine schwingungstechnisch steife Unterlage aufgespannt. Ein Fallgewicht mit der Masse m fällt unter Einfluss der Gravitation aus der Höhe h_0 und trifft mit der Geschwindigkeit v auf den zu vermessenden Probekörper, die Unterlagsplatte.

Die Masse m des Fallgewichtes und die Fallhöhe h_0 sind so berechnet, dass vergleichbare Verformungen bzw. Verformungsgeschwindigkeiten wie im Verdichtungsprozess mit der Schockvibration entstehen.

In Abhängigkeit von den Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften der Unterlagsplatte wird das Fallgewicht verzögert und prallt zurück. Nach einer Flugphase schlägt das Fallgewicht wieder auf die Unterlagsplatte auf und es entsteht ein zweiter Stoß. Dieser Vorgang wiederholt sich mehrfach, bis zum Stillstand des Fallgewichtes.

Die Bewegungen des Fallkörpers werden als Zeitverhalten der Beschleunigung durch einen Beschleunigungssensor mit ausreichender Abtastrate erfasst, wobei sich ein Zeitverlauf wie im Beispiel in Abb. 5 feststellen lässt.

Aus diesen Primärdaten lassen sich die Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften in der folgenden Weise bestimmen.

Steifigkeitseigenschaft – Stoßsteifigkeit S_K

Die Höhe des ersten Stoßimpulses \dot{a}_1 wird weitestgehend bestimmt durch die Steifigkeitseigenschaften der beiden Stoßpartner. Unter der Annahme, dass die Steifigkeit des Fallgewichtes sehr viel größer ist als die der Unterlagsplatte (was für alle bekannten Holz- und Kunststoffplatten zutreffend ist) wird die Höhe des ersten Stoßimpulses also

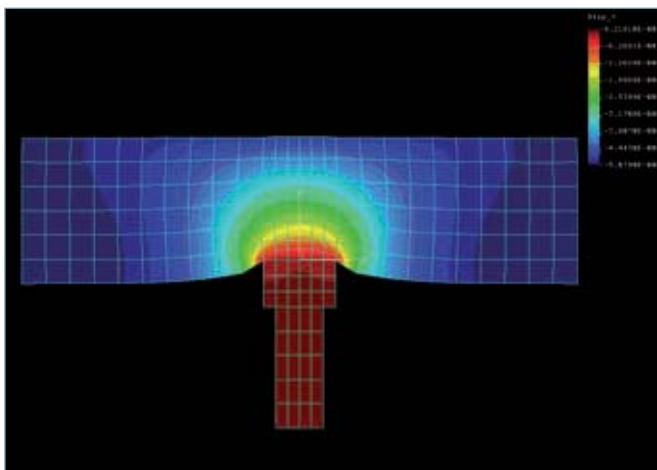


Abb. 3: Verformungsberechnungen während des Stoßvorganges zwischen Unterlagsplatte und Tischleiste

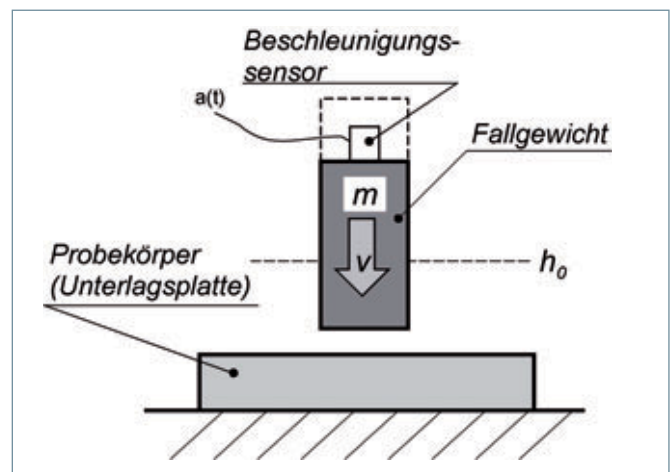


Abb. 4: Schema Funktionsprinzip „Fallhammer“

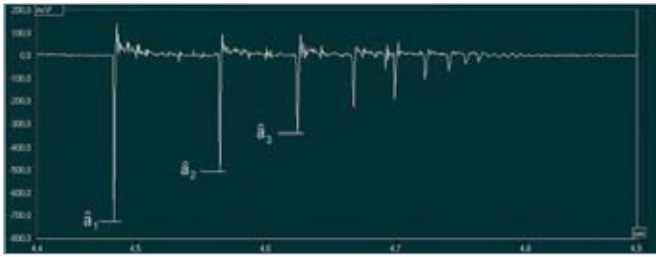


Abb. 5: Aufnahme des Zeitverlaufs der Beschleunigung (Messbeispiel)

im Wesentlichen von der Steifigkeit der Unterlagsplatte bestimmt. Lediglich bei Stahl-Unterlagsplatten sind die Steifigkeiten beider Stoßpartner gleichwertig.

Neben den Werkstoffeigenschaften bestimmen auch strukturelle Eigenschaften des Prüfkörpers die Steifigkeit. Bei einem homogenen Vollkörper ist das in der beschriebenen Messanordnung die Plattendicke.

Damit ergibt sich die Größe des ersten Stoßimpulses \hat{a}_1 als ein messtechnisch einfach bestimmbarer Parameter als Maß für die Stoßsteifigkeit S_K der Unterlagsplatte.

$$S_K \sim \hat{a}_1$$

Dämpfungseigenschaft – Stoßdämpfung D

Die Dämpfung D wird als lineares Amplitudenverhältnis $\Delta\hat{a}_{rel}$ bzw. als logarithmisches Dekrement Λ berechnet aus den Werten der ersten und zweiten bzw. der n-ten und (n+1)ten Beschleunigungsamplitude.

$$\Delta\hat{a}_{rel} = \frac{\hat{a}_1 - \hat{a}_2}{\hat{a}_1} = \frac{\hat{a}_n - \hat{a}_{n+1}}{\hat{a}_n}$$

$$\Lambda = \ln\left(\frac{\hat{a}_n}{\hat{a}_{n+1}}\right)$$

$$D \sim \Delta\hat{a}_{rel} \quad \text{bzw.} \quad D \sim \Lambda$$



Abb. 6: Ansicht der labortechnischen Versuchsvorrichtung

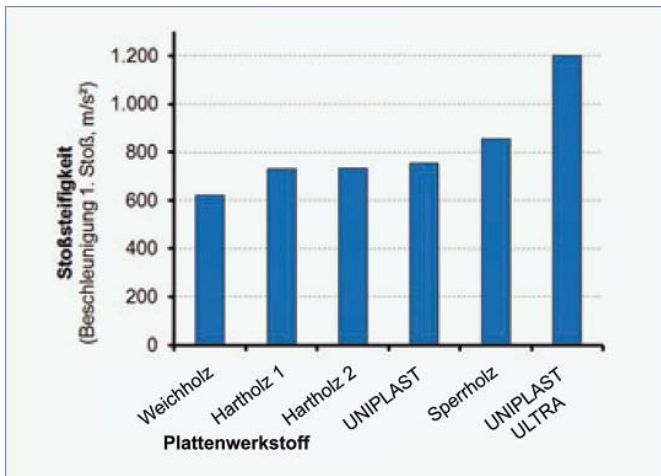


Abb. 7: Stoßsteifigkeit in Abhängigkeit vom Plattenwerkstoff

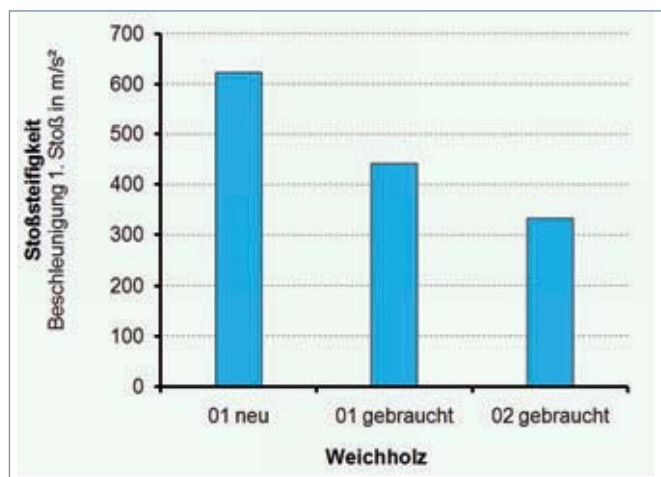


Abb. 8: Stoßsteifigkeit in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer von Weichholzplatten

Messung der Kenngrößen

Für die praktische Umsetzung des Messverfahrens und die Bestimmung werkstückspezifischer Kennwerte wurde eine labortechnische Messeinrichtung geschaffen (siehe Abb. 6). In Messserien wurden Kennwerte für Unterlagsplatten bestimmt. Dabei wurden Einflussfaktoren wie

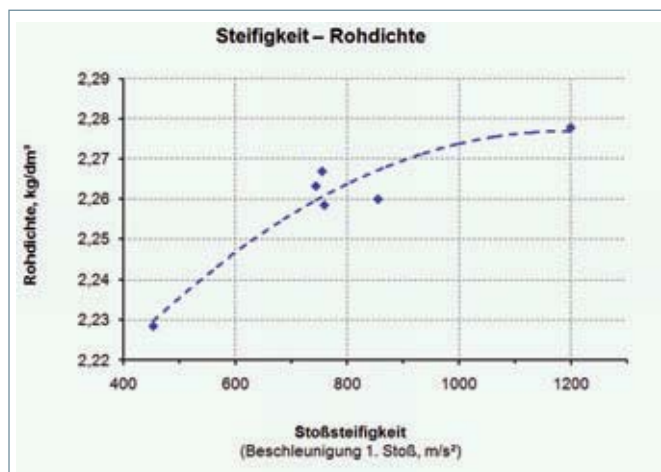


Abb. 9: Verdichtungswirkung (Rohdichte) in Abhängigkeit von der Stoßsteifigkeit

- Werkstoff
 - Feuchtegehalt (bei Holzplatten)
 - Alter bzw. Nutzungsgrad
- untersucht.

Die folgenden Diagramme zeigen ausgewählte Ergebnisse dieser Messungen zur Bestimmung von Kennwerten.

Das Diagramm in Abb. 7 zeigt beispielhaft die aus der Beschleunigungsamplitude des ersten Stoßes ermittelten Steifigkeitskennwerte für verschiedene Plattenwerkstoffe.

Im Diagramm in Abb. 8 sind Kennwerte von Weichholz-Unterlagsplatten mit unterschiedlicher Nutzungsdauer dargestellt.

Zusammenhänge Kenngröße – Verdichtungswirkung/Produktqualität

Mit den vermessenen Unterlagsplatten wurden auf Betonsteinfertigern Pflastersteine produziert, die hinsichtlich der erreichten Rohdichten und Druckfestigkeiten geprüft wurden. Es wurden Betonsteine auf zwei verschiedenen Betonsteinfertigern mit jeweiligen Parametereinstellungen hergestellt und untersucht.

Das Diagramm in Abb. 9 stellt den Zusammenhang zwischen der Stoßsteifigkeit und der Verdichtungswirkung mit der Rohdichte als Bewertungskriterium dar. Die Messpunkte stellen Mittelwerte der Rohdichte aus mehreren Pflastersteinen dar, die auf einer Unterlagsplattenart (Weichholz, Hartholz, Kunststoff) gefertigt wurden. Das Diagramm gilt streng gesehen nur für die gewählte Maschineneinstellung.

Fazit der Kenngrößenermittlung

Mit dem beschriebenen Fallhammer-Messverfahren ist es möglich, mit definierten mechanischen Einwirkungen auf eine Unterlagsplatte und der Messung von zeitabhängigen Bewegungsgrößen während der Einwirkung Kenngrößen aus den Messwerten zu bestimmen, die die schwingungstechnischen Eigenschaften dieser Unterlagsplatte mit Bezug auf die Anwendung im Schockvibrationsverfahren zur Herstellung von Betonwaren beschreiben.

Als geeignete und messbare Kenngrößen wurden ermittelt:

- die erste Beschleunigungsamplitude \hat{a}_1 als Maß für die Steifigkeitseigenschaften, hier beschrieben als Stoßsteifigkeit S_K
- das lineare Amplitudenverhältnis $\Delta\hat{\sigma}_{rel}$ bzw. das logarithmische Dekrement Λ als Maß für die Dämpfung D

In labor- und kleintechnischen Versuchen wurden Kennwerte für gegenwärtig verwendete Arten von Unterlagsplatten bestimmt. Es wurden die Einflüsse von Plattenmaterial, Feuchtegehalt und Nutzungsdauer auf die schwingungstechnischen Eigenschaften untersucht.

In Verarbeitungsversuchen wurden bei konstanten Maschineneinstellungen von Betonsteinfertigern quantitative Zusammenhänge zwischen der Kenngröße Stoßsteifigkeit S_K und der Verdichtungswirkung bzw. der Produkteigenschaft Druckfestigkeit bei Pflastersteinen bestimmt.

Messgerät für Betonwerke

Für die prozessnahe Anwendbarkeit des Messverfahrens wurde eine Messeinrichtung entwickelt, gebaut und unter industriellen Bedingungen erprobt.

Die Messeinrichtung ist für eine Anwendung in einem Betonsteinfertiger in einer Umlaufanlage ausgeführt und enthält 3 Sensorköpfe zur Messung der Platteneigenschaften an mehreren Stellen der Unterlagsplatte.

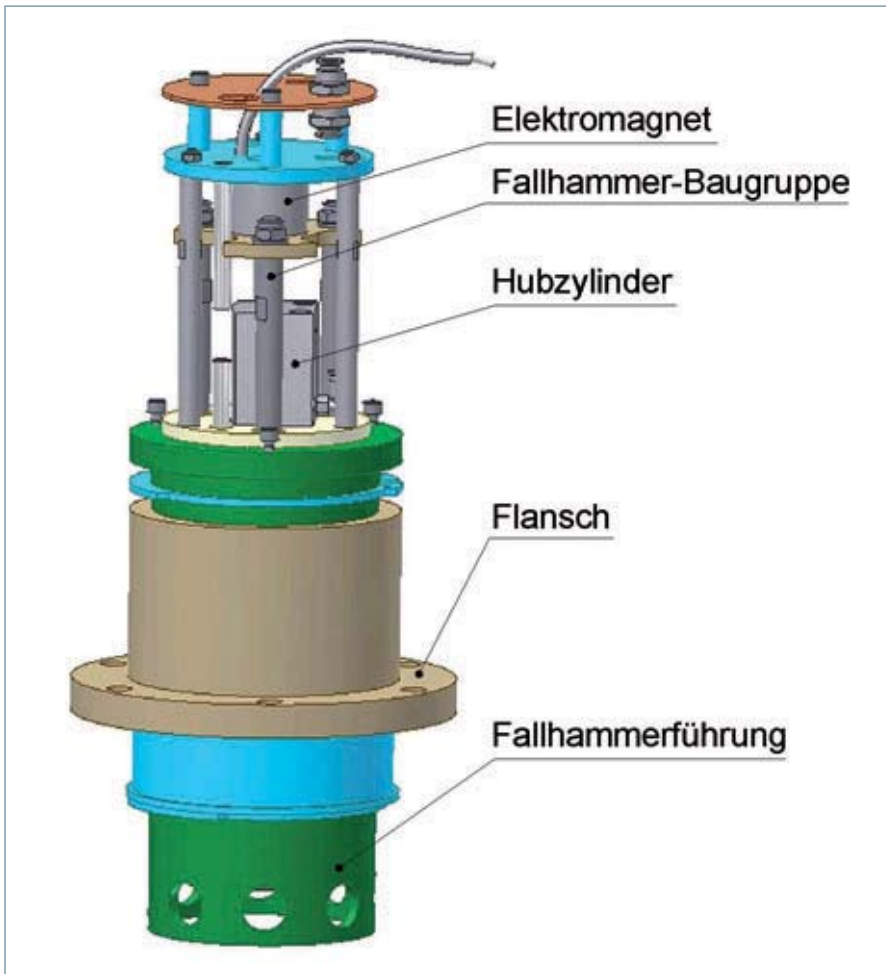


Abb. 10: Ansicht des CAD-Modells eines Sensorkopfes

Abb. 10 zeigt eine Ansicht des CAD-Modells eines Sensorkopfes mit Beschreibung der wesentlichen Komponenten zur Umsetzung des Messverfahrens. In Abb. 11 ist die fertige Messeinrichtung vor ihrem Einbau in den Steinfertiger dargestellt.

In einer ersten Serie wurden 200 Unterlagsplatten aus Weichholz (Kiefer) und einer bisherigen Nutzungsdauer von 2,75 Jahren vermessen. Eine statistische Auswertung ergab folgende Werte:

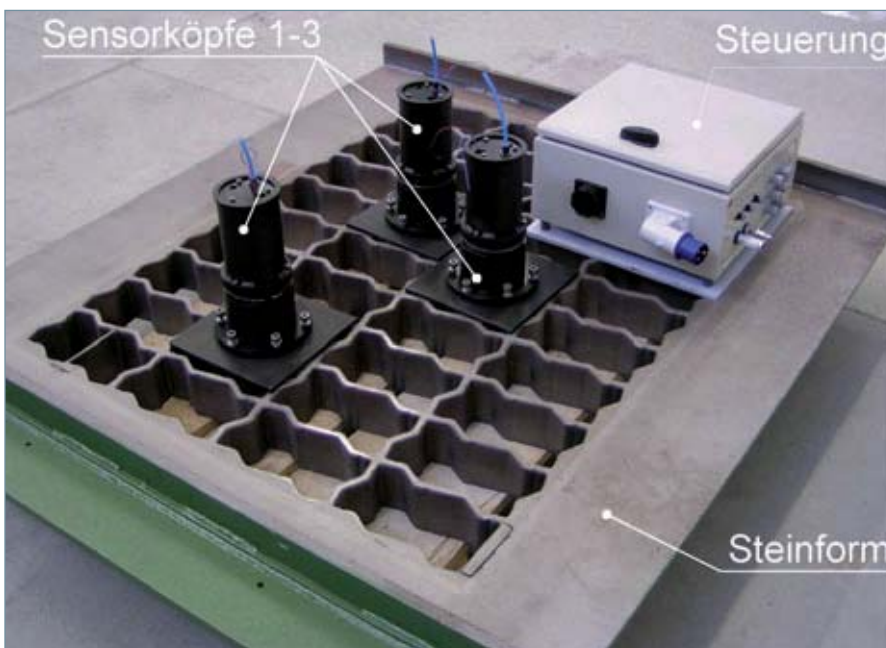


Abb. 11: Ansicht der fertigen Messeinrichtung

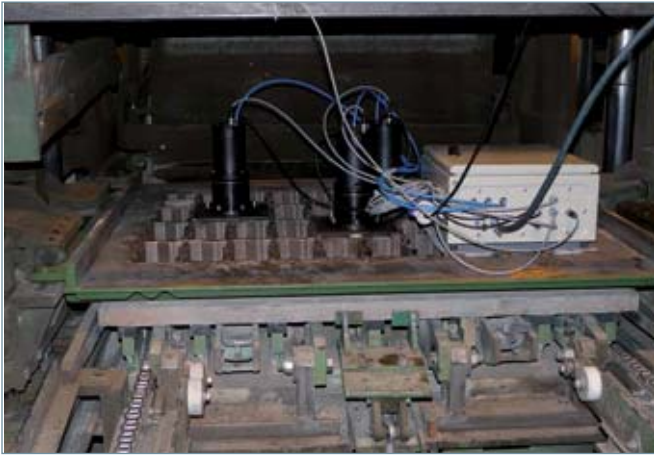


Abb. 12: Ansicht der Messeinrichtung im Betonsteinfertiger

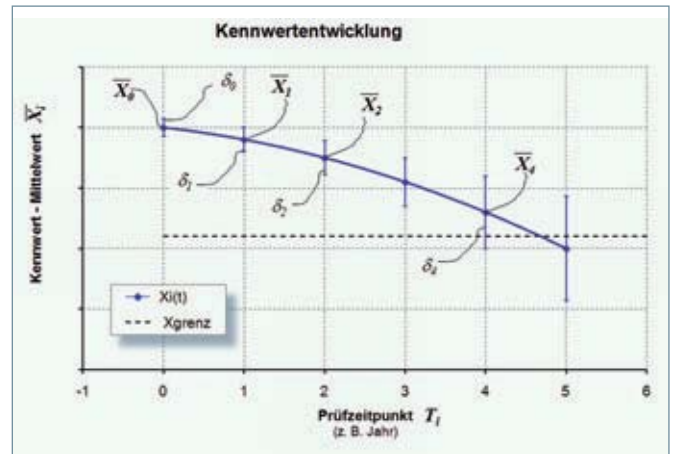


Abb. 13: Kennwertentwicklung eines Plattenbestandes (beispielhafte Annahme)

- Mittelwert, ges. 457 m/s²
- Standardabweichung 89,7 m/s²

Weitere Messserien zur Erfassung der Kennwerte des kompletten Plattenbestandes sind 2010 geplant. Zur Messung des Zeitverhaltens der Kennwerte sind weiterhin Messungen in zyklischen Zeitabständen vorgesehen.

Anwendungsmöglichkeiten des Messverfahrens

Das entwickelte Messverfahren ist vorteilhaft sowohl beim Hersteller von Unterlagsplatten als auch beim Anwender in einem Betonsteinwerk nutzbar.

Aus der Sicht des Herstellers von Unterlagsplatten werden folgende Anwendungsmöglichkeiten gesehen:

- Messung und Bewertung der dynamischen Bretteigenschaften im Herstellerwerk und beim Kunden als eine Qualitätskontrolle bzw. ein Qualitätsnachweis
- Nachweis der schwingungstechnischen Eigenschaften bei Ersatzlieferung von Unterlagsplatten (z. B. bei Ersatzbedarf in Kleinmengen) für bestehende Fertigungsanlagen
- Herstellung und Lieferung von Unterlagsplatten mit definierten Eigenschaften und abgestimmt auf die Eigenschaften der anderen Arbeitsmassen im Vibrationsverband

Für den Betreiber von Betonsteinfertigern ergeben sich u. a. folgende Anwendungsmöglichkeiten:

- Auswahl von Unterlagsplatten in Abhängigkeit von den maschinen- und verfahrenstechnischen Randbedingungen und den angestrebten Produktqualitäten bereits in der Planungsphase einer Steinfertigeranlage

- Identifikation von Unterlagsplatten mit unzureichender Verdichtungswirkung, erforderlichenfalls selektive Aussonderung/ selektiver Ersatz
- Erfassung und Bewertung der zeitlichen Entwicklung der Platteneigenschaften durch zyklische Messungen und Prognose des optimalen Zeitpunktes für den Austausch des kompletten Plattenbestandes (siehe auch Diagramm in Abb. 13).

Die Kenntnis des zeitlichen Verlaufes der Kennwerte mit ihren Mittelwerten und der Streuung kann mit objektiven Messwerten die Entscheidung zum richtigen Zeitpunkt des Plattenwechsels unterstützen.

Zusammenfassung

Es wurden Kenngrößen für die schwingungstechnischen Eigenschaften von Unterlagsplatten definiert. Zur Bestimmung der Kennwerte wurden Messverfahren und Messvorrichtungen entwickelt und erprobt. Herstellern und Anwendern von Unterlagsplatten stehen damit objektive Messwerte zu den verdichtungsrelevanten Eigenschaften der Platten zur Verfügung.

Die Forschungsergebnisse wurden im Rahmen eines Kooperationsforschungsprojekts von den Unternehmen

- Fritz Herrmann GmbH & Co., Betonsteinwerke KG, Eisenberg
- Wasa Pallets GmbH & Co. KG, Neubrunn
- Institut für Fertigertechnik und Fertigbau Weimar e. V.

erarbeitet.

Das Forschungsvorhaben wurde im Rahmen des Programmes „PROgramm INNOvationskompetenz mittelständischer Unternehmen“ (PRO INNO) vom Bundes-

ministerium für Wirtschaft und Technologie (Förderkennzeichen KF 0031713UK7) gefördert.

Literatur

- [1] Kuch, H.; Schwabe, J.-H.; Palzer, U.: Herstellung von Betonwaren und Betonfertigteilen – Verfahren und Ausrüstungen, Verlag Bau + Technik, Düsseldorf 2009

WEITERE INFORMATIONEN



IFF Institut für Fertigertechnik und Fertigbau Weimar e.V.
Cranachstr. 46
99423 Weimar, Deutschland
T +49 3643 86840
F +49 3643 868413
kontakt@iff-weimar.de
www.iff-weimar.de