

Werk

Jahr: 1936

Kollektion: fid.geo

Signatur: 8 GEOGR PHYS 203:12

Digitalisiert: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

Werk Id: PPN101433392X_0012

PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0012

LOG Id: LOG_0033

LOG Titel: Seismische Untersuchungen des Geophysikalischen Instituts in Göttingen. XXIII. Messung der Schwingungskennziffern und Herabminderung der Erschütterungen in einer Kohlenwäsche

LOG Typ: article

Übergeordnetes Werk

Werk Id: PPN101433392X

PURL: <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X>

OPAC: <http://opac.sub.uni-goettingen.de/DB=1/PPN?PPN=101433392X>

Terms and Conditions

The Goettingen State and University Library provides access to digitized documents strictly for noncommercial educational, research and private purposes and makes no warranty with regard to their use for other purposes. Some of our collections are protected by copyright. Publication and/or broadcast in any form (including electronic) requires prior written permission from the Goettingen State- and University Library.

Each copy of any part of this document must contain these Terms and Conditions. With the usage of the library's online system to access or download a digitized document you accept the Terms and Conditions.

Reproductions of material on the web site may not be made for or donated to other repositories, nor may be further reproduced without written permission from the Goettingen State- and University Library.

For reproduction requests and permissions, please contact us. If citing materials, please give proper attribution of the source.

Contact

Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen
Georg-August-Universität Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen
Germany
Email: gdz@sub.uni-goettingen.de

Seismische Untersuchungen des Geophysikalischen Instituts in Göttingen

XXIII. Messung der Schwingungskennziffern und Herabminderung der Erschütterungen in einer Kohlenwäsche

Von R. Köhler — (Mit 14 Abbildungen)

Die Schwingungskennziffern eines großen Maschinengebäudes werden gemessen. Ihre Kenntnis dient zur Herabminderung der Gebäudeerschütterungen durch Maschinen. Durch Änderung der Drehzahl um 11% bei der hauptsächlich störenden Maschine wird eine Herabminderung der Gebäudeschwingungen um 77% erreicht. Die Anregung und Auswertung freier Eigenschwingungen erweist sich als besonders vorteilhaft.

Einleitung. Die neueren Arbeiten über Gebäudeschwingungen, insbesondere die von A. Ramspeck*) in Göttingen und J. A. Blume**) in Kalifornien durchgeführten Untersuchungen, haben den Nachweis erbracht, daß ein Gebäude als Ganzes mit bestimmten Eigenschwingzahlen in sich einheitlich zu schwingen vermag. Ein Gebäude befolgt die Gesetze eines schwach gedämpften Schwingers mit mehreren Freiheitsgraden, besitzt genau angebbare Resonanzkurven mit meist sehr steilen Gipfeln und schaukelt sich zu großen Schwingweiten auf, wenn es im Takt seiner Eigenschwingzahlen durch periodisch wirkende Kräfte, z. B. durch die Massendrucke schlecht ausgewuchteter Maschinen zu Schwingungen angeregt wird.

Die Schwingungskennziffern von Gebäuden lassen sich bisher in keiner Weise vorausberechnen, wohl aber kann man sie durch Untersuchungen mit Erschütterungsmessern bei stoßförmiger oder sinusförmig-stationärer Anregung des Gebäudes mit großer Genauigkeit ermitteln. Wie nützlich die Kenntnis der Lage der Resonanzgipfel bei einem Bauwerk sein kann und wie wichtig es ist, die Drehzahl großer Maschinen nicht in der Nähe einer Eigenschwingzahl des Gebäudes zu wählen, soll am Beispiel einer Kohlenwäsche gezeigt werden. In dieser Wäsche wurden von der „Forschungs- und Beratungsstelle für Boden- und Gebäudeschwingungen an der Westfälischen Berggewerkschaftskasse zu Bochum“ eingehende Schwingungsuntersuchungen durchgeführt mit dem Ziel, durch planmäßige Verstimmung der Maschinendrehzahlen gegen die Eigenschwingzahlen

*) A. Ramspeck: Versuche über Boden- und Gebäudeschwingungen, Zeitschr. f. Geophysik 9, 44—60 (1933); F. Gerecke u. A. Ramspeck: Boden- und Gebäudeschwingungen in Rastatt nach dem Erdbeben vom 8. Februar 1933, Zeitschr. f. Geophysik 9, 342—349 (1933).

**) John A. Blume: A machine for setting structures and ground into forced vibration. Bull. Seism. Soc. Amer. 25, 361—380 (1935).

des Gebäudes die fühlbaren Erschütterungen des letzteren infolge des Maschinenbetriebes auf ein erträgliches Maß herabzudrücken. Die Hauptergebnisse dieser Untersuchungen sind im folgenden dargestellt.

Versuchsordnung. Grundriß und Vorderansicht des 40 m hohen und 72 m langen Wäschegebäudes, das aus Eisenträgerrahmen mit Ziegelmauerwerk-ausfüllung besteht, sind in Fig.1 wiedergegeben. Zur Schwingungserregung

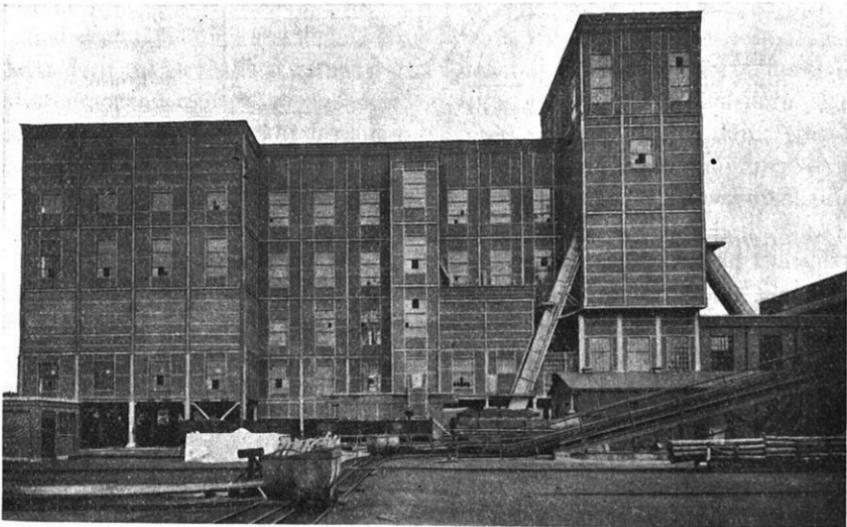
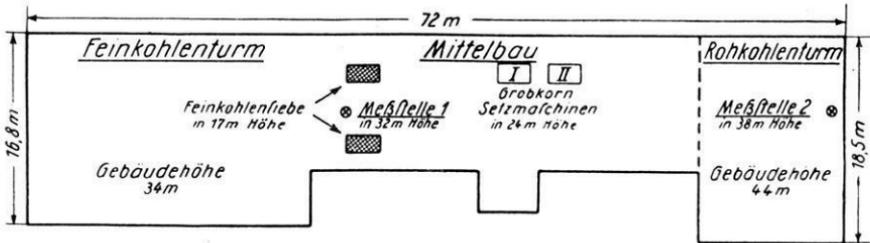


Fig. 1. Grundriß und Vorderansicht der untersuchten Kohlenwäsche

wurden geeignete Maschinen der Wäsche benutzt, nämlich die bei vollem Betrieb mit 160 U./Min. laufenden Feinkohlensiebe und zwei Grobkornsetzmaschinen mit einer größten Drehzahl von 71 U./Min. und 81 U./Min. Die Verwendung betriebs-eigener Maschinen bietet den Vorteil, daß die Versuchsbedingungen den Verhält-nissen bei vollem Betrieb mit jeder gewünschten Genauigkeit nachgebildet werden können. Allerdings läßt sich bei derartigen Maschinen die Drehzahl nicht so genau einregeln und nicht so stetig ändern wie bei einer eigens für Schwingungsunter-

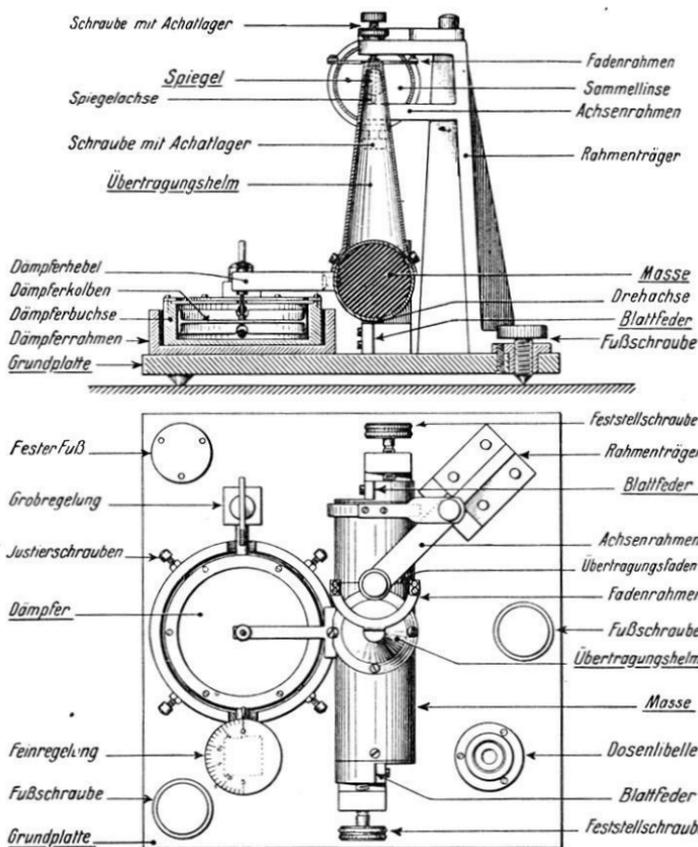


Fig. 2. Bei den Messungen benutzter Waagrecht-Erschütterungsmesser
Grund- und Aufriß. Maßstab 1 : 4

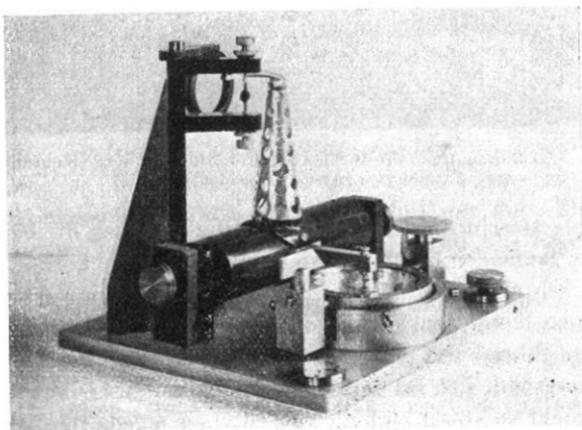


Fig. 3. Ansicht des Waagrecht-Erschütterungsmessers

suchungen gebauten Schwingungsmaschine. Infolgedessen mußten die Einzelversuche, insbesondere die Aufzeichnungen der Gebäudeerschütterungen beim allmählichen Anlaufen der Maschinen, häufig wiederholt werden. Außerdem wurden zur Ergänzung der Anlaufversuche die schwach gedämpft ausklingenden *freien* Eigenschwingungen der Wäsche angeregt und aufgezeichnet.

Die Messungen wurden an zwei verschiedenen, 45 m voneinander entfernten Punkten des Gebäudes vorgenommen (vgl. Fig. 1). Meßstelle 1 lag im Mittelbau nahe dem Feinkohlenturm in 32 m Höhe über dem Erdboden, Meßstelle 2 in 38 m Höhe nahe der Außenwand des Rohkohlenturmes. Gemessen wurden in erster Linie die waagerechten Bewegungen in der Längsrichtung und in der Querrichtung des Gebäudes, die wesentlich größer waren als die senkrechten Erschütterungen.

Meßgeräte. Die benutzten Waagrecht-Erschütterungsmesser*) sind in der Mechanischen Werkstatt der Erdbebenwarte der Westfälischen Berggewerkschaftskasse von Herrn L. Grube gebaut worden, teilweise in Anlehnung an entsprechende Geräte des Geophysikalischen Instituts in Göttingen. Die einzelnen Bauteile sind so starr gewählt, daß unerwünschte Eigenschwingungen nicht vorhanden sind. Wie die aufrißliche Darstellung in Fig. 2 zeigt, werden die tragenden Blattfedern auf Druck beansprucht. Die Rückstellkraft der Federn ist der Schwerkraft entgegengerichtet, so daß durch geeignete Wahl der Blattfedern jede gewünschte Eigenschwingzahl bis herunter zu 0.8 Hz = 48 Schw./Min. eingestellt werden kann. Die Dämpfungsvorrichtung — regelbare Luftdämpfung — ist so bemessen, daß auch für hohe Eigenschwingzahlen die Dämpfung noch aperiodisch ist.

Die Vergrößerung der Geräte ist bei 1 m Registrierabstand und 1 mm Durchmesser der Spiegelachse 7800fach. Im vorliegenden Fall wurde sie auf rund 120 herabgesetzt. Die Eichkurven der Geräte sind unmittelbar nach den Messungen auf einem Waagrecht-Schütteltisch neu bestimmt worden und in Fig. 4 dargestellt. Neben der sekundlichen Schwingzahl ist die Schwingzahl in der Minute eingetragen, die im folgenden ausschließlich benutzt wird, da die Drehzahlmesser der Maschinen in Schw./Min. geeicht waren.

Die Schwingungskennziffern der Kohlenwäsche. Die Gebäudebewegungen beim Anlaufen der *Feinkohlensiebe* veranschaulicht Fig. 5, die eine von vielen Aufzeichnungen wiedergibt und bereits alle wesentlichen Eigenschwingzahlen der Kohlenwäsche erkennen läßt. In der *Längsrichtung* des Gebäudes — obere Kurve — ist ein ausgesprochenes Resonanzmaximum bei einer Drehzahl von 115 U./Min. vorhanden. Die Bewegungen in der *Querrichtung* — untere Kurve — beginnen mit freien Eigenschwingungen von 72 Schw./Min., die durch böigen Wind, der die

*) Die Geräte sind beschrieben in: Untersuchungen über die durch Verkehr und Industrie verursachten Gebäudeerschütterungen. Mitt. d. Erdbebenwarte d. Westf. Berggewerkschaftskasse 1934/35.

Breitseite des Bauwerks mit voller Wucht traf, angeregt worden waren; ihnen überlagern sich winderregte freie Schwingungen von etwa 146 Schw./Min.

Die Drehzahl 72 U./Min. wird von den Feinkohlensieben so schnell durchlaufen, daß es zur Ausbildung eines Resonanzmaximums nicht kommt. Dagegen wird

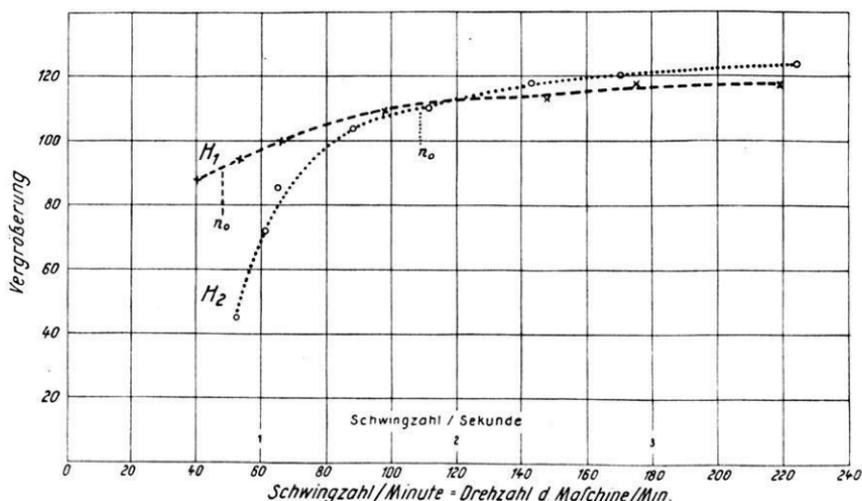


Fig. 4. Eichkurven der Waagrecht-Erschütterungsmesser H_1 und H_2 , gemessen auf dem Schütteltisch
 n_0 = Eigenschwingzahl des Gerätes

das Gebäude in der ersten Oberschwingung zu deutlich erkennbaren Resonanzbewegungen aufgeschaukelt, wenn die Siebe mit der Drehzahl 146 U./Min. laufen*).



Fig. 5. Waagrechte Gebäudebewegungen an der Meßstelle 1 beim Anlaufen der Feinkohlensiebe

Obere Kurve: Bewegungen in der Längsrichtung des Gebäudes, aufgezeichnet mit H_1 ;
 Untere Kurve: Bewegungen in der Querrichtung des Gebäudes, aufgezeichnet mit H_2

*) Der wahre Wert der Eigenschwingzahl für die Oberschwingung ist $72 \times 2 = 144$ Schw./Min. Der höhere Wert 146 Schw./Min. ist durch das benutzte Anlaufverfahren bedingt.

Den Verlauf der Resonanzkurve für die *Längsrichtung* des Gebäudes zeigt Fig. 6. Die Aufzeichnungen im Mittelbau und im Rohkohlenturm stimmen innerhalb der Meßfehler überein. Es handelt sich also bei diesen Gebäudebewegungen um Eigenschwingungen des *ganzen*, einheitlich in seiner Längsrichtung schwingenden Wäschegebäudes.

Der Verlauf der Resonanzkurve in der *Querrichtung* läßt sich aus den Aufzeichnungen beim Anlaufen der Feinkohlensiebe nur ungenau ableiten. Unterhalb 100 Schw./Min. wurden in der Querrichtung durch die Feinkohlensiebe über-

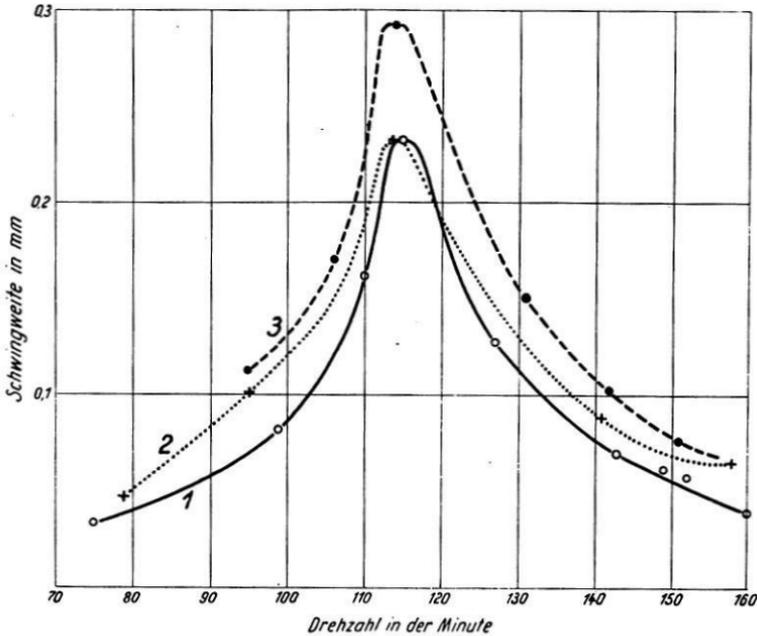


Fig. 6. Resonanzkurven der Wäsche in der Längsrichtung, aufgenommen beim Anlaufen der Feinkohlensiebe an zwei verschiedenen Stellen des Gebäudes

●●● mit H_2 an der Meßstelle 1, ○○○ mit H_1 an der Meßstelle 1, +++ mit H_2 an der Meßstelle 2. Kurve 1 entspricht der oberen Kurve in Fig. 5

haupt keine Schwingungen angeregt, die bei der im vorliegenden Falle benutzten, wegen der starken sonstigen Erschütterungen des Gebäudes geringen Vergrößerung meßbar gewesen wären. Große Schwingungen bei 70 bis 80 Schw./Min. erzeugten dagegen die Grobkornsetzmaschinen der Wäsche. Ihre Verwendung als Schwingungserreger bereitete jedoch insofern Schwierigkeiten, als die Drehzahlen der beiden Maschinen, die nicht getrennt eingeschaltet werden konnten, zunächst nicht gleich waren, sondern im konstanten Verhältnis 1.14:1 standen. Infolgedessen traten beim Anlaufen der Grobkornsetzmaschinen störende Schwebungserscheinungen auf.

Eine verhältnismäßig gut gelungene Aufzeichnung, in der gleichwohl schwache Schwebungsminima bei 63 und 69 U./Min. und ein starkes Minimum bei 75 U./Min. zu erkennen sind, ist in Fig. 7 wiedergegeben. Aus den in Fig. 8 als *leere Kreise* eingetragenen Werten, die sich bei der Auswertung dieser Aufzeichnung ergaben, läßt sich der Verlauf der Resonanzkurve allerdings nur angenähert entnehmen. Aus diesem Grunde wurden auch noch die schwach gedämpft ausklingenden *freien* Eigenschwingungen von 72 Schw./Min. durch plötzliches Abschalten der Grobkornsetzmaschinen angeregt, aufgezeichnet und ausgewertet, wie im letzten

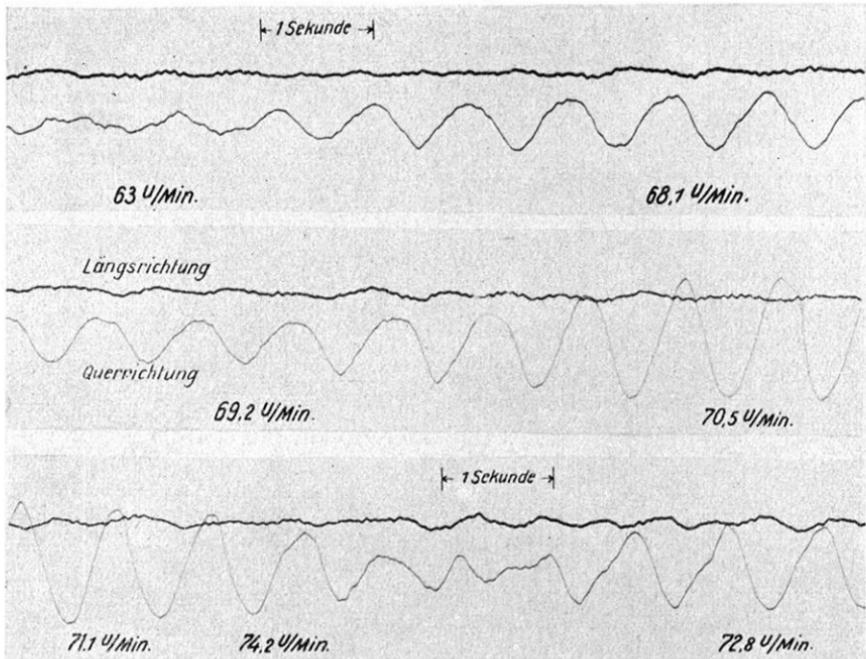


Fig. 7. Waagerechte Gebäudebewegungen beim Anlaufen der Grobkornsetzmaschinen, aufgezeichnet an der Meßstelle 1

Obere Kurve: In der Längsrichtung des Gebäudes. Untere Kurve: In der Querrichtung des Gebäudes

Abchnitt dieser Arbeit beschrieben wird. Aus den beobachteten Werten für die Eigenschwingzahl und die Dämpfung errechnet sich dann nach der Schwingungslehre die ausgezogene Kurve in Fig. 8.

Die durch *volle Kreise* gekennzeichneten Werte in Fig. 8 wurden zum Schluß der Schwingungsuntersuchungen gemessen, nachdem auf unsern Vorschlag die Maschine I zwecks Herabminderung der Erschütterungen so umgebaut worden war, daß sie die gleiche Drehzahl besaß wie die Maschine II. Nunmehr konnten bei gleicher und stufenweise konstanter Drehzahl beider Maschinen die Schwingweiten für verschiedene Drehzahlen recht genau ermittelt werden.

Bemerkenswert ist, daß die an der *Meßstelle 1* im Mittelbau gemessenen Werte — leere und volle Kreise — recht genau auf der ausgezogenen Resonanzkurve liegen, obwohl diese aus den Beobachtungen an der im Rohkohlenturm gelegenen *Meßstelle 2* berechnet worden ist. Der langgestreckte Mittelbau und der 10 m höhere und 7 m breitere*) Rohkohlenturm haben also auch in der Querrichtung *eine* gemeinsame Eigenschwingung von 72 Schw./Min. Daneben besitzt der Rohkohlenturm eine nur ihm eigentümliche Eigenschwingzahl 78 Schw./Min., von der später zu sprechen sein wird.

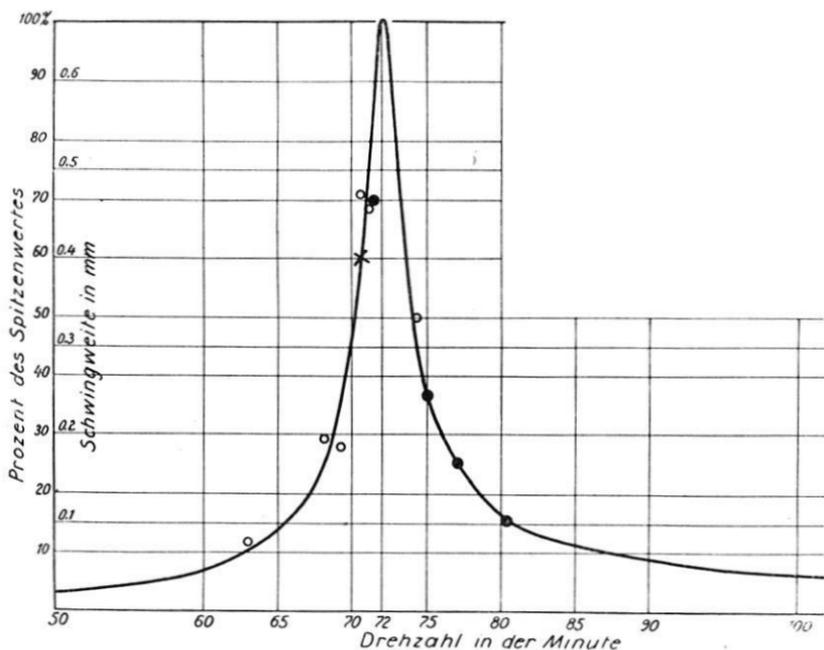


Fig. 8. Resonanzkurve in der Querrichtung des Gebäudes

Die ausgezogene Kurve ist berechnet aus den an der Meßstelle 2 beobachteten Werten der Eigenschwingzahl: 72 Schw./Min. und der Dämpfung: $\kappa = 1.1 : 1$

Die Einzelwerte sind an der Meßstelle 1 gemessen, und zwar ○○ beim Anlaufen der Maschinen, ●● bei stufenweise gleichbleibender Drehzahl der Maschinen

× entspricht 0.70 mm Schwingweite bei vollem Betrieb und voller Beschickung der Maschinen

Herabminderung der Gebäudeerschütterungen. Da die hier dargestellten Schwingungsuntersuchungen in erster Linie dazu dienen sollten, geeignete Maßnahmen zu finden, um die fühlbaren Schwingungen der Wäsche infolge des Maschinenbetriebes auf ein erträgliches Maß herabzumindern, so wurden die Erschütterungen des Gebäudes sowohl bei vollem Betrieb aller Maschinen als auch beim Betrieb jedes einzelnen Maschinensatzes eingehend untersucht.

*) Vgl. die Maßzahlen in Fig. 1.

Es ergab sich, daß von allen Erschütterungsursachen innerhalb und außerhalb der Wäsche — Setzmaschinen, Kohlensiebe, Schlammsiebe, Becherwerke, Kompressoren, Fördermaschinen usw. — die Grobkornsetzmaschinen weitaus am stärksten wirkten. Zum Vergleich sind die größten bei den verschiedenen Erschütterungsursachen beobachteten Schwingweiten nachstehend zusammengestellt.

Erschütterungsursache	Schwingzahl Schw./Min.	Schwingweite mm
Grobkornsetzmaschinen in der Wäsche	71	0,7—0,9
Kompressoren im Kesselhaus in 40 m Entfernung	72	0,10
Feinkohlensiebe in der Wäsche	160	0,09
Anfahren des Förderkorbes im 40 m entfernten Schacht	208	0,07

Eine Aufzeichnung der Gebäudeschwingungen bei vollem Betrieb der beiden Grobkornsetzmaschinen ist in Fig. 9 wiedergegeben. Die Schwingungen erfolgen

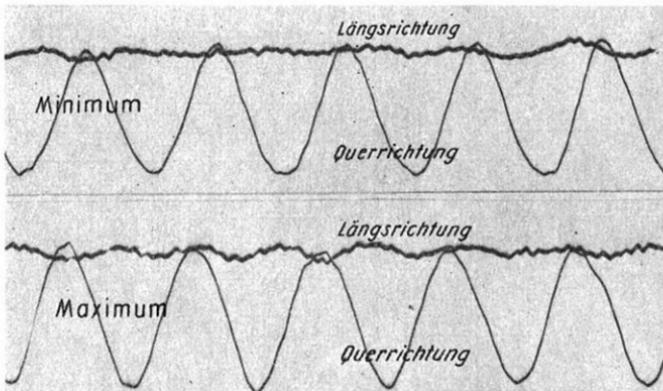


Fig. 9. Gebäudeschwingungen in der Längs- und Querrichtung beim Betrieb der Grobkornsetzmaschinen I und II

Schwingzahl der Gebäudebewegungen: 71 Schw./Min.
 Drehzahl der Grobkornsetzmaschine I: 71 U./Min.
 Drehzahl der Grobkornsetzmaschine II: 81 U./Min.

mit 71 Schw./Min., sind also ganz überwiegend durch die mit 71 U./Min. laufende Grobkornsetzmaschine I verursacht, während die Wirkung der genau gleichgebauten Grobkornsetzmaschine II mit der Drehzahl 81 U./Min. lediglich in geringfügigen Schwebungserscheinungen zum Ausdruck kommt.

Die nahezu sinusförmige Kurve in Fig. 9 ist entstanden aus einer sinusförmigen Schwingung von 71 Schw.-Min. mit der Schwingweite (Amplitude) A_1 , der eine gleichfalls sinusförmige Schwingung von 81 Schw./Min. mit der gegenüber A_1 kleinen Schwingweite A_2 überlagert ist. Da die Schwingweite im Schwebungsmaximum $A_{\max} = A_1 + A_2$ ist, entsprechend die Schwingweite im Schwebungsminimum $A_{\min} = |A_1 - A_2|$, so lassen sich A_1 und A_2 einzeln berechnen. Aus

den Werten für A_{\max} und A_{\min} in Fig. 9 ergibt sich $A_2/A_1 = 0.10$. Die Grobkornsetzmaschine I erschüttert also im vorliegenden Falle das Wäschegebäude etwa zehnmal stärker als die genau gleichgebaute und außerdem schneller arbeitende Maschine II, und zwar deshalb, weil ihre Drehzahl in der Nähe einer scharf ausgeprägten Gebäuderesonanz liegt.

Auf Grund dieses Ergebnisses wurde eine Erhöhung der Drehzahl der Grobkornsetzmaschine I vorgeschlagen. Eine Erniedrigung der Drehzahl hätte sich

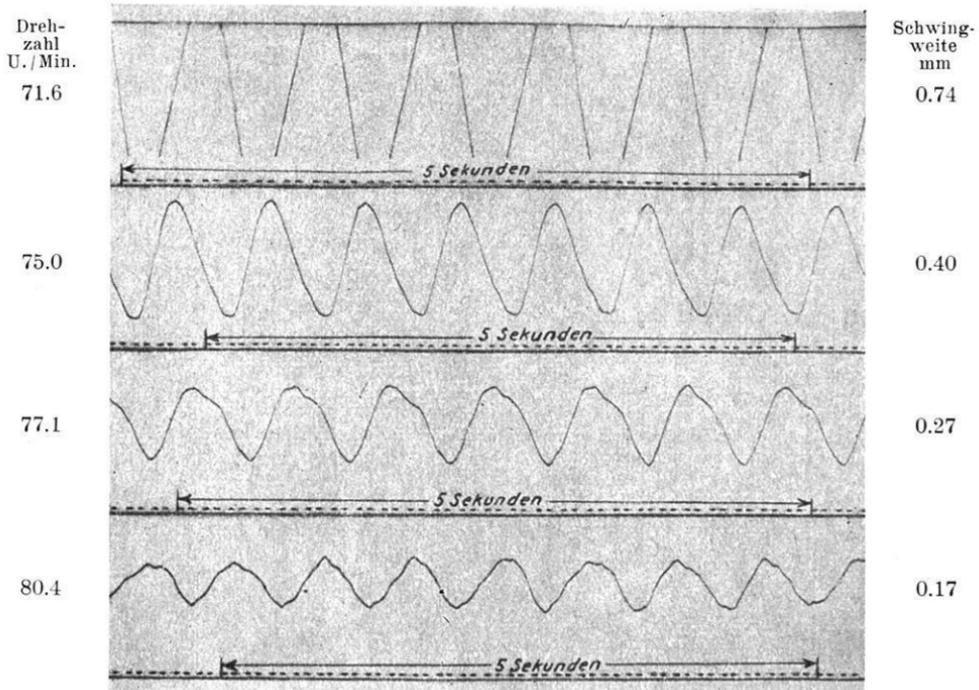


Fig. 10. Gebäudebewegungen in der Querrichtung bei genau gleicher, stufenweise konstanter Drehzahl der beiden Grobkornsetzmaschinen
Gemessen an der Meßstelle 1 nach erfolgter Drehzahländerung der Maschine I

zwar schwingungstechnisch günstiger ausgewirkt, wäre aber mit einer Minderung der Arbeitsleistung verbunden gewesen. Die Drehzahl wurde daraufhin von der Werkleitung durch Umbau der Riemenscheibe am Vorgelege auf 81 U./Min. erhöht, so daß beide Maschinen nunmehr mit genau gleicher Drehzahl liefen. Nach erfolgter Drehzahländerung wurden die Erschütterungen des Gebäudes bei stufenweise konstanter, gleicher Drehzahl beider Grobkornsetzmaschinen erneut gemessen.

Fig. 10 gibt Ausschnitte aus einer Meßreihe wieder, aus denen hervorgeht, daß bei einer Drehzahlerhöhung von 71.6 U./Min. auf 80.4 U./Min. die durch beide

Grobkornsetzmaschinen verursachten Gebäudeschwingungen von 0.74 mm auf 0.17 mm, also auf 23% zurückgingen. Andere Meßreihen zeigen ähnliche, teilweise noch günstigere Ergebnisse. Im Rohkohlenturm gingen allerdings die Schwingungen in einer Reihe von Fällen nur auf etwa 0.45 mm zurück. In Fig. 11 sind die Ergebnisse einer derartigen Meßreihe eingetragen. Das Gebäude schwingt auch in diesem Falle zunächst gemäß der für das ganze Gebäude gültigen ausgezogenen Resonanzkurve. Von 75 U./Min. aufwärts macht sich jedoch die bereits erwähnte, *nur* dem Rohkohlenturm eigentümliche Eigenschwingung von 78 Schw./Min. geltend. Dieses abweichende Verhalten des Rohkohlenturmes wurde in etwa 40% der Fälle beobachtet. Durch häufige Wiederholung der Versuche bei 80 bis 81 U./Min. konnte festgestellt werden, daß der Rohkohlenturm sich entweder auf die niedrigen

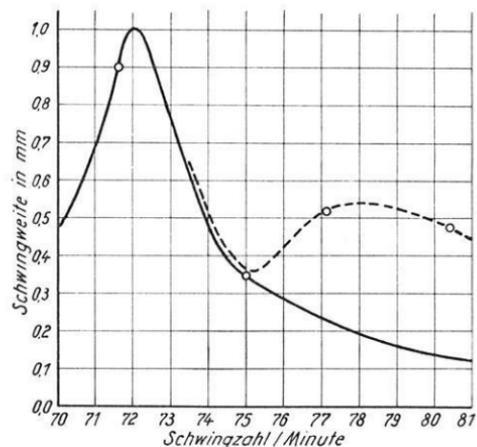


Fig. 11. Resonanzkurve des Rohkohlenturmes in der Querrichtung

- bei normalem, - - - bei abweichendem Schwingungsverhalten
- Schwingweiten bei stufenweise konstanter Drehzahl der beiden Grobkornsetzmaschinen, beobachtet an der Meßstelle 2

Werte der eingipfeligen, ausgezogenen Resonanzkurve oder aber auf die wesentlich höheren Werte der zweigipfeligen, gestrichelten Kurve einschwingt. Zwischenwerte von 0.23 bis 0.45 mm wurden *nicht* beobachtet.

Werte der eingipfeligen, ausgezogenen Resonanzkurve oder aber auf die wesentlich höheren Werte der zweigipfeligen, gestrichelten Kurve einschwingt. Zwischenwerte von 0.23 bis 0.45 mm wurden *nicht* beobachtet.

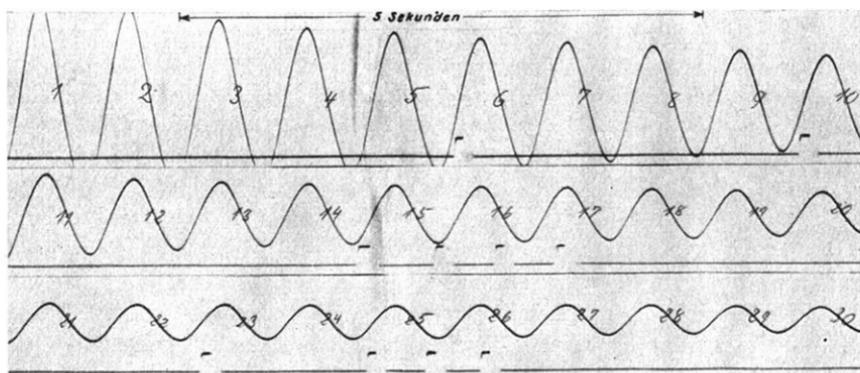


Fig. 12. Ungestört ausklingende freie Eigenschwingungen der Kohlenwäsche in der Querrichtung

Eigenschwingung $U_1 = 72$ Schw./Min., wachsend bis auf 73.5 Schw./Min.
 Dämpfung $k_1 = 1.10:1$, sinkend bis auf 1.04:1

Anregung und Auswertung der freien Eigenschwingungen. Für die Anregung der zur Ermittlung der ausgezogenen Resonanzkurve in Fig. 8 verwendeten aus-

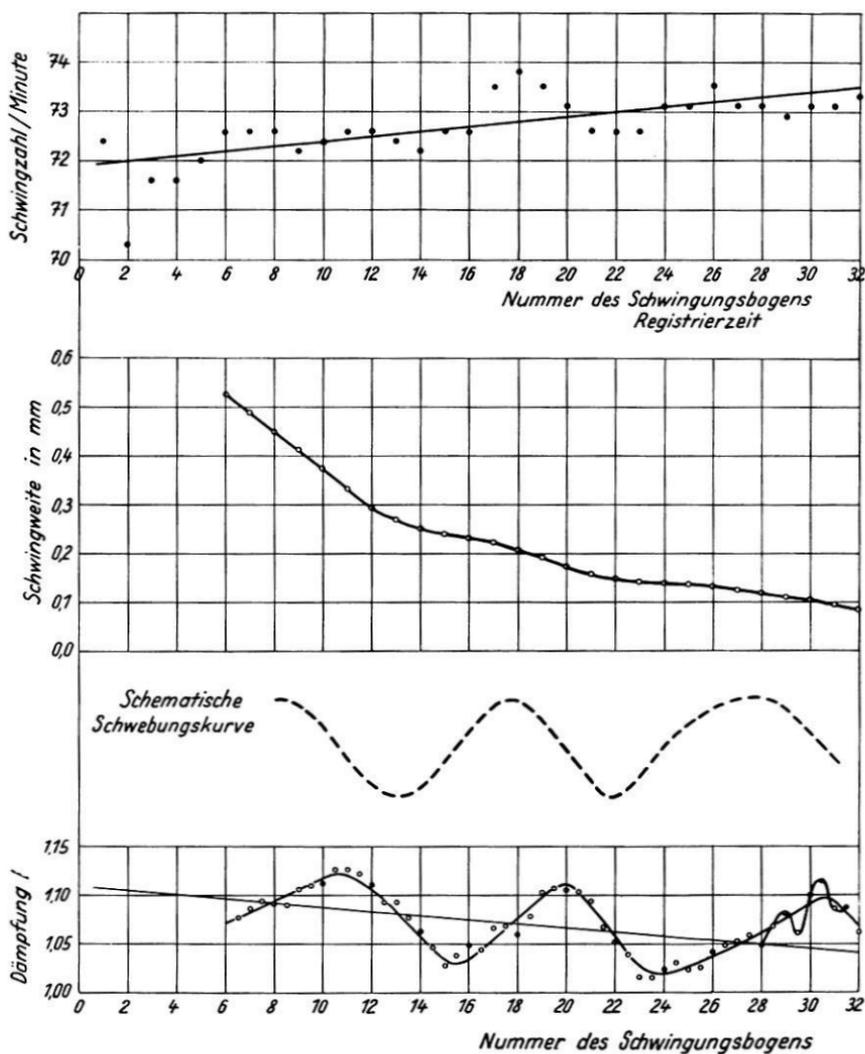


Fig. 13. Auswertung der in Fig. 12 wiedergegebenen ausklingenden freien Eigenschwingungen

klingenden freien Eigenschwingungen wurde folgendes Verfahren benutzt. Die Grobkornsetzmaschinen wurden angenähert auf 72 U./Min. eingeregelt und alsdann, nachdem das Gebäude sich zu großen Resonanzschwingungen aufgeschaukelt hatte, möglichst rasch abgeschaltet. Sie kamen nach wenigen Sekunden zum

Stillstand, so daß die von ihnen angeregten Gebäudeschwingungen, nunmehr sich selbst überlassen, als schwach gedämpfte freie Eigenschwingungen ungestört ausklingen konnten.

Die Uraufzeichnung einer solchen Ausklingkurve ist in Fig. 12 wiedergegeben. Ihre in Fig. 13 niedergelegte Auswertung wird im folgenden ausführlich besprochen, um zu zeigen, daß sich aus dieser *einen* Aufzeichnung bereits eine Fülle von Schwingungseigenschaften des Gebäudes ableiten lassen.

Der Mittelwert der *Eigenschwingzahl* wächst mit der Zeit, d. h. mit abnehmender Schwingweite von 72.0 Schw./Min. bei 0.7 mm auf 73.5 Schw./Min. bei 0.1 mm. Diese Zunahme der Eigenschwingzahl mit abnehmender Schwingweite muß man beachten, wenn man Messungen bei verschiedener Schwingweite aufeinander beziehen will.

Die zum ersten und zweiten Schwingungsbogen gehörenden Schwingzahlwerte sind noch durch die auslaufende Maschine gefälscht, die folgenden schwanken mehr oder weniger regelmäßig um eine allmählich ansteigende Gerade. Die Schwankungen können größtenteils durch die weiter unten behandelten Schwebungserscheinungen erklärt werden.

Die *Schwingweite* der freien Eigenschwingungen von 72 Schw./Min. klingt angenähert nach einem Exponentialgesetz aus. Die Abweichungen von diesem Gesetz erfaßt man am besten, wenn man das *Dämpfungsverhältnis* k , d. h. das Verhältnis aufeinanderfolgender gleichgerichteter*) Schwingungsbogen berechnet. Die in der unteren Kurve eingetragenen Werte von k zeigen, daß die so berechnete Dämpfung regelmäßig schwankt. Diese Schwankungen sind durch Schwebungserscheinungen in der Ausklingkurve bedingt. Die Schwebungen sind allerdings so gering, daß die Schwingungen trotzdem stetig abnehmen, jedoch erfolgt der Abfall je nachdem mehr oder weniger steil.

Der Zusammenhang zwischen den auf die ungedämpfte Schwingung bezogenen Schwebungserscheinungen und den Schwankungen der Dämpfung wird durch die gestrichelt eingetragene schematische Kurve erläutert. Ein Maximum der Dämpfung entspricht dem Zeitpunkt des stärksten Abfalles der Schwingweiten, ein Minimum dem Zeitpunkt des schwächsten, durch den Anstieg der Schwingweiten nach dem Schwebungsmaximum hin gemilderten Abfalles. Die mittlere und damit gleichzeitig die wahre Dämpfung erhält man aus aufeinanderfolgenden Schwingungsbogen im Schwebungsmaximum und -minimum, wo die Schwingweiten lediglich infolge der Dämpfung, unbeeinflusst durch die Schwebung, abnehmen.

Im vorliegenden Falle wird die wahre Dämpfung mit abnehmender Schwingweite beträchtlich geringer. Man entnimmt der Darstellung in Fig. 13, daß einer Schwingweitenabnahme von 0.62 auf 0.12 mm eine Änderung der Dämpfung k von 1.10 auf 1.05, also ein Absinken des Dämpfungsdekrementes lnk auf die Hälfte

*) Diese Definition entspricht der in der Physik heute gebräuchlichen. Der in der Seismik außerdem noch benutzte Wert ε ist gleich \sqrt{k} . Die folgenden Rechnungen sind als Annäherungen anzusehen.

entspricht. Diese Dämpfungsabnahme kann in keiner Weise durch die in der oberen Kurve zum Ausdruck kommende Schwingzahlzunahme von 72.1 auf 73.3 Schw./Min. erklärt werden, wie folgende Überlegung zeigt.

Für einen Schwinger mit geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung gilt nach Angenheister*) in entsprechender Umformung:

$$\frac{\varphi}{4\pi m} \cdot \frac{60}{U} = 0.733 \cdot \frac{1}{2} \cdot \log k,$$

wo φ proportional der Dämpfungskraft, m die Masse, $2m/\varphi$ also die Abklingzeit und U die *minutliche* Schwingzahl der gedämpften Eigenschwingung ist. Für zwei verschiedene Schwingzahlen U' und U'' und die bei konstanter Dämpfungskraft und Schwinger Masse ihnen zugehörigen Dämpfungswerte k' und k'' ergibt sich aus der Formel

$$\frac{\log k'}{\log k''} = \frac{U''}{U'}.$$

Dem beobachteten Wert $\frac{U'}{U''} = \frac{72.1}{73.3} = 0.985$ entspricht demnach eine Abnahme von $k' = 1.100$ auf $k'' = 1.098$. Die gemessene sehr viel stärkere Änderung der wahren mittleren Dämpfung muß daher wohl durch eine tatsächliche Abnahme der Dämpfungskraft mit der Schwingweite erklärt werden.

Auch die beobachteten Schwebungserscheinungen kann man rechnerisch verfolgen. Die Schwingzahlen U_2 und U_3 der überlagerten Schwingungen lassen sich angenähert ermitteln aus der für eine reine Schwebung, d. h. bei gleichen und konstanten Schwingweiten streng gültigen Formel für die Schwebungsdauer T_s :

$$T_s = \frac{60}{|U_1 - U_2|}.$$

Die mittlere Schwebungsdauer bestimmt sich aus der unteren Kurve in Fig. 13 zu 7.6 Sek. für die stärkeren und langsameren Schwebungen und zu 1.38 Sek. — $5\frac{1}{2}$ Schwebungen von dem Maximum beim Schwingungsbogen 10.7 bis zum Maximum beim Schwingungsbogen 19.9 — für die gerade noch erkennbaren schnelleren Schwebungen. Daraus folgt nach der vorstehenden Formel:

$$|U_1 - U_2| = 7.9 \quad |U_1 - U_3| = 43.5$$

oder bei

$$U_1 = 72.7 \text{ Schw./Min.},$$

$$U_2 = 80.6 \text{ Schw./Min.} \quad \text{oder} \quad 64.8 \text{ Schw./Min.},$$

$$U_3 = 116.2 \text{ Schw./Min.} \quad \text{oder} \quad 29.2 \text{ Schw./Min.}$$

In beiden Fällen ist der größere Wert der richtige. Für U_2 folgt das daraus, daß in den Schwebungsminima — siehe gestrichelte Kurve — die Schwingzahl —

*) G. Angenheister: Erdbebenwellen. Handb. d. Phys. 6.

siehe obere Kurve — gleichfalls ein Minimum besitzt. Das ist bekanntlich immer dann der Fall*), wenn die schnellere Schwingung die kleinere Schwingweite hat. Für $U_3 = 116$ statt 29 Schw./Min. spricht die gute Übereinstimmung dieses Wertes mit der Eigenschwingzahl 115 Schw./Min. in der Längsrichtung des Gebäudes.

Außer den eben berechneten *Schwingzahlen* U_2 und U_3 der überlagerten Schwingungen kann man auch ihre *Schwingweiten* A_2 und A_3 ermitteln. Der Gang der Rechnung ist im folgenden für A_2 , die größere von beiden, näher ausgeführt. Zur Vereinfachung wird dabei angenommen, daß die Abnahme von A_2 infolge der Dämpfung in der jeweils der Rechnung zugrunde gelegten kleinen Zeitspanne zwischen Schwebungsmaximum und -minimum vernachlässigt, A_2 also für die Rechnung als konstant angesehen werden kann.

Da die Schwingweite der resultierenden Schwingung im Schwebungsminimum gleich $A_1 - A_2 = A_{\min}$, im Schwebungsmaximum gleich $A_1 + A_2 = A_{\max}$ ist, so ergibt sich für die Dämpfung k_1 von A_1 , die in Fig. 13 unten als gerade Linie eingetragen ist, die folgende Beziehung:

$$\frac{A_{1 \max}}{A_{1 \min}} = \frac{A_{\max} - A_{2 \max}}{A_{\min} + A_{2 \min}} = \bar{k}_1^p,$$

wobei $\bar{k}_1 = \frac{k_{1 \max} + k_{1 \min}}{2}$, d. h. gleich dem Mittelwert der Dämpfung im untersuchten Abschnitt gesetzt ist und p die Anzahl der Schwingungsbogen zwischen den gemessenen Werten A_{\max} und A_{\min} bedeutet. Da im untersuchten Abschnitt

$$A_{2 \max} \cong A_{2 \min} \cong A_2$$

ist, so kann man vereinfachend schreiben:

$$\frac{A_{\max} - A_2}{A_{\min} + A_2} = \bar{k}_1^p$$

oder

$$A_2 = \frac{A_{\max} - A_{\min} \cdot \bar{k}_1^p}{1 + \bar{k}_1^p}.$$

Diese Formel gilt, wenn A_{\max} zeitlich früher liegt als A_{\min} . Für den umgekehrten Fall erhält man in entsprechender Weise

$$\frac{A_{\min} + A_2}{A_{\max} - A_2} = \bar{k}_1^p$$

oder

$$A_2 = \frac{A_{\max} \cdot \bar{k}_1^p - A_{\min}}{1 + \bar{k}_1^p}.$$

*) Vgl. H. Martin: Schwingungslehre. Handb. d. Experimentalphysik 17, 1, S. 33.

Alle Werte in diesen Formeln außer A_2 lassen sich der Fig. 13 bzw. der Aufzeichnung in Fig. 12 entnehmen, so daß A_2 berechnet werden kann. Die nachstehende Zahlentafel gibt zusammengehörige Werte für verschiedene Abschnitte der Ausklingkurve wieder. Außer der *Anzahl* p der Schwingungsbogen ist auch die *Nummer* des Schwingungsbogens im Schwebungsminimum als N_{\min} und im Schwebungsmaximum als N_{\max} angegeben, so daß die der Berechnung zugrundegelegten Werte in Abb. 13 aufgesucht und nachgeprüft werden können.

Gemessene Schwingweite	Nummer des Schwingungsbogens	Gemessene Schwingweite	Nummer des Schwingungsbogens	Anzahl der Schwingungsbogen p
im Schwebungsmaximum		im Schwebungsminimum		
A_{\max} mm	N_{\max}	A_{\min} mm	N_{\min}	
0.455	7.8	0.265	13.2	5.4
0.215	17.6	0.265	13.2	4.4
0.215	17.6	0.149	21.8	4.2
0.122	27.6	0.149	21.8	5.8

Mittlere Dämpfung \bar{k}_1 von A_1 im untersuchten Abschnitt	Schwingweite A_2 der überlagerten Schwingung	
	mm	% von A_1
1.085	0.017	4.7
1.075	0.013	5.4
1.066	0.009	4.8
1.059	0.009	6.5
	Mittel: 5.4	

Die in der vorletzten und letzten Spalte der Zahlentafel aufgeführten, für A_2 berechneten Werte betragen rund $\frac{1}{20}$ der Schwingweite von A_1 im untersuchten Bereich und nehmen allmählich mit der Zeit ab. Ihre Dämpfung läßt sich berechnen. Durch Benutzung des ersten und dritten Wertes von A_2 erhält man

$$\frac{0.017}{0.009} = k^{9.2}; \quad k = 1.072$$

aus dem ersten und vierten Wert von A_2

$$\frac{0.017}{0.009} = k^{14.2}; \quad k = 1.046.$$

Die Schwingweite der U_3 -Schwingung kann man genau so berechnen, wie das eben für die A_2 -Schwingung gezeigt worden ist. Legt man der Rechnung den 30. bis 31. Schwingungsbogen, wo die überlagerten schnellen Schwingungen am deutlichsten zu erkennen sind, zugrunde, so ergibt sich $A_3 = 0.001$ mm, das ist 1% von A_1 . Die Schwingweite 0.001 mm entspricht 0.1 mm in der Uraufzeichnung. Große Genauigkeit darf man diesem Wert also nicht beimessen. Er kann ebenso gut auch halb so groß sein.

Zum Schluß sollen die beobachteten *Schwankungen der Schwingzahl* noch kurz erörtert werden. Nach der Schwingungslehre ist die Schwingzahl der durch Überlagerung entstandenen resultierenden Schwingung nicht konstant. Sie ändert sich im Takt der Schwebungen um den Betrag*)

$$\frac{|U_1 - U_2|}{60} \cdot \frac{2A_1 \cdot A_2}{A_1^2 - A_2^2}$$

Auf Grund dieser Formel kann man abschätzen, welche Schwingzahlschwankungen für die obere Kurve der Fig. 19 zu erwarten sind. Aus $|U_1 - U_2| = 7.9$ und $A_2/A_1 = 0.054$ ergibt sich die Schwankung zu 1.42%, entsprechend einer größten Änderung von 72.5 auf 73.5 Schw./Min. Eine derartige Änderung im Takt der langsamen Schwebungen ist mit den beobachteten Werten gut vereinbar. Für die schnellere Schwebung errechnet sich aus $U_1 - U_3 = 43.5$ und $A_3/A_1 = 0.01$ die Schwankung zu 1.45%. Schnelle Schwankungen der Schwingzahl von diesem Ausmaß wurden nicht gemessen, der errechnete Wert $A_3/A_1 = 0.001$ mm = 1% ist also noch zu groß.

Die vorstehenden Darlegungen zeigen, daß man durch genaue Beobachtung der ausklingenden freien Eigenschwingungen eines Gebäudes bereits eine Vielzahl der Schwingungseigenschaften desselben ermitteln kann. Im vorliegenden Fall ergab sich:

Eigenschwingzahl des ganzen Gebäudes in der Querrichtung:

$$U_1 = 72 \text{ Schw./Min.};$$

ferner: $U_1 = f_1(A_1), k_1 = F_1(A_1) = 1.10 + \frac{dk_1}{dA_1}$.

Eigenschwingzahl des Rohkohlenturmes in der Querrichtung:

$$U_2 = 80.6 \text{ Schw./Min.};$$

ferner: $k_2 = 1.06$

und, nur für dieses Beispiel gültig:

$$A_2/A_1 = 0.054.$$

Eigenschwingzahl des ganzen Gebäudes in der Längsrichtung:

$$U_3 = 116 \text{ Schw./Min.};$$

ferner, nur für dieses Beispiel gültig:

$$A_3/A_1 \sim 0.01.$$

Rechnet man die nur dem Rohkohlenturm eigentümliche Schwingzahl $U_2 = 80.6$ Schw./Min., beobachtet bei $A_2 = 0.015$ mm, auf die großen störenden Schwingungen der Grobkornsetzmaschinen um, so ergibt sich, wenn man die

*) Vgl. H. Martin, l. c.

prozentische Änderung von U_2 mit der Schwingweite der bei U_1 beobachteten gleichsetzt, eine Abnahme von U_2 um 2.4% bei Anwachsen der Schwingweiten auf 0.4 mm. Der so errechnete Wert 78.2 U./Min. ist bereits auf S. 158 zur Erklärung des zusätzlichen, nur im Rohkohlenturm beobachteten Resonanzmaximums bei 78 U./Min. herangezogen worden.

Zum Schluß sei noch auf eine andere, an der gleichen Meßstelle aufgezeichnete Ausklingkurve hingewiesen, die in Fig. 14 wiedergegeben ist. Die Auswertung

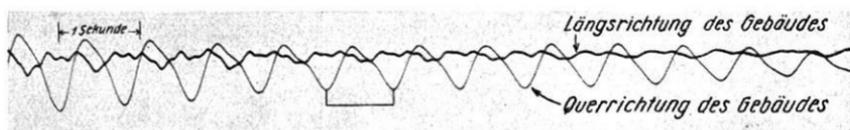


Fig. 14. Ausklingende freie Eigenschwingungen von 72 Schw./Min., überlagert mit der Oberschwingung 144 Schw./Min.

Der mit — bezeichnete Ausschnitt wurde harmonisch zergliedert

zeigt, daß auch in diesem Falle eine zweite Eigenschwingung von 81 U./Min. überlagert ist, außerdem aber die Oberschwingung 144 Schw./Min. Die harmonische Zergliederung der in Fig. 14 hervorgehobenen vollen Schwingung ergab folgende Werte:

Nr. der Teilschwingung . . .	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Schwingweite in mm. . .	10.2	2.0	0.3	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1
Phasenwinkel in Grad . . .	273	203	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Die Schwingweite der Oberschwingung ist also genau $\frac{1}{5}$ der Grundschwingung. Die als Schwingweite der 3., 4. usw. Teilschwingung erscheinenden Werte dürften von der bei der harmonischen Zergliederung nicht erfaßbaren unharmonischen Schwingung 81 Schw./Min. herrühren. Dagegen kann der Einfluß der Dämpfung auf das Ergebnis vernachlässigt werden, da die der harmonischen Zergliederung unterworfenen Schwingung einer *solchen* Stelle in der Aufzeichnung entnommen wurde, an der das Abklingen infolge Dämpfung durch das Anschwellen infolge der Schwebung gerade ausgeglichen wird.

Zusammenfassung. Die Schwingungskennziffern einer 40 m hohen, 72 m langen Kohlenwäsche wurden durch Anlaufversuche mit betriebseigenen Maschinen gemessen. Das weitverzweigte Bauwerk schwingt sowohl in der Längsrichtung wie in der Querrichtung vorwiegend mit Eigenschwingzahlen, die dem Gebäude als Ganzes eigentümlich sind.

Aus den gemessenen Resonanzkurven wurden geeignete Maßnahmen zur Bekämpfung der Gebäudeerschütterungen infolge des Maschinenbetriebes abgeleitet, erfolgreich durchgeführt und in ihrer Wirkung nachgeprüft. Eine Drehzahlerhöhung um 11% bei der am meisten störenden Grobkornsetzmaschine bewirkte eine Herabminderung der Gebäudeschwingungen um 77%.

Die Auswertung der freien Eigenschwingungen, die durch plötzliches Abschalten der Maschinen angeregt wurden, läßt die Schwingungseigenschaften des Gebäudes besonders deutlich hervortreten.

Dem Leiter der Abteilung „Geophysikalische Warten“ der Westfälischen Berggewerkschaftskasse, der die Forschungsstelle für Boden- und Gebäudeschwingungen angegliedert ist, Herrn Markscheider Lühr, danke ich herzlich für Hilfe und Rat bei der Planung, Ausführung und Bearbeitung der vorliegenden Untersuchungen. Herr Professor Angenheister hatte mich in entgegenkommender Weise für diese und andere Forschungsarbeiten beurlaubt. Dafür und für wertvolle Hinweise bei der Abfassung des Textes möchte ich ihm auch an dieser Stelle meinen herzlichsten Dank aussprechen.

Bochum, im April 1936.

Die Temperatur am Boden des grönländischen Inlandeises

Von Kurt Wegener, Graz — (Mit 1 Abbildung)

Die Temperatur am Boden von Inlandeis ist durch die Temperatur der Eisoberfläche die Eisdicke und den Wärmestrom nach unten, durch die Schmelztemperatur nach oben begrenzt. Am Boden des Inlandeises herrscht Schmelztemperatur

Die Grundlage der hier vorgelegten Arbeit, die April 1933 abgeschlossen war, aber aus äußeren Gründen liegen blieb, bilden die glaziologischen Beobachtungen der „Deutschen Grönland-Expedition Alfred Wegener“, die jetzt, abgesehen von einzelnen noch ausstehenden Beobachtungen, publiziert vorliegen, insbesondere im Band I (Schneepegel-Beobachtungen und Schneefegen), Band II (Eisdickenmessungen) und Band III (Glaziologie) der „Ergebnisse“. Weil die Arbeit rein theoretischen Charakter hat, wird sie im Einverständnis mit der Deutschen Forschungsgemeinschaft außerhalb der „Ergebnisse“ veröffentlicht. Inzwischen ist die ausgezeichnete Arbeit von Lagally: „Mechanik und Thermodynamik des stationären Gletschers“, Leipzig, Akad. Verlagsgesellschaft, 1934, erschienen, die einige ähnliche Überlegungen allgemeinsten Art bringt.

Die hauptsächlichsten Daten über das grönländische Inlandeis, die hier verwendet werden, sind folgende:

Randabstand:	Weststation	40	60	80	120	400 km
Höhe etwa:	950	1600	1800	2000	2200	3000 m
Eisdicke:	600	1200	1000—1500	1600	1800	— m
	neben der Station					
Temperatur an der Eis-						
oberfläche etwa:	— 11	— 17	— 19	— 21	— 23	— 31° C