

**Zeitschrift:** IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH  
Kongressbericht

**Band:** 8 (1968)

**Artikel:** Dynamische Belastungen (insbesondere durch Wind und Erdbeben)

**Autor:** Borges, J. Ferry

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-8730>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 10.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# VI

## Dynamische Belastungen

### **Dynamische Belastungen (insbesondere durch Wind und Erdbeben)**

J. FERRY BORGES

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisbon

#### **1. Einleitung**

Der Fortschritt auf dem Gebiet der Baustatik verlangt die Erweiterung der Kenntnisse über die wirkenden Kräfte und das Verhalten der Bauten unter diesen Belastungen. Allgemein kann gesagt werden, daß das tatsächliche Wissen über dynamische Belastungen nicht groß ist. Damit wird das Interesse verständlich, das an der Beschaffung von Unterlagen besteht, die eine bessere Definition dieser Kräfte erlauben, aber auch an der Entwicklung einer geeigneten Methode zu deren Untersuchung.

Bei der Differenzierung zwischen statischen und dynamischen Belastungen tritt eine erste Schwierigkeit auf: Diese Unterscheidung kann nicht auf der Grundlage der Lasten selbst getroffen werden, sondern muß auch die Natur des Bauwerkes berücksichtigen, auf welches die Lasten wirken. Tatsächlich muß eine Belastung bereits als dynamisch gelten, wenn ihre Zeitabhängigkeit so ist, daß zur Untersuchung des Verhaltens der Bauten der Einfluß der Massenträgheit des Bauwerkes nicht vernachlässigt werden darf.

Eine zweite Schwierigkeit, die im Zusammenhang mit der Definition dynamischer Belastungen auftritt, stammt von der Wechselwirkung zwischen dem baulichen Verhalten und den Belastungen selbst her. Betrachtet man die dynamischen Belastungen als ein System von zeitabhängigen Kräften, so werden diese Kräfte häufig unmittelbar von dem Verhalten des Bauwerkes beeinflußt. Dies tritt zum Beispiel bei Windeinwirkungen auf, die auf aeroelastische Effekte zurückzuführen sind und bei Problemen im Zusammenhang mit Erdbeben auf Grund der Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Baugrund. Im vorliegenden

Bericht wird versucht, die Belastungen auf grundsätzliche Weise zu definieren, damit diese Wechselwirkungen untersucht werden können, indem das Gesamtverhalten des Systems betrachtet wird.

Um den Rahmen des Berichtes abzugrenzen, konzentriert sich die anschließende Betrachtung auf die Belastungen, die auf Ingenieurbauten wie Brücken, Häuser und Masten wirken.

Die behandelten Belastungen sind zurückzuführen auf: Wind, Erdbeben, Verkehr, Maschinen und Explosionen. Die beiden ersten Belastungsarten, denen im allgemeinen die größere Bedeutung zukommt, werden eingehender besprochen.

Für jede Belastungsart sind zwei Hauptprobleme zu berücksichtigen: 1. Die Messung der wirkenden Kräfte; 2. Ihre analytische und experimentelle Darstellung. Die Besprechung der geeigneten Methoden zur Behandlung dieser Probleme ist von großer Wichtigkeit, wobei zu hoffen ist, daß sich die Diskussion auch mit der Methodik befassen und sich nicht auf die Darlegung von Ergebnissen beschränken werde.

Zwei grundsätzliche Methoden stehen für die Darstellung zur Auswahl: die deterministische und die stochastische. Die deterministische verlangt die genaue Kenntnis der Zeitabhängigkeit der Belastungen. Die stochastische Methode verlangt nur die Kenntnis der statistischen Verteilung dieser zeitlichen Belastungsänderungen.

Erschütterungen durch Maschinen und Druckwellen sind Beispiele für Belastungen, auf welche die deterministische Methode Anwendung findet. Wind- und Erdbebenbelastungen können gemeinhin nur durch stochastische Schemata bequem dargestellt werden.

Die Erweiterung der Kenntnisse über die Belastungen verlangt systematische Messungen in der Natur. Der dynamische Charakter der Belastungen bereitet bei diesen Messungen besondere Schwierigkeiten. Die Schwierigkeiten sind grundsätzlich von zweierlei Art. Die erste stammt daher, daß es häufig unmöglich oder unpraktisch ist, die wirkenden Kräfte unmittelbar zu messen, weshalb Größen gemessen werden, aus denen die Kräfte abgeleitet werden können. Das ist zum Beispiel der Fall beim Wind, bei dem die Geschwindigkeit und nicht der Druck gemessen wird. Dadurch muß ein neues Problem gelöst werden: die Umformung der Geschwindigkeiten in Drücke. Die zweite Schwierigkeit besteht in der Anzeigegenauigkeit des Meßgerätes als Funktion der auftretenden Frequenz. Tatsächlich verhalten sich die Meßinstrumente meistens wie Tiefpaßfilter und besitzen häufig eine ausgeprägte Frequenzabhängigkeit; in einigen Fällen sind sie nichtlinear, das heißt, die Anzeige ist eine Funktion der mittleren Belastungsstärke. Zur genauen Interpretation der Ergebnisse müssen die Meßgeräte als Übertrager angesehen werden und ihre Meßcharakteristik genauestens untersucht werden. Schwierigkeiten dieser Art tauchen zum Beispiel beim Gebrauch von Anemometern auf. Die vorhandenen Ergebnisse können nur unter Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften des Gerätes gedeutet werden.

Wenn die Natur der Belastungen hinreichend bekannt ist, müssen die Methoden der Darstellung dieser Belastungen zwecks analytischer und experimenteller Untersuchung erörtert werden. Die Darstellung muß so fundamental wie nur irgend möglich sein, um sie allgemein anwendbar zu gestalten. Ebenso muß die analytische Darstellung der Belastungen mit den allgemeinen Theorien übereinstimmen, die bei der Untersuchung des Verhaltens der Bauten benutzt werden sollen. Besonders im stochastischen Schema müssen die Grundbegriffe der Theorie der Störschwingungen [1, 2] berücksichtigt werden.

Der Bequemlichkeit halber sollten auch die analytischen Darstellungen so einfach wie möglich sein. Der Einfluß der benutzten Vereinfachungen muß bestimmt werden und der Bereich, in dem sie Gültigkeit haben, muß definiert werden.

Im Fall von Dauerbelastungen ist die Definition der Belastungsdauer unwichtig. Bei den wechselnden, nichtpermanenten Belastungen ist es angebracht, sie aufzuteilen in Intervalle von vorgegebener Dauer. Belastungen durch Wind und Erdbeben sollen durch eine Serie von Zeitintervallen dargestellt werden, von denen jedes eine bestimmte Dauer hat. Eine weitere übliche Vereinfachung besteht darin, daß sich die statistische Verteilung, von welcher die Intervallserie abgeleitet wird, zeitlich innerhalb der angenommenen Spanne nicht ändert; es wird also angenommen, daß die Erscheinungen stationär sind.

Die experimentelle Darstellung der dynamischen Belastungen muß auch einigen allgemeinen Bedingungen genügen. Lastanordnungen, welche die tatsächlichen Belastungen darstellen sollen, werden auf Modelle angewendet, und das Verhalten dieser Modelle wird unter Benutzung der Ähnlichkeitstheorie interpretiert. Die Grenzen, in denen Ähnlichkeit angenommen werden kann, stellen weitere Bedingungen an die Darstellung der Belastungen. Bei der Auslegung der Ergebnisse müssen die Beschränkungen berücksichtigt werden, denen das Experiment unterworfen war.

Zum Beispiel vernachlässigen Versuche im Windtunnel normalerweise Windgradienten und berücksichtigen das Ähnlichkeitsverhalten der Turbulenz nicht. Dynamische Versuche zum Studium von Erdbebenproblemen wenden häufig Erschütterungen an, die nicht im entferntesten Erdbebenerschütterungen simulieren.

Ein Vergleich zwischen den analytischen und experimentellen Ergebnissen wird erleichtert durch den Umstand, daß die analytische und experimentelle Darstellung der Belastungen übereinstimmen. Schließlich muß noch das Problem der Belastungsannahmen behandelt werden. Diese Annahmen beziehungsweise Voraussagen der Belastungen müssen im allgemeinen auf statistischer Grundlage erfolgen. Dann dürfen auch statistische Sicherheitsbegriffe Anwendung finden.

Es muß beachtet werden, daß diese statistische Voraussage der Belastungen nichts mit der deterministischen oder stochastischen Methode gemein hat, die zur Darstellung der zeitlichen Veränderungen der Belastungen benutzt wird.

Auf mehreren Tagungen wurden kürzlich die allgemeinen Probleme, die dynamische Belastungen von Bauwerken betreffen, erörtert, unter anderem auf dem RILEM-Symposium über die Messung von dynamischen Wirkungen und Vibrationen von Bauwerken, das 1963 in Budapest abgehalten wurde, und auf dem Symposium über Vibrationen im Ingenieurwesen in London 1965 [3] sowie auf dem RILEM-Symposium über die Auswirkungen einer wiederholten Belastung von Werkstoffen und Bauwerken, das 1966 in Mexiko stattfand. Die speziellen Probleme im Zusammenhang mit Wind- und Erdbebenbelastungen wurden auf besonderen Tagungen behandelt, die unten aufgeführt werden. In seinem Vortrag am Symposium in Mexiko [4] gibt DAVENPORT eine interessante allgemeine Übersicht und einen Vergleich zwischen Wind- und Erdbebenbelastungen.

## 2. Windbelastungen

### 2.1. *Die Natur des Windes*

Ein gutes Verständnis der Windphänomene setzt eine allgemeine Kenntnis der Windursachen voraus. Es ist wohl bekannt, daß die Windgeschwindigkeit mit der Höhe über dem Erdboden zunimmt und für Höhen von 300 bis 600 m einen Grenzwert erreicht (die Gradientengeschwindigkeit), der hauptsächlich durch die Druckgefälle, die durch thermische Einflüsse verursacht werden, und geostrophische Beschleunigungen bestimmt wird. Diese Gradientengeschwindigkeit kann analytisch mit den genannten Ursachen in Verbindung gebracht werden.

Die Windgeschwindigkeit variiert stark mit der Zeit und von einem Ort zum anderen. Da diese Veränderungen nicht nach einem geordnetem Schema erfolgen, ist die Strömung turbulent.

Zum Studium der Windbelastungen ist es günstig, Zeitintervalle einer gegebenen Dauer (zum Beispiel 10 min oder 1 h) zu betrachten, und für diese Zeitintervalle die entsprechende mittlere Geschwindigkeit zu berechnen. Die sich rasch ändernde Geschwindigkeitskomponente entspricht dann der Turbulenz.

Neuere Untersuchungen zur Natur des Windes, welche die Turbulenz berücksichtigen, sind hauptsächlich im Zusammenhang mit der Luftverschmutzung [5] und der Aeronautik erfolgt [6]. Von diesen Untersuchungen her ist jetzt viel Zahlenmaterial vorhanden, aber nur ein kleiner Teil davon kann beim Studium der Windeinwirkung auf Bauwerke verwendet werden. Trotzdem muß anerkannt werden, daß die in diesen Versuchen benutzte Methodik praktisch ist. Neuzeitliche Untersuchungen über den Windeinfluß auf Bauwerke wenden die gleichen Methoden an.

## 2.2. *Windmessung*

Die Messung der Windgeschwindigkeit ist aus zwei verschiedenen Gründen problematisch. Der erste betrifft die Messung der Niederfrequenzkomponente, die der mittleren Windgeschwindigkeit entspricht. Der zweite betrifft die Hochfrequenzkomponente, welche der Turbulenz entspricht.

In fast allen Ländern der Erde sind die meteorologischen Anstalten verantwortlich für die Messung der Windgeschwindigkeit, und es gibt umfangreiche Unterlagen darüber. Dagegen wurden Messungen der Turbulenz nur im Rahmen besonderer Untersuchungen angestellt.

Die meteorologischen Anstalten geben auch die maximalen Windgeschwindigkeiten an, aber diese sind schwierig zu interpretieren und sind im Augenblick noch zu unzuverlässig für die Anwendung.

Die verschiedenen Anemometertypen zur Messung der Windgeschwindigkeit können in verschiedene Klassen eingeteilt werden nach ihrem Frequenzbereich.

Zu den Niederfrequenztypen gehören: das Pitot-Staurohr, Propeller- und Flügelanemometer. Diese Instrumente haben im allgemeinen eine oberste Arbeitsfrequenz von 0,1 Hz.

Im mittleren Frequenzbereich stehen Membrananemometer oder Anemometer mit vibrierenden Massen zur Verfügung, die bis zu 20 Hz registrieren.

Im Bereich der hohen Frequenzen können die Heizdraht- und Entladungsanemometer verwendet werden, die auf Frequenzen bis zu 1000 Hz ansprechen.

Bild 1 zeigt ein typisches Diagramm, das mit einem Pitot-Rohr aufgenommen wurde.

Zur Interpretation der durch diese verschiedenen Anemometer aufgenommenen Diagramme muß man die Geräte nicht nur statisch im Windtunnel eichen, sondern auch ihre Übertragungsfunktion bestimmen. Weil das Meßverhalten häufig nicht genau linear ist, müssen die Übertragungsfunktionen zusätzlich für verschiedene Werte der statischen Komponente bestimmt werden.

Messungen in turbulenten Strömungen, vor allem die Messung der Turbulenz selbst, sind mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Diese Schwierigkeiten werden verringert, wenn allein die mittlere Windgeschwindigkeit berücksichtigt wird. Auf Grund obiger Überlegungen stellen nur die Werte der mittleren Windgeschwindigkeit wertvolles Zahlenmaterial dar, aus dem die maximalen Windgeschwindigkeiten abgeleitet werden können. Die Korrelation zwischen mittlerer und höchster Windgeschwindigkeit muß auf einer Kenntnis der Windstruktur aufbauen. Die Erweiterung der Meßmöglichkeiten im Hochfrequenzbereich ist besonders wünschenswert. Die dann erhaltenen Unterlagen erlauben nicht allein ein besseres Verständnis der Turbulenz, sondern auch eine unmittelbare Bestimmung der Höchstgeschwindigkeit.

### 2.3. Darstellung des Windes

#### 2.3.1. Die mittlere Windgeschwindigkeit

Zum Studium der Windbelastung eines Bauwerkes ist es lediglich interessant, einen begrenzten Raum in der Umgebung des Bauwerkes zu betrachten. Ebenso braucht, wie gesagt, nur ein bestimmtes Zeitintervall betrachtet zu werden, zum Beispiel 10 min oder 1 h.

Im allgemeinen ist die Annahme zulässig, daß in dem vorgegebenen Bereich die mittlere Windgeschwindigkeit durch eine waagrechte Komponente dargestellt werden kann, die nur in Funktion der Höhe variiert. Zur Definition der mittleren Windgeschwindigkeit in einem Bereich ist es dann nur noch erforderlich, die Veränderung der mittleren Windgeschwindigkeit mit der Höhe zu definieren.

Für den Höhenbereich und für Winde hoher Geschwindigkeit, die für die Baukonstruktion interessant sind, kann die mittlere Geschwindigkeit auf der Höhe  $z$ :  $\bar{U}_z$  als Gesetz vom Typ

$$\bar{U}_z = \left( \frac{z}{z_g} \right)^{1/\alpha} \bar{U}_g$$

angenommen werden, wo  $\bar{U}_g$  die Gradientengeschwindigkeit darstellt, die auf der Höhe  $z_g$  erreicht ist. Die Größen  $z_g$  und  $1/\alpha$  hängen von den Bodenunebenheiten ab. Da Windgeschwindigkeiten im allgemeinen etwa 10 m über dem Erdboden gemessen werden, ist es nur sinnvoll, diese Höhe  $\bar{U}_{10}$  als Bezugshöhe zu wählen, und nicht die Gradientengeschwindigkeit.

Bild 2 zeigt die mittleren Windgeschwindigkeitsprofile nach DAVENPORT [8] für drei typische Rauhigkeitszustände des Erdbodens. Jedem Ort entspricht eine statistische Verteilung von  $\bar{U}_{10}$ , welche die Wahrscheinlichkeit der Überschreitung dieser Geschwindigkeit in einem gegebenen Zeitintervall angibt.

#### 2.3.2. Windturbulenz

Wegen des Vorhandenseins der Turbulenz ist es erforderlich, der mittleren Geschwindigkeit eine wechselnde Geschwindigkeit, definiert durch die Komponenten  $u$ ,  $v$ ,  $w$  (für die Längs-, Quer- und Vertikalrichtung) zu überlagern.

Diese Komponenten sollten eine Zufallsverteilung bezüglich Raum und Zeit haben. Die statistische Definition dieser Variationen kann nur unter der Annahme vereinfachender Hypothesen vorgenommen werden.

Eine erste vernünftige Hypothese besteht darin, daß die Turbulenz als stationär während des betrachteten Zeitintervalls angenommen wird. Die Veränderung der Geschwindigkeit in einem Punkt kann dann statistisch durch die Variation der Spektraldichten der Geschwindigkeiten als Funktion der Frequenz beschrieben werden, oder durch die Fourier-Transformation dieser Spektraldichten, die Autokorrelationen. Homogenität in den verschiedenen Höhenschichten vorausgesetzt, variieren die Spektraldichten der Geschwindigkeit dann

als Funktion der mittleren Windgeschwindigkeit und der Höhe über dem Erdboden.

Zeitabhängige Spektraldichten genügen nicht, um die Turbulenz vollständig zu definieren. Es ist zusätzlich erforderlich, die statistischen Veränderungen im Raum zu berücksichtigen, welche durch die räumlichen Spektraldichten oder Raumkorrelationen beschrieben werden.

Für aeronautische Probleme ist die Turbulenz der Vertikalkomponente besonders wichtig [6]. Bei Bauwerken ist diese im allgemeinen nicht so bedeutend. Hier ist die Längskomponente von besonderem Interesse.

Bild 3 zeigt die Spektraldichte der Längskomponente des Windes, wie sie von DAVENPORT [8] vorgeschlagen wurde. Es gibt die Mittelwerte der Messungen wieder, die in Höhen von 8 bis 150 m vorgenommen wurden. Da die Werte gemittelt wurden, ist dies gleichbedeutend mit der Annahme, daß die Turbulenz in dem betrachteten Bereich bei einer Höhenzunahme unverändert bleibt.

Um die Spektraldichten unter wechselnden Bedingungen durch einen Kurvenzug darstellen zu können, normiert Davenport die Spektraldichten  $S_f$  durch Division mit einem Faktor  $K$ , ein Koeffizient der Oberflächenreibung, der von der Bodenrauhigkeit abhängt, und mit  $\bar{U}_{10}^2$ , der 2. Potenz der mittleren Geschwindigkeit auf der Bezugshöhe. Die Abszissen im logarithmischen Maßstab geben nicht unmittelbar die Frequenzen wieder, sondern Wellenzahlen oder Wellenlängen. Die Wellenzahlen, ausgedrückt in Schwingungen pro Meter, können auf die Frequenz zurückgeführt werden durch Multiplikation mit der mittleren Geschwindigkeit. Die Wellenlänge wird durch Division der mittleren Geschwindigkeit durch die Frequenz erhalten.

Die Taylor-Hypothese besteht in der Annahme, daß die Transformation  $x = \bar{U}t$  gilt, das heißt, sie stellt die Gleichwertigkeit von Veränderungen von Raum ( $x$ ) und Zeit ( $t$ ) her. Nach dieser Hypothese kann die gezeigte zeitlich veränderliche Spektraldichte auch als veränderlich in der Längsrichtung angesehen werden. Da die Abszissen im logarithmischen Maßstab gegeben sind, ist es günstig, die Ordinaten mit der Frequenz ( $f$ ) zu multiplizieren, damit das Integral der Spektraldichte den quadrierten Mittelwert der Geschwindigkeitschwankungen wiedergibt.

Für Wellenlängen kleiner als 500 m folgt das vorgeschlagene Spektrum dem Gesetz Kolmogorovs [10]. Dieses Gesetz bringt die Spektraldichte  $S(\lambda)$  in Beziehung zur Wellenzahl  $\lambda$  durch einen Ausdruck der Form:  $S(\lambda) = \beta \lambda^{-5/3}$ .

Um quantitative Angaben zu erhalten, die für den Entwurf verwendbar sind, wurde das Spektrum von Bild 3 für eine mittlere Windgeschwindigkeit von 20 m/s in Bild 4 aufgetragen. Dieses Bild zeigt, daß die normierte Spektraldichte  $fS(f)/\sigma^2$  ein Maximum zwischen 0,0166 und 0,033 Hz besitzt. Mit zunehmender Frequenz nimmt die Spektraldichte rasch ab und kann normalerweise vernachlässigt werden bei Frequenzen über 1 bis 2 Hz.

Die relative Turbulenzintensität, welche den Spektren von Bild 3 und 4 entspricht, ist gegeben durch  $\sigma/\bar{U}_{10} = \sqrt{6K}$ . Für  $K = 0,005$  ergibt das einen

Wert von 0,17, der mit den üblichen Turbulenzintensitäten (zwischen 10 und 20%) übereinstimmt, die von PASQUILL [10] ermittelt wurden.

Die Veränderung der Längskomponente der Windgeschwindigkeit in Querrichtung kann nur unter Berücksichtigung der Korrelation zwischen diesen Richtungen oder der Spektraldichten in Querrichtung  $S(\Delta l, f)$  für Punkte unterschiedlichen Abstandes  $\Delta l$  definiert werden.

DAVENPORT [11] bringt die Spektraldichten in Querrichtung in Zusammenhang mit der zeitlichen Spektraldichte  $S(f)$  mittels eines Koeffizienten:

$$R(\Delta l, f) = \frac{S(\Delta l, f)}{S(f)} = e^{-\frac{cf \Delta l}{\bar{U}_{10}}}$$

wobei  $c$  eine Konstante ist.  $\bar{U}_{10}/cf$  hat die Dimension einer Länge und kann als Korrelationsskala benutzt werden.

Die Entfernung, auf welcher Windgeschwindigkeiten einer Korrelation unterliegen, ist also umgekehrt proportional der Frequenz und dem Koeffizienten  $c$ .

Tafel I gibt für stabile atmosphärische Bedingungen, die in dem vorliegenden Fall von Interesse sind, die Größenordnung des Faktors  $c$  für verschiedene Richtungen und Turbulenzkomponenten wieder [11]:

Richtung von $\Delta l$	Turbulenzkomponente	$c$
längs	längs	8
	quer	6
quer	längs	40
	quer	25
senkrecht	längs	7
	quer	7

Die Tatsache, daß die Korrelationsskala in Querrichtung kleiner ist als in Längsrichtung, deutet darauf hin, daß bei starken Winden die Wirbel gestreckt sind.

#### 2.4. Windtätigkeit

Die Kenntnis der Windgeschwindigkeit ist zur Beschreibung der Windtätigkeit nicht ausreichend. Es ist erforderlich zu wissen, wie die Geschwindigkeiten

in Drücke umzurechnen sind. Auf Grund des dynamischen Charakters dieser Erscheinungen konnte das Problem bisher noch nicht befriedigend gelöst werden.

Für den Fall, daß der Wind eine gleichmäßige Strömung darstellt, steht umfangreiches Zahlenmaterial zur Verfügung, welches die Umrechnung der Windgeschwindigkeit in lokale oder Gesamtdruckbelastungen erlaubt. Diese Zahlen sind in Windtabellen als Druckkoeffizienten zusammengestellt.

JENSEN [12] hat gezeigt, daß bei Ersatz der gleichmäßigen Strömung durch ein Grenzschichtprofil, wie in Bild 2 gezeigt, entscheidende Veränderungen der Druckkoeffizienten beobachtet werden.

In Anbetracht der turbulenten Natur des Windes ist das Problem viel verwickelter. Tatsächlich ist es erforderlich, zur Turbulenz des Windes diejenige Turbulenz, welche durch das Bauwerk hervorgerufen wird, hinzuzurechnen.

Die durch das Bauwerk verursachte Turbulenz stammt hauptsächlich von der Wirblerregung und kann von dem Verformungsverhalten des Bauwerkes unabhängig oder abhängig sein.

Die erste Erscheinungsform entspricht den von Kármán-Wirbeln. Die Frequenz  $f$  der Wirblerzeugung ist mit der mittleren Windgeschwindigkeit durch die Strouhal-Zahl  $S = fD/\bar{U}$  verknüpft, wobei  $D$  eine typische Längenabmessung ist.

Da eine bestimmte Frequenz  $f$  überwiegt, handelt es sich hier nicht um eine echte Turbulenz; sie wird häufig Quasiturbulenz genannt. Eine Übersicht über das Problem der Wirbelablösung bei starren, runden Zylindern wird von LIENHARD [13] gegeben.

Die Vibrationserregung auf Grund der Verformbarkeit des Bauwerkes ist ein noch verwickelteres Phänomen. Ein einfacher Fall, in dem der Mechanismus der Vibrationen leicht zu verstehen ist, ist folgender:

Man betrachte eine waagrechte Windströmung und ein in der Vertikalrichtung schwingendes Bauwerk. Die Vibration des Bauwerkes entspricht einer Querkomponente der Windgeschwindigkeit. Wird diese Querkomponente mit der Längskomponente zusammengefaßt, so entspricht das einem schiefen Auftreffen des Windes. Wenn für dieses schräge Auftreffen das Profil des Körpers zu einem negativen Auftrieb führt, so neigt diese niederdrückende Kraft zur Verstärkung der Vibrationen des Systems und kann als negative Dämpfung bezeichnet werden. Übersteigt diese negative Dämpfung die positive Dämpfung des Bauwerkes, so treten ungedämpfte Eigenschwingungen von wachsender Heftigkeit auf.

Für Systeme mit mehreren Freiheitsgraden können die Erscheinungen der aerodynamischen Instabilität auf das Zusammenwirken verschiedener, zu Flatterbewegungen führender Ursachen zurückgeführt werden. Schließlich kann es ebenfalls vorkommen, daß die von einem Bauwerk erzeugte Turbulenz benachbarte Bauwerke beeinflußt.

SCRUTON [14] beleuchtet die verschiedenen Aspekte der vom Wind erzeug-

ten Vibrationen bei Bauwerken. Auf Grund der komplexen Natur der beteiligten Erscheinungen kann festgestellt werden, daß eine allgemeine analytische Lösung noch nicht vorgetragen werden kann. Modellversuche in Windtunneln zeitigen sehr nützliche Ergebnisse.

### 2.5. *Modellversuche*

Normalerweise versucht man beim Bau von Windtunneln die Turbulenz möglichst weitgehend zu unterdrücken, um eine gleichmäßige Luftströmung zu erhalten. Ein so konstruierter Windtunnel ist gut geeignet zur Ermittlung von Druckkoeffizienten, gestattet aber offensichtlich nicht die Beobachtung von Turbulenzeffekten des natürlichen Windes.

In neuerer Zeit wurden mehrere Windtunnel [8] gebaut, um die Veränderung der Geschwindigkeit mit zunehmender Höhe zu untersuchen. Dies wird erreicht durch Erhöhung der Rauigkeit des Bodens im Vergleich zu der der übrigen Wände. Bild 5 zeigt den Grenzschichten-Windtunnel der Universität von Western Ontario.

Es wäre wünschenswert, künftig die Turbulenz der Windtunnel genau kontrollieren zu können, um dynamische Versuche mit maßstäblich definierter Turbulenz durchzuführen.

### 2.6. *Bemessungsangaben*

Bei den Bemessungsangaben müssen unter anderem die maximalen Windgeschwindigkeiten definiert werden, auf welche die Druckkoeffizienten angewandt werden können. Die zurzeit benutzten Höchstgeschwindigkeiten sind nicht auf statistischer Grundlage definiert.

Die Verknüpfung von maximaler und mittlerer Geschwindigkeit ist wichtig. Mehrere Verfasser haben dieses Problem untersucht [15, 16]. Unter Verwendung des von DAVENPORT [8] angegebenen Geschwindigkeitsspektrums berechnete CASTANHETA [17] die statistische Verteilung des Verhältnisses von maximaler Geschwindigkeit  $U_f$  zur mittleren Geschwindigkeit, welche in Zeitintervallen von  $t_0 = 10 \text{ min}$  oder  $1 \text{ h}$  registriert wurde. Mit maximaler Geschwindigkeit ist die Geschwindigkeit gemeint, die von einem idealen Filter mit nach oben scharf begrenzter Frequenzgrenze (Grenzfrequenz) aufgenommen würde, wie  $f = 0,2; 0,5; 1,0; 2,0 \text{ Hz}$ .

Tafel II gibt die erhaltenen Verhältnisse der mittleren Höchstgeschwindigkeit zur mittleren Geschwindigkeit wieder. Diese Werte beziehen sich auf eine Höhe von  $10 \text{ m}$  über dem Erdboden.

Es ist bemerkenswert, daß die Veränderung der Koeffizienten auf Grund der sich ändernden Grenzfrequenz fast unabhängig von dem Rauigkeitsfaktor und dem Zeitintervall ist.

Tafel II

Grenzfrequenz (Hz)	$t_0 = 10 \text{ min}$			$t_0 = 1 \text{ h}$		
	Rauhigkeitskoeffizient $K^1)$			Rauhigkeitskoeffizient $K^1)$		
	$K=0,005$	$K=0,010$	$K=0,015$	$K=0,005$	$K=0,010$	$K=0,015$
0,2	1,44	1,63	1,77	1,54	1,75	1,92
0,5	1,50	1,71	1,87	1,58	1,83	2,02
1,0	1,53	1,75	1,92	1,63	1,88	2,07
2,0	1,56	1,79	1,97	1,66	1,92	2,13

<sup>1)</sup> Nach DAVENPORT [8].  $K = 0,005$  entspricht einer ebenen Erdoberfläche und  $K = 0,015$  einer rauen Oberfläche, wie etwa im Zentrum einer Stadt.

Wird als Bezugsgröße die Frequenz von 2 Hz gewählt, so werden für die Grenzfrequenzen 1,0; 0,5; 0,2 Hz jeweils Abnahmen von 2, 4 und 9% beobachtet.

Angenommen, ein Bauwerk verhält sich wie ein Filter mit gegebener Grenzfrequenz, so könnten die angegebenen Abnahmen auf die Maximalgeschwindigkeiten angewandt werden, die beim Entwurf berücksichtigt werden. Weil der Druck proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit ist, würden die Druckabnahmen doppelt so hoch wie angegeben ausfallen.

Bei Bauwerken mit einer ausgedehnten Front kann eine weitere Abnahme in Betracht gezogen werden, die mit der Querkorrelation der Windgeschwindigkeit zusammenhängt. Bis jetzt wurden diese Abnahmen hauptsächlich auf experimentellem Wege ermittelt [18, 19]. Die nun vorliegenden Angaben über die Windturbulenz sind bereits ausreichend, um eine analytische Bestimmung dieser Abnahmen zu gestatten [17, 20].

Obige Überlegungen zeigen, daß eine Verminderung der Windbelastung durch Turbulenz nur für Bauwerke mit sehr niedriger Eigenfrequenz, wie Hängebrücken großer Spannweite, Freileitungen und Wolkenkratzer gerechtfertigt ist, Bild 4. Bauwerke dieser Art haben Eigenfrequenzen von 0,1 Hz oder sogar noch weniger. Das gleiche gilt nicht für normale Gebäude mit weniger als zehn Stockwerken, die im allgemeinen Frequenzen über 1 Hz besitzen. Für Bauwerke dieser Art kann der Wind als statische Belastung angesehen werden. Andererseits können aeroelastische Erscheinungen für stark verformbare Bauwerke, wie Hängebrücken, von überragender Bedeutung sein [21].

Zur Erweiterung des Wissens bezüglich Windbelastungen erscheint es wichtig, das tatsächliche Verhalten von Bauwerken zu beobachten [22]. Durch derartige Untersuchungen können die angenommenen Hypothesen bestätigt und die aussichtsreichsten Forschungsgebiete aufgezeigt werden.

### 3. Erdbebenwirkungen

#### 3.1. Natur der Erdbeben

Es wird allgemein angenommen, daß Erdbeben durch örtliche Rißbildung in der Erdkruste entstehen. Erdbebenerschütterungen können noch in großer Entfernung vom Epizentrum wahrgenommen werden, beeinflussen aber normalerweise Bauwerke in einem nur sehr viel kleinerem Umkreis. Innerhalb des Bereiches, in dem Erdbeben eine zerstörende Wirkung haben, zeigen die Erdbewegungen einen unregelmäßigen Charakter, wie aus den vorhandenen Aufzeichnungen hervorgeht (Bild 6).

Künstliche Sprengungen können ebenfalls Ursache von Erdstößen sein, die in mancher Hinsicht mit Erdbebenbewegungen verglichen werden können.

Durch Erdbebenstöße geraten Wassermassen in Bewegung und können große Wellen im Meer hervorrufen (tsunami), sowie auch hydrodynamische Drücke auf Bauwerke ausüben, die unter Wasser angelegt sind oder mit ihm in Berührung stehen.

Im Laufe der letzten Jahre wurden große Anstrengungen unternommen, die Erdbebenursachen zu erforschen, einmal um das seismische Verhalten der verschiedenen Erdteile definieren zu können, und um die geeignetsten Methoden zur Messung und Darstellung seismischer Bewegungen zu untersuchen sowie auch um das Verhalten von Bauwerken unter der Einwirkung von Erdbeben darstellen zu können. Unter der umfangreichen Literatur über diese Themen nehmen die Niederschriften der World Conferences of the International Association on Earthquake Engineering einen hervorragenden Platz ein [23, 24, 25]. Die neueren Bemühungen der UNESCO, die die Forschung auf diesem Gebiet koordinieren und fördern will, seien ebenfalls erwähnt.

#### 3.2. Erdbebenmessungen

Obwohl die Erdbewegungen geringer Amplitude, welche auf entfernte Erdbeben zurückzuführen sind, seit vielen Jahren registriert werden, wurden erst kürzlich geeignete Geräte zur Aufzeichnung heftiger Bewegungen entwickelt [26].

Das heute normalerweise verwendete Gerät zeichnet die drei Komponenten der Erdbeschleunigung auf und beginnt selbsttätig mit der Registrierung, sobald die Vertikal- oder eine der Horizontalkomponenten etwa 0,01 g überschreitet.

Die dynamischen Eigenschaften dieses Gerätes und die Geschwindigkeit, mit welcher die Aufzeichnung vorgenommen wird, sind geeignet zum Zweck der eingehenderen Analyse von seismischen Erschütterungen. Ebenso ist die Zahl der Beschleunigungsaufnehmer für heftige Stöße im raschen Steigen begriffen. Trotzdem sind noch nicht alle wichtigen seismischen Regionen ausreichend mit Anzeigegeräten ausgerüstet.

### 3.3. Darstellung von Erdbeben

Ein wichtiger Beitrag zur Darstellung von erdbebenverursachten Erdbewegungen stammt von HOUSNER [27], der diese Bewegungen einer Serie von Stör-impulsen gleichstellte und sie durch Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- oder Verschiebungsspektren darstellte. Nach Housner stellt das Spektrum einer gegebenen Größe, zum Beispiel der Geschwindigkeit, die Maximalgeschwindigkeiten dar, welche einfache Schwingen mit unterschiedlichen Eigenfrequenzen und unterschiedlichen Dämpfungseigenschaften erfahren, wenn sie dem betrachteten Stoß ausgesetzt werden. Housner berechnete die Spektren einiger Beschleunigungsaufnahmen bei starken Erdstößen und schlug vor, Erdbewegungen durch die Spektren von Bild 7 darzustellen.

Eine weitere Methode, um solche verschiedenartige Bodenbeschleunigungen zu beschreiben, besteht darin, die Spektraldichte der Beschleunigungen zu definieren. Diese Beschreibung verwendet die Grundgrößen der Theorie der Störschwingungen, die auch zur Beschreibung der Windturbulenz benutzt wurde.

Die Darstellung von HOUSNER und anderen Verfassern [28, 29] entspricht einer Erschütterung, die als «white noise vibration» bezeichnet wird (Erschütterung einer konstanten Leistungs-Spektraldichte). Die Veränderung der Leistungsspektraldichte als Funktion der Frequenz wurde von TAJIMI [30] vorgeschlagen auf der Grundlage von Vorarbeiten KANSAIS [31] und BARSTEINS [32]. In einer Untersuchung über den Wahrscheinlichkeitsansatz bei der Konstruktion erdbebensicherer Bauten betrachtet ROSENBLUETH [33] die verschiedenen Idealisierungen der seismischen Belastungen.

BYCROFT [34] hat gezeigt, daß die von Housner angegebenen Geschwindigkeitsspektren einer Vibration, die als «white noise vibration» bezeichnet wird, entsprechen und auf den Bereich 0,2 bis 5 Hz beschränkt sind. Jeder Versuch hatte eine Dauer von 30 s. Er zeigt, daß die Spektraldichte von  $695 \text{ cm}^2 \text{s}^{-4}/(\text{Hz})$  der Nord-Süd-Registrierung des El Centro Erdbebens von 1940 entspricht.

Kürzlich haben RAVARA [35], JENNINGS [36] und ARIAS und PETIT LAURENT [37] Digitalrechner eingesetzt, um unmittelbar aus den vorhandenen Erdbeben-aufzeichnungen die entsprechenden Spektraldichten zu errechnen.

Obwohl die Spektren wichtige Schwankungen aufweisen, ist es trotzdem möglich, eine mittlere Abweichung der Spektraldichten als Funktion der Frequenz (Bild 8) abzuleiten. Analytische Ausdrücke für dieses Gesetz werden von mehreren Autoren vorgeschlagen [30, 36, 38, 39]. Es ist zu erwarten, daß die Veränderung der Spektraldichte von der Geometrie und den mechanischen Eigenschaften des Erdbodens abhängen wird. Leider erlaubt das zurzeit vorhandene Material noch nicht die zahlenmäßige Erfassung dieser Einflußgrößen oder des Einflusses des Epizentrenabstandes.

Es muß betont werden, daß der Unterschied in der Darstellung als «white noise» von begrenztem Frequenzumfang und als Spektrumsfunktion, die einem linearen Schwingen entspricht, nicht so entscheidend ist, wie man meinen

könnte. In Wirklichkeit verhalten sich mechanische Systeme immer wie Filter, welche die Frequenzen oberhalb einer bestimmten Grenze nicht erfassen. Deshalb ist es gleichgültig, ob die Belastung eine bestimmte positive Spektraldichte oberhalb dieser Grenze hat oder nicht. PEREIRA [39] verglich die Anzeige von linearen Schwingern für drei Typen von Spektralfunktionen (Bild 8) und erhielt die in Bild 9 gezeigten Ergebnisse, welche die obigen Überlegungen gut bestätigen.

Um Erdbewegungen vollkommen wiederzugeben, müßte man für jeden Punkt nicht allein die Beschleunigungsänderungen mit der Zeit angeben, sondern auch die Kreuzkorrelationen in den verschiedenen Richtungen. Zurzeit liegen keine Unterlagen vor, welche die Ableitung dieser Angaben gestatten. Trotzdem vermitteln die Aufstellungen von BARSTEIN [32] und PETIT LAURENT [37] nützliches Material bezüglich des Bereiches, in dem die Erderschütterungen als ungefähr gleichmäßig betrachtet werden können. Tatsächlich beträgt das Zeitintervall, für welches die Korrelation Gültigkeit hat, großenordnungsmäßig 0,1 s. Also werden Punkte in einer Entfernung von 100 m voneinander noch simultan ähnliche Erschütterungen erfahren, selbst bei hoher Ausbreitungsgeschwindigkeit der seismischen Wellen. Das gleiche wird nicht mehr gelten, wenn die Punkte mehr als 500 m auseinander sind.

Eine Darstellung der Erdbeben, welche die Untersuchung von ungleichmäßigen Erschütterungen an verschiedenen Punkten erlaubt, wurde von BOGDANOFF, GOLDBERG und SCHIFF [40] vorgeschlagen. Diese Verfasser betrachten Bündel von gedämpften Schwingungen mit willkürlichen Amplituden, Frequenzen, Eintreffzeiten, Phasen und Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Diese Darstellung wird benutzt, um die Längsvibration einer Hängebrücke zu untersuchen.

### 3.4. Verhalten der Bauwerke

Neuerdings zur Verfügung stehende analytische Methoden erlauben die Untersuchung von Bauwerken unter sehr allgemeinen Annahmen. Verfahren, die mit einer Darstellung der Systeme durch konzentrierte Massenarbeiten und Matrizen verwenden, welche mit Digitalrechnern ausgewertet werden, sind sehr wirksame Hilfsmittel zur dynamischen Analyse von Bauwerken.

Die obige idealisierte Erdbebendarstellung stellt die notwendige Grundlage dar zur Durchführung dieser dynamischen Analyse. Bei der Betrachtung von Erdbebendarstellungen darf nicht vergessen werden, daß sich auf Grund der Wechselwirkung zwischen Erdreich und Fundament die tatsächlich auf das Bauwerk einwirkenden Erschütterungen von den auf das Fundament wirkenden sehr verschieden sein können. Dieses Problem kann nur behandelt werden unter Einbeziehung des Verhaltens des gesamten Systems Bauwerk/Erdreich und unter der Annahme, daß in genügender Entfernung vom Bauwerk die Bodenerschütterungen mit der gegebenen Darstellung übereinstimmen.

### 3.5. *Modellversuche*

Obwohl der Nutzen einer analytischen Methode heute durch den Einsatz von Digitalrechnern stark erhöht wird, können zahlreiche Probleme noch nicht bequem auf diese Weise gelöst werden, und für solche sind Modelluntersuchungen eine geeignete Methode. Sowohl mechanische Modelle als auch elektrische Analoga kommen als Modelle in Betracht, wobei festzustellen ist, daß das elektrische Analogon normalerweise der analytischen Darstellung näher verwandt ist.

Analogrechner sind zur Untersuchung von dynamischen Problemen in Zusammenhang mit Erdbeben erfolgreich eingesetzt worden [41]. Störschwingungen können auf diese Weise bequem untersucht werden. Generatoren zur Erzeugung von Störschwingungen gehören zur Standardausrüstung, die zur Eingabe in den Rechner benutzt werden können.

In dynamischen Prüfungen können verschiedene Methoden angewandt werden, um Erderschütterungen zu simulieren [42]. Seit Jahren sind Rütteltische in Gebrauch, die nach Frequenz und Amplitude kontrollierte Sinusschwingungen ausführen. In anderen Fällen wurden Vibrationen erzeugt durch Stöße, die gedämpfte Sinusschwingungen einleiten, deren Frequenz von einem am Tisch befestigten Federnsystem abhängt.

Im Laboratório Nacional de Engenharia Civil sind Modellversuche hauptsächlich unter Verwendung von Störschwingungen seit 1960 durchgeführt worden [43, 44]. Bild 10 zeigt den Versuchsaufbau. Die auf das Modell ausgeübten Belastungen stellen in günstigem Maßstab die Erderschütterungen dar, und sowohl das Spektrum, das normalerweise als «white noise» von begrenzter Reichweite betrachtet wird, als auch die Dauer werden simuliert. Durch mehrere Prüfungen gelingt es, die maximalen mittleren Ansprechwerte zu bestimmen. Indem stufenweise die Leistungs-Spektraldichte erhöht wird, ist es möglich, das Verhalten im nichtlinearen Bereich sogar bis zum Bruch zu untersuchen. Modelluntersuchungen, bei denen Erschütterungen, die einem willkürlichen Rauschen entsprechen, benutzt wurden, wurden kürzlich auch in Japan durchgeführt [45, 46].

Bei diesen Versuchen wurden elektromagnetische Rüttler benutzt, die nur für Frequenzen bis 20 Hz geeignet sind. Automatisch geregelte hydraulische Pressen, die jetzt in einigen Ländern fabriziert werden, sind gut geeignet zur Durchführung von dynamischen Modelluntersuchungen. Mit diesen Pressen können Kräfte von der Größenordnung einiger hundert Tonnen aufgebracht werden, wobei diese Kräfte im Frequenzbereich bis 20 Hz regelbar sind [47]. Da in einigen Fällen die Kräfte nach jedem vorgegebenen Programm variiert werden können, ist es auch möglich, Störschwingungen zu erzeugen. Es ist zu erwarten, daß sich Systeme dieser Art für seismische Untersuchungen an Modellen als sehr nützlich erweisen werden.

### *3.6. Konstruktionsgrundlagen*

Im allgemeinen schreiben die Bestimmungen über erdbebensichere Bauten [48] vor, daß seismische Koeffizienten auf das Gewicht der in unterschiedlicher Höhe befindlichen Massen angewendet werden, wodurch die Berechnung der Horizontalkräfte, für welche der Bau bemessen werden muß, ermöglicht wird. Auf diese Weise werden dynamische Erdbebenkräfte in gleichwertige statische Kräfte umgeformt.

Es ist ausgesprochen schwierig, die seismischen Koeffizienten so zu bestimmen, daß sie alle die in einer dynamischen Analyse ermittelten Daten enthalten. Wenngleich sehr angenähert, läßt die Bemessung auf der Grundlage von seismischen Koeffizienten doch einen Widerstand gegen horizontale Kräfte garantieren, der für die Praxis sehr wichtig ist.

In Anbetracht der Schwierigkeiten, die einer dynamischen Analyse entgegenstehen, kann die Angabe von seismischen Koeffizienten als günstig für den Bemessungsingenieur angesehen werden, hauptsächlich für die gängigen Bauten wie zum Beispiel normale Gebäude. Für Bauwerke wie Dämme, Hochbauten, große Brücken und Masten wird im allgemeinen die Durchführung einer vollständigen dynamischen Analyse erforderlich [49].

## **4. Andere Arten von dynamischen Belastungen**

Die Zeit, die für dieses einleitende Referat zur Verfügung steht, erlaubt lediglich eine kurze Schilderung der wichtigsten dynamischen Belastungen.

Die folgenden Überlegungen sind nur gedacht als Einleitung und Anregung zur Diskussion über die dynamischen Belastungen neben denen, die auf Wind und Erdbeben zurückzuführen sind.

### *4.1. Belastungen durch Verkehr*

Das Problem der dynamischen Belastung von Brücken durch Verkehr ist grundsätzlich verschieden je nachdem, ob es sich um Straßen- oder Eisenbahnbrücken handelt.

Bei Straßenbrücken wird in den Bestimmungen immer mehr zwischen Belastungen durch Verkehrsstauungen und durch außergewöhnlich schwere Fahrzeuge unterschieden [50]. Dazwischenliegende Zustände ergeben keine extremalen Bedingungen. Da Verkehrsstauungen als statische Belastungen angesehen werden können, braucht das dynamische Verhalten nur für außergewöhnlich schwere Fahrzeuge untersucht zu werden.

Bei Eisenbahnbrücken ist die Situation ganz anders. Die ständige Wiederholung der Belastung, häufig noch mit einer Spannungsumkehr verknüpft,

kann Ermüdungserscheinungen hervorrufen. Die Untersuchung des dynamischen Verhaltens hat hier überragende Bedeutung.

Eine weitere Variation der Verkehrsbelastung lässt sich auf landende Flugzeuge zurückführen.

Zur Verbesserung der heutigen Kenntnisse über Verkehrsbelastungen erscheint es richtig, die dynamischen Einflüsse in ihre deterministischen und stochastischen Teile zu zerlegen. Diese Teile können dann nach ihren spezifischen Theorien analysiert werden. Auf diesem Wege könnten genauere Bemessungsvorschriften als die heute üblichen entwickelt werden.

#### *4.2. Belastung durch Maschinen*

Dynamische Belastungen, die auf Maschinen zurückgehen, können im allgemeinen auf deterministischer Grundlage analysiert werden, indem sie periodischen Erschütterungen gleichgesetzt werden. In einigen Fällen können Sondermaschinen wie Kugelmühlen auch Störschwingungen erzeugen.

Jede Maschine hat ihre speziellen Vibrationsprobleme, und es ist schwierig, hier Material von allgemeinem Interesse vorzutragen. Einige Fachbücher [51, 52] enthalten wertvolle Angaben zu diesem Thema.

#### *4.3. Belastungen durch Explosionen*

Die allgemeine Bezeichnung «Explosion» bezieht sich sowohl auf Bodenerschütterungen wie auch auf durch künstliche Detonationen verursachte Luftdruckschwankungen.

Was die Bodenbewegungen anbelangt, können Explosionseffekte den seismischen Bewegungen gleichgesetzt werden. Die vorhandenen Aufzeichnungen zeigen, daß die Beschleunigungen ebenfalls als Störschwingungen angesehen werden können, aber die Dauer der Erschütterungen ist erheblich kürzer als die Dauer von Erdbeben [53]. Untersuchungen im Zusammenhang mit Sprengungen in Steinbrüchen bringen die Beschädigungen an Bauwerken und die Beschleunigungs- oder Geschwindigkeitsmaxima in Beziehung zu der Entfernung des Sprengzentrums und zur Ladung selbst.

Andere Untersuchungen behandeln unterirdische Kernexplosionen und analysieren die Aufzeichnungen im Sinne ihrer Leistungs-Spektraldichten [55].

Atmosphärische Druckwellen treten hauptsächlich bei der Explosion von Kernwaffen in der Atmosphäre auf. Die Druckwelle einer Explosion in Bodennähe besteht in einem starken Druckanstieg, gefolgt von einem Druckabfall, aus dem eine negative Druckhalbwelle resultiert [56]. Die Gestalt der Druckwelle ist definiert, somit können ihre Auswirkungen auf Bauwerke unter Anwendung der deterministischen Theorie der Vibratoren untersucht werden.

Der Belastungsgrad, der für die Bemessung in Ansatz gebracht werden soll, muß auf der Grundlage strategischer Überlegungen ermittelt werden, unter Berücksichtigung des erwünschten Schutzgrades.

Auch der Überschallknall kann als eine Art dynamische Belastung betrachtet werden.

## 5. Folgerungen

Dieses einleitende Referat soll hauptsächlich als Grundlage für die Diskussion während des Kongresses dienen. Deshalb enthalten diese Folgerungen Vorschläge zu Forschungsprojekten, über die eine Diskussion wünschenswert ist.

5.1. Die Notwendigkeit einer genauen Definition der auf ein Bauwerk wirkenden Belastungen wurde hervorgehoben. Diese Definition muß grundlegend sein und mit den fundierten allgemeinen Theorien übereinstimmen. Eine Diskussion über die günstigste Methode zur Erreichung dieses Zweckes ist erwünscht.

5.2. Neuere Fortschritte bezüglich unserer Kenntnisse über das dynamische Verhalten des Windes wurden beschrieben. Zur Erweiterung der vorhandenen Kenntnisse erscheint es wünschenswert:

5.2.1. Die Windturbulenz mit Hilfe geeigneter Anemometer systematisch aufzuzeichnen als Ergänzung zu den Aufzeichnungen der mittleren Windgeschwindigkeit.

5.2.2. Die Methoden zur Darstellung des Windes zu verbessern durch Anwendung von Geschwindigkeitsspektren, die als Funktion der geographischen Bedingungen und anderer wichtiger Parameter variieren.

5.2.3. Auf solider statistischer Grundlage die bei der Baukonstruktion anzuwendenden Geschwindigkeiten zu ermitteln.

5.2.4. Das dynamische Verhalten von Bauwerken zu untersuchen unter Berücksichtigung der eigentlichen Windturbulenz und der durch das Bauwerk selbst hervorgerufenen Turbulenz. Zu diesem Zweck erscheinen Modellversuche vielversprechend, die das Windgeschwindigkeitsprofil und die Turbulenzeffekte berücksichtigen.

5.2.5. Die Beobachtung wichtiger Bauwerke fortzusetzen, um mehr Material über ihr Verhalten unter Windeinflüssen zu erhalten.

5.2.6. In den Bauvorschriften nicht allein vereinfachte Angaben zur Konstruktion normaler Bauwerke niederzulegen, sondern auch Angaben von grundlegendem Wert, die zur Konstruktion wichtiger Bauwerke dienen können.

5.3. Zur Erzielung weiterer Fortschritte bei der Definition seismischer Belastungen erscheinen die folgenden Methoden vielversprechend:

5.3.1. Einrichtung weiterer Beschleunigungsaufnehmer für heftige Erdstöße und die Interpretation der erhaltenen Aufzeichnungen.

5.3.2. Definition der seismischen Belastungen durch die Spektraldichte der

Beschleunigung und die Berücksichtigung von Schwankungen der Spektren, die sich auf lokale Bedingungen zurückführen lassen.

5.3.3. Definition des seismischen Verhaltens eines Gebietes durch Angabe der Wahrscheinlichkeit, daß eine bestimmte Spektraldichte der Beschleunigung in dieser Gegend erreicht wird. Das seismische Verhalten der verschiedenen Regionen muß unter Verwendung aller geophysikalischen, geologischen und seismischen Angaben ermittelt werden und unter möglichst weitgehender Benutzung von quantitativen statistischen Kriterien.

5.3.4. Fortsetzung der auf der Theorie der Störschwingungen basierenden analytischen und experimentellen Untersuchungen, hauptsächlich um weitere Angaben über das Verhalten von linearen und nichtlinearen Systemen mit mehreren Freiheitsgraden zu erhalten.

5.3.5. Erweiterung der Meßeinrichtungen der Beschleunigungsaufnehmer für starke Erdstöße durch Installierung von Geräten, die auch die Beobachtung des Gebäudeverhaltens selbst gestatten. Nützliche Angaben können auch durch dynamische Prüfungen an existierenden Bauwerken erhalten werden, sogar bei Vibrationen kleiner Amplitude.

5.3.6. Sehr wünschenswert ist die Verbesserung der Bauvorschriften. Was den Wind anbetrifft, wäre es günstig, wenn die Bauvorschriften vereinfachte Regeln für die Konstruktion normaler Bauwerke enthielten sowie auch grundsätzliche Angaben, die bei Sonderuntersuchungen wichtiger Bauwerke anwendbar wären.

5.4. Der Diskussion über andere dynamische Belastungen als Wind- und Erdbebenbelastungen wird ebenfalls freier Raum gegeben. Unter anderem wurden Belastungen durch Verkehr, Maschinen und Explosionen erwähnt. Neue Angaben, die auf neuzeitlich-wissenschaftlicher Grundlage ermittelt wurden, können einen bedeutenden Beitrag zur Konstruktion von billigeren und sichereren Bauwerken leisten.

5.5. Zum Schluß muß die Bedeutung der internationalen Zusammenarbeit als starkes Instrument zur Beschleunigung des Fortschritts herausgestellt werden. Diese Zusammenarbeit könnte besonders nützlich sein bei der Aufstellung von Empfehlungen allgemeiner Art, auf denen regionale Vorschriften aufbauen können.

#### *Verdankung der Mitarbeit*

Die Mitarbeit der Herren JERVIS PEREIRA, MÁRIO CASTANHETA und ARTUR RAVARA, Spezialisten und Forschungsassistent an dem Laboratório Nacional de Engenharia Civil, wird dankbar anerkannt.

Leere Seite  
Blank page  
Page vide