

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 95 (1977)
Heft: 49

Artikel: Schockresponse-Spektren
Autor: Kessler, Erwin
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-73499>

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: 09.02.2026

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

Schockresponse-Spektren

Von Erwin Kessler, Zürich

Schockresponse-Spektren sind ein *Bemessungshilfsmittel* bei *transienten dynamischen Beanspruchungen* – kurz «Schock» genannt – von Bauwerken (Kernkraftwerke, Militär- und Zivilschutz-Bauten, erdbebensichere Bauten) und ihren technischen Einrichtungen. Im folgenden werden das Wesen und der Anwendungsbereich solcher Spektren umrissen.

Ereignisse wie *Erdbeben*, *Flugzeugabstürze* und *Nuklear-explosionen*, die den Boden und Bauwerke erschüttern, zeigen jedesmal einen anderen zeitlichen Verlauf der Erschütterung. Obwohl solche Erschütterungen für jede Ursache gewisse charakteristische Ähnlichkeiten haben, ist es schwierig, aus den unendlich vielen möglichen Zeitfunktionen einige wenige für Berechnungen auszuwählen, derart, dass die ungünstigsten Fälle erfasst werden. Es ist deshalb üblich, solche Erschütterungen *nicht als Zeitfunktionen, sondern als sogenannte Schockresponse-Spektren*, kurz auch Response-Spektren oder *Schockspektren* genannt, darzustellen.

Definition des Schockspektrums

Die dynamischen Eigenschaften eines ungedämpften linear-elastischen Systems mit einem Freiheitsgrad (Bild 1a) sind vollständig festgelegt durch die Eigenfrequenz f . Alle derartigen Systeme mit der gleichen Frequenz f führen unter einer beliebigen Anregung die gleiche Schwingung aus, insbesondere erhalten sie die gleiche maximale Deformation, Geschwindigkeit und Beschleunigung. Dieser Sachverhalt wird beim Aufstellen von Schockspektren benutzt: Über einer Frequenzachse trägt man z.B. die Maximalwerte der Beschleunigung für eine bestimmte Anregungsfunktion auf und erhält damit ein *Beschleunigungs-Schockspektrum* für diese Anregungsfunktion (Bild 2); analog erhält man Geschwindigkeits- und Deformationsspektren, genauer gesagt man erhält *Maximax-Response-Spektren*; sie enthalten die Maximalwerte des vollständigen Responses. Betrachtet man nur den Response während der Wirkdauer der Anregung (Initialbereich) oder nur nach Aufhören der Anregung (Residualbereich), so hat man entsprechend ein *Initial-* bzw. ein *Residual-Response-Spektrum*. Gewöhnlich arbeitet man mit *Maximax-Spektren*. Ist man aber besonders am Ausschwingvorgang interessiert (z.B. wegen Fragen der Materialermüdung infolge hochfrequenter, oszillierender Schockkomponenten), so ist das *Residual-Spektrum* wichtiger. – Es lässt sich zeigen, dass das *Residual-Response-Spektrum* das Fourier-Amplitudenspektrum der Anregungsfunktion darstellt.

In Bild 2 sind die Responsekurven verschiedener Anregungsfunktionen übereinander gezeichnet. Während die Anregungen im Zeitbereich sehr verschieden sind, konzentrieren sich die Responsekurven im Schockspektrum auf ein enges Band. Im unteren Frequenzbereich sind die Kurven überhaupt identisch (Bereich der Impulsbelastung). Ändert man die Spitzenwerte der Anregungen, erhält man im Response-Spektrum eine Kurvenschar mit der Anregungsintensität (Spitzenwert) als Parameter. Damit sind wir beim Kern der Schockspektrum-Darstellung angelangt: Für die in Bild 2 angegebene Klasse von Anregungsfunktionen lassen sich obere und untere Grenzen des Responses angeben, wenn lediglich die Intensität, nicht aber das im Einzelfall vorliegende Funktionsbild bekannt ist. Wir werden damit in einem gewissen Sinne unabhängig vom zeitlichen Verlauf der Anregung, genau, was man sich bei der Behandlung von Erdbeben, Explosionserschütterungen und ähnlichem wünscht. Tatsächlich bleibt die eben skizzierte Eigenschaft des Schockspektrums oft auch bei komplizierteren Anregungen erhal-

ten. Vor allem lässt sich aber immer eine obere Umhüllende angeben, die eine *konservative Abschätzung* des Responses erlaubt. Wenn diese Umhüllende z.B. eine grosse Anzahl gemessener Erdbeben-Kurven umschliesst, ermöglicht sie eine sehr zuverlässige Bemessung erdbebensicherer Bauten, vorausgesetzt, man beachte die Gültigkeitsgrenzen des Response-Spektrums. Damit werden wir uns im nächsten Abschnitt befassen. Vorerst sollen der Vollständigkeit halber noch einige weitere, verbreitete Arten von Schockspektren kurz erläutert werden.

Bei Anregungen durch Supportbewegungen (Fusspunkt-erschütterung von Maschinen, Druckbehältern, Apparaturen usw.) ist zu unterscheiden, ob in den Schockspektren *absolute* oder *relative* Bewegungsgrössen (gegenüber dem Support) dargestellt sind. In der Regel arbeitet man mit *Absolut-Beschleunigungs-*, jedoch mit *Relativ-Geschwindigkeits-* und *Relativ-Verschiebungs-Spektren*. Neben diesen Grössen mit klaren physikalischen Bedeutungen werden oft sog. *Pseudo-Spektren* verwendet. Sie stützen sich auf die Beziehungen zwischen Beschleunigung, Geschwindigkeit und Verschiebung bei einer Sinusschwingung $y = A \sin \omega t$. Mit der Kreisfrequenz ω gelten hier folgende elementare Beziehungen:

$$\begin{aligned} y &= A \sin \omega t & y_{\max} &= A & (\text{Verschiebungs-Amplitude}) \\ y &= A \cos \omega t & \dot{y}_{\max} &= \omega A & (\text{Geschwindigkeits-Amplitude}) \\ y &= \omega^2 \sin \omega t & \ddot{y}_{\max} &= \omega^2 A & (\text{Beschleunigungs-Amplitude}) \end{aligned}$$

Ausgehend vom Relativ-Verschiebungs-Spektrum erhält man z.B. das Pseudo-Geschwindigkeits-Spektrum durch Multiplikation der Ordinaten des Relativ-Verschiebungsspektrums mit ω .

Analog erhält man das Pseudo-Beschleunigungsspektrum durch Multiplikation mit ω^2 . Während die Pseudo-Geschwindigkeit keinen physikalischen Sinn hat, ist die Pseudo-Beschleunigung physikalisch sinnvoll.

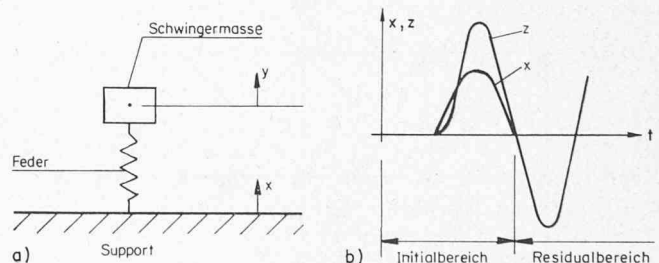


Bild 1. Response eines linearen Schwingers mit einem Freiheitsgrad. a) Definition des Systems. b) Beschleunigungs-Responsespektrum für einen Halbsinus-Puls als Anregungsfunktion.

x : Supportbewegung (Anregung)
 y : absolute Responsebewegung des Schwingers
 $z = y - x$: relative Responsebewegung gegenüber dem Support

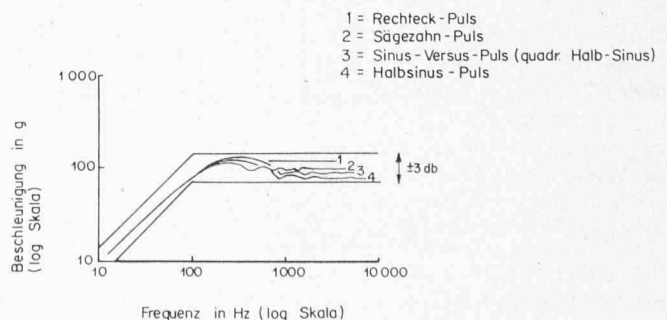


Bild 2. Beschleunigungsspektrum für verschiedene Anregungsfunktionen

schleunigung im Fall ungedämpfter Schwinger identisch mit der Absolut-Beschleunigung und stellt bei nicht verschwindender, aber kleiner Dämpfung eine gute Näherung dar. Oft werden verschiedene Dämpfungen in den Spektren durch Kurvenscharen dargestellt. Pseudogeschwindigkeiten und Pseudo-beschleunigungen ermöglichen im Sinne einer Vereinfachung und Approximation eine kombinierte Darstellung der Verschiebung, Geschwindigkeit und Beschleunigung im selben Spektrum (Bild 3).

Grenzen der Anwendbarkeit

Aus der Definition der Schockspektren geht unmittelbar hervor, dass sie nur für linear-elastische Schwinger mit einem Freiheitsgrad gültig sind; unterschiedliche Dämpfungskoeffizienten können durch Kurvenschar-Parameter mitberücksichtigt werden. Im Prinzip ist es möglich und gelegentlich auch schon gemacht worden, Responsespektren für nicht-lineare Schwinger zu erstellen. Da es aber für jede Art von Nichtlinearität wieder andere Spektren braucht, geht dabei der Hauptvorteil der Übersichtlichkeit und Einfachheit weitgehend verloren, insbesondere ist das kombinierte Spektrum nach Bild 3 in dieser Art nicht mehr möglich, da auch die Pseudo-Beschleunigung ihren physikalischen Sinn verliert. *Schockspektren sind also im allgemeinen bei nichtlinearem Verhalten des Schwingers nicht mehr gültig.* Bei Schockbeanspruchungen nimmt man aber häufig plastische Deformationen in Kauf oder erzwingt sie sogar, da sie eine sehr wirksame Schockdämpfung darstellen.

Ein weiterer, gravierender Nachteil der Schockspektren ist, dass sie *nur für Systeme mit einem Freiheitsgrad gültig* sind. Solch einfache Systeme kommen in der Technik selbst näherungsweise nur als Ausnahme vor. Bei Schwingungsberechnungen kann man diesen Nachteil durch eine Modal-

Analyse umgehen. Wie aus der Theorie der linearen Schwingungen bekannt ist, verhalten sich die Eigenschwingungen eines linear-elastischen Systems unabhängig voneinander wie Systeme mit einem Freiheitsgrad. Man kann deshalb für jede Eigenschwingung den Maximalresponse aus Schockspektren entnehmen und durch Summieren über alle Eigenschwingungen eine obere Grenze für den Maximalresponse des Gesamtsystems bestimmen. Dadurch kann sich unter Umständen eine starke Überdimensionierung ergeben; auf jeden Fall ist das Verfahren aber konservativ und genügt damit auch strengsten Sicherheitsanforderungen, sofern «genügend» viele Eigenfrequenzen berücksichtigt werden, was ein schwieriges, oft nicht sauber geklärtes Problem darstellt.

Sobald wir aber *inelastische Deformationen* zulassen, verlassen wir bei der Anwendung von Schockspektren das Feld wissenschaftlich gestützter Methoden. Die dann eingeschlossenen Unsicherheiten sind nicht abschätzbar. Ähnlich ist die Situation, wenn ein Schockspektrum als Grundlage für *experimentelle Schockprüfungen* verwendet wird. Es wird dann üblicherweise irgendeine prüftechnisch bequeme Zeitfunktion verwendet, deren Schockspektrum eine Umhüllende des verlangten Spektrums darstellt. Für ein System mit mehreren gekoppelten Eigenschwingungen ist dieses Verfahren nicht konservativ, es lässt sich daraus nicht ableiten, mit welcher Wahrscheinlichkeit das geprüfte Objekt den Schockbeanspruchungen zu widerstehen vermag, für die das vorgeschriebene Schockspektrum gültig ist. Dies liegt daran, dass das Responsespektrum *keine Phaseninformation* enthält, d.h. es ist nicht bestimmt, zu welcher Phasenlage sich die Response (Schwingungsantworten) der verschiedenen Eigenfrequenzen überlagern. Das ist auch der Grund, weshalb aus einem Responsespektrum die Zeitfunktion nicht mehr zurückgewonnen werden kann (wie das bei Fourier-Spektren möglich ist).

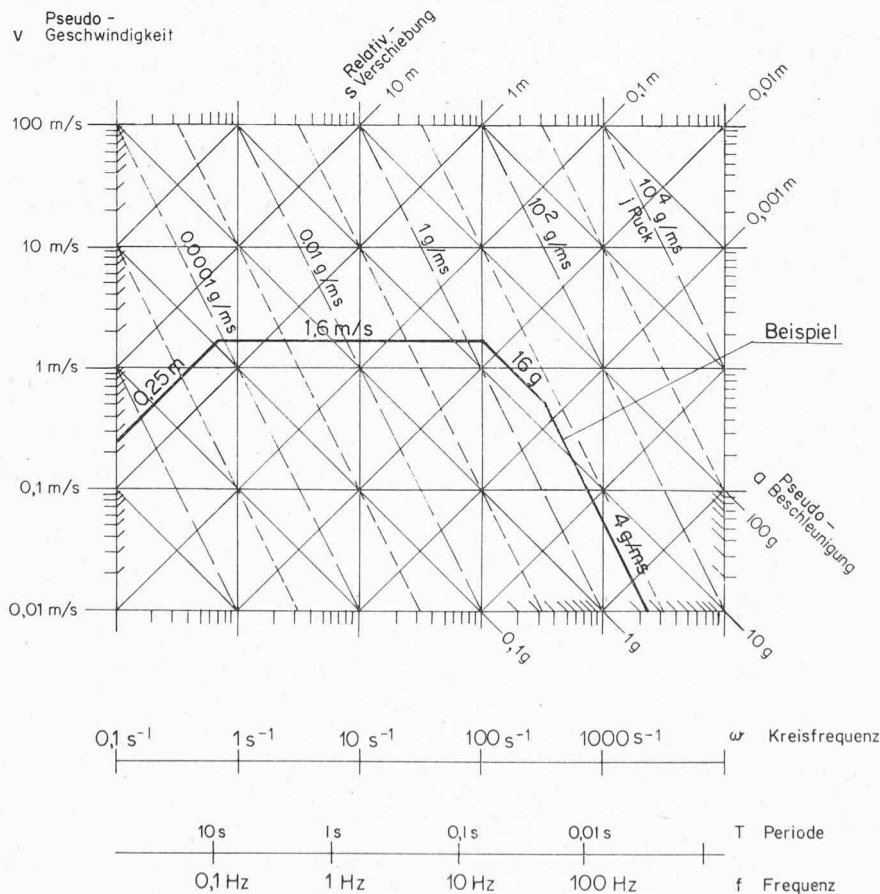


Bild 3. Kombiniertes Schockspektrum-Netz

Es ist eine wichtige Eigenheit des Schockspektrums, dass der Fehler, den man begeht, unbeschränkt gross werden kann, wenn die Gültigkeitsgrenzen verlassen werden. Würde man beispielsweise das Spektrum in Bild 2 auf eine Anregungsfunktion anwenden, die zwar die gleiche Amplitude und die gleiche Dauer hat wie eine Funktion aus Bild 2, jedoch stark oszillierend ist, z.B. eine hochfrequente Sinusfunktion, so wäre der Maximalresponse bei der Resonanzfrequenz sehr viel stärker, als das Responsespektrum angibt.

Umschau

Krebsverursachende Umwelteinflüsse

DNS-Synthese als Indikator

Einen relativ einfachen Test zur Ermittlung krebserzeugender Substanzen und ihres Gefährlichkeitsgrades hat Robert P. Painter, Professor der Mikrobiologie und Radiologie an der Universität Kalifornien in San Francisco, in mehrjähriger Arbeit entwickelt. Als Indikatoren dienen DNS-Moleküle, die sich selbst reproduzierenden «Schlüsselmoleküle des Lebens» im Zellkern, aus Kulturen menschlicher Zellen.

Eine Verlangsamung bzw. Hemmung der Synthese von DNS (Abkürzung für Desoxiribonukleinsäure), die normalerweise die Zellteilung begleitet, zeigt an, dass die Zellen dem Einfluss von Substanzen oder anderen Faktoren ausgesetzt waren, die möglicherweise Krebs hervorrufen. Handelt es sich beispielsweise um ein Agens wie ultraviolettes Licht, das die Struktur des DNS-Moleküls beschädigt oder verändert, so verlangsamt sich die DNS-Synthese immer mehr. Entsteht jedoch nur geringfügiger Schaden am Gerüst des Molekülbaus bzw. seiner geordneten Untergruppen oder wird diese Struktur nur unwesentlich verändert, so nimmt das Tempo der Synthese schon nach kurzer Zeit wieder zu.

Wie Painter erklärt, ist dem Test die Annahme zugrundegelegt, dass alles, was den chemischen Aufbau des DNS-Moleküls schädigt oder verändert, als Krebsrisiko betrachtet werden müsse. Bei der Synthese von DNS-Molekülen im Gefolge der Zellteilung, die den «Hauptplan» und die Befehlszentrale für den Aufbau und die Funktionen aller Zellen und Zellprodukte enthalten, werden auch Strukturveränderungen des DNS-Moleküls weitergegeben. Sind die Veränderungen nur geringfügig und relativ harmlos, so kann der genetische Code weiterhin abgelesen werden und dient als «Vorlage» für die Reproduktion: Die neuen Zellen sind dann trotzdem lebensfähig und können ihre normalen biologischen Funktionen erfüllen. Es können aber auch neue Zellen mit abweichendem Verhalten – beispielsweise unkontrollierter Vermehrung und Tumorbildung – entstehen. Was immer diese gefährliche Veränderung ausgelöst hat, gilt als krebserzeugend (karzinogen).

Der von Painter entwickelte Test – eine Arbeit, für die die US-Energieforschungs- und Entwicklungsbehörde (ERDA) Gelder zur Verfügung stellte – wird gegenwärtig unter Verwendung menschlicher Zellkulturen anstatt von Bakterienkulturen mit einer Vielzahl bekannter krebserzeugender Substanzen erprobt. Er dauert vier Stunden, die Kosten liegen mit 50 bis 100 Dollar je Untersuchung verhältnismässig niedrig. Später soll er dazu benutzt werden, unbekannte Faktoren in Abgasen und Abwässern, aber auch in der Umgebungsluft oder Nahrungsmitteln und anderen Substanzen aufzufindig zu machen, die möglicherweise karzinogen sind. Der DNS-Gehalt der exponierten Zellen und die Ge-

Wir haben gesehen, dass es viele verschiedene Responsepektren gibt, z.B. ein ungedämpftes Maximax-Relativverschiebungs-Schockresponse-Spektrum. Die Spektren werden aber selten in dieser Ausführlichkeit benannt. Um Fehler zu vermeiden, ist es deshalb wichtig, sich jeweils über die Art des Spektrums zu vergewissern.

Adresse des Verfassers: E. Kessler, Ing. SIA, c/o Ingenieurbureau Heierli AG, Postfach 248, 8033 Zürich.

schwindigkeit der DNS-Synthese werden dabei als Parameter dienen. Dieser «Schnelltest» könnte u. a. wichtige Anhaltspunkte dafür geben, auf welchen Gebieten eingehende weiterführende Untersuchungen erforderlich sind.

Man nimmt heute an, dass Krebs zu 85 Prozent durch Umwelteinflüsse – chemische Substanzen und andere Faktoren – verursacht wird. Gegenwärtig werden grosse Anstrengungen unternommen, den möglichen Ursachen auf die Spur zu kommen. Erst vor wenigen Monaten schuf das Nationale Krebsforschungsinstitut der USA mit der Berufung eines 30köpfigen Expertenausschusses ein «Clearinghouse für Umweltkarzinogene». Seine Mitglieder werden aus nichtstaatlichen Forschungsinstituten, Kliniken, aus Kreisen der Privatwirtschaft, der Gewerkschaften und Bürgerinitiativen ausgewählt. Aufgrund ihrer Sachkenntnis auf den Gebieten der Medizin, des Rechtswesens, der Durchführung und Auswertung von Tierversuchen, der Chemie, Biochemie, Biostatistik, Toxikologie, Pathologie und Epidemiologie sollen sie das Nationale Krebsforschungsinstitut bei der Durchführung wichtiger Programme beraten und Empfehlungen geben.

Suche nach neuen Uranvorkommen

Computer und «Pfadfinderelemente» beschleunigen die Prospektion

Angeichts des schnell wachsenden Bedarfs an Uran für den Betrieb von Kraftwerkreaktoren wird in den Vereinigten Staaten nach Mitteln und Wegen gesucht, um die Prospektion zu beschleunigen und neue, wenn auch weniger ergiebige Lagerstätten zu erkunden und für den Abbau zu erschliessen. In jüngster Zeit spielen dabei Computermodelle, welche die geologischen Merkmale von Gebieten mit Uran-«höffigem» Gestein berücksichtigen, und chemische Analysen nach den modernsten Methoden auf sogenannte Pfadfinderelemente in Bodenproben, die auf uranhaltige Gesteine hinweisen könnten, eine immer wichtigere Rolle.

Einige Prospektoren des Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Boston stützen sich nunmehr in erster Linie auf geologische Karten und einen auf geologische Datenverarbeitung programmierten Computer, um in unwegsamem Gelände geeignete Stellen für Probebohrungen zu finden. Das Verfahren beruht auf einer Art Mustererkennung geologischer Merkmale durch den Computer, wie sie erstmals sowjetische Wissenschaftler bei Versuchen zur Vorhersage von Erdbeben anwandten. Peter C. Briggs vom MIT-Department für Geowissenschaften und Planetenforschung, und Frank Press, der frühere Leiter des Departments und jetzige Wissenschaftsberater Präsident Carters, haben diese Verfahren so modifiziert, dass es für die Uranprospektion anwendbar wurde. Es dürfte sich vor allem bei der Lagerstättenforschung in Alaska, wo ausgedehnte neue Vorkommen vermutet werden, als nützlich erweisen.

Als «Modellfall» diente zunächst einmal das Colorado-Hochplateau mit seinen sehr genau erforschten Erzvorkommen. Alle geologischen Daten der Gebiete mit uranführenden