

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 71 (1953)
Heft: 51

Artikel: Über dynamische Einwirkungen auf Gebäude
Autor: Geiger, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-60684>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.01.2025

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

Über dynamische Einwirkungen auf Gebäude

Von Dr.-Ing. J. GEIGER, Augsburg

DK 699.84

Der Architekt und der Bauingenieur sind gewohnt, mit statischen, also ruhenden, von der Zeit unabhängigen Kräften zu rechnen. Die technische Entwicklung der letzten hundert Jahre im Maschinenbau und Verkehrswesen strebt aber unaufhaltsam nach immer höherer Leistung und trotzdem geringem Aufwand und damit Hand in Hand nach immer höheren Geschwindigkeiten unserer Kraft- und Arbeitsmaschinen, nach intensiverem, schnellerem Verkehr, nach leichteren Bauwerken und auch nach billigeren Baustoffen. Es dürfte daher angebracht sein, den Einfluss dieser Entwicklung auf unsere Gebäude näher zu untersuchen.

Wir fassen zunächst die von *laufenden Maschinen* ausgehenden Kräfte ins Auge. Sie zerfallen in hin- und hergehende und rotierende Kräfte. Die ersteren entstehen hauptsächlich bei Kolbenkraftmaschinen, aber auch bei einer grossen Reihe von Arbeitsmaschinen, unter denen nur der Webstuhl angeführt sei. Die rotierenden Kräfte sind Fliehkräfte nicht vollständig ausgewuchteter rotierender Teile und sind besonders beachtlich bei Turbinen und elektrischen Maschinen. Neben diesen Kräften können auch Kräftepaare eine Rolle spielen. Aus diesem Grunde ist bei rasch laufenden Maschinen neben den statischen auch eine dynamische Auswuchtung unbedingt notwendig.

Bei Maschinen mit hin- und hergehenden Massenkräften können erfahrungsgemäss Kräfte auftreten, die mit der einfachen und der doppelten Drehzahl wechseln; beide können gefährliche Erschütterungen verursachen. Zur Vermeidung von Trugschlüssen sei aber ausdrücklich betont, dass bei Kolbenkraftmaschinen die in ihrem Innern auftretenden Gasdrücke keinen Einfluss auf die Erschütterungen haben. Lediglich die Reaktion des ungleichförmig verlaufenden Drehmoments spielt noch eine wenn auch untergeordnete Rolle.

Ausser laufenden Maschinen können auch Hämmer Erschütterungen erzeugen. Diese leiten über zu den *Verkehrsererschütterungen*, die durch den zunehmenden Kraftwagenverkehr immer mehr an Bedeutung gewinnen. Bei diesen spielen neben Eisen- und Trambahnen hauptsächlich und stark überwiegend die Lastwagen eine Rolle. Die Personenkraftwagen scheidet aus, lediglich Autobusse sind noch zu erwähnen. Dass geteerte oder asphaltierte Strassen viel günstiger als makadamisierte oder gepflasterte Strassen sind, braucht nicht besonders hervorgehoben zu werden. Sehr wichtig ist jedoch, wie die Erschütterungen mit zunehmender Entfernung von der Störstelle abnehmen. Allgemein gilt hier in erster Annäherung das für die Ausbreitung aller Schwingungen einschliesslich Licht, Schall und Erdbeben sowie für Gravitation, Magnetismus, Elektrizität und Wärme geltende Newtonsche Gesetz, nach welchem in einem vollständig homogenen Medium die Erschütterungen umgekehrt proportional dem Quadrat ihres Abstandes von der Störstelle abnehmen. In einem Meter von der Störstelle sind also die Erschütterungen 16mal so stark wie in 4 m Abstand. Da die Strassen-

decke verfestigt ist, haben wir es jedoch nicht mehr mit einem homogenen Halbraum — es heisst Halbraum, weil der Luftraum über der Strasse ausscheidet — zu tun. In diesem Falle nehmen die Erschütterungen etwas schwächer als mit dem Quadrat des Abstandes von der Störstelle ab. Bild 1 zeigt für eine teergebundene Strasse die messtechnisch gefundene Abnahme der Lotrechterschütterungen.

Häufig wird die Frage gestellt, welche Schwingungsausschläge man bei einem Gebäude zulassen kann. Hier ist zu unterscheiden zwischen der Zulässigkeit für das Gebäude und der Zulässigkeit für die darin sich aufhaltenden Menschen. Wie eingehende Untersuchungen gezeigt haben, besteht für die letztgenannten weder ein einfacher Zusammenhang mit dem Schwingungsausschlag noch mit der Schwingungsfrequenz. Am einfachsten ist der Zusammenhang mit der Schwingungsbeschleunigung. Die Abhängigkeit der vom menschlichen Körper gerade noch als zulässig empfundenen Beschleunigung von der Frequenz oder Wechselzahl der Erschütterungen ist in Bild 2 dargestellt. Hierbei handelt es sich um die Einwirkung von Lotrechterschütterungen auf stehende Menschen. Die Kurve wurde an Hand einer grossen Reihe von Versuchspersonen gefunden, die sämtlich erwachsen und gesund waren. Für kranke, insbesondere nervöse Menschen liegt die Kurve niedriger. Das ist wichtig für Krankenhäuser, Sanatorien und Altersheime. Dass ängstliche Personen, insbesondere Damen, bereits etwas geringere Beschleunigungen als lästig empfinden können, sei nur nebenbei bemerkt.

Bei Waagrechterschütterungen kommt man, wenn die Personen liegen, zu annähernd gleichen Ergebnissen. Natürlich sind hier liegende Personen im wachen Zustand gemeint. Bei Leuten mit schlechtem Schlaf sind dagegen die Schwingungsbeschleunigungen, die gerade noch als erträglich empfunden werden, geringer, weil die Leute durch sie am Einschlafen gehindert werden. Lotrechterschütterungen werden von liegenden Personen leichter ertragen; der Erschütterungspegel liegt also hier höher. Das ist verständlich, weil bei liegenden Personen auf den cm^2 Körperauflagefläche eine kleinere Körpermasse als bei stehenden oder sitzenden Personen kommt. Manchmal spielen auch Nebenumstände eine Rolle. So kann sich eine Dame darüber irritieren, wenn ein im Schloss lose steckender Schlüssel infolge der Erschütterungen etwas klappert und sie infolgedessen glaubt, ein Einbrecher arbeite am Schloss herum. Ein ähnlicher Fall liegt vor, wenn eine Person gegenüber einem grossen Spiegel sitzt, der infolge der Lichtstrahlzeigerwirkung die Schwingungen eines an der gegenüber befindlichen Wand hängenden Gegenstandes stark vergrössert wiedergibt.

Betrachten wir jetzt die Kurve Bild 2. Sie hat einen deutlichen Geringstwert bei 5 bis 6 Hertz, d. h. bei etwa 300 Schwingungen pro Min. Hier werden bereits Schwingungsbeschleunigungen von etwa 10 cm/s^2 , d. h. dem hundertsten Teil der Erdbeschleunigung (981 cm/s^2) als lästig empfunden. Das ist deshalb wichtig, weil eine ganze Anzahl Maschinen mit etwa 300 bzw. 150 U/min laufen. Gegenüber höheren Frequenzen ist der Mensch viel unempfindlicher. So empfindet er bei 6000 Schw./min erst über zehnmal so grosse Beschleunigungen als lästig.

Es ist bemerkenswert, festzustellen, dass auch für das menschliche Auge eine ganz ähnliche Kurve gilt, die ebenfalls einen ausgesprochenen Mindestwert besitzt und dass dieser Mindestwert bei der selben Frequenz wie beim menschlichen Gefühl liegt, nämlich bei 6 Hertz (Bild 3).

Wir kommen jetzt zu der *Einwirkung auf Gebäude*. Dass hier nicht die Schwingungsamplitude, sondern die Beschleunigung die massgebende Grösse ist, leuchtet ohne weiteres ein: denn die Beschleunigung multipliziert mit der Masse ergibt die auf das Gebäude einwirkende Kraft.

Es sei zunächst ein kurzer Auszug aus der internationalen *Mercalli-Sieberg-Skala* für Erdbeben gegeben. Darnach wird eine Erdbebenbeschleunigung von 1 bis $2,5 \text{ cm/s}^2$ als mässig, von 5 bis 10 cm/s^2 als stark, von 25 bis 50 cm/s^2 als

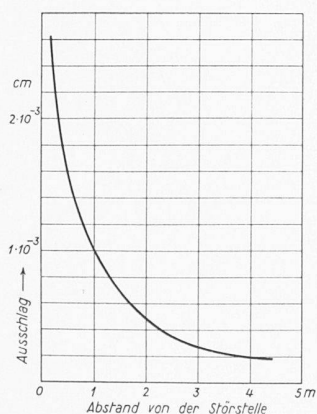


Bild 1 (links). Amplituden der Lotrechterschütterungen in Abhängigkeit der Entfernung von der Störstelle bei einer teergebundene Strasse.

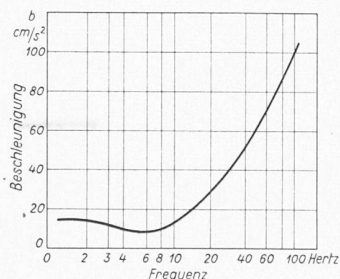


Bild 2 (rechts). Vom gesunden Menschen bereits als lästig empfundene Schwingungsbeschleunigungen in Abhängigkeit von der Frequenz.

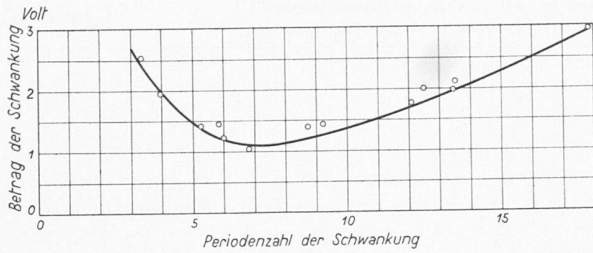


Bild 3. Spannungsschwankungen in Volt, die bei einer Metallfadenslampe von 220 V ein vom ausgeruhten menschlichen Auge gerade noch wahrnehmbares Flimmern verursachen, in Abhängigkeit der Frequenz.

zerstörernd und von 100 bis 250 cm/s² als vernichtend empfunden.

Wenn bei Versuchen mit Strassenfahrzeugen verschiedentlich festgestellt worden ist, dass bei Beschleunigungen von 10 bis 40 cm/s², ja sogar gelegentlich bis 100 cm/s² noch keine Zerstörungen auftraten, so steht dies nicht im Widerspruch mit dieser Skala; denn bei Erdbeben ist der Erschütterungsherd gewöhnlich viele 100 m, meistens sogar viele km von dem erschütterten Gebäude entfernt; die Erschütterungen nehmen also in der Nähe des Gebäudes pro m Entfernung sehr viel weniger ab als bei einer Strassenunebenheit, die nur einige m vom erschütterten Gebäude entfernt ist. Dennoch wäre es verkehrt, die Erschütterungen durch den Verkehr oder durch laufende Maschinen zu sehr auf die leichte Achsel zu nehmen. Ein Erdbeben kommt in Mitteleuropa nur selten vor; die Erschütterungen durch laufende Maschinen oder durch den Verkehr in Hauptverkehrsstrassen dauern aber Tag für Tag acht oder mehr Stunden an. Bei Erdbeben handelt es sich um eine kurzzeitige seltene Beanspruchung, bei Maschinen- und Verkehrserschütterungen um eine sehr lang andauernde und immer wiederholte Beanspruchung. Gegenüber dauernd wechselnden Beanspruchungen sind aber alle unsere Baustoffe sehr viel empfindlicher als gegenüber statischen. Hier handelt es sich um die *Dauerfestigkeit*, die bei Metallen besonders eingehend untersucht worden ist. Es zeigt sich allgemein, dass die zulässige Wechselbeanspruchung um so geringer ist, je grösser die dem Bauteil gleichzeitig auferlegte statische Beanspruchung ist.

Bild 4 zeigt die Abhängigkeit für eine gewisse Stahlsorte. Diese Kurve gibt aber nur den Zusammenhang für hochglanzpolierte Probestäbe an. Bei naturgrossen Bauwerken spielen zwei weitere Einflüsse eine sehr wesentliche Rolle, nämlich 1. die Kerbwirkung, durch welche die Spannung an mehr oder weniger schroffen Querschnittsübergängen ganz gewaltig in die Höhe schnellen kann, und 2. der Grösseneinfluss, der sich dahin äussert, dass bei gleicher Form und gleichem Baustoff ein grösserer Bauteil pro cm² eine beachtlich geringere Festigkeit besitzt als ein kleinerer. Dahingehende Untersuchungen liegen insbesondere für Stahlwellen vor.

Leider sind bei den üblichen Baustoffen unserer Gebäude solche Dauerfestigkeitsschaubilder noch nicht ausreichend vorhanden. Trotzdem ist der Verfasser auf Grund seiner über 40jährigen Erfahrung auf diesem Gebiet in der Lage, gewisse zahlenmässige Angaben zu machen:

Wechselnde Beschleunigungen von 10 bis 15 cm/s², die

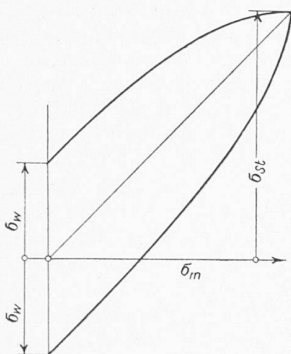


Bild 4. Schwingungsfestigkeit σ_w und Festigkeit für statische Beanspruchung σ_{st} bei einem polierten Probestab aus Stahl in Abhängigkeit der mittleren Beanspruchung σ_m .

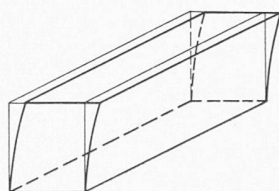


Bild 6. Gebäudekubus im Zustand der niedrigsten Horizontalschwingung in der Querrichtung.

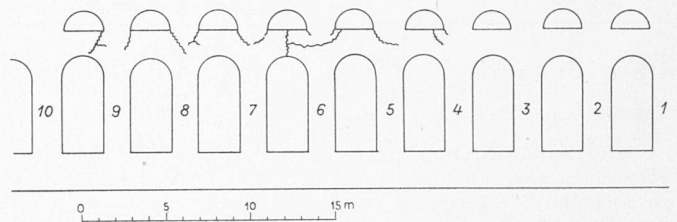


Bild 5. Durchgehende Risse im Ziegelmauerwerk einer Grossgasmaschinenhalle bei einer Wechselbeschleunigung von 12,6 cm/s² nach neunjähriger Betriebszeit.

als stark aber noch nicht als zerstörernd gelten, erzeugen in Backsteingebäuden zwar nicht in kurzer Zeit Risse, wohl aber, wie mehrere Fälle auch bei sehr gut ausgeführten Gebäuden beweisen, mit Sicherheit dann, wenn sie 10 bis 20 und mehr Jahre andauern. Die Stossbeschleunigungen, die bei Strassen unmittelbar an der Stosstelle auftreten, sind ausserordentlich viel grösser und zwar je nach dem Strassenzustand ein Vielfaches der Erdbeschleunigung, wenn es sich um stark ausgefahrene Grosspflasterstrassen handelt¹⁾.

Bei stark ausgefahrenen Strassen ist mit 1 bis 8 Stössen pro m und Lastfahrzeug zu rechnen. Bild 5 zeigt den Fall einer Grossgasmaschinenhalle mit kräftigem Ziegelmauerwerk, bei der durch den Betrieb der Grossgasmaschinen Wechselbeschleunigungen von 12,6 cm/s² auftraten, die nach neunjähriger Betriebszeit zu den dargestellten Rissen führten, die sämtliche durch die ganze Wand durchgehen. Ihre Ausgangspunkte sind die Hohlkehlen bei den Fensteröffnungen, was sich durch die Kerbwirkung ohne weiteres erklärt. Besonders bemerkenswert ist, dass die Beschleunigung niedriger liegt als jene, die der Mensch bei gleicher Frequenz als lästig empfindet.

Die Beschleunigung von 10 bis 15 cm/s² bezieht sich auf Ziegelmauerwerk; bei Stahl- oder Stahlbetonbauten sind die zulässigen Beschleunigungen natürlich höher, aber nur für die Stahlbetonteile, nicht aber für etwaige Ziegelmauern zwischen den Stahlbetonteilen. Die Beschleunigungen sind dabei jeweils in den oberen bewohnten Geschossen gemessen, im Keller oder auf dem Erdboden vor dem Gebäude sind sie ganz erheblich geringer. Zur Vermeidung von Missverständnissen sei noch betont, dass bei Stahlbetonbauten die Rissgefahr wegen der höheren Festigkeit bedeutend geringer ist, dass aber deshalb die Erschütterungen nicht auch naturnotwendig vielmal geringer zu sein brauchen.

Bei Verkehrserschütterungen wird man etwa mit der gleichen Grenzbeschleunigung von 10 bis 15 cm/s² rechnen können; d. h. bei andauernden Wechselbeschleunigungen in dieser Grösse ist damit zu rechnen, dass an Backsteingebäuden im Laufe von zwei oder mehr Jahrzehnten Risse eintreten. Das ist deshalb besonders wichtig, weil heute manchmal Strassen mit ganz schmalen Fusssteig zu Hauptverkehrsstrassen erklärt werden oder weil gar der Fusssteig, um an Strassenbreite zu gewinnen, in das Gebäude selbst hineingelegt wird und die Lastwagen dann mit voller Geschwindigkeit ganz dicht am Gebäude entlang fahren. Bei Hauptverkehrsstrassen mit sehr starkem Lastwagenverkehr sollte der Fusssteig nicht unter 1 m breit sein, wenn man nicht im

¹⁾ Meister: Die dynamischen Eigenschaften von Strassen mit Rücksicht auf ihre Beanspruchung durch Lastkraftwagen. Veröffentlichungen aus dem Institut für Schall- und Wärmeforschung der Technischen Hochschule Stuttgart 1936.

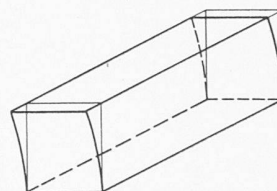


Bild 7. Gebäudekubus im Zustand der niedrigsten Horizontalschwingung in der Längsrichtung.

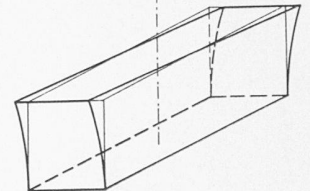


Bild 8. Gebäudekubus im Zustand der niedrigsten Verdrehungsschwingung um die lotrechte Schwerpunktaxe.

Laufe von Jahrzehnten starke Schäden an den Gebäuden riskieren will. Hierauf muss mit grösstem Nachdruck hingewiesen werden; denn von Gebäuden erwartet man eine bedeutend längere Lebensdauer als etwa bei Maschinen.

Um die Strassen im Innern einer Altstadt verbreitern zu können, werden manchmal Arkaden vorgeschlagen, durch die der Fusssteig in das Innere der angrenzenden Häuser verlegt wird. Wenn es sich um reine Stahlbetonbauten handelt, ist dagegen vom Standpunkt der Dauerfestigkeit im allgemeinen kaum etwas einzuwenden. Es ist jedoch bei Hauptverkehrsstrassen notwendig, zwischen den Arkadensäulen und der Strasse selbst einen mindestens 1,5 m breiten, von Lastfahrzeugen nicht befahrenen Streifen zu belassen, da man sonst in den oberen Geschossen mit dem menschliche Wohlbefinden störenden Erschütterungen rechnen muss.

Ganz anders ist dies aber bei Nebenstrassen, in denen nur gelegentlich Lastwagen und dann nur mit niedriger Geschwindigkeit verkehren. Hier kann man mit einem schmalen Fusssteig auskommen oder ihn notfalls in das Gebäude selbst verlegen. Es kommt eben ganz auf die absolute Wechselzahl der auftretenden Beschleunigungen an. Bei sehr stark befahrenen Strassen kommt man im Lauf von 25 Jahren ohne weiteres auf etwa 100 Millionen Lastwechsel. Je grösser aber die Zahl der Lastwechsel ist, um so niedriger ist die zugehörige Wechselfestigkeit. Vielfach wird geglaubt, dass ein Bauteil, der bei einer bestimmten Beanspruchung 10 Millionen Lastwechsel ertragen hat, diese Beanspruchung dann auch bei beliebig weiterer Steigerung der absoluten Lastwechselzahl aushält. Das ist nicht zutreffend. Der Verfasser hat bei Bauteilen aus bestem Stahl sogar noch nach 5 Milliarden Lastwechseln Brüche festgestellt. Die Kurve, welche die Abhängigkeit der Wechselfestigkeit von der Lastwechselzahl darstellt, hat lediglich bei etwa 10 Millionen Lastwechseln ihre schärfste Krümmung und verläuft von dort an wie eine Hyperbel immer flacher.

Oft wird man als Schwingungsfachmann gefragt, ob in dem einen oder andern Fall die Erschütterungen für das Gebäude bereits gefährlich sind. Ganz allgemein ist dazu zu sagen, dass wir noch in keinem Fall, auch bei weit mehr als zwei Jahrzehnte lang andauernder Wechselbeanspruchung, Schäden, wenn auch nur geringer Natur, an Gebäuden irgend welcher Art festgestellt haben, wenn die Wechselbeschleunigungen weniger als 5 cm/s^2 betragen. Bei Beschleunigungen zwischen 5 bis 10 cm/s^2 lässt sich dies nicht mehr so sicher behaupten; hier spielt die Bauart des Gebäudes bereits eine Rolle.

Wir wenden uns jetzt der Berechnung der Schwingungserscheinungen zu. Hier steht nicht, wie man gern vermutet, die Bestimmung der Ausschläge oder der Beanspruchungen im Vordergrund, sondern vielmehr die Ermittlung der Eigenschwingungszahlen. Ein Gebäude — etwa ein viereckiger Backsteinbau — kann sehr verschiedene Schwingungen ausführen und besitzt demzufolge sehr verschiedene Eigenschwingungszahlen. Zunächst kommen die Waagerechtschwingungen quer zu seiner Längsaxe in Frage, Bild 6. Sodann Waagerechtschwingungen in Richtung der Längsaxe, Bild 7. Ferner Lotrechtschwingungen. Weiterhin Verdrehungsschwingungen um die lotrechte Schwerpunktsaxe, Bild 8. Verdrehungsschwingungen um die waagrechte Längs- oder Queraxe kommen bei einem fest im Erdboden veranker-

ten Gebäude solange nicht in Frage, als der Erdboden als einigermaßen unbeweglich angesehen werden kann.

Das Gebäude kann bei den Waagerechtschwingungen quer zu seiner Längsaxe Schwingungen I., II., III. oder höheren Grades ausführen. Die ersten drei sind in Bild 9 dargestellt. Das selbe gilt auch für die anderen vorgenannten Eigenschwingungsmöglichkeiten. Schliesslich können einzelne Teile eines Gebäudes, wie etwa eine Decke, für sich Eigenschwingungen verschiedener Grade ausführen. Darnach erscheint das Ganze hoffnungslos verwickelt. Das ist es aber glücklicherweise für den erfahrenen Fachmann nicht. Die Eigenschwingungen höheren Grades liegen nämlich normalerweise so hoch, dass für sie Resonanz mit der Frequenzzahl einer erregenden Ursache, sei es eine periodisch wechselnde Kraft oder ein Kräftepaar, nicht in Frage kommt. Das ist aber wichtig; denn nur bei Resonanz kommt es im allgemeinen zu gefährlichen Schwingungen. Ausserhalb der Resonanz treten starke Schwingungen nur in zwei Fällen auf, nämlich: 1. bei ungewöhnlich grossen Massenkräften, wie sie bei Grossgasmaschinen manchmal vorkommen, oder 2. bei ganz ungewöhnlich schlechtem Baugrund, wie man ihn z. B. manchmal in Holland antrifft.

Bei Resonanz können sich die Ausschläge stark hochschaukeln. Bei Gebäuden mit Ziegelmauerwerk hat man mit einer 10 bis 20fachen Aufschaukelung zu rechnen, d. h. die auftretenden Beanspruchungen sind 10 bis 20 mal so gross wie bei statischer Wirkung der Kraft. Bei hochwertigem Edelmetall, wie er bei Dampfturbinenschaufeln verwendet wird, haben wir sogar 120fache Aufschaukelung festgestellt, weil ein solcher Stahl eine viel geringere Hysterese, d. h. innere Baustoffreibung besitzt als ein Ziegelmauerwerk. Man soll aber nicht meinen, dass die Dämpfung bei letzterem etwa ganz besonders hoch wäre. Zum Beweis diene Bild 10, das den Ausschwingvorgang einer durch Stoss zu Schwingungen angeregten Ziegelsteinwand darstellt²⁾.

An Hand der Erfahrung auf Grund von Messungen zeigt sich, dass die wichtigste von den zuvor aufgeführten Eigenschwingungszahlen, die für Waagerechtschwingungen quer zur Längsaxe bei mehrgeschossigen Fabrikgebäuden im allgemeinen zwischen 120 und 190 pro Minute liegt. Bei Wohngebäuden liegt sie infolge der geringeren Belastung und der Versteifung durch die Zimmerwände höher, und zwar zwischen etwa 180 und 360 pro Minute. Natürlich sind dies nur rohe Anhaltspunkte. Die richtigen Werte sind von der Bauart des Gebäudes abhängig. Es ist aber durchaus möglich, die wichtigsten Eigenschwingungszahlen annähernd im voraus zu berechnen.

Die Ermittlung dieser Eigenschwingungszahlen stellt allerdings schon in einfachen Fällen mathematisch ziemlich hohe Anforderungen und setzt u. a. Vertrautheit mit hyperbolischen Funktionen voraus. Der Rechnungsgang ist hiebei im wesentlichen der selbe, den der Verfasser für verjüngte und durch Deckbänder verbundene Dampfturbinenschaufelpakete erstmals angegeben hat³⁾.

Allerdings ist man zur Zeit noch nicht so weit, dass man die Eigenschwingungszahlen beliebiger Gebäude auf etwa 1 % genau vorausberechnen kann, wie es im Maschinenbau seit Jahrzehnten durch die Pionierarbeiten des Verfassers auch bei ganz verwickelten Anlagen mit vielfach gekrüppften Wellen möglich geworden ist. Eine Annäherungsrechnung ist aber sehr wohl möglich und durchaus anzuraten. Sie wird um so zuverlässiger, je grösser die Zahl von ausgeführten Gebäuden ist, bei denen dynamische Messergebnisse vorliegen, die sorgfältig ausgewertet sind und die natürlich mit der Rechnung zu vergleichen sind. Schwingungsmessungen namentlich an Industrie- und Bürogebäuden sind daher dringend erwünscht, da nur auf diese Weise die nötige Sicherheit bei der Rechnung gewonnen werden kann. Sie werden immer wichtiger werden, weil es ganz zweifellos feststeht, dass der Verkehr, auch der schwere Lastwagenverkehr, immer mehr zunimmt und weil auch die Verwendung von Maschinen sich immer mehr ausbreiten wird.

²⁾ Scharrer: Ermittlung der Eigenschwingungszahlen rechteckiger Gebäudedecken und -wände, Veröffentlichungen aus dem Institut für Schall- und Wärmetechnik der TH Stuttgart, 1933.

³⁾ «Werft-Reederei-Hafen», Febr. 1943, S. 49–58; Ermittlung der Eigenschwingungszahlen von verjüngten Turbinenschaufeln. «Schiff und Werft», Juli 1943, S. 217/224; Ueber Schwingungen von Turbinenschaufeln.

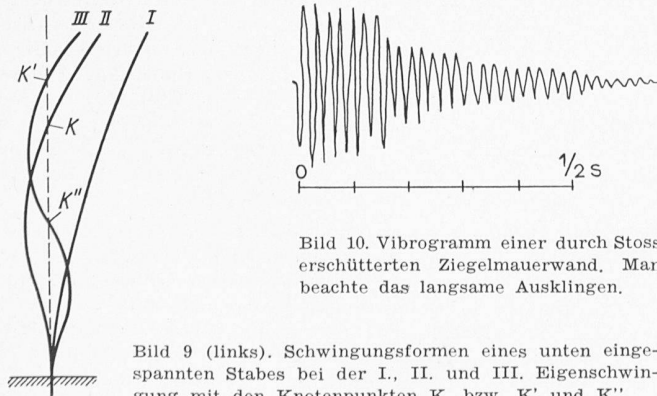


Bild 10. Vibrogramm einer durch Stoss erschütterten Ziegelmauerwand. Man beachte das langsame Ausklingen.

Bild 9 (links). Schwingungsformen eines unten eingespannten Stabes bei der I., II. und III. Eigenschwingung mit den Knotenpunkten K, bzw. K' und K''.

Die Eigenschwingungszahlen von Decken liegen, je nach der Spannweite, ziemlich weit auseinander, die Grundeigenschwingungszahl etwa zwischen 300 und 1200 pro Minute, wobei ganz roh gerechnet die Annahme, dass die Einspannung an den Enden etwa dem Mittel zwischen fester Einspannung und freier Auflagerung entspricht, der Wirklichkeit ziemlich nahe kommt. Bei Gebäuden hat man dagegen mehr mit fester Verankerung im Baugrund zu rechnen.

Einen technisch wichtigen Sonderfall bilden die Schwingungen von Turbinenfundamenten. Ueber diese habe ich die Pionierarbeiten selbst geleistet und die einschlägigen Berechnungsmethoden in der «Z. VDI» 1922 und 1923 sowie später in der «Schweiz. Bauzeitung» 1950, Nr. 31, und 1951, Nr. 21, veröffentlicht, worauf hier verwiesen sei. Ein weiterer Sonderfall ist die Isolierung von Maschinenfundamenten durch elastische Unterlagen. Hierüber sei auf die Veröffentlichung des Verfassers in den «Mitt. der Forschungsanstalten des GHH-Konzerns» 1938 verwiesen, wobei bereits der Einfluss der inneren Baustoffreibung berücksichtigt ist. Es gibt hier regelmässig zwei verschiedene Eigenschwingungszahlen, wobei bei der ersten der Schwingungsknotenpunkt unter und bei der zweiten in der Maschine selbst liegt. Die Vorausberechnung dieser Eigenschwingungszahlen ist durchaus zuverlässig möglich. Eine solche Isolierung kann entweder durch elastische Unterlagen, wie Gummi, oder durch Lagerung der Maschine auf Stahlfedern ausgeführt werden. Im allgemeinen wird man die Maschine auf einen kräftigen, schweren Fundamentklotz stellen, unter dem die Isolierung angebracht wird. Man kann aber bei genügend hoher Drehzahl, genügendem Gewicht und hohem Massenträgheitsmoment auch ganz ohne Fundamentklotz auskommen. Dass dies auch bei ganz grossen Maschinen möglich ist, beweist der Fall eines 2400 PS-Dieselmotors, den ich ohne Fundament lediglich auf Gummiunterlagen aufgestellt hatte. Allerdings muss man in einem solchen Falle dafür sorgen, dass sämtliche Zu- und Ableitungen federnd ausgeführt werden und dass die Maschine beim Anfahren schnell auf Touren und beim Abstellen rasch zum Stillstand kommt, da die kritischen Drehzahlen der elastischen Lagerung, die unter der Betriebsdrehzahl liegen, durchfahren werden müssen. Günstig hierbei, jedoch keineswegs allgemein notwendig, ist die Anbringung von Dämpfern.

Neben der Vorausberechnung ist die *messtechnische Untersuchung* der auftretenden Erschütterungen unumgänglich notwendig. Die vorkommenden Erscheinungen sind manchmal so verwickelt, dass sich nur auf diese Weise hinreichende Klarheit und Sicherheit gewinnen lässt. An dieser Stelle sind einige Ausführungen über die Messgeräte am Platz. Es wird manchmal mit Geräten gemessen, die für den vorliegenden Zweck schlecht geeignet sind. Man halte sich die zuvor angeführten Eigenschwingungszahlen von Gebäuden bis herunter zu 120 pro Minute vor Augen, die in Sonderfällen noch beträchtlich unterschritten werden können. Wenn die Schwingungen eines solchen Gebäudes mit einem Messgerät ermittelt werden, dessen Eigenschwingungszahl nicht bekannt ist, so bedeutet das das selbe, wie wenn jemand mit einem Thermometer misst, ohne zu wissen, ob es Celsius oder Fahrenheit anzeigt. Recht häufig kommt es erfahrungs-

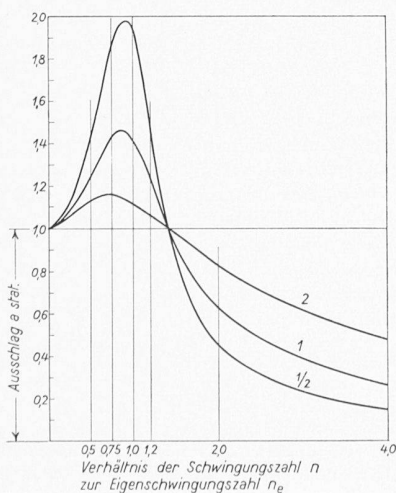


Bild 11. Abhängigkeit der Schwingungsamplitude einer elastisch aufgehängten Masse vom Verhältnis der erzwungenen Schwingungszahl n zur Eigenschwingungszahl n_e bei geschwindigkeitsproportionaler Relativdämpfung.

a_{stat} ist der gleichbleibende Ausschlag an der Aufhängestelle.

Kurve 1 = aperiodische Dämpfung

Kurve 2 = doppelt so starke Dämpfung

Kurve $\frac{1}{2}$ = halb so starke Dämpfung

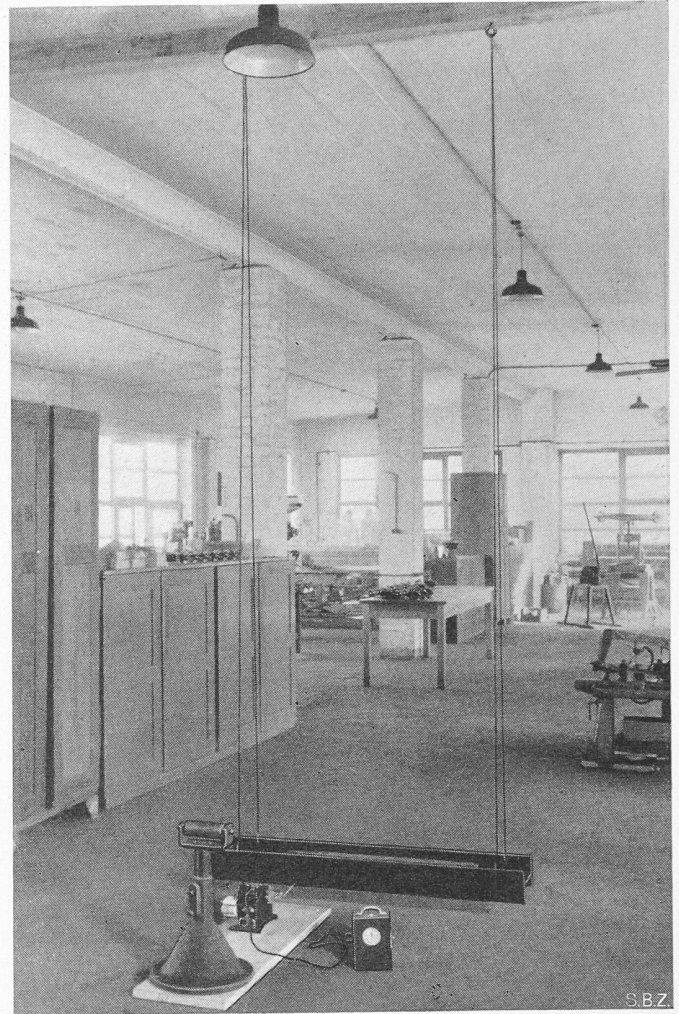


Bild 12. Einrichtung zum Messen von Waagrechtsschwingungen

gemäss vor, dass mit Schwingungsmessern gemessen wird, deren Eigenschwingungszahl in einiger Nähe der zu messenden Schwingungszahl liegt, wodurch wesentliche Fehler und Verzerrungen entstehen. Der Wichtigkeit der Frage wegen sei sie kurz mathematisch behandelt:

Wirkt auf ein schwingungsfähiges Einmassensystem mit der Masse m in $\text{kg s}^2/\text{cm}$ und Federung c in kg/cm eine sinusförmig mit der minutlichen Zahl n wechselnde Kraft P in kg ein, so ergibt sich ganz allgemein unter Vernachlässigung der Dämpfung für den Ausschlag x der Masse m die Beziehung:

$$x = \frac{P}{m(\omega_e^2 - \omega^2)} \left(\sin \omega t - \frac{\omega}{\omega_e} \sin \omega_e t \right) \\ = \frac{a_{\text{stat}}}{1 - (\omega/\omega_e)^2} \left(\sin \omega t - \frac{\omega}{\omega_e} \sin \omega_e t \right)$$

Hierbei ist $\omega = n\pi/30$ die zu der Schwingungszahl n gehörende Kreisfrequenz, $\omega_e = n_e \pi/30$ die zu der Eigenschwingungszahl n_e der Masse m gehörende Kreiseigenfrequenz und a_{stat} der Ausschlag der Masse m , wenn die Kraft P statisch an ihr angreifen würde. Man erkennt, dass sich die entstehende Schwingung der Masse m aus zwei Sinusschwingungen x_1 und x_2 zusammensetzt, von denen die eine (x_1) mit der Schwingungszahl n und die andere (x_2) mit der Eigenschwingungszahl n_e wechselt. Die letztere klingt, je nach der Grösse der Dämpfung, mehr oder weniger rasch ab. Eine gewisse Dämpfung ist immer vorhanden.

Bei einem Messgerät zum Messen von Schwingungsaussschlägen muss man sich eine von den Schwingungen des aufgehängten möglichst wenig beeinflusste Masse schaffen, der gegenüber die Schwingungen der Messstelle registriert werden. Es handelt sich also darum, beide Schwingungen (x_1 und x_2) tunlichst klein zu halten. Bei der ersten (x_1) geschieht dies — und das ist ausschlaggebend — dadurch, dass

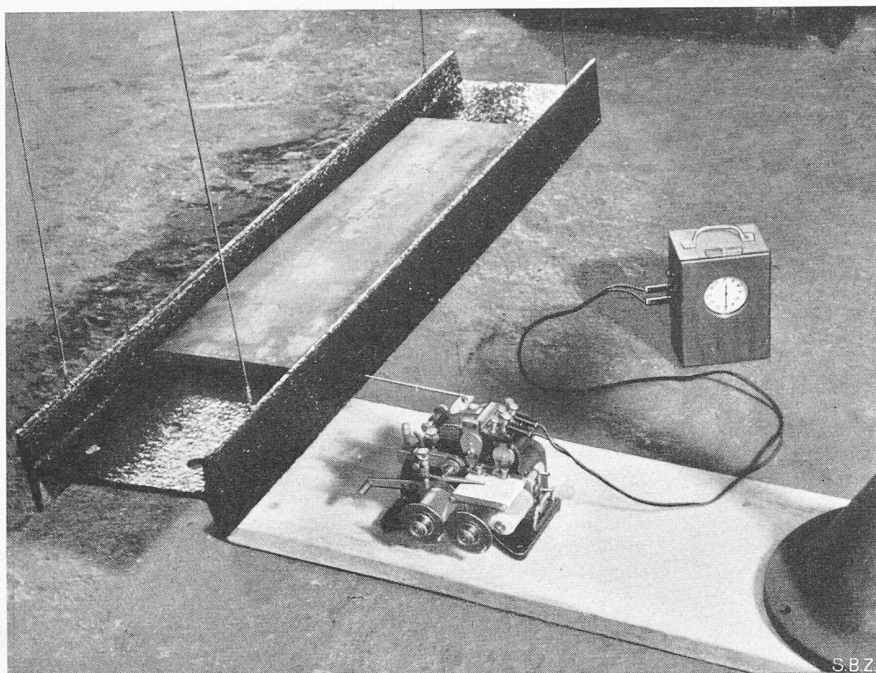


Bild 13. Einzelheiten zu Bild 12. Der I-Träger, der als schwere Masse wirkt, ist an vier Drähten an der Decke aufgehängt und macht die Gebäudeschwingungen nicht mit. Auf dem durch ein Gewicht belasteten Brett steht das Registriergerät mit der horizontalen Nadel, die die Relativverschiebung zwischen der Masse und dem Gebäude aufnimmt und stark vergrößert registriert. Rechts der Zeitmarkengeber.

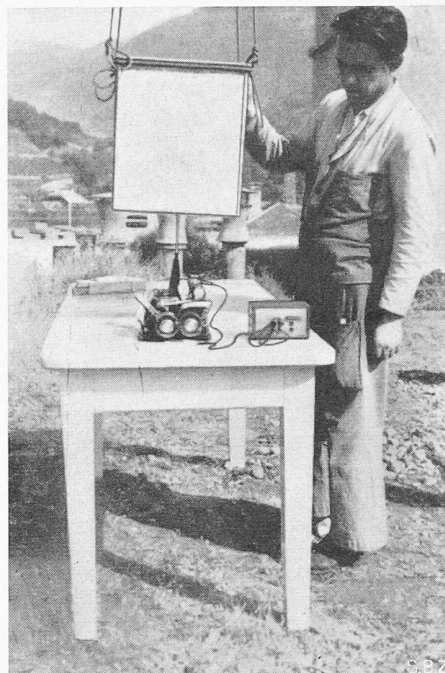


Bild 14. Einrichtung zum Messen von Lotrechtschwingungen auf dem Flachdach eines Gebäudes. Rechts der Zeitmarkengeber, in der Mitte das Registriergerät, senkrecht darüber die Nadel und die schwerere Masse, die an Gummischnüren aufgehängt ist.

man die Eigenschwingungszahl n_e gegenüber n möglichst klein hält. In Tabelle 1 sind unter Weglassung des Gliedes mit $\sin \omega t$ bzw. $\sin \omega_e t$ die Werte von x_1 und x_2 für verschiedene Verhältnisse von n/n_e angegeben. Man sieht, dass es auch für die Kleinhaltung des Gliedes x_2 günstig ist, wenn die Eigenschwingungszahl möglichst tief liegt. Allerdings nimmt x_2 nicht so rasch ab wie x_1 . Dies ist aber nicht schlimm. Ist z. B. n_e gleich $n/6$, so wird man sehr leicht die so auftretende langsame Eigenschwingung der Masse m als solche erkennen und sie bei der Auswertung des verzeichneten Vibrogramms als solche eliminieren können. Ausserdem klingt sie erfahrungsgemäss durch die ohnehin vorhandene Dämpfung des Messgerätes genügend rasch ab. Liegt dagegen die Eigenschwingungszahl n_e ziemlich nahe bei der zu messenden Schwingungszahl n , so ist, wie aus Tabelle 1 hervorgeht, die auftretende Eigenschwingung x_2 viel stärker, z. B. bei $n/n_e = 1,5$ fast 10 mal so gross wie bei $n/n_e = 8$. Ferner ist die auftretende Eigenschwingung viel schwieriger von der mit der Zahl n wechselnden, zu messenden Schwingung zu trennen, weil beide Schwingungen zu wenig voneinander abweichen.

Es wird oft versucht, die Verzerrung, die durch die Nähe der Eigenschwingungszahl entsteht, durch Dämpfung zu verkleinern. Dies ist aber durchaus verkehrt. Eine Dämpfung lässt sich im erschütterten Raum gar nicht anders durchführen, als durch Abhängigkeit vom Relativausschlag (nicht vom Absolutausschlag) der Masse m gegenüber dem Aufhängepunkt. Je stärker aber diese Dämpfung ist, um so mehr sucht der Aufhängepunkt die Masse mitzunehmen, um so grösser werden also auch bei tiefer Lage der Eigenschwingungszahl die Ausschläge der Masse. Bild 11 zeigt dies sehr deutlich.

Ein nur geringer Unterschied der Geräte-Eigenschwingungszahl von der niedrigsten Zahl der zu messenden

Schwingungen ist auch dann völlig verkehrt, wenn das Messgerät eine so starke Dämpfung besitzt, dass eine wesentliche Verzerrung des Ausschlags infolge Resonanznähe nicht mehr eintritt. Durch starke Dämpfung tritt nämlich unweigerlich eine erhebliche Phasenverschiebung auf, die aber sehr von dem Verhältnis der Messfrequenz zu der Gerät-Eigenfrequenz abhängt. Da gewöhnlich mehrere Schwingungen verschiedener Frequenz sich übereinander lagern, so ergeben sich für diese Schwingungen so stark voneinander abweichende Phasenverschiebungen, dass das Diagramm eine u. U. völlig verzerrte Wiedergabe der zu messenden Schwingungen darstellt. Dazu kommt als weiterer Nachteil, dass die Dämpfung häufig stark von Nebeneinflüssen abhängig ist, z. B. die Oeldämpfung von der Art des verwendeten Oels und insbesondere seiner Temperatur. Schliesslich kennt man — insbesondere bei Verkehrserschütterungen — die niedrigste auftretende Schwingungszahl keineswegs mit Sicherheit zum voraus, weshalb auch aus diesem Grunde eine Messanordnung, deren Eigenschwingungszahl sehr viel niedriger als die niedrigste höchstens in Frage kommende Zahl der zu messenden Schwingungen ist, und die deshalb auch diese langsamen Schwingungen noch richtig ohne Verzerrung und Phasenverschiebung zu verzeichnen vermag, unbedingt den Vorzug verdient. Sie bietet ausserdem noch den wichtigen Vorteil, dass man auf eine Dämpfung überhaupt nicht angewiesen ist.

Für den erfahrenen Fachmann ist es aber keineswegs schwierig, die Eigenschwingungszahl genügend tief zu legen, und es besteht nicht der geringste Anlass, ein Messgerät zu verwenden, dessen Eigenschwingungszahl nicht tief genug unter der niedrigsten Zahl der zu messenden Schwingungen liegt. Es ist durchaus nicht notwendig, zu teuren und umständlichen optischen oder elektrischen Verfahren — womöglich mit Verstärkerröhren — zu greifen.

Tabelle 1

n/n_e	x_1/a_{stat}	x_2/a_{stat}	n/n_e	x_1/a_{stat}	x_2/a_{stat}
1,50	0,800	1,20	6,0	0,0286	0,171
2,0	0,333	0,666	8,0	0,0159	0,127
3,0	0,125	0,375	12,0	0,0070	0,084
4,0	0,0625	0,250			

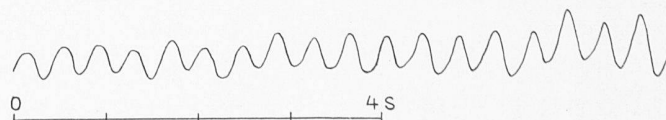


Bild 15. Wiedergabe eines Originaldiagramms von Waagrechtschwingungen eines Webereigebäudes in Originalgrösse. Vergrösserung der Amplituden 7,5fach.

Die für mechanische Schwingungen in waagrechter Richtung am besten geeignete Messanordnung erhält man im allgemeinen, indem man ein Gewicht von 100 oder mehr kg an vier Drähten von solcher Länge aufhängt, dass es infolge tiefer Lage der Eigenschwingungszahl vollständig in Ruhe bleibt. Ein Vibrograph, der entsprechend stark vergrößert, wird an der erschütterten Stelle aufgestellt und mit einer Nadel an das Gewicht angelenkt. Eine Markierung für je 0,2 s sorgt für genaue Ermittlung der Schwingungszahlen. Wir sagen Schwingungszahlen, weil es sich gewöhnlich nicht um einfache harmonische Schwingungen, sondern um eine Anzahl sich übereinander lagernder Schwingungen handelt. Bei Lotrechtsschwingungen verwendet man statt der dünnen bifilar angeordneten Drähte lange Gummischnüre. In beiden Fällen kann man so auch in sehr beengten Räumen die Eigenschwingungszahl der Messanordnung unter 15 pro Mi-

nute und noch erheblich tiefer erniedrigen, was für die praktisch vorkommenden Fälle bei weitem hinreicht.

Die Bilder 12 und 13 zeigen die Art der Messungen bei Waagrechtsschwingungen, Bild 14 jene für Lotrechtsschwingungen. Ein in einer Weberei aufgenommenes Originaldiagramm zeigt Bild 15.

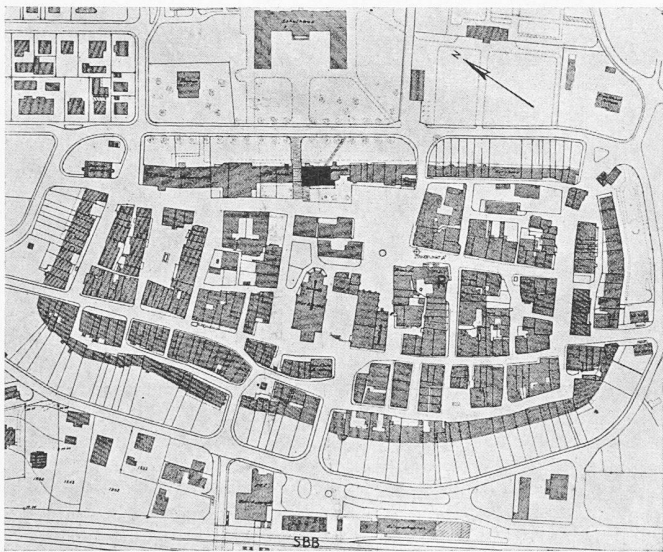
Elektrische Messmethoden sind dann im Vorteil, wenn man von irgend einer weit entfernten Stelle aus die Vibrationen einer ganzen Reihe räumlich voneinander entfernter Messpunkte gleichzeitig aufnehmen und auf einem gemeinsamen Papierstreifen registrieren will. Die hierfür notwendige Messeinrichtung ist natürlich sehr viel teurer als die mechanische und erfordert besonders geschultes Personal. Sie wird vorzugsweise zur Erforschung von Oellagerstätten angewendet.

Projektwettbewerb für ein reformiertes Kirchgemeindehaus in Zofingen

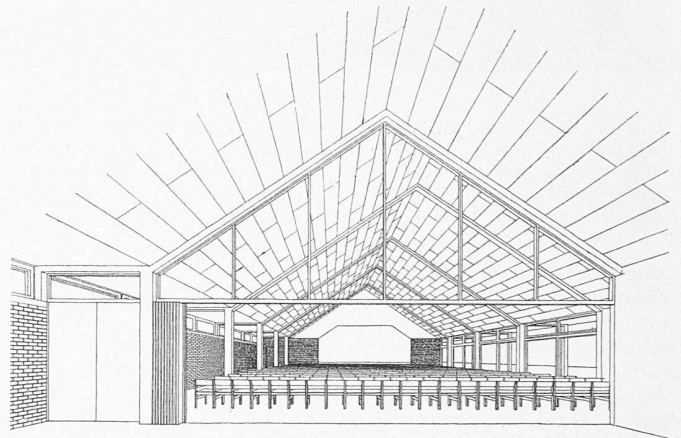
DK 726.934 (494.22)

Eingeladen waren sechs Architekten. Für die Erfüllung der Bauaufgabe stand ein Grundstück im Stadtring zur Verfügung. In den Richtlinien für die Bearbeitung war angegeben worden, dass es sich für die Projektierung weitgehend

darum handle, eine glückliche Lösung der städtebaulichen Anforderungen und der Einpassung des Neubaus in die Gegebenheiten der bestehenden Bauten zu finden. Als Kirchgemeindehaus durfte und sollte es den dadurch gegebenen,

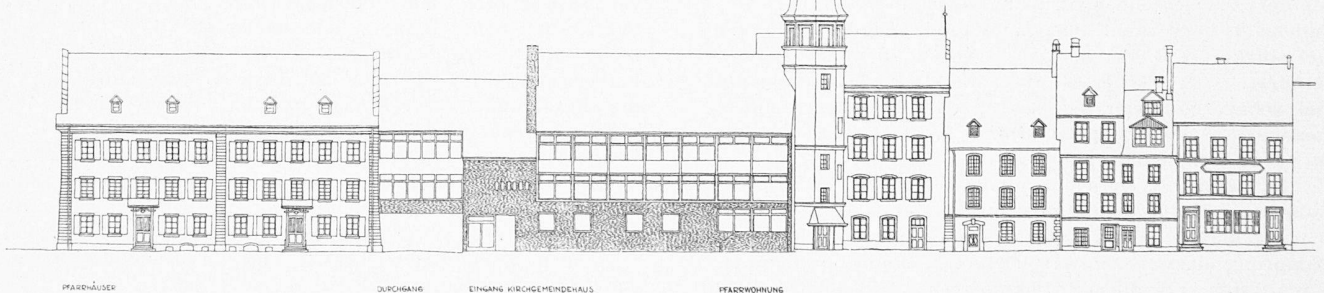


Stadtplan von Zofingen. Masstab 1:6000. R = Rathaus, Schwarz = Bauplatz Kirchgemeindehaus.



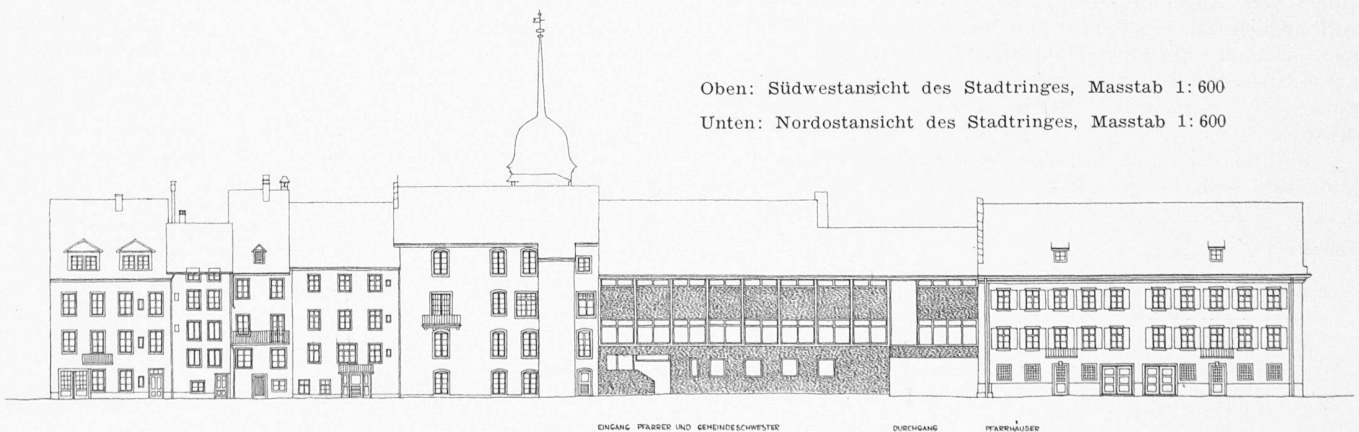
Innenperspektive des Saales

1. Preis (1800 Fr. ohne Antrag auf Weiterbearbeitung) Projekt Nr. 5. Verfasser Arch. ERNST GISEL, Zürich.



Oben: Südwestansicht des Stadtringes, Masstab 1:600

Unten: Nordostansicht des Stadtringes, Masstab 1:600



EINGANG PFRER UND GEMEINDEGEWERTER DURCH IN DIE PASSAGE GESCHÜTZTE LAUBE

DURCHGANG

PFARRHÄUSER