**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
**Band:** 84 (1966)
**Heft:** 36

**Artikel:** Maschinenfundamente in Stahlbeton: Vortrag
**Autor:** Stolz, M.
**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-68978

**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:** 16.07.2025

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

# Maschinenfundamente in Stahlbeton

Von **M. Stolz**, dipl. Ing. ETH, Zürich

DK 621–216/218:624.012.45

Vortrag, gehalten am 15. Oktober 1965 an der ETH anlässlich der Studientagung über dynamische Wirkungen auf Bauwerke, durchgeführt von der S.I.A.-Fachgruppe der Ingenieure für Brückenbau und Hochbau

**Problemstellung**

Das Konstruieren von Maschinenfundamenten gehört zu den reizvollsten Aufgaben für den Bauingenieur, weil sich hier Theorie und Praxis gegenseitig ergänzen und fördern. Vor allem die Praxis tritt mit Forderungen und Wünschen an den Ingenieur heran. Dies kann am Beispiel von Tischfundamenten grosser und kleiner Dampfturbinengruppen am besten verdeutlicht werden:

— Die Bauwerkshöhe, das heisst der Abstand zwischen Fundament und Tischoberkante wird ständig grösser; die Folge davon sind höher werdende Stützen.

— Die Maschinensätze (Dampfturbine mit Hoch-, Mittel- und Niederdruckteilen, Getriebe, Generator, Erreger) werden immer länger, was bei gleicher Stützenzahl zu grösseren Längsträgerspannweiten führt.

— Für Querträger, welche Längsträger und Stützen verbinden, bleibt immer weniger Platz, insbesondere weniger Breite übrig.

— Hilfsaggregate und -betriebe werden immer zahlreicher und umfangreicher, so dass die Stützenquerschnitte eingeengt werden.

Es ist also unverkennbar, dass der Schlankheitsgrad aller Bauteile – Stützen, Längsträger, Querträger – zunimmt und noch zunehmen wird.

Die Bilder 1 bis 4 lassen alle den selben Aufbau erkennen: Auf einer Grundplatte erhebt sich ein Tischfundament, das sich in Stützen, Quer- und Längsträger gliedert. Nicht nur grosse, sondern auch kleine Maschinen wie das Turbogebläse in Bild 1 lassen dem Konstrukteur bisweilen überhaupt keine Freiheit mehr in der Wahl der Stützenquerschnitte, so dass die Stützenelastizität bereits vorgeschrieben ist. Die in Bild 2 dargestellten 2 Kondensatoren bedingten bei dieser Gruppe mit 115 MW Leistung einen relativ schmalen Mittelpfeiler. Der Querträger zwischen MD- und ND-Turbine ist in Breite und Höhe eingeschränkt und durch Schrägen reduziert. Als Besonderheit ist eine Verstimmungsmöglichkeit zu erwähnen, indem Teile der Pfeiler nach Bedarf unwirksam gemacht werden könnten, eine Einrichtung, von der kein Gebrauch gemacht werden musste. Im Zuge der Entwicklung (Bild 3) wurde zunächst versucht, für die Kondensatoren mehr Raum zu schaffen und eine neue Bauform mit der Bezeichnung $Y$ zu entwickeln, welche auch erlaubt, die Vorwärmer im Bereiche der Fundation unterzubringen. Im turbinenseitigen und im generatorseitigen Bereich sind die Verhältnisse indessen immer noch nicht ganz befriedigend, weil Frischdampfleitungen, Statorkühlanlage, Rotorkühlanlage usw. untergebracht werden müssen. Bei ganz grossen Einheiten wie etwa der Gruppe mit 600 MW Leistung in Bild 4 bewegt man sich, was die Abmessungen anbelangt, gegen die obere Grenze des Realisierbaren; mindestens gilt dies für schlaffe Bewehrung. Die Kondensatoren haben überhaupt keinen Platz für Mittelstützen übrig gelassen, so dass die notwendige Versteifung in der Längsträgerhöhe und im Anzug der Stützen (Bezeichnung V) gesucht werden musste.

Die Bilder 1 bis 4 illustrieren die Forderungen, die vom Maschinenhersteller an den Ingenieur gerichtet werden. Dies ruft nach einer Verbesserung der Berechnungsverfahren für diese Bauwerke, die sich infolge steigender Schlankheit der Bauglieder zu Stabwerken entwickelt haben. Dazu kommt die Forderung der Hersteller, die Amplituden erzwungener Schwingungen an den Lagerstellen im Pflichtenheft des Bauingenieurs zahlenmässig genau zu begrenzen. Bild 5 steht als Beispiel für jene komplizierten Fälle, bei denen verschiedene Erregerfrequenzen (hier waren es 1000, 2000 und 3000 U/min bei einem Einphasen-Generator mit Turbine) wirksam sind. Bild 6 zeigt ein Beurteilungskriterium, das als Parameter die Schwinggeschwindigkeit heranzieht. Es kann in praktischer Hinsicht gesagt werden, dass für eine Drehzahl von 3000 U/min (50 Hz) Amplituden der Lagerstellen von 5 $\mu$ erstrebenswert und auch zu verwirklichen sind.

**Die Berechnung erzwungener harmonischer Schwingungen von Stabwerken**

Für einen einzelnen, unbelasteten, geraden Stab mit konstantem Querschnitt, dessen Elemente eine ungedämpfte harmonische Schwingung ausführen, ist der Zusammenhang zwischen den Stabendkräften (Auflagerreaktionen, Einspannmomente) und den Auflagerverschiebungen und -verdrehungen bekannt. Wird beispielsweise der beidseitig eingespannte und gleichmässig mit Masse $\mu$ belegte Stab $ik$ am Ende $i$ durch die Auflagersenkung $y_i$ und die Auflagerdrehung $\gamma_i$ harmonisch bewegt mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega$, so wird das Einspannmoment $M_i$ die folgende Form aufweisen:

$$M_{ik} = \frac{EJ}{L^2} f_1(\lambda)\, y_i \sin \omega t + \frac{EJ}{L} f_2(\lambda) \gamma_i \sin \omega t\,,$$

$$\text{worin } \lambda^4 = L^4 \frac{\mu\, \omega^2}{EJ}\,.$$

Die Funktionen für $M_{ki}$, die Auflagerreaktionen $Y_i$ und $Y_k$ usw., sind analog und können wie die Stabendkräfte und -verformungen infolge der aufgesetzten äusseren harmonischen Belastungen (Störfunktionen) der Literatur entnommen werden.

Im Hinblick auf Turbinenfundamente ist seit langer Zeit versucht worden, für die räumlichen Tragsysteme verbesserte Berechnungsmethoden zu entwickeln, indem willkürliche Entkoppelungen (beispielsweise die Zerlegung in einzelne unabhängige Querrahmen) umgangen werden sollten. Koloušek [1] kommt das Verdienst zu, die Deformationsmethode in die Dynamik räumlicher Stabwerke einge-

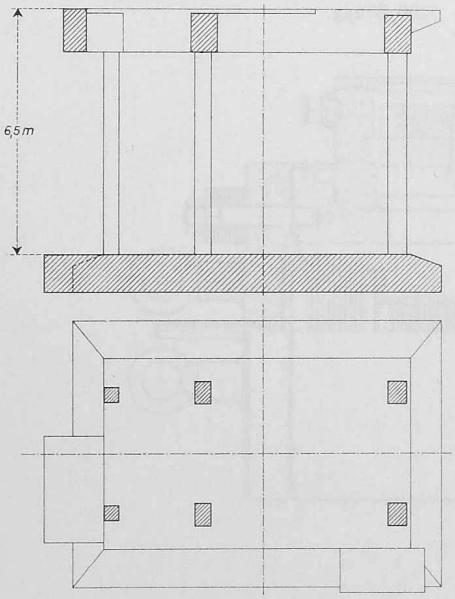


Bild 1. Zentrale Seraing, Masstab 1:200

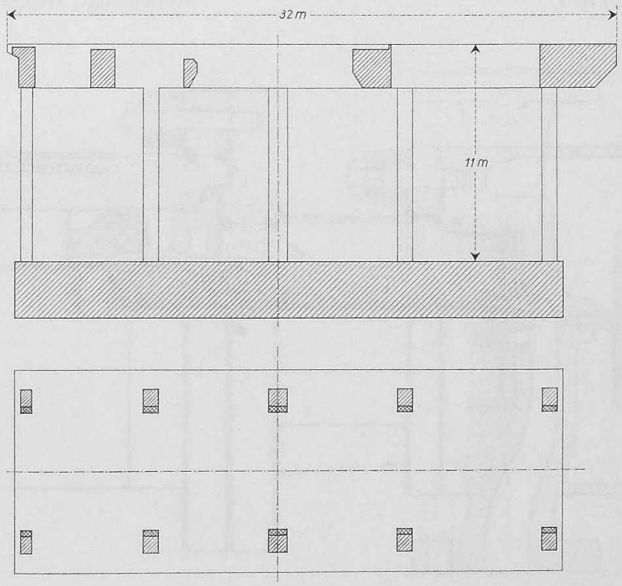


Bild 2. Zentrale Peronnes, 115 MW, Masstab 1:400

führt zu haben. Es ist seither möglich, diese Stabwerke in ihrem ungestörten dreidimensionalen Zusammenhang dynamisch zu untersuchen und namentlich den Verlauf der Beanspruchungen über das ganze Tragwerk zu verfolgen.

Eine Voraussetzung ist, dass die Konstruktion in einem Ersatzsystem zu einem Stabwerk idealisiert wird. Biegesteifigkeit $EJ$, Torsionssteifigkeit $GI$ und Längssteifigkeit $EF$ und Masse $\mu$ pro Längeneinheit brauchen nicht feldweise, sondern lediglich abschnittweise konstant zu sein. Es ist bemerkenswert, dass die Stäbe nicht etwa masselose, sondern gleichmässig mit Masse belegte Biege-, Torsions- und Längsfedern sind. Eine solche Massebelegung ist in Bild 7 dargestellt. Es sind keine Reduktionen von Masse auf benachbarte Knoten nötig. Gleichwohl können einzelne Massenpunkte eingefügt werden, sei es als Verkörperung der Maschinenteile auf Querträgern oder zur Verhinderung von Massenverlusten bei voluminösen Knoten. Für Stäbe variablen Querschnitts sind keine geschlossenen Ausdrücke verfügbar; man behilft sich durch Aufteilung in prismatische Teilstücke (Bild 8).

Wird eine harmonisch schwingende Beanspruchung, eine Störfunktion (Querkraft, Biegemoment, Torsionsmoment, Längskraft) auf dieses räumliche Tragsystem gesetzt, so führt jeder Teil eine synchrone Schwingung, eine *erzwungene Schwingung* durch. Im allgemeinsten Fall führt jeder Knoten $i$ des Tragwerks

3 Verschiebungen $x_i$, $y_i$ und $z_i$ nach den Richtungen $x$, $y$, $z$ und

3 Verdrehungen $\gamma_i^x$, $\gamma_i^y$ und $\gamma_i^z$ um die Axen $x$, $y$, $z$

aus. In jedem im Knoten $i$ angeschlossenen Stab $ik$ werden die

Auflagerreaktionen $X_{ik}$, $Y_{ik}$ und $Z_{ik}$

Stabendmomente $M_{ik}^x$, $M_{ik}^y$ und $M_{ik}^z$

erzeugt, die mit den genannten Deformationen verknüpft werden, indem das dynamische Gleichgewicht am Knoten $i$ formuliert wird. Diese Aufstellung der Gleichgewichtsbedingungen an allen $n$ Knoten des Tragwerks führt auf ein

lineares Gleichungssystem von $6n$ Gleichungen mit

$6n$ Unbekannten $x_i$, $y_i$, $z_i$, $\gamma_i^x$, $\gamma_i^y$, $\gamma_i^z$,

dessen Absolutglieder die vorgegebenen Störfunktionen sind. Die Wurzeln dieses Systems stellen die Amplituden der Deformationen (Verschiebungen, Verdrehungen) dar, woraus die Amplituden der Beanspruchungen (Biegemomente, Torsionsmomente, Querkräfte, Längskräfte) mit Hilfe der Ausgangsgleichungen gewonnen werden können.

In der Praxis können symmetrische und antimetrische Schwingungen meistens getrennt untersucht und die Beanspruchungen vektoriell überlagert werden. Ferner erweisen sich einzelne Grössen oft als vernachlässigbar klein, so dass ein System $3n$ berechnet werden kann.

**Vorzüge der Deformationsmethode**

Auf der *theoretischen* Ebene weist die Deformationsmethode folgende Vorzüge auf:

1. Das Verfahren geht für $\omega = 0$ lückenlos und zwangslos in die Statik über; die Statik erscheint als Sonderfall der Dynamik. Die

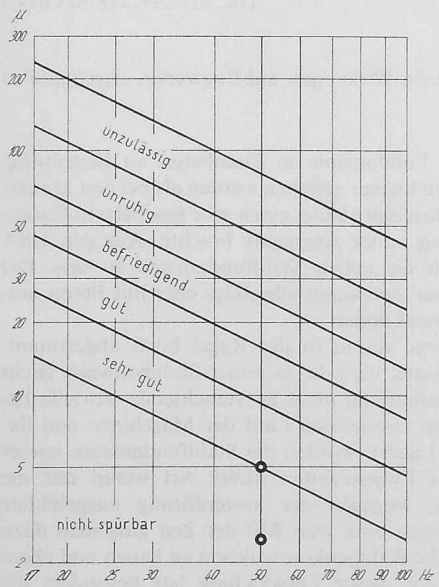


Bild 6. Betriebszustand von Turbinen nach Rathbone-Church-Nelting

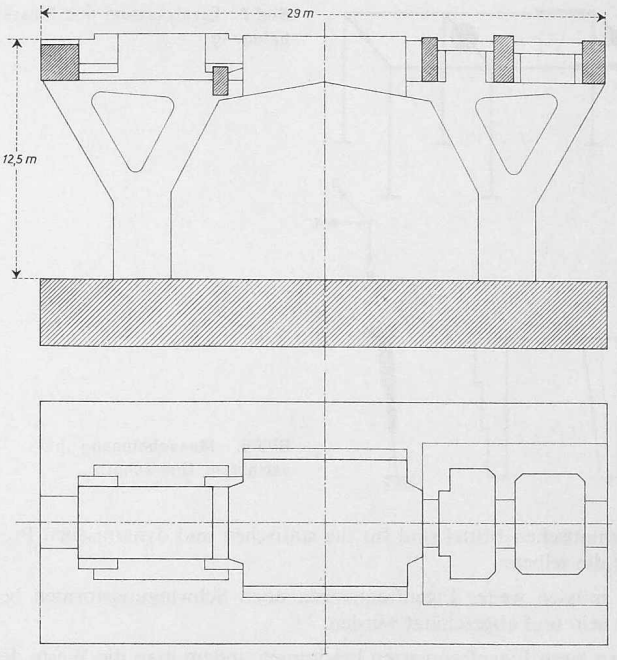


Bild 3. Zentrale Studstrupværket, 150 MW. Masstab 1:400

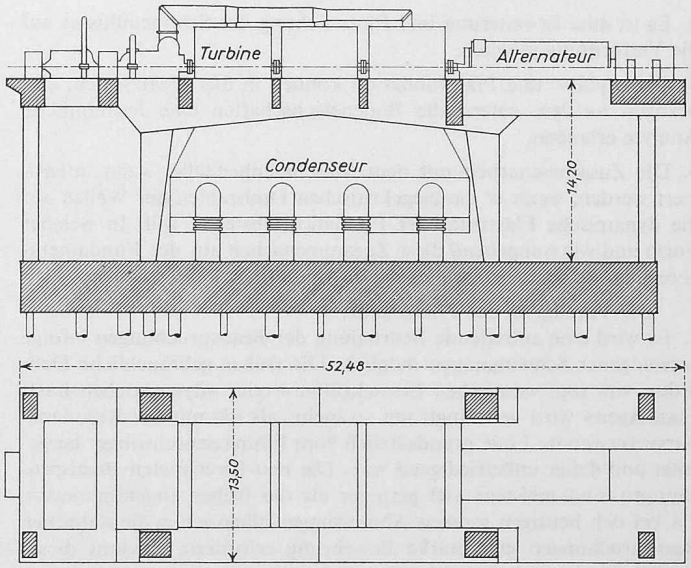


Bild 4. Zentrale Porcheville, 600 MW. Masstab 1:600

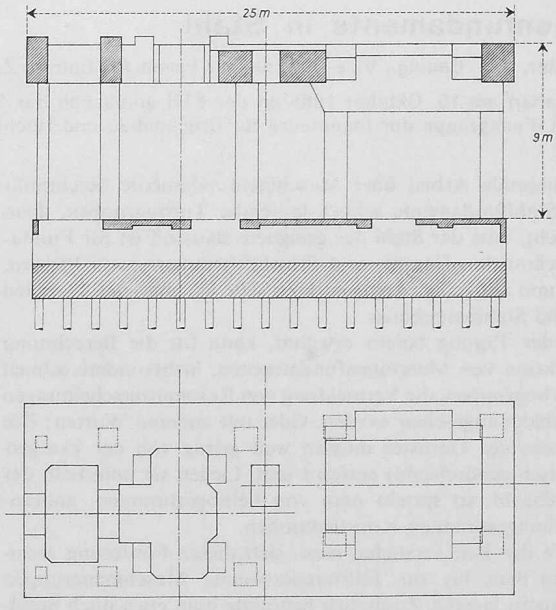


Bild 5. Kraftwerk Lausward, 40 MW. Masstab 1:400

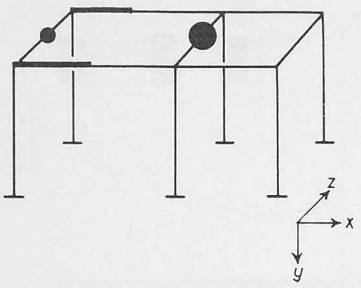


Bild 7. Ersatzsystem und Massebelegung

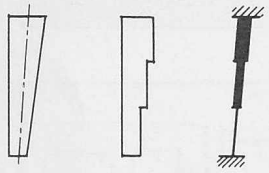

Bild 8. Massebelegung bei variablem Querschnitt

mathematischen Mittel sind für die statischen und dynamischen Probleme die selben.

2. Es müssen weder Eigenfrequenzen noch Schwingungsformen bekannt sein und abgeschätzt werden.

3. Man kann Eigenfrequenzen bestimmen, indem man die Werte der Nennerdeterminanten über verschiedenen Frequenzen aufträgt und die Nullstellen bestimmt.

4. Es ist eine Erweiterung und Einbeziehung des Schubeinflusses auf die Verformung möglich.

5. Grundplatte und Pfahlfundation können in das Ersatzsystem einbezogen werden, sofern die Bodeneigenschaften eine harmonische Analyse erlauben.

6. Die Zusammenarbeit mit dem Maschinenhersteller kann intensiviert werden, wenn er die biegekritischen Drehzahlen der Wellen auf die dynamische Elastizität der Fundation abstellen will. In welcher Form und wie weitgehend diese Zusammenarbeit aus der Fundamentberechnung Nutzen ziehen kann, wird sich in Zukunft weisen.

Die Vorzüge in der *Praxis* sind:

1. Es wird eine zutreffende Beurteilung der Beanspruchungen infolge erzwungener Schwingungen möglich. Die früher gebräuchliche Definition von sog. «statischen Ersatzkräften» oder «dynamischen Lastzuschlägen» wird verdrängt, um so mehr, als die mit der Resonanzkurve verwandte Linie grundsätzlich vom Einmassenschwinger hergeleitet und daher unbefriedigend war. Die neu berechneten Beanspruchungen sind meistens viel geringer als die früher angenommenen. Da bei den heutigen grossen Abmessungen allein schon die statischen Beanspruchungen eine starke Bewehrung erfordern, gewinnt dieser Gesichtspunkt wirtschaftliche Bedeutung.

2. Die statischen Beanspruchungen (Eigengewichte, Schwinden, Temperaturunterschied, Temperaturänderung) sind auf dieselbe Weise zu berechnen; statische und dynamische Berechnung sind aus einem Guss.

3. Der Verlauf des Kräftespiels in torsionssteifen Anschlüssen kann sehr gut überblickt werden, insbesondere auf der Generatorseite.

4. Schlanke Bauteile wie Stützen dürfen unbedenklich höheren Amplituden ausgesetzt werden, sofern die daran befestigten Installationen dies nicht verbieten.

5. Die im Pflichtenheft verlangte Begrenzung der Amplituden kann eingehalten werden. Messungen an ausgeführten Bauwerken bestätigen ihre Grössenordnung. Die heute zur Verfügung stehenden Messergebnisse reichen aber noch nicht aus, die Schwingungsformen zu überprüfen, weil insbesondere die Phasenverschiebungen nicht gemessen wurden.

6. In komplizierten Fällen mit mehreren Erregerfrequenzen ist es möglich, mit ganz wenigen Iterationsschritten zu brauchbaren Entwürfen zu gelangen, ein Vorteil, der jeder Deformationsmethode innewohnt. Unsymmetrie der Konstruktion und Antimetrie der Störfunktionen können berücksichtigt werden. Sind die berechneten Amplituden klein, so kann die Konstruktion als richtig beurteilt werden.

7. Wenn die Stützenlängselastizität (Senkbarkeit der Auflager) vernachlässigt werden darf, ist eine bedeutende Vereinfachung möglich, indem die Beanspruchungen des räumlichen Tragsystems mit einem Ausgleichsverfahren, also mit ganz elementaren Mitteln bestimmt werden können.

8. Die früher oft diskutierten Verstimmungsmöglichkeiten (nachträgliche Änderung von Massen und Federkennwerten) sind im allgemeinen entbehrlich.

**Zusammenfassung**

Es wurde gezeigt, wie sich Praxis und Theorie gegenseitig ergänzen und fördern. Die Bauglieder für die Fundationen grosser Turbo-Generatorgruppen werden immer schlanker. Die in den Grundzügen erläuterte Deformationsmethode, welche die Berechnung der Amplituden und der Beanspruchungen infolge erzwungener harmonischer Schwingungen erlaubt, stellt sich ebenbürtig neben andere Verfahren und ergänzt sie sinnvoll in verschiedener Hinsicht. Sie erweitert unsere Kenntnisse vom Verhalten des Aggregates Fundament-Maschine und gestattet die Berechnung von Amplituden, welche als Beurteilungskriterium herangezogen werden. Sie hilft die Aufgabe lösen, Teile eines Bauwerkes und das zusammenhängende Ganze mit vertretbarem Aufwand zu konstruieren und wirtschaftlich zu bemessen.

**Literatur:**

[1] *Koloušek, V.:* Baudynamik der Durchlaufträger und Rahmen. Fachbuchverlag GmbH Leipzig, 1953.

Adresse des Verfassers: *M. Stolz*, dipl. Ing., Kuttelgasse 1, 8001 Zürich.

# Maschinenfundamente in Stahl

DK 621–216/218:624.014.2

Von **M. Meister**, dipl. Bauing., Vize-Direktor der Firma AG Conrad Zschokke, Döttingen

Vortrag, gehalten am 15. Oktober 1965 an der ETH anlässlich der Studientagung über dynamische Wirkungen auf Bauwerke, durchgeführt von der S.I.A.-Fachgruppe der Ingenieure für Brückenbau und Hochbau

Die vorliegende Arbeit über Maschinenfundamente beschränkt sich auf die Stahlfundamente schnell laufender Turbogruppen, denn ich glaube nicht, dass der Stahl der geeignete Baustoff ist für Fundamente von Schmiede-, Dampf- und Presslufthämmern, von Pressen, Walzwerken und ähnlichen Anlagen. Hier sehe ich eher eine Domäne des Beton- und Stahlbetonbaues.

Wie an der Tagung bereits erwähnt, kann für die Berechnung und Konstruktion von Maschinenfundamenten, insbesondere schnell laufender Turbogruppen, die Vermeidung von Resonanzerscheinungen als Hauptproblem angesehen werden. Oder mit anderen Worten: Die Eigenfrequenzen des Gerüstes müssen weit genug von der Erregerfrequenz (Maschinendrehzahl) entfernt sein. Liegen sie unterhalb der Maschinendrehzahl, so spricht man von tiefabgestimmten, andernfalls von hochabgestimmten Konstruktionen.

Im Laufe der Zeit versuchte man, sich dieser Forderung anzupassen, indem man bis zur Jahrhundertwende Maschinengruppen meist auf Mauern lagerte. Zusätzlich benötigte man etwa noch Stahlträger, die man von Mauer zu Mauer legte. Ab etwa 1910 gewannen in zunehmendem Masse Fundamente in Eisenbeton an Bedeutung. Die Abmessungen konnten kleiner gehalten werden als bei den Mauerfundamenten, was dem Maschinenbauer einen sehr geschätzten Raumgewinn zur Unterbringung seiner Aggregate brachte. Aus den USA kamen bald darauf auch die ersten Stahlfundamente zu uns. Die ersten Ausführungen dieser Art waren allerdings eher mit Beton umkleidete Stahlträger-Konstruktionen.

Alle diese Fundamente waren in der Regel hoch abgestimmt. Nachdem man erkannt hatte, dass die in reiner Stahlbauweise leicht zu erreichende, tiefe Abstimmung nicht zu verachtende Vorteile besitzt (ich erwähne nur den zwanglosen Lauf der Maschinen und dadurch die Schonung der Lager), wurden die Stahlfundamente immer beliebter. Bei den ersten Fundamenten dieser Art waren nur die Stützen tief abgestimmt, wogegen der kastenförmig ausgebildete Turbotisch noch hoch abgestimmt war. Mit der Zeit ging man dazu über, den Tisch als einfache Rahmenkonstruktion zu bauen und ebenfalls tief abzustimmen. An dieser Entwicklung hat besonders die Firma BBC, Baden, grossen Anteil. Man kann also zusammenfassend