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

Artikel: Maschinenfundamente in Stahl: Vortrag
Autor: Meister, M.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-68979

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: 12.12.2025

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

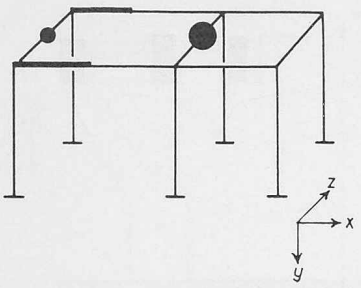


Bild 7. Ersatzsystem und Massebelegung

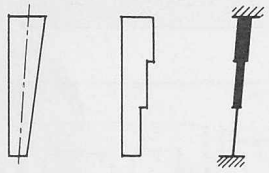


Bild 8. Massebelegung bei variablem Querschnitt

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

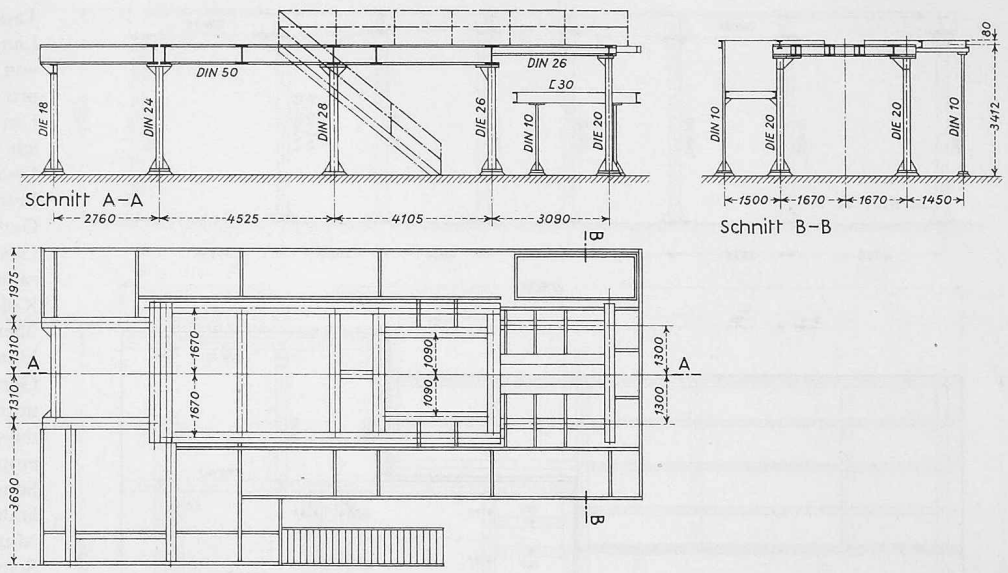
Die vorliegende Arbeit über Maschinenfundamente beschränkt sich auf die Stahlfundamente schnell laufender Turbogruppen, denn ich glaube nicht, dass der Stahl der geeignete Baustoff ist für Fundamente von Schmiede-, Dampf- und Presslufthämmern, von Pressen, Walzwerken und ähnlichen Anlagen. Hier sehe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

Bild 2. Stahlfundament für eine kleinere Anlage. Masstab 1:200



sagen, dass die Entwicklung von Fundamenten für Turbogruppen von der Auflagerung auf Mauern über Stahlbetonkonstruktionen zu reinen Stahlfundamenten geführt hat. Es sei jedoch betont, dass heute beide Konstruktionsarten, Stahlbeton- und Stahlbau, ihre Anhänger haben.

Die *Berechnung* tief abgestimmter Turbofundamente verlangt einige Sorgfalt; denn es ist möglich, dass Oberschwingungen des Gerüstes in den Bereich der Normaldrehzahl der Maschinen zu liegen kommen, was natürlich vermieden werden muss. Da aber der Aufbau der Fundamente klar und übersichtlich gestaltet werden kann und überdies der Elastizitätsmodul von Stahl praktisch konstant und von der Zeit unabhängig ist, können die Eigenschwingungszahlen verhältnismässig genau vorausbestimmt werden. Allerdings hat es keinen Sinn, die Rechnung auf die Spitze zu treiben, da verschiedene zusätzliche, nicht immer erfassbare Einflüsse eine Rolle spielen können. Ich möchte in diesem Zusammenhang den bekannten Fachmann *E. Rausch* zitieren, der im Schlusswort eines Meinungsaustausches in der Zeitschrift «Der Bauingenieur» 1964, Heft 9, folgende Auffassung vertrat:

«Eine weitere Verfeinerung der Rechnung ist aber gar nicht erforderlich, da bei Turbinenfundamenten Einflüsse vorhanden sind, die sich der Berücksichtigung entziehen und mit einer Streuung der Ergebnisse gerechnet werden muss. Solche Einflüsse sind:

— eine zusätzliche Aussteifung der Fundament-Tischplatte durch die Maschinen-Anlage,
— Kopplungswirkung der Maschinenläufer,
— Schwingungseinfluss des angekoppelten Kondensators, der nicht als steifer Körper betrachtet werden kann,
— unvermeidliche Ungenauigkeit bei der Annahme der Querschnittswerte,
— Streuung des Elastizitätsmasses bei Stahlbeton.»

Abschliessend bemerkt Rausch:

«Im übrigen sind hier Feinheiten nicht am Platze, da man auf sehr grobe Schätzungen angewiesen ist.»

Ich glaube, man kann seinen Worten im allgemeinen zustimmen, auch wenn die obige Aufzählung schwer erfassbarer Einflüsse nicht vollständig ist.

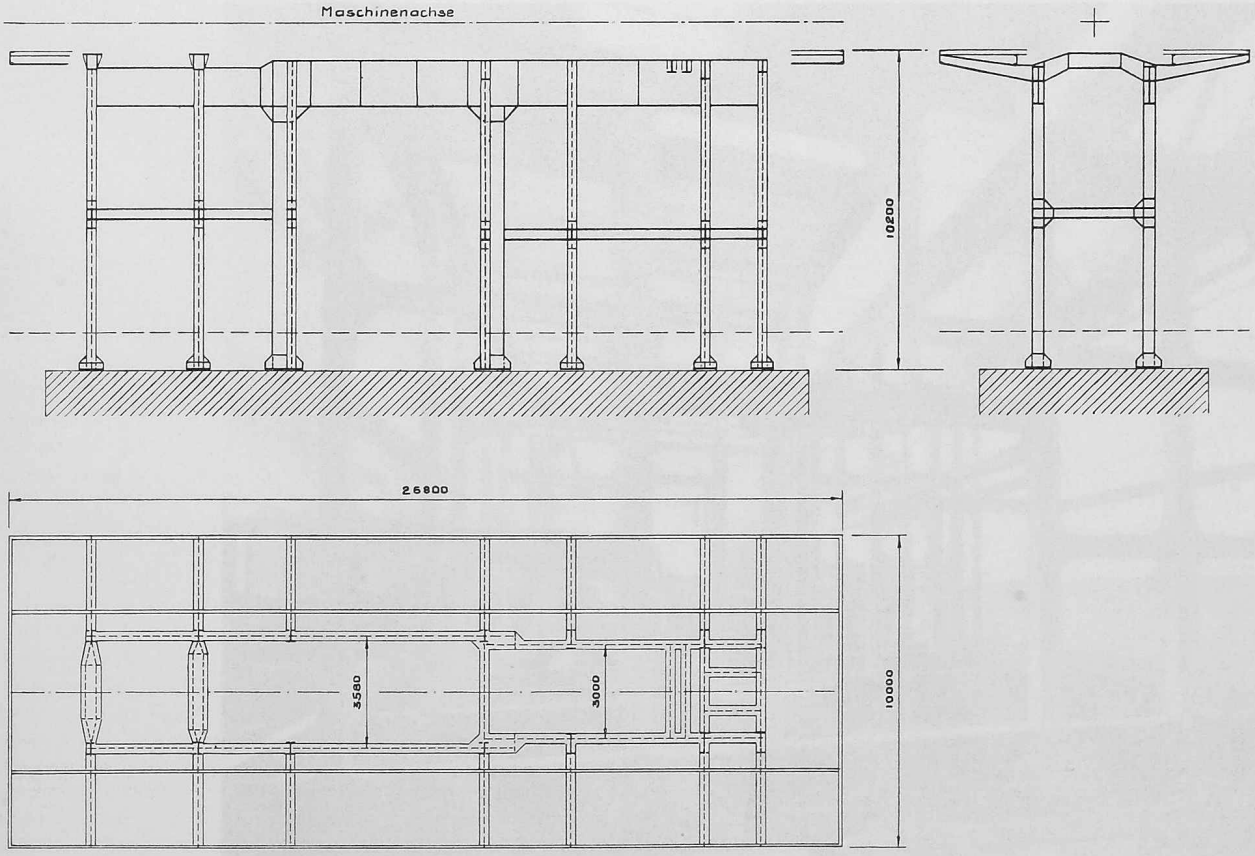


Bild 1. Stahlfundament für eine Dampfturbinen-Generatorengruppe mit einer Leistung von 56 MW. Masstab 1:250

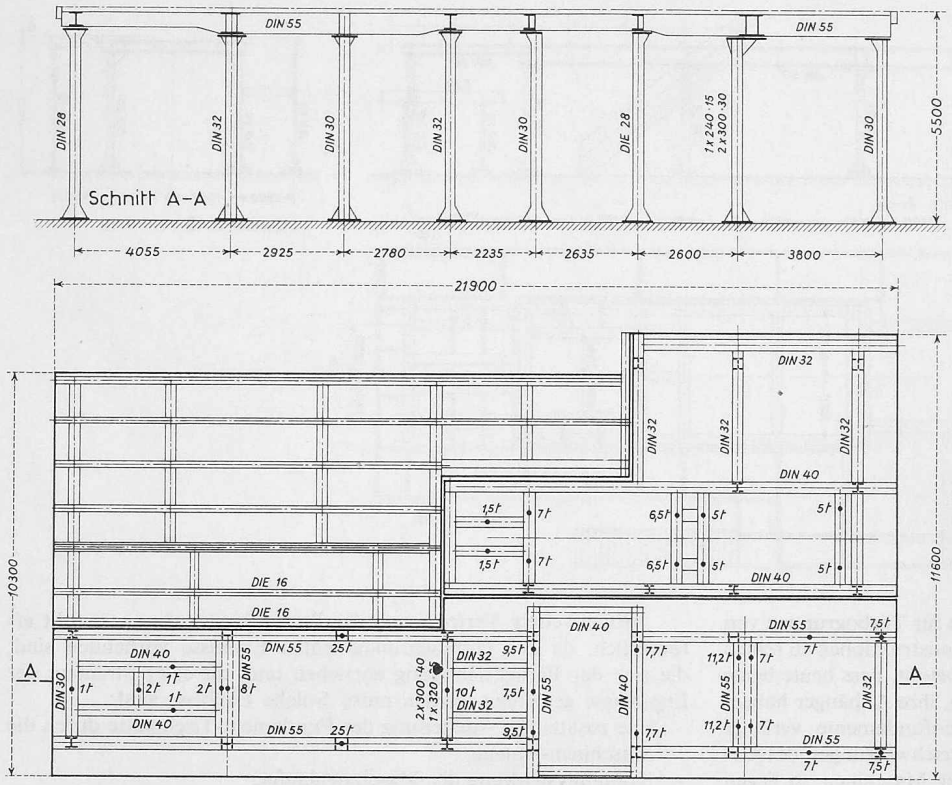


Bild 3. Drei ineinandergeschachtelte Fundamente, welche voneinander unabhängig sind. Masstab 1:200

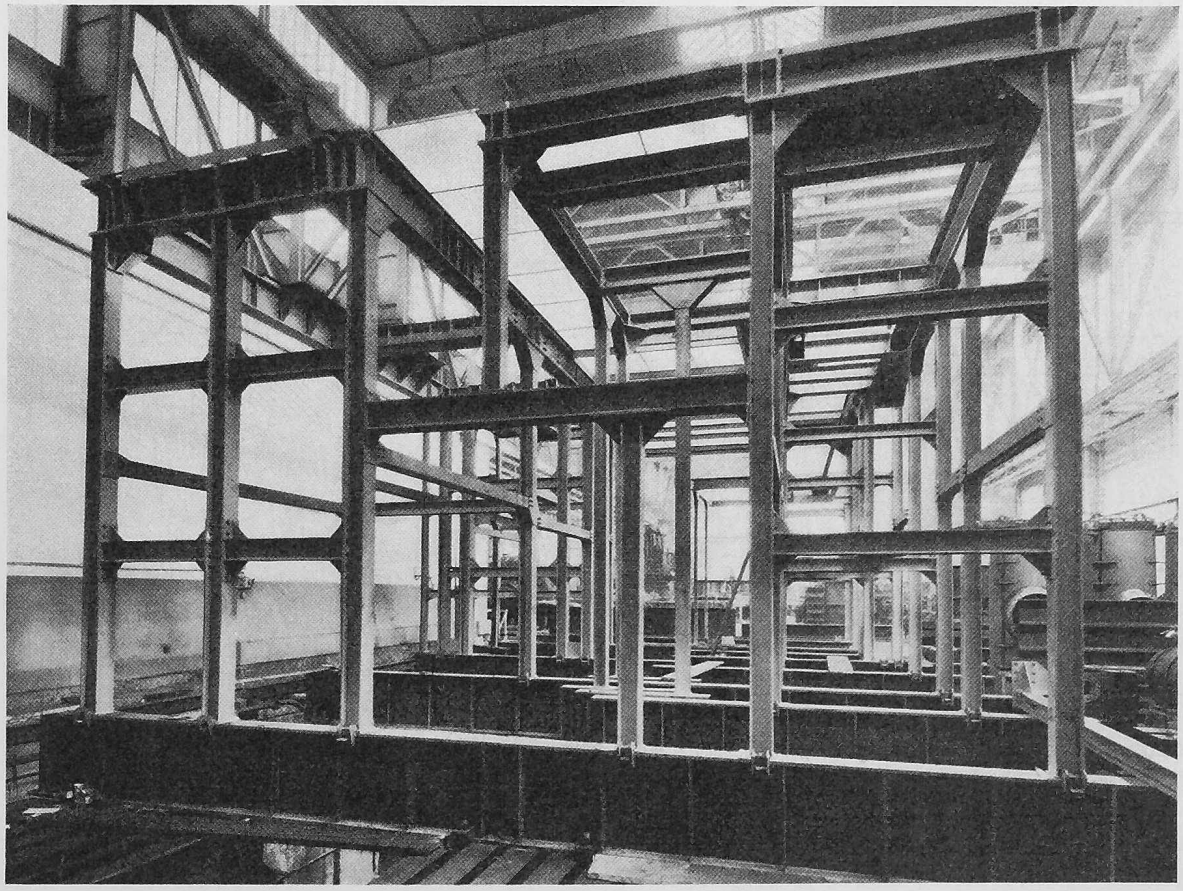
Wie verwirrend solche Einflüsse bezüglich ihrer Entstehung und ihrer Auswirkungen sein können, zeige das folgende Beispiel aus der Praxis: Nach unseren Berechnungen und Plänen war im Ausland ein Turbofundament gebaut worden. Noch während der Montage der Maschinengruppe traf der alarmierende Anruf ein, dass der ganze Tisch in Richtung seiner Längsaxe schwinge. Da die Maschine noch nicht lief, war mir die Meldung unverständlich. Auf der Baustelle stellte ich fest, dass erst der untere Statorteil der Turbine montiert war. Tatsächlich bewegte sich der Tisch in seiner Längsaxe hin und her mit einer Amplitude von rd. 2 mm, Frequenz 3–4 Schwingungen pro s. Die Ursache war nicht zu erkennen. Um meine Verlegenheit zu verbergen, bat ich den mich begleitenden Ingenieur des Unternehmens, mir zunächst einmal den Betrieb zu zeigen. Etwa 60 bis 80 m vom Gerüst entfernt, stiess ich auf einige grosse Gaskolbenmaschinen: Kolbenstangen parallel zur Längsaxe unseres Gerüstes, 3÷4 Kolbenbewegungen pro s. Offensichtlich übertrug sich diese Bewegung durch den Untergrund auf das Gerüst. Die Masse des Gerüstes, zusammen mit der montierten, unteren Statorschale, war gerade so gross, dass das Gerüst in Resonanz geriet. Ich empfahl, weiter zu montieren und die Schwingungen zu vergessen. Mit den veränderten Massen der fertig montierten Maschine zeigten sich denn auch keine Schwingungen mehr. Wenn sich allerdings mit der endgültigen Masse eine Resonanzlage eingestellt hätte, wäre es etwas peinlicher, aber auch nicht hoffnungslos gewesen.

Stellt man an einer fertig montierten Anlage unzulässige Schwingungen am Stahlfundament fest, so ist die Behebung dieses Mangels verhältnismässig einfach. In den meisten Fällen genügt es, den schwingenden Teil zu verstimmen, sei es durch Aufschweissen von Laschen, sei es durch den Einbau zusätzlicher Diagonalen und Riegel. Bei den wenigen mir bekannt gewordenen Fällen ist man jedenfalls mit diesen Methoden immer zum Ziele gekommen.

Anhand von Beispielen von ausgeführten Stahlfundamenten sollen noch einige Grundsätze erläutert werden.

Bild 1 zeigt den Übersichtsplan eines Stahlfundamentes in Holland. Es dient zur Aufnahme einer Dampfturbinen-Generatorgruppe mit einer Leistung von 56 MW. Die Betriebsdrehzahl der Maschinen

Bild 4. Stahlfundamente für eine Gasturbinengruppe



beträgt 3000 U/min. Die vertikalen Eigenfrequenzen betragen: Grundschwingung 1100 U/min, erster Oberton 2100 U/min; die höheren Obertöne liegen über 3600 U/min. Man kann also sagen, dass das Fundament für die Grundschwingung und den ersten Oberton tief, für höhere Obertöne hoch abgestimmt ist.

Bild 2 zeigt die Schemazeichnung einer kleinen Anlage in Italien. Das Bild zeigt die übliche Konstruktion mit dem rahmenartigen Aufbau des Tisches.

Die Schemazeichnung in Bild 3 zeigt eigentlich 3 ineinandergeschachtelte Fundamente, die in Schweden aufgestellt wurden. Der im Grundriss unten dargestellte Teil dient zur Aufnahme einer Niederdruckanlage mit einer Maschinenumdrehungszahl von 3000 U/min. Der Teil oben rechts trägt den Hochdruckteil mit 4430 U/min, und der Teil oben links nimmt die zusätzlichen Apparate auf. Alle drei Gerüste stehen vollständig für sich, um gegenseitige Beeinflussungen zu vermeiden.

Bild 4 zeigt ein Stahlfundament für eine Gasturbinengruppe in Lima, Peru. Dieses Fundament wurde zusammen mit der ganzen Maschinenanlage im Prüfstand der BBC in Baden aufgebaut und untersucht[1]). Sie konnte auf diese Weise unter den gleichen Bedingungen ausprobiert werden wie am definitiven Standort. Das ist bei Neuentwicklungen wertvoll und kann wohl nur mit Stahlfundamenten erreicht werden. Während des Probebetriebes wurden durch das Institut für Baustatik an der ETH auch Schwingungsmessungen am Fundament selbst ausgeführt. Bei der normalen Drehzahl der Maschinen waren meistens Ausschläge gar nicht messbar (kleiner als 5/1000 mm). Beim Durchlaufen einer Resonanz wurde als grösste Amplitude 23/1000 mm gemessen. In den Bodenfundamenten waren keine messbaren Erschütterungen festzustellen.

Dass Turbinenfundamente Bauwerke beträchtlichen Ausmasses

[1]) siehe SBZ 1947, Nr. 32, S. 438

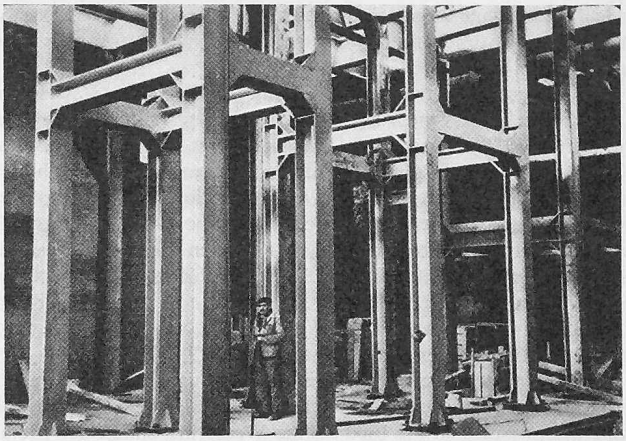


Bild 5. Ausschnitt eines Fundamentes für eine Dampfturbine und einen Veloxkessel

sein können, zeigt der Teilausschnitt eines Fundamentes in Luxemburg für eine Dampfturbine und einen Veloxkessel (Bild 5). Das Gewicht des Gerüstes beträgt rd. 135 t. Der auf dem Bild sichtbare Mann erlaubt, die Grössenverhältnisse abzuschätzen.

Der vorliegende Abriss konnte die Probleme, die beim Bau von Stahlfundamenten auftreten, nur streifen. Etwas überspitzt und idealisiert lassen sich die Hauptprobleme vielleicht so ausdrücken: Die Fundamente sind so zu entwerfen, dass sie unter den dynamischen Einwirkungen nicht dynamisch beansprucht werden, und dass sie möglichst wenig Platz einnehmen.

Adresse des Verfassers: *M. Meister*, dipl. Bauing., Vize-Direktor der AG Conrad Zschokke, 5312 Döttingen.

Zur Frage der Beeinflussung des Grundwassers durch Ablagerungen von Verbrennungsrückständen und Müllkompost

DK 628.191:628.496

Von Dr. **R. Braun**, EAWAG, Zürich

Die Redaktion der Schweizerischen Bauzeitung hat uns ersucht, zum Aufsatz «Einwirkung abgelagerter Müllasche und Müllkompostes auf das Grundwasser» von *O. Wolfskehl* und *E. Boye* (SBZ 1966, Heft 3, S. 61–63 und H. 19, S. 358) abschliessend Stellung zu nehmen.

Die Verfasser kommen auf Grund von Auslaugungsversuchen im Laboratorium mit Schlacken der Müllverbrennungsanlage Lausanne und mit Müllkompost des Kompostwerkes Bad Kreuznach (Deutschland) zum Schluss, dass für das Grundwasser die Ablagerung von Müllschlacke ganz wesentlich ungefährlicher sei als die Ablagerung von Müllkompost. Zu dieser Schlussfolgerung fühlen sich die Verfasser berechtigt, da die Auslaugungsversuche im Labor ergeben haben, dass aus dem Kreuznacher Kompost weit grössere Mengen an wasserlöslichen Stoffen extrahiert werden konnten als aus der Lausanner Schlacke.

Wir sind der Ansicht, dass die in diesem Artikel angeschnittene Frage nicht mit Hilfe einiger Experimente im Laboratorium – die wir zudem nicht als repräsentativ betrachten – endgültig beantwortet werden kann. Die Verhältnisse und Bedingungen eines Laborversuches sind doch von denjenigen einer Deponie solcher Stoffe im Gelände grundverschieden in bezug auf die mit dem Abfallmaterial in Berührung kommende Wassermenge, auf die Verdunstung, auf Wasserkapazität und Ionenhaltevermögen des abgelagerten Materials, Beschaffenheit des Untergrundes u. a. m.

Obschon auch wir keineswegs in der Lage sind, mit den folgenden Ausführungen diesen ganzen Fragenkomplex zu lösen, möchten wir uns zum erwähnten Aufsatz einige kritische Bemerkungen erlauben:

a) Zur Auswahl der untersuchten Proben

Schon die Wahl der Schlacken- bzw. Kompostprobe scheint uns fragwürdig. Es dürfte auch den Verfassern bekannt sein, dass sich deutscher und schweizerischer Hausmüll insbesondere im Aschegehalt wesentlich unterscheiden. Als Grundlage für eine solche Untersuchung, zumal, wenn man derart weitgehende und verallgemeinernde Schlussfolgerungen ziehen will, sollten zumindest Müllproben einigermassen gleicher Herkunft und gleichen Charakters miteinander verglichen werden.

Weiterhin sollte doch unterschieden werden zwischen Schlacken, die im rezirkulierenden Wasserbad und Schlacken, die im durchlaufenden Bad abgeschreckt werden. Ein grosser Teil der wasserlöslichen Stoffe aus Schlacke und Flugasche findet sich bereits gelöst im Wasserbad! Wird dieses rezirkuliert, so reichert es sich immer mehr an mit löslichen alkalischen Salzen, sodass sein pH-Wert auf über 12 ansteigen kann. Wird das Wasser des Schlackenbades ständig erneuert (also nicht rezirkuliert) und in die Kanalisation abgeführt, so enthält die Schlacke nachher weniger lösliche Salze als beim Rezirkulationsverfahren. Zumindest sollte doch in einer solchen Untersuchung auch über diesen Punkt etwas ausgesagt werden.

b) Zur Methodik der Untersuchung

Wir vermissen in der Untersuchung Angaben über die bei den Auslaugungsversuchen verwendete Wassermenge, und es ist uns nicht klar, wie auf Grund der 10 Extraktionen, die mit jeder Probe durchgeführt wurden, das Resultat «mg/1» verstanden werden soll. Wäre es nicht eindeutiger, das Resultat in % der Trockenschlacke anzugeben? Unklar erscheint auch, wie bei der 8., 9. und 10. Extraktion aus der Schlacke immer noch genau dieselben, nicht unwesentlichen Mengen löslicher Stoffe (gemessen am Abdampfrückstand) extrahiert werden konnten. Auch bei den Untersuchungen mit Kompost scheint uns die Differenz von Extraktion zu Extraktion (namentlich bei den 3 letzten) auffallend gering. Wie verläuft die Auswaschkurve weiter, d. h. bei welcher Anzahl von Extraktionen wäre das Material endlich wasserunlöslich?

Da die Frage der eventuellen Beeinflussung des Grundwassers durch abgelagerte Schlacke einerseits oder durch abgelagerten Kompost anderseits von weittragender Bedeutung ist, hat auch unsere Anstalt seit fast zwei Jahren Untersuchungen in dieser Richtung durchgeführt. Obschon eine grössere Anzahl von Schlacken- und Kompostproben aus den verschiedensten Verbrennungs- und Kompostierungsanlagen auf ihren Gehalt an löslichen Stoffen geprüft worden sind, hätten wir nicht den Mut gehabt, auf Grund von Laborversuchen derartige Schlussfolgerungen zu ziehen, wie es die Verfasser getan haben.

Bei unseren Untersuchungen wurden die Schlacken- und Flugasche-Proben jeweils bei 105 °C getrocknet und 50 g der feingemahlenen Probe in 400 ml destilliertem Wasser 24 Stunden lang ausgeschüttelt. Mit den Kompostproben wurde gleich verfahren, jedoch