

ASEISMIC DESIGN OF TURBINE HOUSES OF NUCLEAR POWER PLANTS (ASEISMISCHE AUSLEGUNG DER MASCHINENHÄUSER VON KERNKRAFTWERKEN)

R. DANISCH and M. LABES

Kraftwerk Union AG, Kraftwerktechnik, D-852 Erlangen, Germany

SUMMARY

The turbine house does not belong to the safety-related parts of equipment of a nuclear power plant. A special protection against earthquakes is not demanded by the authorities as long as it is proven that safety-related parts of equipment will not be restricted in their function by a collapse of the turbine house. The degree of an aseismic design is largely up to the customer, who has to weigh the risk of costs and availability against the additional costs, that are necessary for the earthquake calculation and for constructive hardening.

In comparison to the high-tuned turbine foundations as they are in use in the USA today, low-tuned turbine foundations as a result of helical-spring-support, which are constructed by the KWU exclusively, pose special problems with the aseismic design. This will be discussed in particular in the presented report.

The spring-supported mass constitutes about a quarter of the building-mass. For mechanical reasons the spring elements are chosen in such a way, that the turbine foundation has a natural frequency of ~ 3 Hz. Thus it remains within the same frequency range as the turbine house and within that very range which is particularly amplified by an earthquake. It is therefore likely that resonance effects as well as oscillation annulment effects may occur.

The standardized calculation methods for conventional buildings without safety function such as DIN 4149 (Germany) or SIA 162 (Switzerland) do not cover the oscillation conduct of such a complicate structure. One receives informations about possible relative displacements between the building and the turbine foundation (hammering-effect) and about the stresses on the turbine and other components only by dynamic calculation methods such as the time-history or the response-spectrum method.

In dependence of the assumed earthquake (operating basis earthquake) the following constructive hardening measures will be necessary:

small earthquakes (< 0.05 g)

- reinforcement of the building structure, the concept of the building structure may be kept unchanged.

medium earthquakes

- reinforcement of the building structure, slight alterations of the building concept;
- installation of damping elements at the spring assemblies;
- reinforcement of the turbine foundation without changing the concept.

strong earthquakes (> 0.15 g)

- essential alteration of the building concept such as light steel construction or renunciation of the machine hall, additional shear-walls, deeper foundation level of the building;
- installation of damping elements at the spring assemblies;
- reinforcement of turbine bearings;
- modified design of the turbine foundation.

The acceleration values given above are only a rough evidence, since the stresses are largely dependent on particular soil conditions and response-spectra of the site.

1. Einleitung

Das Maschinenhaus gehört zu den sicherheitstechnisch nicht relevanten Anlagenteilen eines Kernkraftwerkes. Der Grad der erdbebensicheren Auslegung liegt daher weitgehend im Ermessen des Betreibers, der das Kosten- und Verfügbarkeitsrisiko abzuwägen hat gegenüber dem Mehraufwand, der für die Erdbebenberechnung und konstruktiven Ertüchtigungen erforderlich wird.

In diesem Bericht wird zunächst die allgemeine Problematik der Erdbebenauslegung von Maschinenhäusern behandelt. Anschließend werden die Ergebnisse einer Parameteruntersuchung erläutert.

2. Beschreibung eines Maschinenhauses

2.1 Gebäude

Das Maschinenhaus ist üblicherweise ein kastenförmiger, auf einer durchgehenden Fundamentplatte gegründeter Baukörper, der durch Stahlbetonscheiben und durch Rahmen ausgesteift ist. Die Innenkonstruktion besteht aus Rahmen und Deckenplatten, die große Öffnungen zur Montage und zur Aufnahme der Komponenten aufweisen. Typische Gebäudeschnitte sind in den Bildern 1 und 2 dargestellt.

2.2 Turbosatz

Der Turbosatz besteht aus einem Hochdruckteil, mehreren Niederdruckteilen und den zugehörigen Kondensatoren sowie dem Generator und der Erregermaschine. Die Drehzahl beträgt in Europa 25 s^{-1} oder 50 s^{-1} , das Arbeitsmedium ist Sattedampf.

Von einigen Ausnahmen abgesehen, ist es in den USA üblich, hoch abgestimmte Turbinenfundamente zu bauen. Die unterste Eigenfrequenz dieser Fundamente liegt über der Drehzahl der Turbine und somit in einem Frequenzbereich, der durch Erdbebenerschütterungen nicht angeregt wird. Für die aseismische Auslegung kann das Fundament als starr angesehen werden, Resonanzerscheinungen treten nicht auf. Es ergeben sich keine spezifischen Probleme, die anders wären, als bei üblichen Hochbauten.

Im Gegensatz zu dieser Bauweise werden in Deutschland seit ca. 25 Jahren nahezu nur tief abgestimmte Turbinenfundamente gebaut, deren unterste Eigenfrequenz unterhalb der Turbinendrehzahl liegt. Erreicht wurde diese Abstimmung durch Trägerrostkonstruktionen auf schlanken Stützen, sogenannten Tischfundamenten. Mit dem Bau von großen Sattedampfmaschinen für Kernkraftwerke mit einer Drehzahl von 25 s^{-1} wurde es schwierig, diese tiefe Abstimmung wegen der dafür erforderlichen Schlankheit mit Stahlbetonstützen zu erzielen. Aus diesem Grunde entschloß man

sich, die Funktion der Stahlbetonstützen durch Federelemente zu ersetzen, zumal diese Art der Unterstützung für kleinere Maschinen wie Notstromdiesel, Kohlemühlen oder Pumpen seit langem bekannt ist und sich bewährt hat.

Für die Anordnung der Federelemente gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie zum Beispiel in Reihen auf Unterstützungslängsbalken bei Turbinen für Siedewasserreaktoranlagen, oder konzentriert auf Stützenköpfen bei Turbinen für Druckwasserreaktoranlagen.

Die Kondensatoren ruhen ebenfalls auf Federn und sind, wie in Europa üblich, fest mit dem Turbinengehäuse verbunden. Turbine, Generator und Kondensator bilden mit dem Turbosatzfundament eine federnd gelagerte Masse von mehreren zehntausend Meganewton, die in etwa einem Viertel der Gebäudemasse entspricht.

Die Steifigkeiten der Federelemente werden aus maschinentechnischen Gründen so gewählt, daß das Turbinenfundament eine unterste Eigenfrequenz von ca. 2 bis 3 s⁻¹ in vertikaler und horizontaler Richtung hat. Es liegt damit im gleichen Frequenzbereich wie das Maschinengebäude, einem Bereich, der durch Erdbeben vornehmlich angeregt wird. Es kann daher sowohl zu Resonanzeffekten als auch aufgrund der großen abgefederten Massen zu Schwingungstilgungseffekten kommen.

Weitere Einzelheiten der Bauweise von auf Federn gelagerten Turbinenfundamenten sind in [1] beschrieben.

3. Auslegung gegen Erdbeben

3.1 Quasistatische Methoden

An Standorten mit geringem seismischen Risiko, wie z.B. im norddeutschen Küstengebiet, ist es üblich, nur sicherheitstechnisch wichtige Anlagenteile gegen Erdbeben auszulegen und auf einen Nachweis für andere Bauteile zu verzichten.

Maschinenhäuser in erdbebengefährdeten Gebieten wurden bisher nach einfachen, sogenannten quasistatischen Methoden bemessen. Beispiele dafür sind die Maschinenhäuser für die Kernkraftwerke Biblis A und B, die nach der deutschen Erdbebennorm DIN 4149 ausgelegt wurden. Nach dieser Norm werden je nach Erdbebenzone und Baugrund horizontale Ersatzlasten als konstanter Anteil der Gebäude- und Komponentenlasten in der statischen Berechnung berücksichtigt. Vertikale Zusatzlasten werden vernachlässigt, weil sie erfahrungsgemäß bei Erdbeben mitteleuropäischer Stärke zu keinen Schäden führen. Dieser Ansatz bedeutet eine über die Gebäudehöhe konstant

angenommene horizontal wirkende Beschleunigungsverteilung, ohne Berücksichtigung des Schwingungsverhalten des betrachteten Systems, was sowohl zu einer Über- als auch Unterschätzung der Erdbebenlasten führen kann. Andere Normen, wie der französische Erdbebencode [2] oder die Richtlinien für das Bauen in Erdbebengebieten des Landes Baden-Württemberg (BRD) erfassen das dynamische Verhalten zumindest überschläglich, indem bei der Berechnung der Beschleunigungsverteilung ein Faktor in Abhängigkeit der Eigenschwingzeit berücksichtigt wird. Mit diesen Näherungsmethoden erhält man für übliche Baukonstruktionen ausreichend gute Ergebnisse, wobei der relativ geringe Aufwand mit der kleinen Eintrittswahrscheinlichkeit eines Erdbebens und dem damit verbundenen geringen Schadensrisiko in einem vernünftigen Verhältnis stehen. Aussagen über mögliche Relativbewegungen zwischen Gebäude und Turbinenfundament sowie Beanspruchungen am Turbosatz und anderen Komponenten bekommt man mit diesen quasistatischen Methoden nicht. Dafür sind dynamische Rechenverfahren erforderlich, wie sie für sicherheitstechnisch wichtige Anlagenteile eines Kernkraftwerkes angewandt werden.

3.2 Dynamische Methoden

Die drei in Frage kommenden Methoden

- direkte numerische Integration
- Zeitablaufmethode (time history method)
mit der Modalen Analyse
- Antwortspektrummethode (response spectrum method)

sind in der Literatur hinreichend beschrieben und werden hier als bekannt vorausgesetzt. (Siehe z.B. [3])

Im folgenden wird erläutert, wie die letztgenannte Methode, die in der Praxis allgemein üblich ist, für ein spezielles Projekt angewendet wurde.

3.2.1 Beschreibung einer speziellen dynamischen Berechnung

Wie aus der Abbildung 3 zu sehen ist, sind die Gebäudeteile unter Berücksichtigung der Biege- und Schubsteifigkeit als Stabmodelle aus finiten Elementen abgebildet. Die Massen der Deckenplatten und die ständigen Lasten sowie ein gewisser Teil der Verkehrslasten sind auf die Knotenpunkte in Höhe der Decken konzentriert. Die dazwischenliegenden Wand- und Stützteile sind als gleichmäßig verteilte Massen in den Stäben berücksichtigt.

Die Fundamentplatte wird als starr angenommen. Die Eigenschaften des Baugrundes werden durch gedämpfte Translations- und Rotationsfedern und durch mitschwingende Bodenmassen simuliert, die im Schwerpunkt der Fundamentplatte angeordnet sind. Die Feder- und Dämpfungswerte hängen ab von den Bodeneigenschaften, der Gebäudemasse und den Massenträgheitsmomenten um die Achsen der Fundamentplatte.

Die Turbinentischplatte wird als durchgehender Balken idealisiert und die Turbinengehäuse nur durch ihre Massen im entsprechenden Abstand berücksichtigt. Die durchgehende Turbinenwelle hat gegenüber der Tischplatte eine vernachlässigbar kleine Steifigkeit und ist zum anderen sehr oft gelagert, so daß sie für Erdbebenerregungen als starr angenommen werden kann. Ihre Masse wird deshalb anteilmäßig den Gehäusemassen zugeteilt. Die Kondensatoren unter den Niederdruckteilen werden durch auskragende Massen berücksichtigt.

Die Federn werden in jeder Federebene mit ihren entsprechenden Steifigkeiten an das elastische Gebäude- und Turbinenmodell gebunden.

Gebäude, Baugrund und Turbosatzfundament-Dämpfer haben unterschiedliche Dämpfung, die als Prozentsatz der kritischen Dämpfung gegeben ist. Für die Berechnung wird jedoch die zu jeder Eigenfrequenz gehörige kritische Dämpfung für das Gesamtsystem Gebäude-Baugrund-Turbinenfundament benötigt. Diese wird aus der anteiligen Verformungsenergie der einzelnen Substrukturen mit unterschiedlichen Dämpfungen gewichtet.

Relativverschiebungen, Relativgeschwindigkeiten und Absolutbeschleunigungen werden aus den zuvor ermittelten Eigenwerten und aus dem Beschleunigungs-Antwortspektrum getrennt für die Längs-, Quer- und Vertikalrichtung nach der Response Sepctrum Analysis berechnet. Es wird die übliche quadratische Mittelwertbildung verwendet.

Aus den Absolutbeschleunigungen erhält man durch Multiplikation mit den zugehörigen Massen die infolge des Erdbebens auftretenden Zusatzkräfte für das Gebäude.

Die Relativverschiebungen dienen zur Festlegung von Fugenbreiten und zur Ermittlung der Kräfte in den Federelementen des Turbinenfundamentes.

Aus den Relativgeschwindigkeiten an den Auflagerpunkten des Turbosatzfundamentes werden die Kräfte in den Dämpfern berechnet.

Feder- und Dämpfungskräfte sind um 90° phasenverschoben. Die maximale Kraft (Feder + Dämpfer) erhält man somit durch geometrische Addition.

3.3 Folgerungen aus den dynamischen Berechnungen

In Abhängigkeit von der angenommenen Erdbebenintensität (Betriebs-erdbeben) werden aufgrund der Berechnungen folgende konstruktive Ertüchtigungsmaßnahmen gegenüber einem Maschinenhaus ohne Erdbebenauslegung notwendig:

3.3.1 Kleines Erdbeben

Bis zu einer Erdbebenintensität von $I \leq 5$ sind keine Ertüchtigungsmaßnahmen auf der Turbosatzseite und nur geringe Verstärkungen (höhere Bewehrung) auf der Gebäudeseite erforderlich.

3.3.2 Mittleres Erdbeben

Bei einem mittleren Erdbeben ($I \leq 6$) genügt die Gebäudeverstärkung durch höhere Bewehrung meist nicht, sondern es werden auch einige Änderungen des Gebäudekonzeptes durch Einplanung zusätzlicher Aussteifungselemente wie Ausbildung der Längs- und Giebelwände als Scheiben oder stärkere Stützen notwendig.

Der von den Federkörpern zusätzlich aufnehmbare Federweg liegt in vertikaler und horizontaler Richtung im Millimeterbereich. Bei einer Überschreitung werden die Federkörper plastifiziert und es besteht die Gefahr des Aneinanderschlagens von Turbosatzfundament und Gebäude (Hammering-Effekt). Wie die Erfahrungen aus dem Erdbeben in Managua/Nicaragua 1972 gezeigt haben, entstehen dadurch die größten Schäden am Turbosatz.

Um das zu verhindern, müssen Dämpfer vorgesehen werden. Eine Fotografie und eine typische Anordnung von Federkörper und Dämpfer sind in den Bildern 4 und 5 wiedergegeben.

Auf der Turbosatzseite ist eine Verstärkung der Fixpunkte, der Gehäuseführungen und Distanzschrauben notwendig, um eine ausreichende Verbindung zwischen den Gehäusen und dem Fundament herzustellen, und eine Ertüchtigung der Lager, um eine sichere Führung der Welle gewährleisten zu können. Darüberhinaus ist die Frage eines Bruches einer Steuerflüssigkeitsleitung zu überprüfen. Die Leitungen werden gegen hydraulische Druckstöße ausgelegt, wodurch sie auch gegen äußere Erschütterungen resistent werden.

Beim Bruch einer Steuerflüssigkeitsleitung bleibt der Folgeschaden gering, weil 1. das Schutzkonzept so aufgebaut ist, daß bei zunehmendem Steuerflüssigkeitsdruck die Dampfventile automatisch schließen und 2. die Flüssigkeit schwer entflammbar ist (Brandschutzmaßnahmen).

3.3.3 Starkes Erdbeben

Für eine Intensität $I > 6$ ist es notwendig, ein aseismisches Gebäudekonzept unter Berücksichtigung einiger der folgenden Ertüchtigungsmaßnahmen zu entwerfen. Dazu gehören:

- Verstärkung und Verbreiterung der Grundplatte
- tiefere Gründung des Gebäudes
- möglichst gleichbleibende Gründungstiefe
- Wegfall der Maschinenhaushalle bzw. Ersatz durch eine leichte Stahlkonstruktion. Wenn dies aus Schallschutz- oder Witterungsgründen nicht möglich ist, Vergrößerung der Abmessungen der Außenstützen und Wahl einer leichten Dachkonstruktion.
- Verteilung der Aussteifungselemente und Massen in der Weise, daß Schubmittelpunkt und Massenschwerpunkt der Gebäudequerschnitte zusammenfallen und die Anregung von Torsionsschwingungen vermieden wird. In den meisten Fällen bedeutet das den Verzicht auf die bautechnisch günstige Dehnungsfuge in Gebäudemitte, die zur Reduzierung der Schwind- und Temperaturbelastungen sowie zum Ausgleich von Setzungsunterschieden üblicherweise vorgesehen wird.
- Reduzierung der Kranbahnweiten auf das montagetechnisch erforderliche Mindestmaß.

Ein typisches Beispiel für ein aseismisches Gebäudekonzept ist im Bild 6 wiedergegeben. Die Unterschiede gegenüber dem nicht ertüchtigten Konzept im Bild 1 sind deutlich zu erkennen.

Für das Turbosatzfundament ist die kritische Stelle der Querriegel, an dem über das Achsiallager die gesamten erdbebeninduzierten Längskräfte aus dem Wellenstrang des Turbosatzes über Biegung und Torsion eingeleitet werden. Die Verbreiterung des Querriegels hat eine weitgehende Umkonstruktion der Turbinenwelle zur Folge. Will man das vermeiden, so bleibt der Ausweg über die Aussteifung des Riegels durch eine Fachwerkkonstruktion. Gegenüber dem mittleren Erdbeben ist eine größere Anzahl von Dämpfern erforderlich.

Auf der Turbosatzseite sind die Ertüchtigungsmaßnahmen analog denen des mittleren Erdbebens.

Die Gleitlagerflächen bleiben bei der kurzen Überbeanspruchung intakt, weil eine unzulässige Erwärmung erst bei längerer Überbeanspruchung auftritt.

4. Parameteruntersuchung

Um standort- und gebäudeunabhängige Aussagen machen zu können, wurden Baugrundparameter und Gebäudekonzeptionen variiert. Als Belastung wurde das für den Standort Goesgen/Schweiz festgelegte Betriebserdbeben angenommen.

4.1 Variation der Baugrundparameter

Untersucht wurden die Fälle weicher Baugrund, mittelfester Baugrund und fester Baugrund (starre Einspannung). Die Ergebnisse sind in den Bildern 7 bis 9 für die 3 Hauptrichtungen dargestellt, wobei die Beschleunigung des Turbosatzes der Mittelwert aus den Teilbeschleunigungen von Turbosatz und Kondensator ist. Für das Gebäude ist der maximale Beschleunigungswert gewählt worden.

Die Kurven zeigen einmal den typischen Verlauf des Abfalls der Gebäudebeschleunigung mit abnehmender Bodensteifigkeit. Zum anderen steigt die Turbosatzbeschleunigung mit fallender Gebäudebeschleunigung an, was auf einen Schwingungstilgungseffekt zurückzuführen ist.

4.2 Variation der Gebäudekonstruktion

Es wurde hierbei das Schwingungsmodell des Gebäudes so variiert, daß neben einem offenen Gebäude (zwei gegeneinanderstehende offene U-Profile) der Effekt durch Verbindung beider Gebäudeteile mit einer durchgehenden Dachscheibe und das Verhalten eines geschlossenen Kastenprofils erfaßt werden konnte. Der Baugrund wurde als mittelfest angenommen.

Die Ergebnisse sind auf den Bildern 10 und 11 für beide horizontale Richtungen aufgetragen. Auf die vertikale Richtung konnte verzichtet werden, weil sich das Verhalten in vertikaler Richtung, wie zu erwarten, dadurch nicht verändert hat.

Die Ergebnisse zeigen, daß mit zunehmender "Gebäudesteifigkeit" die Beanspruchungen im Gebäude und an der Turbine abnehmen. Bei höheren Erdbebenbeanspruchungen ist es daher wirtschaftlich, auf die Anordnung von Dehnungsfugen im Gebäude zu verzichten und die durch den Wegfall erforder-

liche höhere Bewehrung für Temperatur- und Schwindbelastungen in Kauf zu nehmen.

5. Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht wurde erläutert, wie Maschinenhäuser von Kernkraftwerken mit Turbosätzen der Kraftwerk Union Baulinie erdbebensicher ausgelegt werden können, ohne daß das Betriebsverhalten des Turbosatzes ungünstig beeinflusst wird. Es wurden die Ertüchtigungsmaßnahmen für verschiedene Erdbebenintensitäten diskutiert und einige Ergebnisse einer Parameterstudie angegeben.

Literaturverzeichnis:

- [1] PROBST, P.H., JOYCE, J.S.,
"The Development of Helical-Spring
Foundations for Large
Steam Turbine - Generators"
American Power Conference,
Chicago, Illinois, April 19, 1972

- [2] Société de diffusion des
techniques du bâtiment et des
travaux publics, Paris.
Règles Parasismiques 1969 et
Annexes, October 1970.

- [3] WIEGEL, R.L., "Earthquake Engineering",
Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs,
N.J.

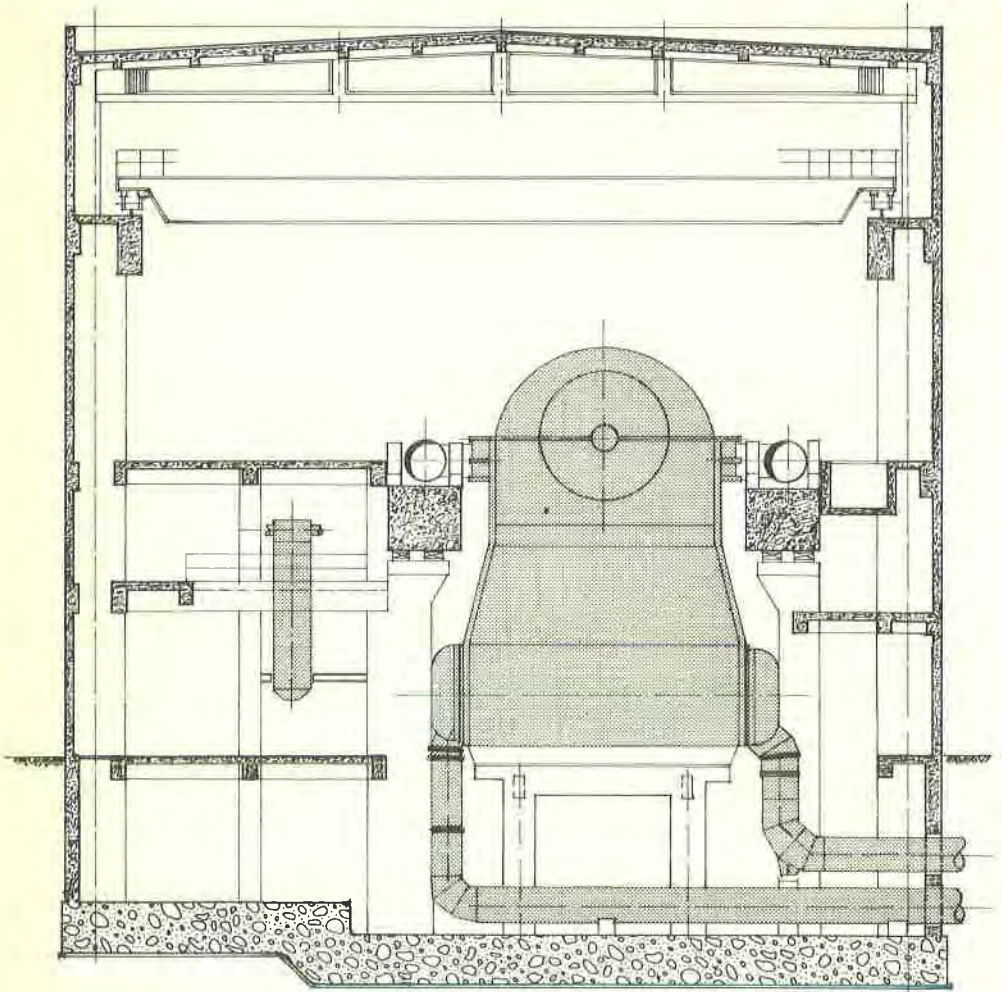
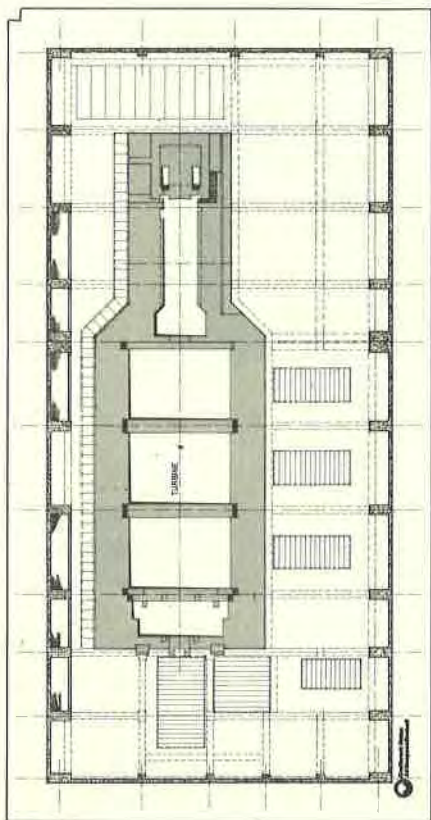
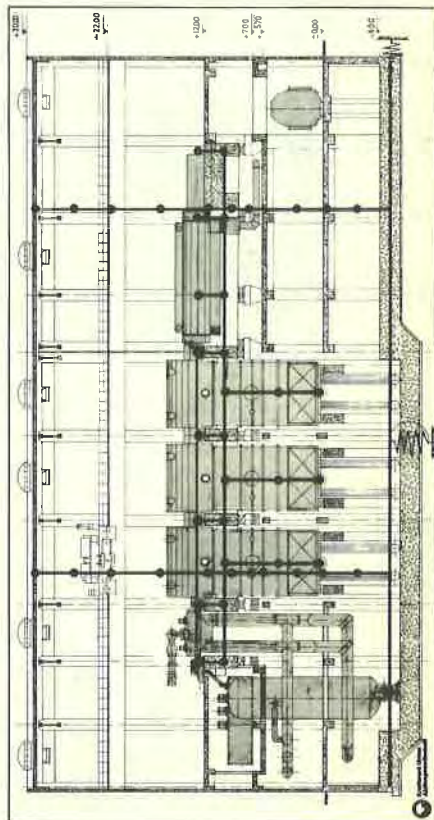


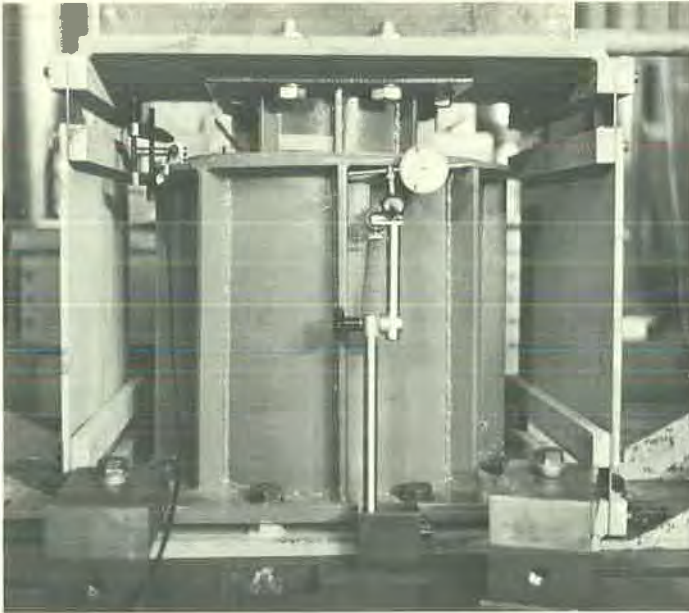
Bild 1 : Querschnitt durch ein Maschinenhaus



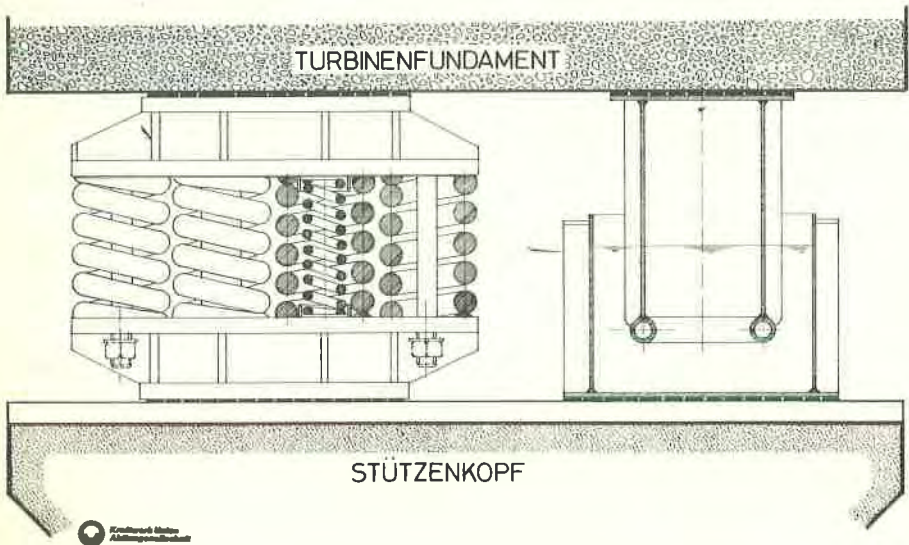
2 : Grundriß Maschinenhausflur



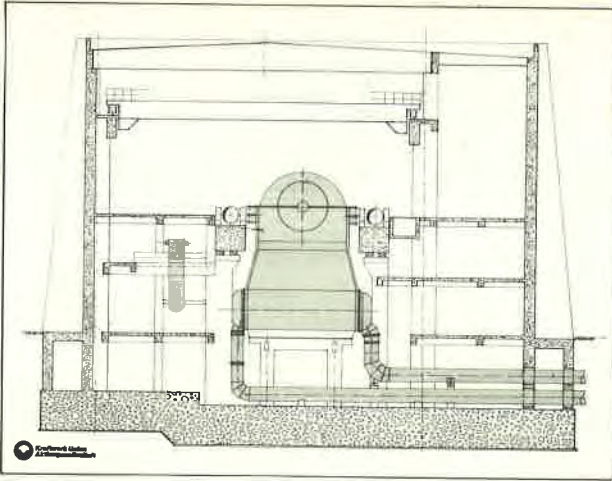
3 : Schwingungsmodell für Gebäude und Turbosatz



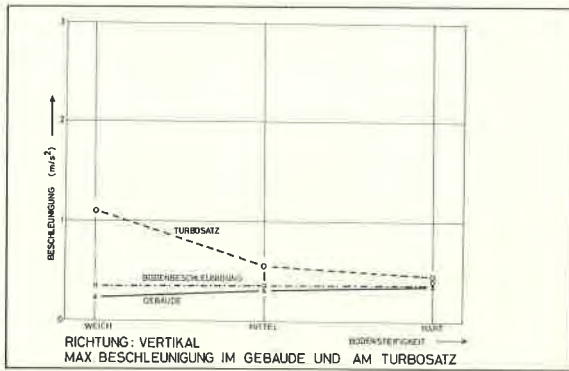
4 : Dämpfer in einer Versuchseinrichtung zur Ermittlung der Dämpfereigenschaften



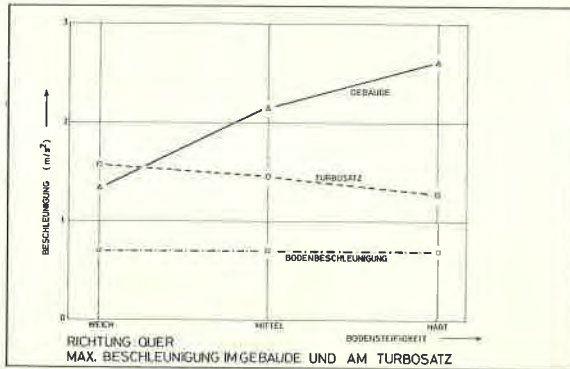
5 : Typische Anordnung eines Federkörpers und Dämpfers



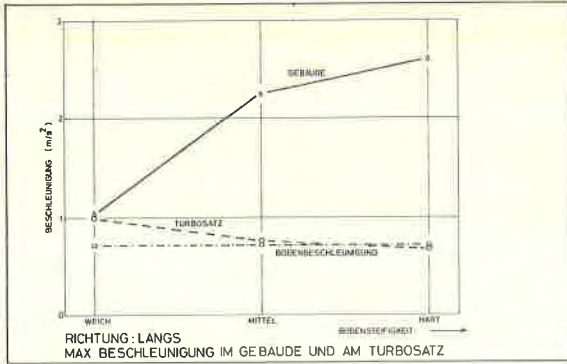
6 : Aseismisches Gebäudekonzept



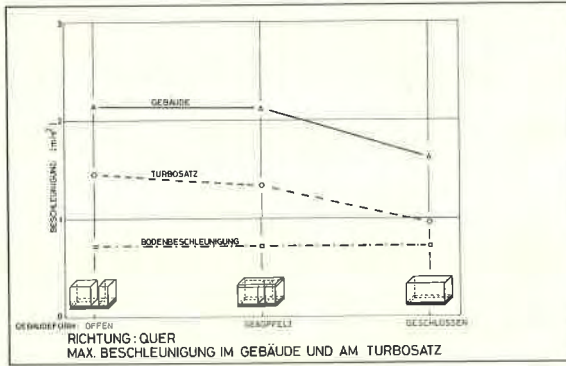
7 : Variation der Bodenparameter, vertikal



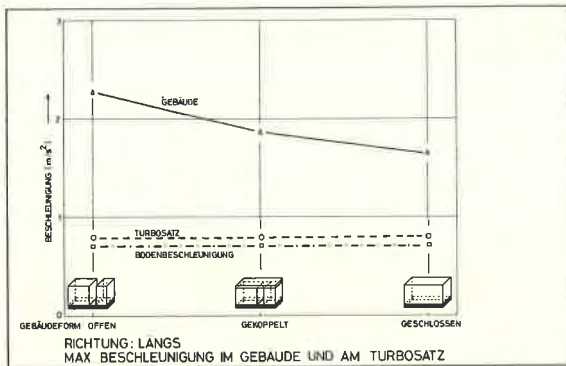
8 : " " " , quer



9 : " " " , längs



10 : Variation der Gebäudekonstruktion, quer



11 : " " " , längs