

# ZEITSCHRIFT FÜR BAUWESEN

HERAUSGEGEBEN IM PREUSSISCHEN FINANZMINISTERIUM

SCHRIFTFLEITER: INGENIEURBAU RICHARD BERGIUS · HOCHBAU Dr.-Ing. GUSTAV LAMPMANN

80. JAHRGANG

BERLIN, JULI 1930

HEFT 7

Alle Rechte vorbehalten.

## DAS NEUE STADTBAD BERLIN-MITTE.

Von Magistratsoberbaurat Dr.-Ing. J e l k m a n n, Berlin.

### BAUPROGRAMM.

Nach dem Bauprogramm wurden gefordert: Brausebäder, Wannebäder, medizinische und russisch-römische Bäder (für Männer und Frauen getrennt), eine Schwimmhalle mit einem Schwimmbecken von 50 m Länge und 15 m Breite (für Männer und Frauen gemeinsam), ein Sonnenbad.

Bei der Aufstellung des Bauprogramms wurde die Einwohnerzahl des Bezirks Berlin-Mitte zugrunde gelegt, wobei sich nachfolgende, aus der Praxis errechnete Erfordernisse ergaben: Nach Angabe des Stadtamts für Leibesübungen werden für je 50 000 Einwohner 96 qm Oberfläche des Schwimmbeckens benötigt. Bei rd. 300 000 Einwohnern des Bezirks Berlin-Mitte muß das Schwimmbecken mithin mindestens  $96 \times 6 = 576$  qm groß sein. Ausgeführt ist ein Schwimmbecken von  $15 \times 50 = 750$  qm. Die Länge von 50 m entspricht den Vorschriften für die Veranstaltung von Wettschwimmen ( $100 : 2 = 50$  m,  $100 : 5 = 55\frac{1}{2}$  m usw.). Auf je 2,4 qm Wasseroberfläche ist ein Badender zu rechnen, das sind  $750 : 2,4 =$  rd. 313 Badende. Dazu kommt die halbe Zahl sich An- und Auskleidender. Es müssen also rd. 470 Auskleidemöglichkeiten vorhanden sein. Rechnet man für starken Besuch einen weiteren Zuschlag von 10 v H, so ergeben sich insgesamt als notwendig 517 Auskleidemöglichkeiten. Ausgeführt sind 538.

Die Anzahl der Wannebäder errechnet sich bei 500 000 Einwohnern, 510 Badetagen und unter Zugrundelegung der Angabe des Berliner städtischen Hauptgesundheitsamtes, daß je Kopf und Jahr einschließlich der medizinischen Bäder  $1\frac{1}{2}$  Wannebäder zu rechnen sind, auf  $500\,000 \times 1\frac{1}{2} = 450\,000$  Wannebäder jährlich, je Tag demnach auf  $450\,000 : 310 = 1452$  Bäder. Aus zwölf Stunden Badezeit ergeben sich 720 Minuten : 40 Minuten jeweilige Badedauer = 18 Bäder je Tag. Bei 1452 Bädern täglich also  $1452 : 18 = 81$  Wannebäder, die auf Männer und Frauen zu verteilen sind. Wird für sehr starken Andrang hierzu ein Mehr von 15 v H gerechnet, so ergibt sich ein Bedarf von 95 Wannebädern. Zur Verfügung stehen 98 Wannebäder.

Die Anzahl der Brausezellen ergibt sich bei 20 Minuten Brausedauer auf  $98 : 2 = 49$  Brausezellen. Zur Verfügung stehen insgesamt 50 Brausebäder, wobei die Brausen in den Vorreinigungsräumen und in den medizinischen Bädern nicht eingerechnet sind.

Es wurden eingehende Erwägungen darüber angestellt, ob die Anlage zweier nach Geschlechtern getrennter Schwimmbecken (wie bei den übrigen Berliner städtischen Bädern) oder die nur eines, dafür aber großen gemeinsamen Schwimmbeckens zweckmäßig wäre. Für die Anlage zweier Schwimmbecken sprach die Möglichkeit des dauernden getrennten Badens der Geschlechter, die Möglichkeit der Benutzung wenigstens eines Beckens bei etwaigen Instandsetzungsarbeiten am anderen Becken, endlich die Möglichkeit, das Schulschwimmen getrennt für sich in einer Halle ohne Störung des Bade- und Schwimmbetriebes in der anderen Halle vorzunehmen. Man entschied sich für die Anlage nur einer Schwimmhalle. Ursprünglich war eine Abflachung des Schwimmbeckens an

beiden Stirnseiten und eine Vertiefung nach der Mitte hin auf 3,15 m geplant. Bei dieser Anordnung hätte man auf beiden Seiten von den Vorreinigungsräumen her getrennte Schwimmbeckenzugänge für Männer und Frauen schaffen können. Durch eine bei Sportfesten zu beseitigende mittlere Bassintrennwand oder durch ein Trennseil hätte immerhin noch eine lose Trennung nach Geschlechtern in einer gemeinsamen Schwimmhalle erreicht werden können. Zu bedenken war auch, daß bei einem beiderseits abgeflachten Becken das Wasser schneller entleert und wieder eingefüllt werden konnte und daß infolge der geringeren benötigten Wassermenge niedrigere Betriebskosten entstanden wären.

Ein besonderer Beschluß der städtischen Körperschaften forderte aber kurz vor Inangriffnahme der Bauausführung die Abflachung und Vertiefung des Beckens nur nach einer Seite hin nach dem Vorbild der übrigen städtischen Schwimmbäder. Diese Entscheidung gründete sich im wesentlichen darauf, daß eine Anordnung der Sprunggelegenheiten in der Mitte einer Längsseite selbst bei 15 m Beckenbreite die freie Länge der Schwimmbahn beträchtlich stört. Auch das Gefahrenmoment des Quereinsprunges in die Längsrichtung der Schwimmbahn hat hier mitbestimmend gewirkt. Die Tatsache, daß für die Möglichkeit einer durchgreifenden Wasserumwälzung bei beiderseitiger Abflachung bisher nur geringe Erfahrungen vorliegen, war zudem von ausschlaggebender Bedeutung.

### BAUPLATZ.

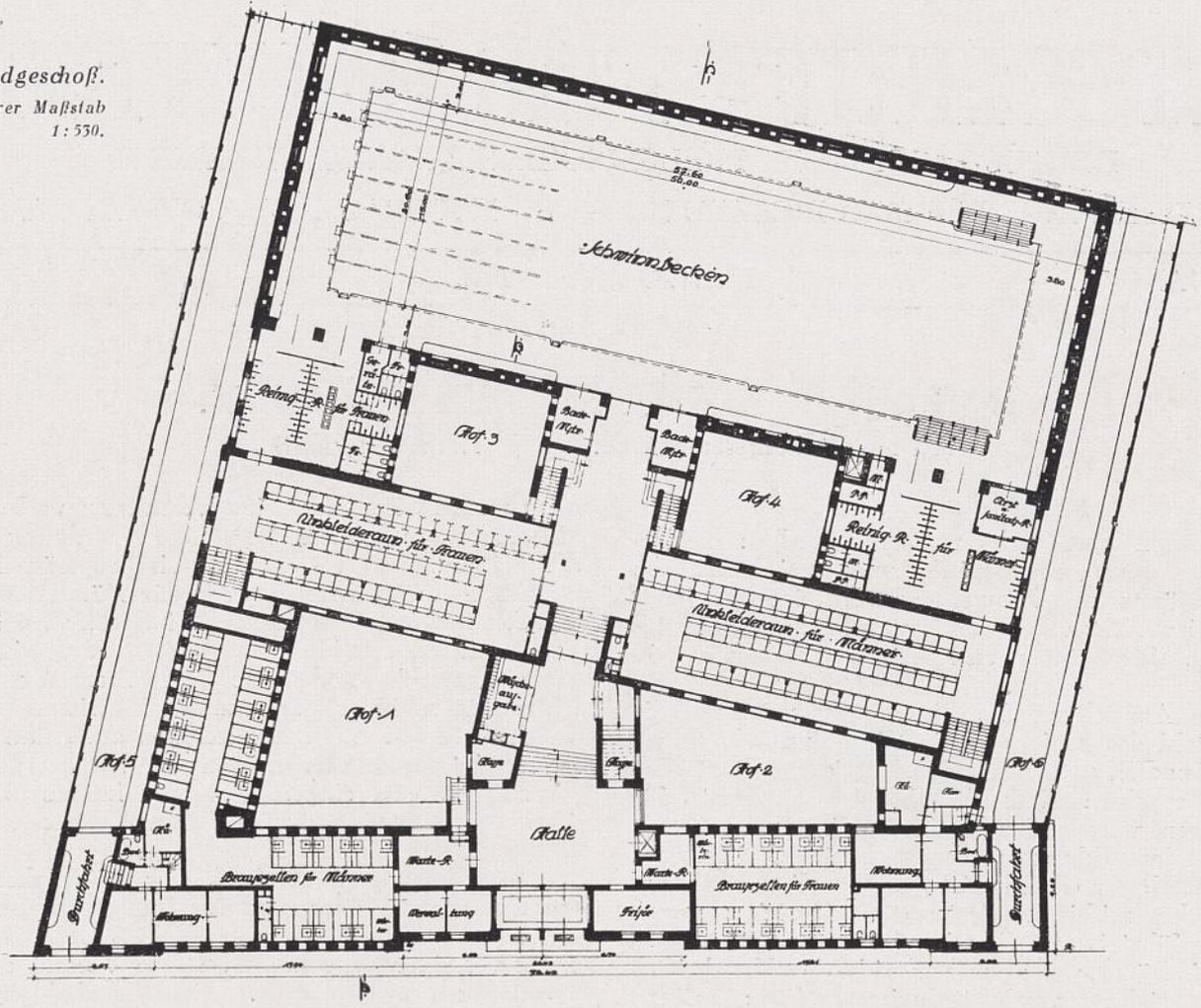
Sehr schwierig war die Wahl eines geeigneten Bauplatzes inmitten des dichtbevölkerten Stadtteiles: er mußte notwendigerweise sehr groß sein, sollte günstig zum Verkehr und möglichst in der Nähe einer Grün- oder Parkanlage liegen. Gewählt wurde der in städtischem Eigentum befindliche Sophienpark in der Gartenstraße, der alle verlangten Vorzüge aufweist. Eine hier bereits bestehende, aber veraltete städtische Badeanstalt wurde niedergelegt. So wurde eine bebaubare Straßenfront von 72 m Länge gewonnen. Die Bautiefe des Neubaus beträgt 62 m. Von der rd. 175 m tiefen Parkanlage mit ihrem guten alten Baumbestand blieb mithin der größere Teil erhalten und kann der Bevölkerung auch weiterhin als Erholungsstätte dienen. Der Baugrund erwies sich nach den vorgenommenen Bohrungen als guter Sandboden und ließ eine gleichmäßige Beanspruchung zu.

### BAULICHE GLIEDERUNG UND EINRICHTUNG.

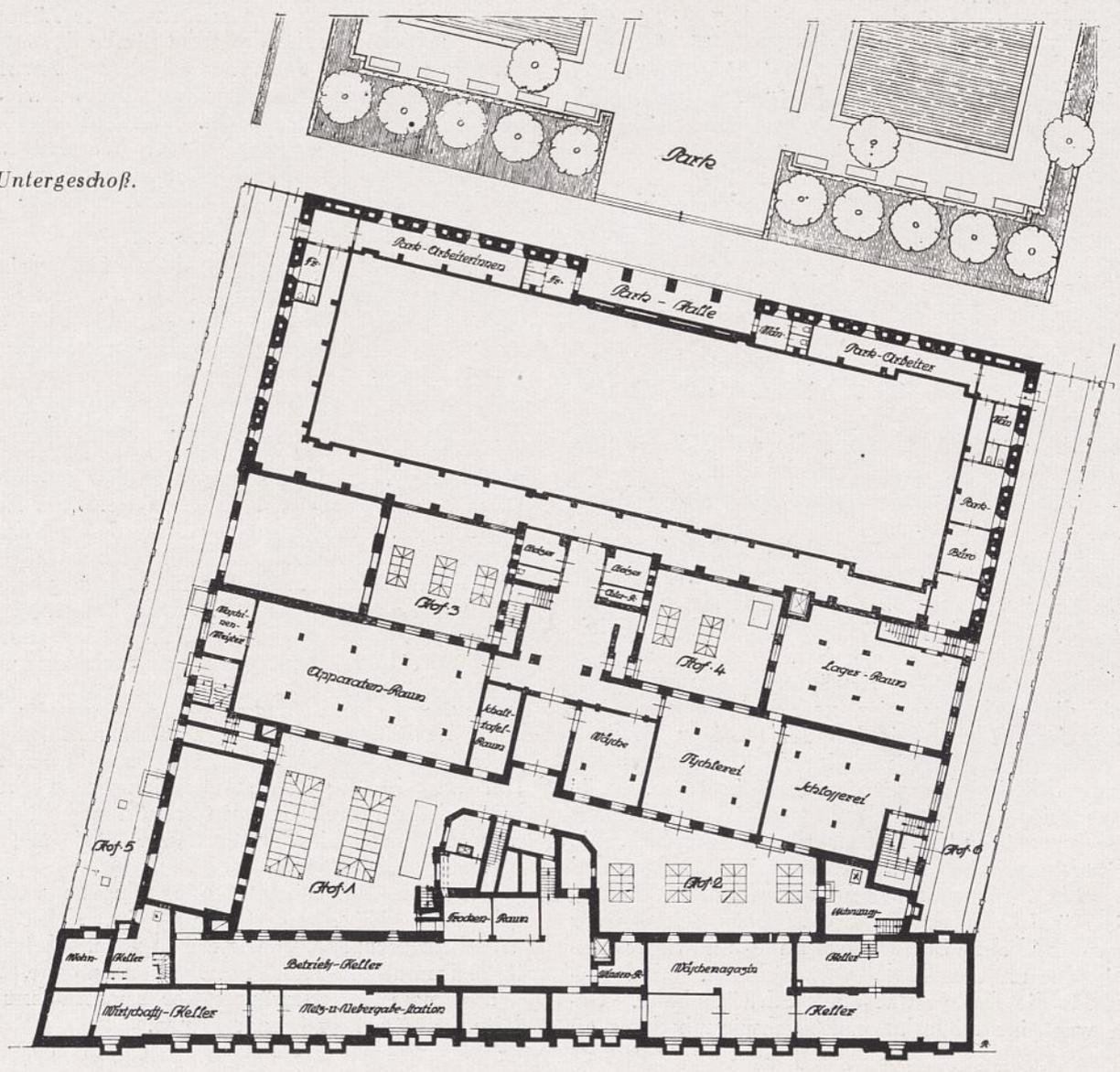
Gleichlaufend mit der Straßenfront gruppieren sich etwa in Nord-Südrichtung drei große Bauakte, die seitlich und in der Mitte untereinander verbunden sind. Diese Anordnung gestattet überall die Zuführung von genügend Luft, Licht und Sonne (bei den wichtigsten Räumen Querlüftung).

Der an der Gartenstraße gelegene vordere Bauteil mit zwei Flügelbauten nimmt im *Kellergeschoß* auf: Wäschetrocknräume, Wäschemagazin, Materialräume, Transformatoren- und Schwachstromanlage, Luftheritzer, Wassermesser, Kellerräume der Dienstwohnungen, Rohrleitungsstränge und Lagerräume.

Erdgeschoss.  
 Ungefährer Maßstab  
 1: 550.



Untergeschoß.









Ansicht von der Gartenstraße.  
Hegermühler Klinker.

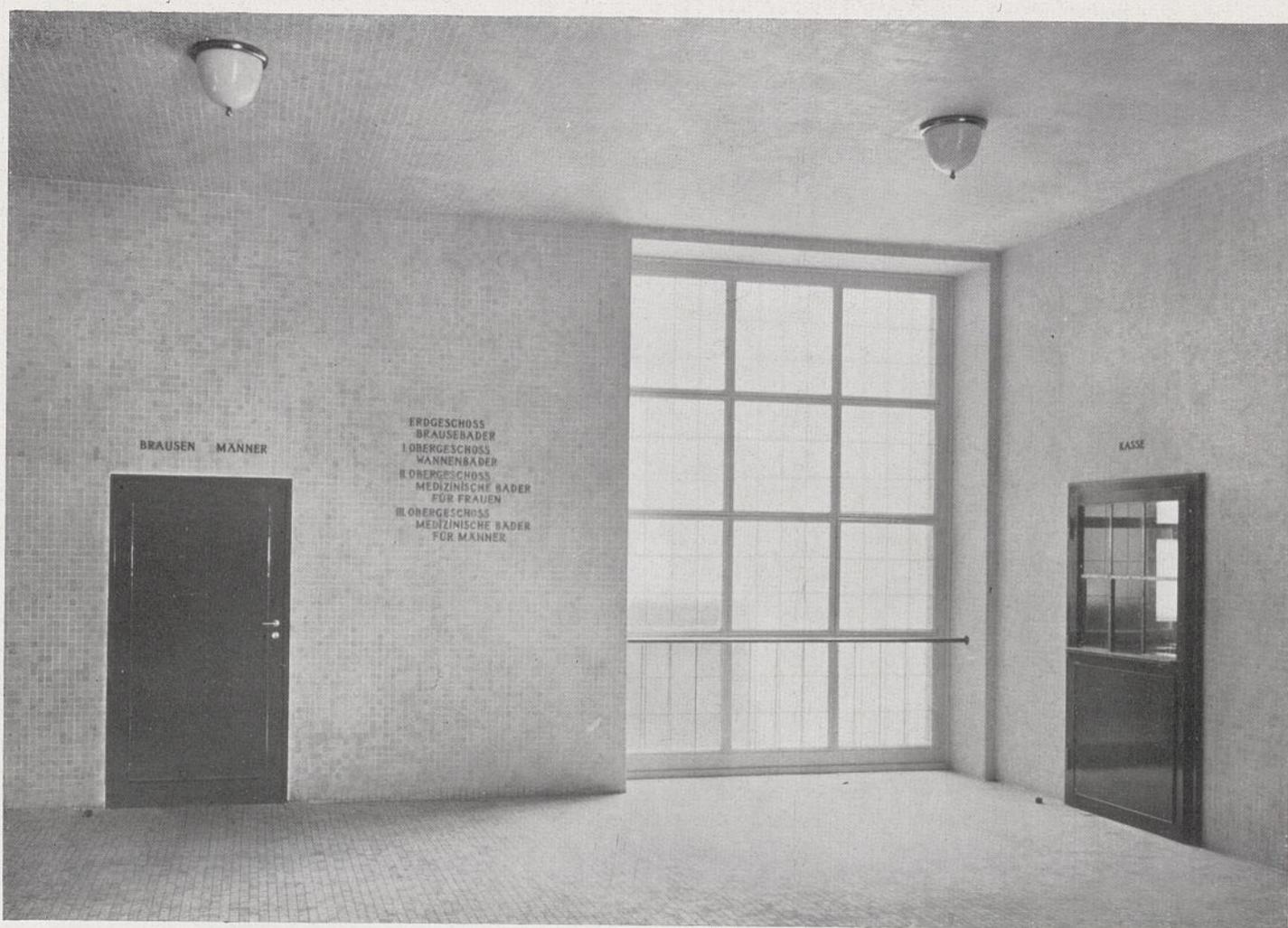
Die Einrichtung einer eigenen Wäscherei erwies sich selbst für den in der Anstalt zu erwartenden Großbetrieb als unwirtschaftlich. Die Aufbewahrung der Wäsche erfolgt im Wäschemagazin in Jalousieschränken, ihre Beförderung nach und in den einzelnen Geschossen durch Fahrstuhl und auf kleinen fahrbaren Gestellen.

Im *Geschoß zu ebener Erde* sind angeordnet: die Kassenhalle mit Vorraum, Fahrstuhl, zwei Kassenräume, Friseurraum, Räume für die Verwaltung, zwei Wartezimmer und eine nach Männern und Frauen getrennte Brausebadanlage von insgesamt 46 Brausezellen. Die Eingangshalle in den Ausmaßen von  $12 \times 7$  m dient als Ausgleich für das an den Ausgangstüren entstehende Gedränge nach schwimmsportlichen Veranstaltungen. Die beiden eingebauten Kassenräume sind gut sichtbar rückwärts in der Eingangshalle gelegen, um bei starkem Besuch, insonderheit auch bei ungünstiger Witterung, ein Anstehen der Badegäste auf der Straße zu vermeiden. Die Einrichtung der Brausebadzellen ist ihrer Einteilung nach wie üblich in Auskleide- und Brauseabteile vorgesehen. Eine etwa 10 cm im Fußboden vertieft liegende Brause-tasse, deren Ablauf durch einen Dreieckseinschnitt sich dem Zulauf entsprechend selbst einstellt, ermöglicht während der eigentlichen Brausezeit ein ausgiebiges Baden und Reinigen der Füße, welchem Zwecke auch eine in etwa 50 cm Höhe eingebaute Fußstütze dient. Im gleichen Geschoß sind ferner untergebracht: ein besonderer Zugang vom Hofe zur Kassenhalle für Besucher mit Fahrrädern, die im Durchgangshof unterzustellen sind, sowie zwei Dienstwohnungen.

Von der zentral gelegenen Eingangshalle führt in Richtung der Hauptachse eine breite Steintreppe mit wenigen Stufen an der Wäscheausgabe vorüber, einmal nach dem rückwärtigen Bau trakt und auch nach der Haupttreppe zu den oberen Geschossen. Eine in Bronze ausgeführte Glaswandteilung mit vier verglasten Pendeltüren bildet hinter dem erwähnten Treppenaufgang im Erdgeschoß den im Betrieb erforderlichen Abschluß des Schwimmbades von den übrigen Badeeinrichtungen.

Im *ersten Obergeschoß* des straßenwärts gelegenen Bauteils sind 78 Einzelzellen für Wannenbäder, für Männer und Frauen getrennt, mit den erforderlichen Neben- und Personalräumen eingerichtet. Zur wechselweisen Benutzung je nach Bedarf für Männer und Frauen ist hierzu ein besonders abgeteilter Mittelflügel von elf Ausgleichbadezellen vorgesehen. Die räumliche Ausgestaltung der Wannenbadanlagen ist nach Art der Brausebadräume durchgeführt. Beide Abteilungen der Wannenbäder sind für Badegäste von zwei an der Treppenhalle des ersten Obergeschosses gelegenen Warteräumen zugänglich. Die weiß emaillierten Stahlbadewannen sind zur besseren Reinigung der Zellen frei aufgestellt. Aus dem gleichen Grunde sind auch die Ablaufrinnen der Wannen nicht abgedeckt.

Das *zweite Obergeschoß* des Vorderbaues nimmt eine russisch-römische und eine medizinische Badestätte für Frauen auf. Es sind hier 50 Auskleidemöglichkeiten (Einzelzellen und Schränke) vorgesehen. Ein besonderer Massageraum, ein Tauchbecken als Vollbad, ein Vorwärmer oder Abkühlungsraum, elektrische Licht- und Dampf-



Eingangshalle.

\*Fußboden, Wände und Decke hellgrün abgetönte Porzellanplättchen (4x4 cm), Türen dunkelgrün.

kastenbäder sowie Dampf- und Wechselduschen ergänzen diese Anlage. Für medizinische und Zusatzbäder sind zehn abgeteilte Wannenbadzellen eingerichtet. Bei der Anlage der russisch-römischen und der medizinischen Bäder wurde der gesamte Naßbetrieb in einem Flügel zusammengeschlossen zur leichteren Beaufsichtigung durch das Badepersonal und um die Ruheräume abseits zu legen und dadurch Störungen fernzuhalten. Von der Aufstellung von Einzelruhebetten in gesonderten Kabinen hat man Abstand genommen. Wie bei der Schwimmhalle, so sind auch hier im wesentlichen aus sanitären Gründen die Auskleidemöglichkeiten von den Bädern und von den Ruheräumen abgeschlossen. Die Entkleidung der Badegäste kann in abgeteilten Einzelzellen mit Schrankeinbauten oder in zwei kleineren Auskleideräumen mit verschließbaren Schränken gemeinsam erfolgen. Der Raum der medizinischen Bäder, der Vorwärme- und Abkühlungsraum mit den hier installierten Lichtbädern und der Massageraum mit Dampfkastenbad und Dampfwechselduschen stehen zwecks einheitlicher Uebersicht offen untereinander in Verbindung. Im Tauchbeckenraum der russisch-römischen Badeanlage sind Sitz- und Wechselbrausen vorgesehen. Dieser Raum liegt um einige Stufen erhöht, um bei seiner Nichtabgeschlossenheit nach dem Vorwärmeraum hin um einige Grade wärmer temperiert zu bleiben. Diese höhere Lage erlaubte zugleich die Schaffung eines besonderen Mezzaninraumes unter dem Fußboden, der einen Zugang zu dem hier frei verlegten Rohrnetz ermöglicht; auch konnte bei dieser Anordnung das Tauchbecken versenkt werden. Mit dem Tauchbeckenraum stehen in unmittelbarer Verbindung die Räume für Dampf, Warmluft und Heißluft. Die Decke des Dampfraumes ist in Porzellanmosaik als Spitzbogengewölbe geformt, um ein Abtröpfen des sich hier niederschlagenden Wassers zu vermeiden. Der Warmluftraum ist in Terfluxmosaik, einem neuartigen Glasprodukt, erstmalig probe-

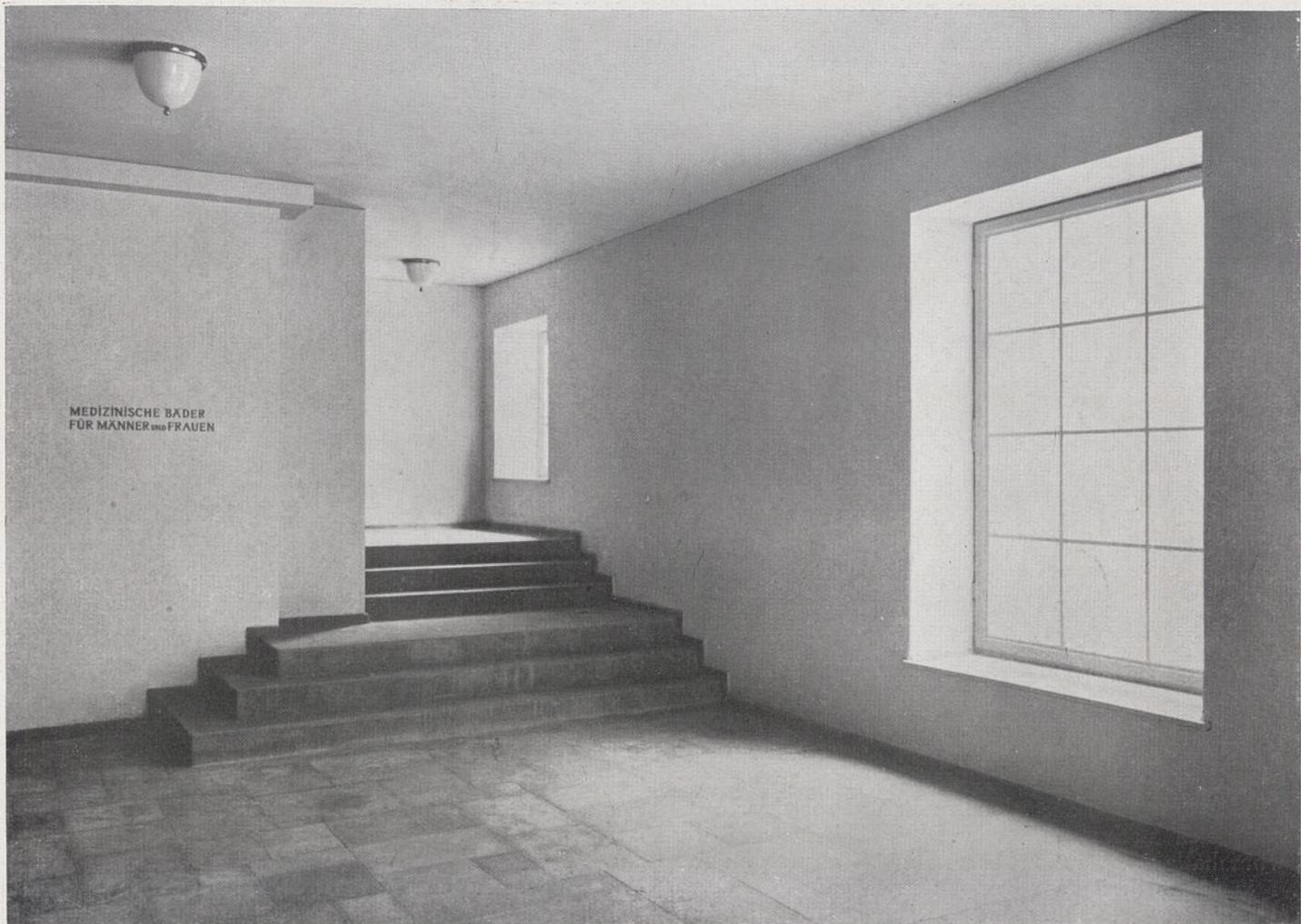
weise ausgelegt. Die Türen vorgenannter Räume sind wärmeschützend durchgebildet und zwecks Einsicht oben mit Glaseinsätzen versehen. Liege- und Sitzgelegenheiten sowie Kaltwasserzapfstellen ergänzen die Einrichtung dieser Raumgruppen. Zur Aufnahme der Ruhebetten dient ein größerer und ein kleinerer Saal.

Das dritte Obergeschoß des Vorderbaues weist eine gleiche russisch-römische Badeanlage für Männer auf. Hier stehen 75 Auskleidemöglichkeiten (Einzelzellen und Schränke) zur Verfügung. Das später erwähnte Sonnenbad steht mit dieser Abteilung in unmittelbarer Verbindung.

Im Dachgeschoß des Vorderbaues sind in dem überhöhten Mittelteil ein Warmwasser- und ein Kaltwasser-Ausgleichbehälter von je 50 cbm aufgestellt. Die seitlichen, gleichfalls massiv gedeckten Dachbodenräume dienen zum Stapeln von Materialien.

Vom Erdgeschoß des straßenwärts gelegenen Bauteiles vermittelt ein Wandelgang mit seitlicher Wäscheausgabe und Treppenanlagen den Verkehr nach dem mittleren zweiten großen Bau trakt, der Auskleidehalle des Schwimmbades. Durch die hier geschaffene Anlage abgetrennter Auskleidemöglichkeiten werden Ausdünstungen von Kleidern und Wäsche der Schwimmhalle ferngehalten. Eine mittlere Flur- und zwei Treppenanlagen in der Auskleidehalle dienen der erforderlichen Trennung der Geschlechter. Die Ausmaße der Halle betragen 60 m Länge bei einer Breite und einer lichten Höhe ab Erdgeschoß von rd. 10 m.

Vom Erdgeschoß nach oben hin bildet die Auskleidehalle einen durch drei Geschosse gehenden, nach der Mitte hin offenen Raum, in dem die Auskleidemöglichkeiten galerieartig eingebaut sind. Durch vierseitig angeordnete Fenster und zwei rd. 15 m lange und 4 m breite Oberlichtverglasungen wird reichlich Licht und Luft zugeführt. Besondere Stiefel- und BarfußTreppen und -gänge ver-



Treppenhalle.

Fußboden Solnhofer Platten. Treppe gleichfarbiger Kunststein. Wände und Decke hellgrün abgetönte Porzellanplättchen.

mitteln die Verbindung der einzelnen Geschosse nach der Schwimmhalle und nach den übrigen Badeeinrichtungen. In den beiden unteren Geschossen der Auskleidehallen sind Einzelzellen, in den oberen Geschossen Schränke zum Auskleiden für insgesamt 538 Badegäste vorgesehen. Ein Vereinszimmer und ein Beratungszimmer für Schwimmfeste sind weiter in diesem Bauteil nahe der Schwimmhalle eingerichtet. Personal-, Geräte- und Nebenräume haben in den einzelnen Geschossen der angrenzenden Bauteile Aufnahme gefunden.

Das in Nord-Südrichtung verlaufende flache Dach dieses Bautraktes ist zugleich mit zwei anschließenden Terrassen, die als Turn- und Rasenplatz ausgeführt sind, mit einer Gesamtfläche von rd. 800 qm als *Sonnenbad* eingerichtet. Ein Belag aus Holzrosten und Flußkies, Brauseanlagen, Ruhegelegenheiten, ein Erfrischungsraum mit davorliegender gedeckter Terrasse sowie Neben- und Warterräumen ergänzen diese mit Pflanzen- und Blumenschmuck versehene Anlage. Erreichbar ist das Sonnenbad durch zwei von den Auskleidetrakten hochführende Treppenanlagen sowie durch Verbindungen aus den Räumen des straßenwärts gelegenen Bauteiles. Da es sich erst aus dem Betrieb der Anstalt ergeben wird, ob ein gemeinsames oder ein nach Geschlechtern getrenntes Sonnenbad wünschenswert ist, erfolgte die Anlage derart, daß eine völlige Abtrennung jederzeit möglich ist.

Die zwischen dem ersten und zweiten Baustrakt liegenden *Höfe* sind unterkellert. Die Unterkellerungen dienen zur Aufnahme der Hauptkesselanlage, als Koks-, Schlacken- und Lagerräume.

Die Auskleidehalle ist in ihrer Mitte mit dem dritten Bauteil, dem eigentlichen Schwimmbad, im Erdgeschoß durch eine Wandelhalle und auf beiden Seiten durch weitere Anbauten verbunden. Diese dienen im Erdgeschoß als Vorreinigungsräume zur Schwimmhalle und sind für Badegäste vor Betreten des Schwimmbades zwangläufig zu

durchschreiten. Abgeteilte Brausezellen und eine Anzahl Fußwaschbecken stehen hier zur Benutzung.

Nach der Parkseite hin schließt sich der dritte große Bauteil, die *Schwimmhalle*, an. Sie hat eine Länge von rd. 60 m, eine Breite von rd. 25 m und eine lichte Höhe von 12 m über dem Wasserspiegel. Die Größe des *Schwimbeckens* beträgt, wie schon erwähnt, 50 m Länge und 15 m Breite mit einer Fläche von 750 qm. Die Schwimmhalle dürfte in ihren Ausmaßen die bisher größte gedeckte Schwimmbahn des Kontinents darstellen. Für Nichtschwimmer ist ein Raum von 16,67 m Länge am flachen Ende abgeteilt, so daß für Sport- und Trainingschwimmen eine ständig freie Uebungsbahn von 33,33 m zur Benutzung steht. Zwei 6 m breite Treppenanlagen führen zu dem am flachen Ende 0,80 m für schwimmsportliche Veranstaltungen ausreichend tiefen Becken. Dieses vertieft sich allmählich bis zur Nichtschwimmergrenze auf 1,20 m, um dann steiler abfallend kurz vor der anderen Stirnwand eine Höchttiefe von 3,50 m zu erreichen. Die weitere Einrichtung für Sport- und Schwimmunterricht (zwei 1 m hohe und ein 3 m hohes Sprungbrett, zwei Sprunggeländer, Startsockel und Tauchstreifen) sind unter Beachtung der Forderungen des Deutschen Schwimmverbandes in neuzeitlichem Sinne vorgenommen. An den Längsseiten sind je drei eingelassene Stufenleitern und an den Bassinwänden ein in 1,20 m Tiefe umlaufender Absatz zum Ausruhen bei Ermüdungen eingebaut. Das Schwimmbekken umläuft ein 5 bzw. 4 m breiter durch Fußbodenheizung erwärmt und mit Porzellanmosaik belegter Umgang, der an den Wänden zu einer Sitzbank erhöht ist. Von hier aus ist zugleich bei Schwimmfesten eine gute Uebersicht nach dem Becken hin gewährleistet. Unmittelbar an der Schwimmhalle liegen ferner Räume für Badewärter und -wärterinnen, Nebenräume für Männer und Frauen, ein Geräteraum, ein Zimmer für den Arzt und den Sanitätsdienst sowie



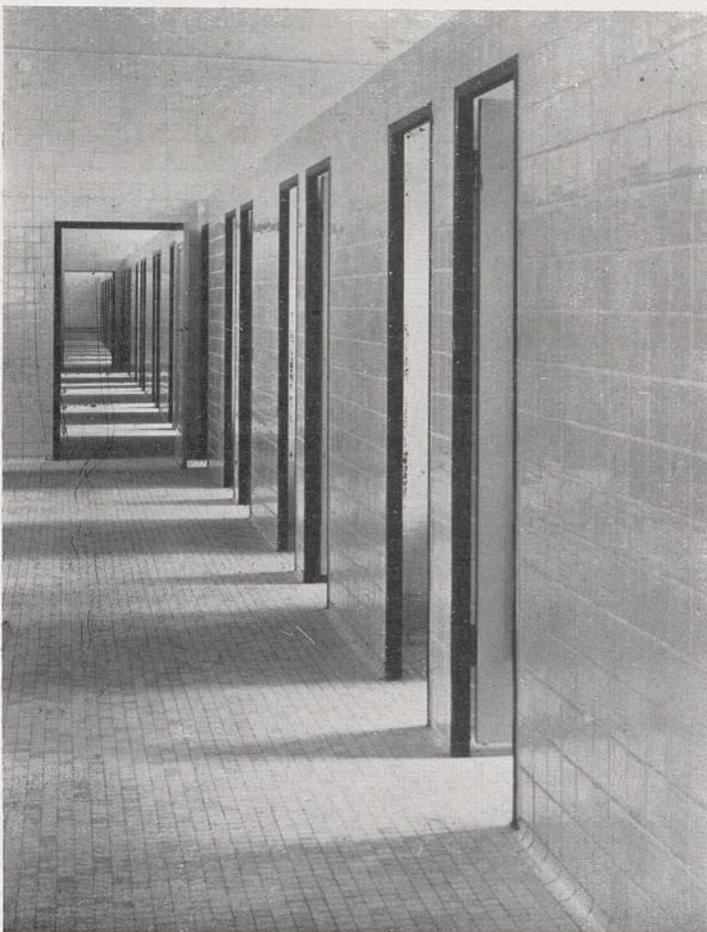
*Medizinische Bäder.*

*Fußboden hellgrün abgetönte Porzellanplättchen, Wandbekleidung weiße Badeanstaltfliesen, Decken weiß gekalkt.*

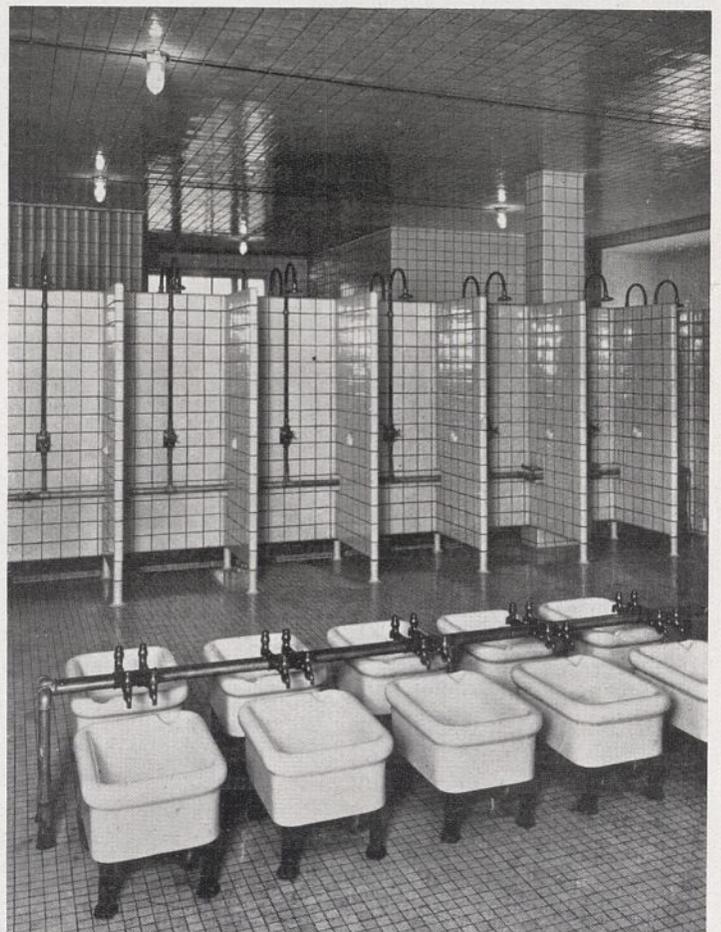
eine Fahrstuhlanlage zur schnellen Beförderung der Sitzgelegenheiten nach dem Keller. Die Seitenwände der Schwimmhalle sind von 5 m Höhe ab in 44 je 8 m hohe und rd. 5 m breite dreiteilige Doppelfenster aufgelöst, deren Teile beliebig verschiebbar sind. Zwischen den Loshölzern der 90 cm voneinander entfernten Doppelfenster führen ringsherum laufende eiserne TZ-Stege, die durch Öffnungen in den senkrechten eisernen Konstruktionspfeilern untereinander verbunden sind. Von diesen Stegen aus ist

eine leichte Bedienung und Reinigung der Fenster möglich. Der zwischen den Fenstern liegende Luftraum wird durch eine besondere Heizanlage erwärmt. Die Bildung von Schwitzwasser und das Herabfallen kalter Luftmassen nach dem Innern der Schwimmhalle wird hierdurch vermieden.

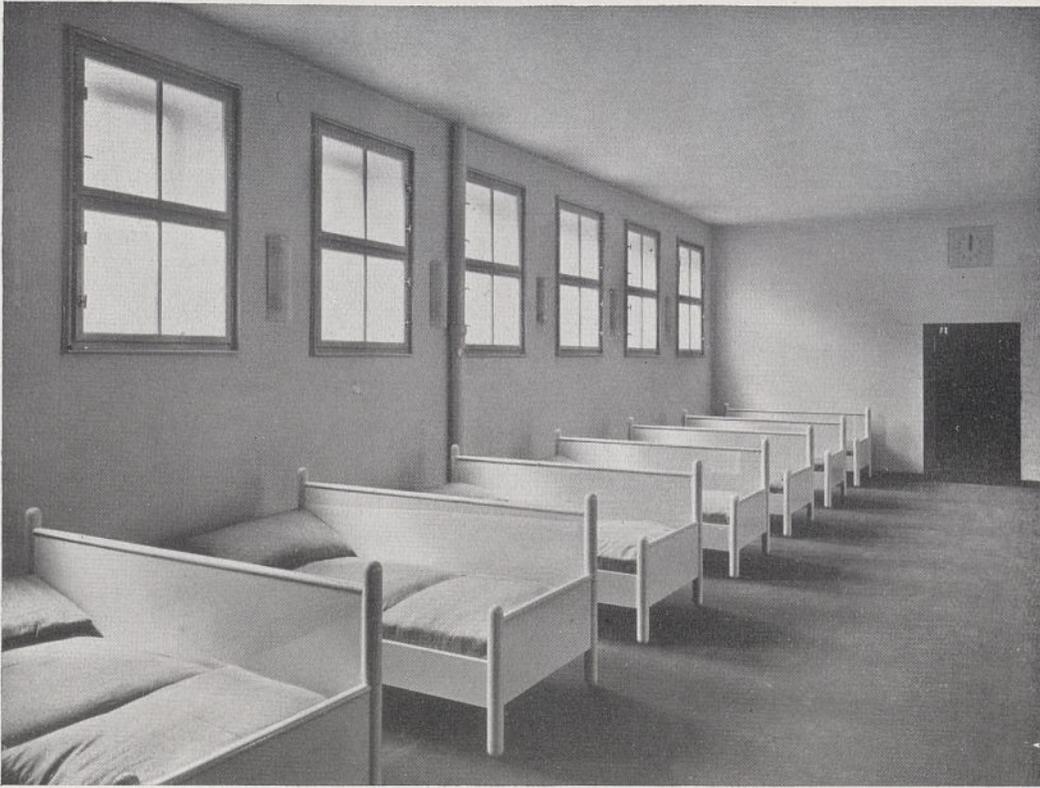
Der Wandgliederung entsprechend ist die Hallendecke in verglaste Kassettenfelder mit beweglichen Oberlichtflügeln eingeteilt. Diese etwa 1200 qm große Staub-



*Wannenbäder, Flur.*



*Vorreinigungsraum der Schwimmhalle.*



*Ruheraum der medizinischen Bäder.*

*Fußboden hellfarbiges Linoleum. Wände und Decke helle Leimfarbe. Fenster leicht getöntes Kathedralglas. Mattverglaste Wandbeleuchtungskörper. Je eine Längsbettwand gegen Einsicht erhöht.*

decke, die bei der ständigen Verdunstung des Wassers und der feuchtwarmen Lufttemperatur einer starken Zersetzung preisgegeben ist, wurde zwischen den mit Monierputz verkleideten Stegen der Decke mit Fenstern aus doppelseitig patentverzinktem Stahlblech und isolierend wirkendem Holzkern nach dem Fabrikat „Rheinland“ ausgestattet, bei dem eine besondere Sicherung gegen Tropfenfall von der Glasabdeckung vorgesehen ist. Zum Zwecke der Reinigung werden die 96 je 9 qm großen Drahtglas-

fenster durch eine besondere Schneckenradwinde betätigt. Durch Luftdruckbremsen können die Fensterflügel in jeder Lage festgehalten werden, so daß auch bei unachtsamer Bedienung Unfälle durch Zurückschlagen der Windenkurbel ausgeschlossen erscheinen. Je zwei Fensterfelder werden durch eine Handwindenkurbel gleichzeitig gehoben, so daß auf die eisernen Dachbinderpfosten keinerlei Horizontalschub der schweren Fensterflügel wirken kann. Für die Anlage dieser Fenster wurden 26 500 kg

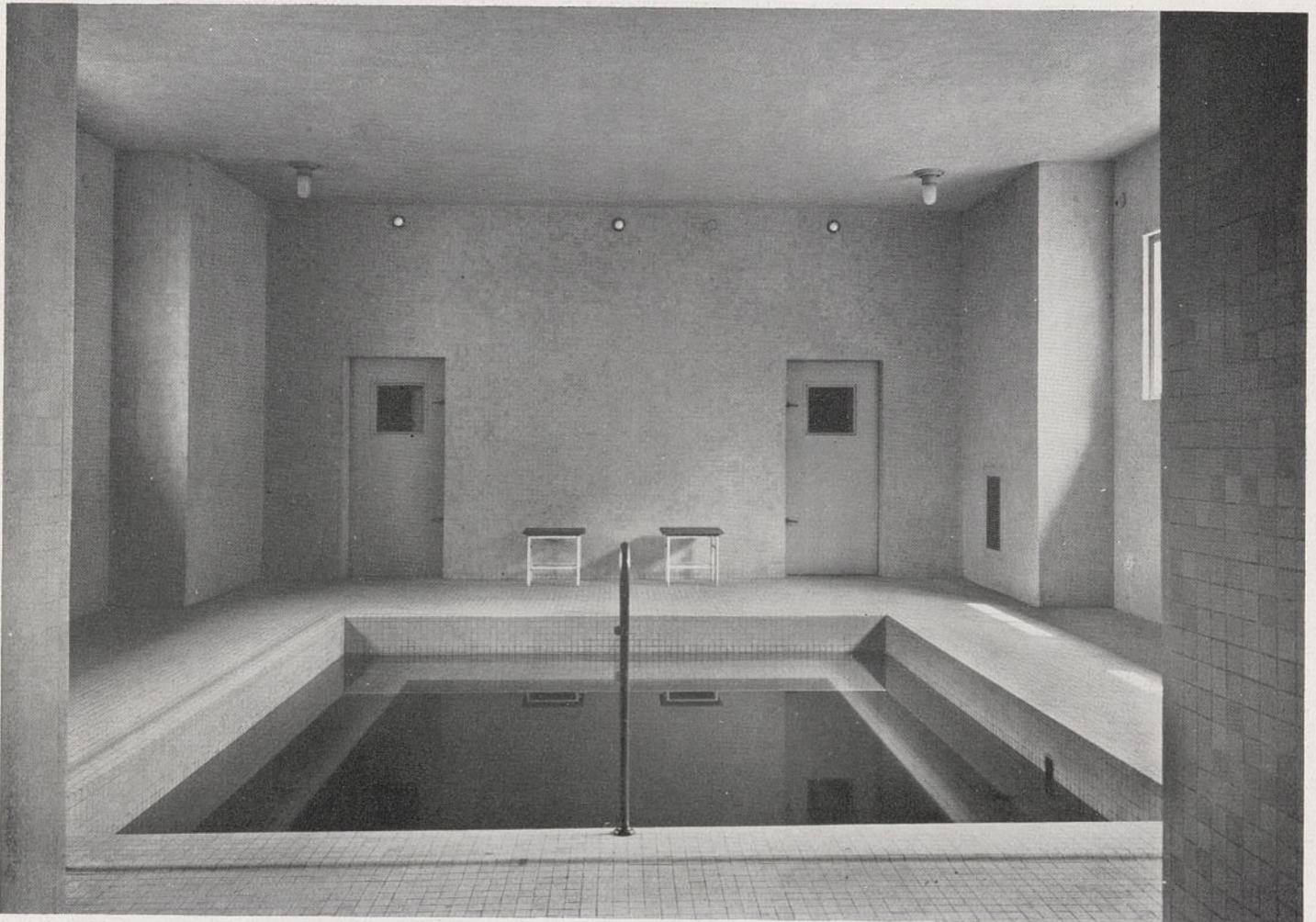


*Auskleideraum für Frauen.*

*Fußboden hellgrün abgetönte Porzellanplättchen (4x4 cm). Wände und Zellen weiße Badeanstaltfliesen. Eiserne Türumrahmungen, Galerie- und Abschlusßgeländer schwarz. Zellentüren silbergrau.*



*Auskleideraum für Männer.*



*Tauchbecken im Russisch-Römischen Bad.*  
Fußboden, Wände und Decke hellgrün abgetönte Porzellanplättchen.

verbundene Eisenkonstruktion und rund 1500 lfd. m Drahtseile benötigt (Abb. S. 169 unten).

Der Zugang zur Schwimmhalle erfolgt für Badende, nach Männern und Frauen getrennt, durch die Vorreinigungsräume, für Zuschauer unmittelbar von dem Haupteingang durch eine vor der Schwimmhalle gelegene rd. 7 m breite und 15 m lange Wandelhalle. Von hier aus führen zwei Treppenanlagen die Badegäste nach den oberen Geschossen der Auskleidehallen und die Zuschauer nach einer oberen eine Längsseite der Halle einnehmenden Galerie. Diese erweitert sich an beiden Enden in zwei rückwärtig gelegene größere Säle, die für gymnastische Übung und Körperkultur bestimmt sind. Diese Räume sind zu Turnzwecken auch unmittelbar von den Auskleidehallen zugänglich. Die die Schwimmhalle rings umschließenden großen Schiebefenster können in warmer Jahreszeit offen gehalten werden. Die an einer Längsseite der Schwimmhalle in Höhe des Obergeschosses stufenartig eingebaute Galerie erweitert sich in ihrer Mitte balkonartig nach vorwärts und rückwärts und bietet so Raum für Repräsentationszwecke. Dem Mittelteil der Galerie ist an der Zugangsseite eine Wandelhalle vorgelagert, an die sich Nebenräume und ein Beratungszimmer mit Fernsprechanlagen anschließen, das bei sportlichen Gelegenheiten auch zugleich der Presse dienen soll. Unter dem Umgang der Schwimmhalle sind zu ebener Erde ein Büro und Lagerräume für die Gartenbauverwaltung eingerichtet. Nach dem Park hin bietet eine geräumige, mit vier Bogen sich öffnende Halle Unterstand für die Parkbesucher.

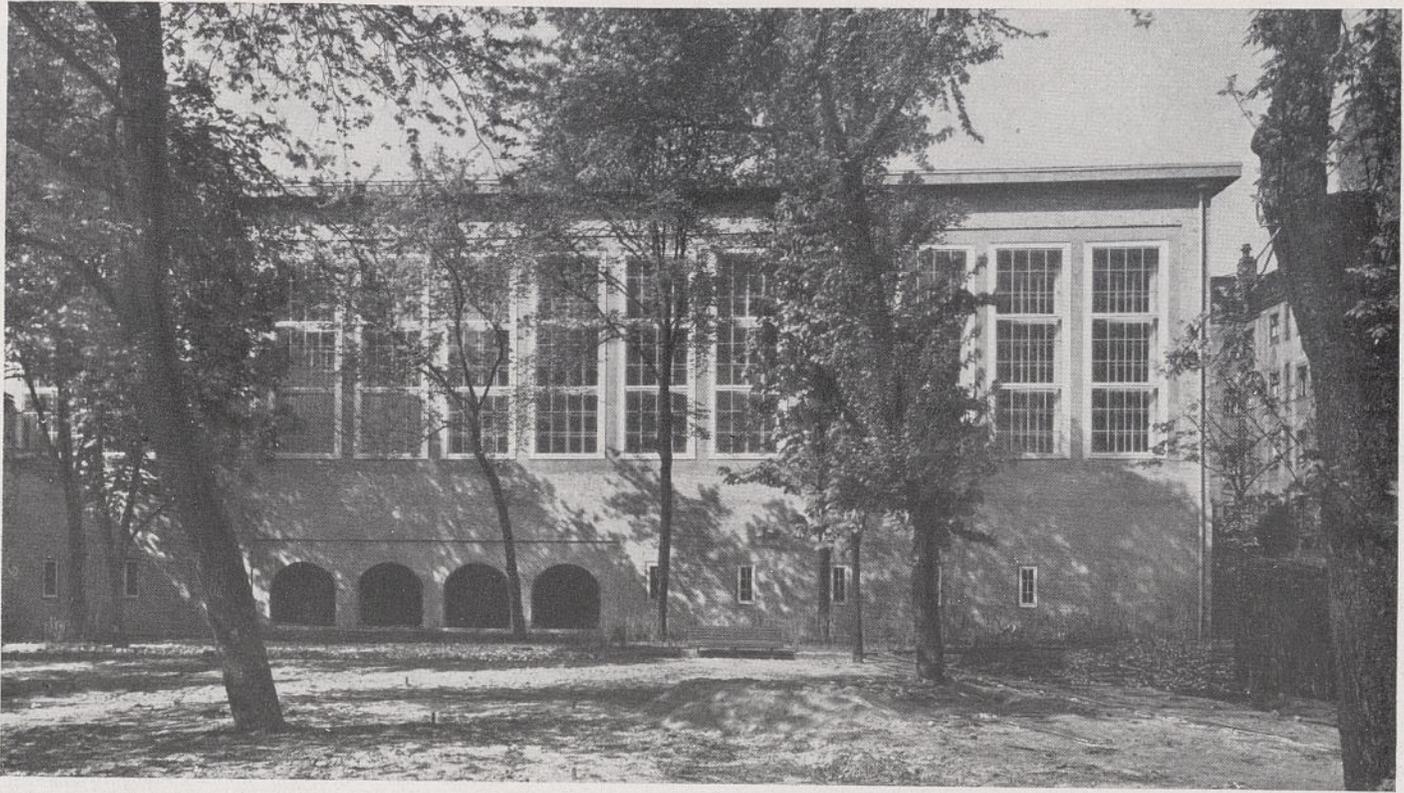
#### TECHNISCHE ANLAGEN.

Eine Niederdruckdampfkesselanlage von 600 qm Heizfläche, bestehend aus zwölf gußeisernen Koksschüttkesseln, erzeugt den Wärmebedarf in Form von Dampf, Heißwasser, Warmwasser und Warmluft. Von einem

zentral gelegenen Verteiler- und Apparateraum wird die Schwimmhalle gruppenweise beheizt durch örtliche Heizkörper, durch Fußbodenerwärmung des Schwimmbeckenumganges, eine Fenster- und Deckenheizung sowie durch Dampfdruckluft. Die Beheizung der beiden Auskleidehallen außerhalb der Schwimmhalle erfolgt durch örtliche Heizkörper. Die im Vordergebäude liegenden Badeabteilungen (Brausebäder im Erdgeschoß, Wannenbäder im ersten Obergeschoß, Medizinalbäder im zweiten und dritten Obergeschoß) werden im wesentlichen durch Dampfdruckluft erwärmt, wobei örtliche Heizkörper zur Ergänzung dienen. Die sechs Dampf- und Heißluftbaderäume im zweiten und dritten Obergeschoß, die auf die üblichen hohen Wärmegrade zu bringen sind, erhielten außer den örtlichen Heizkörpern noch einen im Apparateraum angeordneten Dampfdruckheizapparat, von dem aus sechs kupferne Warmluftleitungen hoch erwärmte Frischluft in die Schwitzbaderäume zur notwendigen Lufterneuerung einführen.

Die Belüftung sämtlicher Baderäume erfolgt auf natürlichem Wege und durch Einführung frischer, vorgewärmter und gereinigter Druckluft durch Dampfdruckheizapparate. Die Lüftung ist auf die einzelnen Badeabteilungen abgestellt. Große Luftvorwärmekammern und lange Kanäle sind vermieden. Die beiden Vorreinigungsräume, die zwischen Schwimmhalle und Auskleidehalle liegen, sind zur Verhütung der Wrasenbildung mit Abluftgebläsen versehen.

Die Anstalt hat außer dem Anschluß an die städtische Wasserleitung eine eigene Wassergewinnungsanlage, die im allgemeinen den Gesamtwasserbedarf liefern soll. Das Rohwasser wird zwei im Parkgelände erbohrten, rd. 80 m tiefen Kiesfilterbrunnen entnommen. Elektropumpen fördern das Rohwasser aus dem Untergrund und drücken es durch eine geschlossene zweiphasige Enteisungsanlage in das Verteilungsnetz und in die Warmwasserbereiter.



Parkansicht der Schwimmhalle.

Aus dem zentral angeordneten Verteiler- und Apparate-  
raum führen systemweise Kalt- und Warmwasserleitungen  
zu den in den einzelnen Badeabteilungen ringförmig an-  
geordneten Gebrauchsleitungen für die verschiedenen  
Bäder. Soweit das Wasser in den Bädern nicht aufge-  
braucht wird, strömt es zu den auf dem Dachboden des  
Vorderbaues aufgestellten, schmiedeeisernen Kalt- und  
Warmwasser-Ausgleichbehältern. Die Kalt- und Warm-  
wasserversorgungsanlage ist somit zur Schonung der  
zahlreichen Armaturen, der zuverlässigen Mischung des  
Brausewassers in den Mischgarnituren und der geräusch-  
losen Wasserentnahme unter gleichen Niederdruck gestellt.

Im Schwimmhallenbau befindet sich unter dem flachen  
Teil des Schwimmbeckens ein Tiefbehälter von 800 m<sup>3</sup>  
Nutzinhalt zur Aufspeicherung von warmem Wasser, der  
als Ausgleich für die wechselnden Betriebsverhältnisse  
in der Badeanstalt dient. Durch die hiermit erzielte  
Gleichmäßigkeit des Betriebes steigt auch der Wirkungs-  
grad der Betriebseinrichtung. Eine besondere Elektro-  
Kreiselpumpe fördert das aufgespeicherte Warmwasser,  
besonders an Tagen des Höchstbedarfs, aus dem Tief-  
behälter zu den Verbrauchsstellen. Für die ständige Fil-  
tration des Schwimmbeckenwassers sind vier Filter mit  
einer Stundenleistung von 150 m<sup>3</sup> eingebaut. Das Wasser  
wird mit Chlor entkeimt.

Die für das Becken richtige gleichmäßige Verteilung  
des eingeführten und die richtige Abnahme des durch-  
fließenden Wassers im Schwimmbecken, wobei das ganze  
Becken stets gleichmäßig von dem Zirkulationswasser  
durchflossen und die Umwälzung des Inhaltes vollkommen  
vollzogen wird, ist durch folgende Maßnahmen erreicht:  
Die Einführung des gefilterten und entkeimten Rein-  
wassers erfolgt an der flachen Seite des Beckens durch  
einen schmalen Schlitz und zwar über die ganze Breite  
des Beckens, unmittelbar über dem Beckenboden; ferner  
zur schnelleren Füllung noch durch zwei Einführungen  
von je 125 mm lichter Weite an jeder der 50 m langen  
Längsseiten des Beckens. Die Abführung des Wassers ge-  
schieht an der tiefsten Stelle des Beckens durch eine sich  
über die ganze Breite erstreckende Abflußrinne, die durch  
starke durchlochte Kupferplatten in einer Zarge aus  
Profilmessing mittels Vorreiber abgedeckt ist. Die Rinne  
selbst erhielt vier Anschlüsse an die Umlaufleitung zu den  
Filtern.

Sämtliche Schmutzwasser der Badeanstalt wie die der

Vorreinigungsräume, der Aus- und Ankleideräume, aller  
Badeabteilungen und der Aborte werden zusammen mit  
den Regenwässern der Dächer durch zwei Abflußleitungen  
von je 200 mm lichter Weite unmittelbar der Kanalisation  
der Gartenstraße zugeführt.

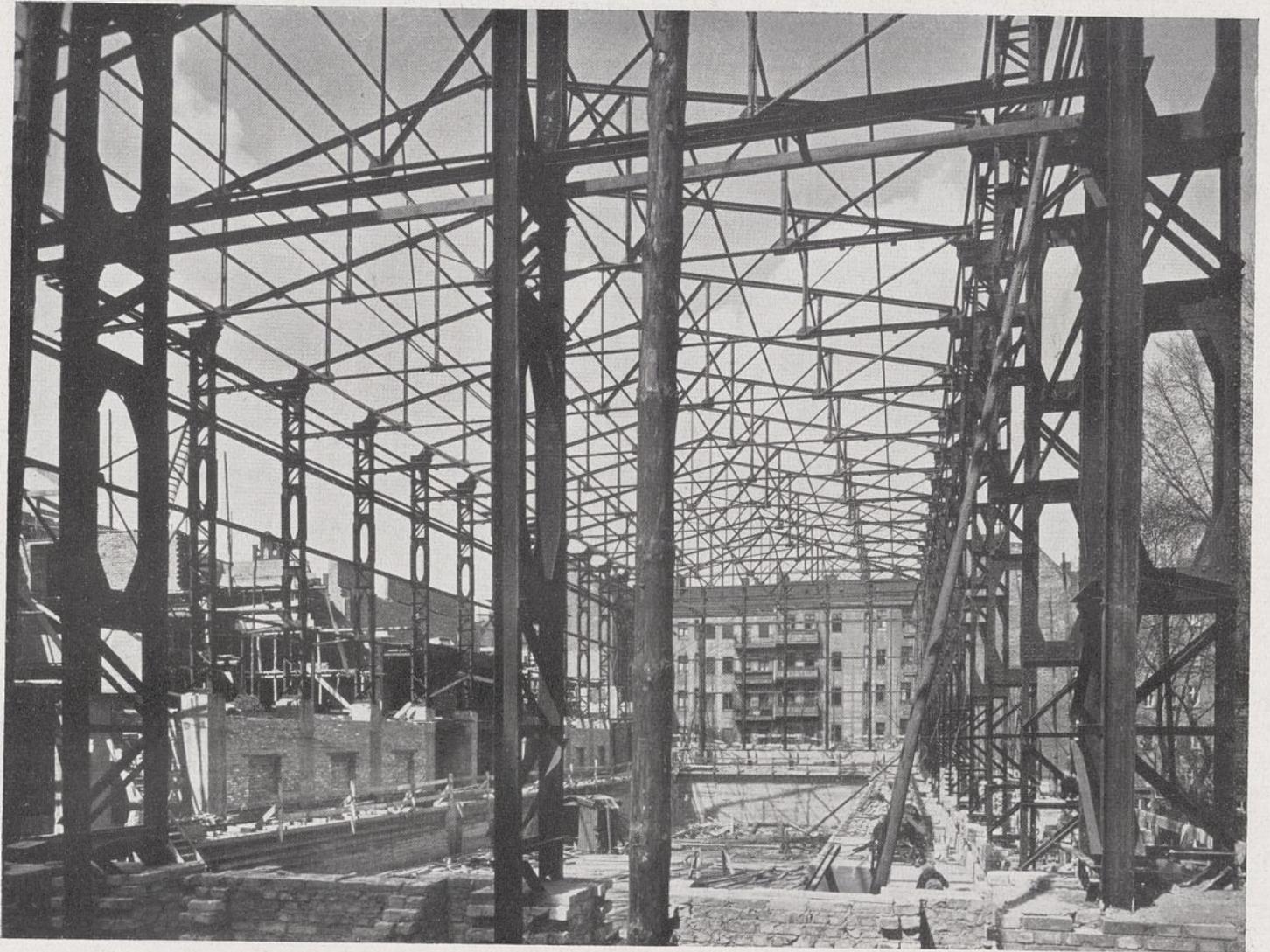
Die Entleerung des rund 1500 m fassenden Schwimm-  
beckens geschieht durch eine Sonderleitung von 300 mm  
lichter Weite und 360 m Länge, die durch das hintere  
Parkgelände und weiter im Zuge der Berg- und Elsasser  
Straße und Ackerstraße in einen Notauslaß der Spree  
führt. Durch diese Abführung der Wassermenge bei Ent-  
leerung des Schwimmbeckens und seines ständigen Zu-  
satzwassers in einen öffentlichen Wasserlauf werden er-  
hebliche Kanalisationsgebühren erspart, die Maschinen  
der betreffenden Pumpstation sind entlastet und gleich-  
zeitig ist die Gefahr einer Ueberschwemmung der tief-  
liegenden Höfe des Grundstücks beseitigt.

Die elektrische Energie wird von den Berliner städti-  
schen Elektrizitätswerken in der Form von Drehstrom  
von 6000 Volt Spannung geliefert und in einer der An-  
stalt gehörenden, im Keller gelegenen Transformatoren-  
station auf die Gebrauchsspannung von  $3 \times 380/220$  Volt  
umgespannt.

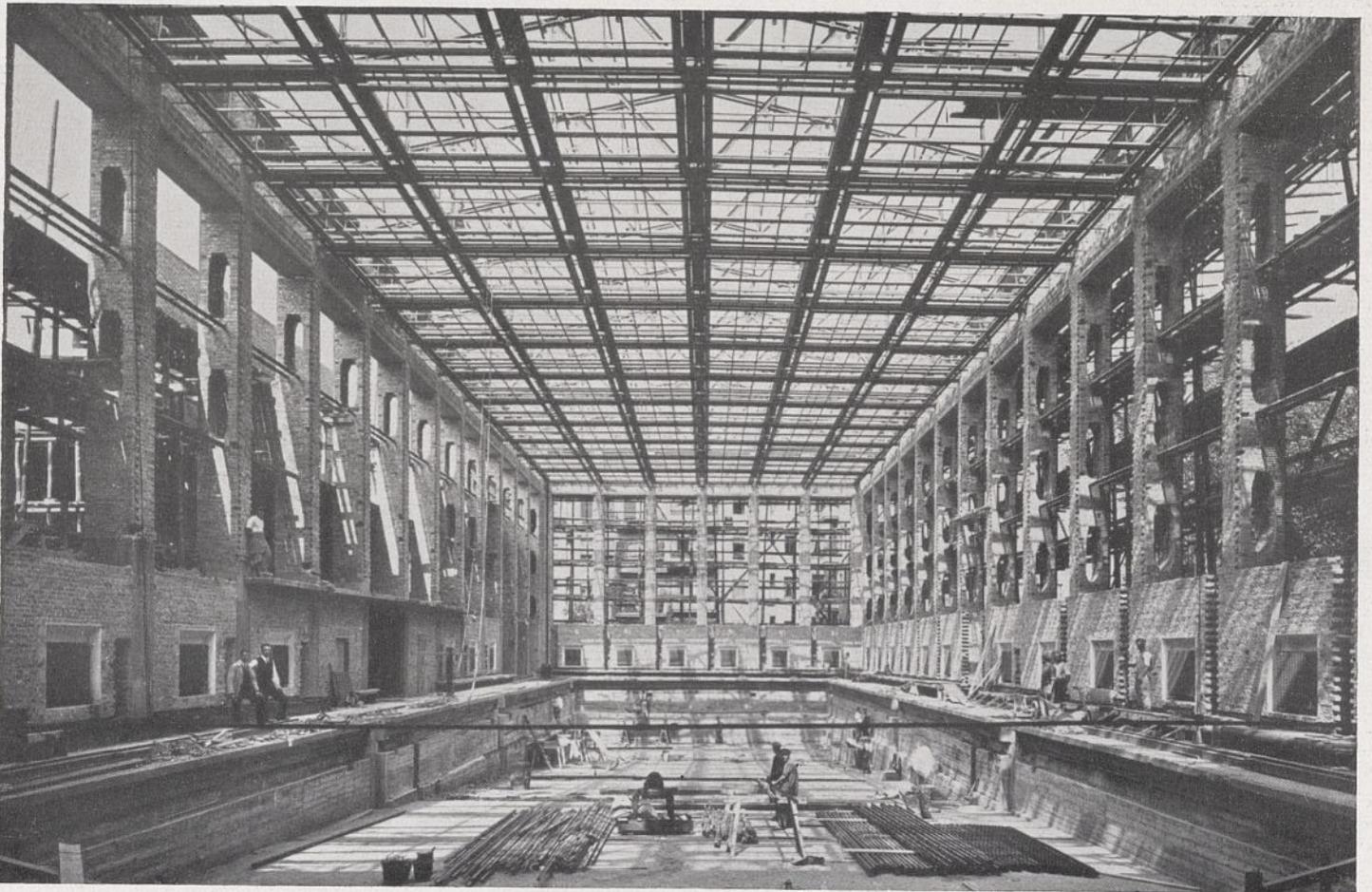
Die Beleuchtungsanlage umfaßt rund 1050 Brenn-  
stellen mit einem Anschlußwert von etwa 95 kW. Dazu  
kommen vier Lichtbäder von je 5 kW. Bemerkenswert  
ist die Beleuchtung der Schwimmhalle mit 14 Opalglas-  
kugeln von insgesamt 7,8 kW Leistung. Es wurden hier-  
bei Kugeln verschiedenen Durchmessers gewählt, die  
außerdem in verschiedenen Höhenlagen hängen. Jedes  
Kugelpendel kann von der begehbaren, aus Glas be-  
stehenden Staubdecke aus mittels einer Seilwinde, die in  
eine normale Bogenlampenkupplung eingreift, herabge-  
lassen werden. In den feuchten Räumen wurde durch-  
weg Feuchtraumleitung auf Abstandschellen verlegt. Die  
übrige Installation wurde in den oberen Geschossen in  
Gummirohr unter Putz, im Kellergeschoß in Stahlpanzer-  
rohr auf Putz verlegt. Um bei Störungen in der Strom-  
versorgung Unglücksfälle zu verhindern, wurde eine Not-  
beleuchtungsbatterie von 114 Zellen aufgestellt.

Die Kraftanlage umfaßt 29 Motoren von insgesamt  
rund 210 PS. Darunter befinden sich vier Pumpenmoto-  
ren von je 40 PS, ein Wäsche- und zwei Personenaufzüge.

Die im Stadtbad eingebaute Fernsprechanlage um-



*Eisenkonstruktionen der Schwimmhalle.*

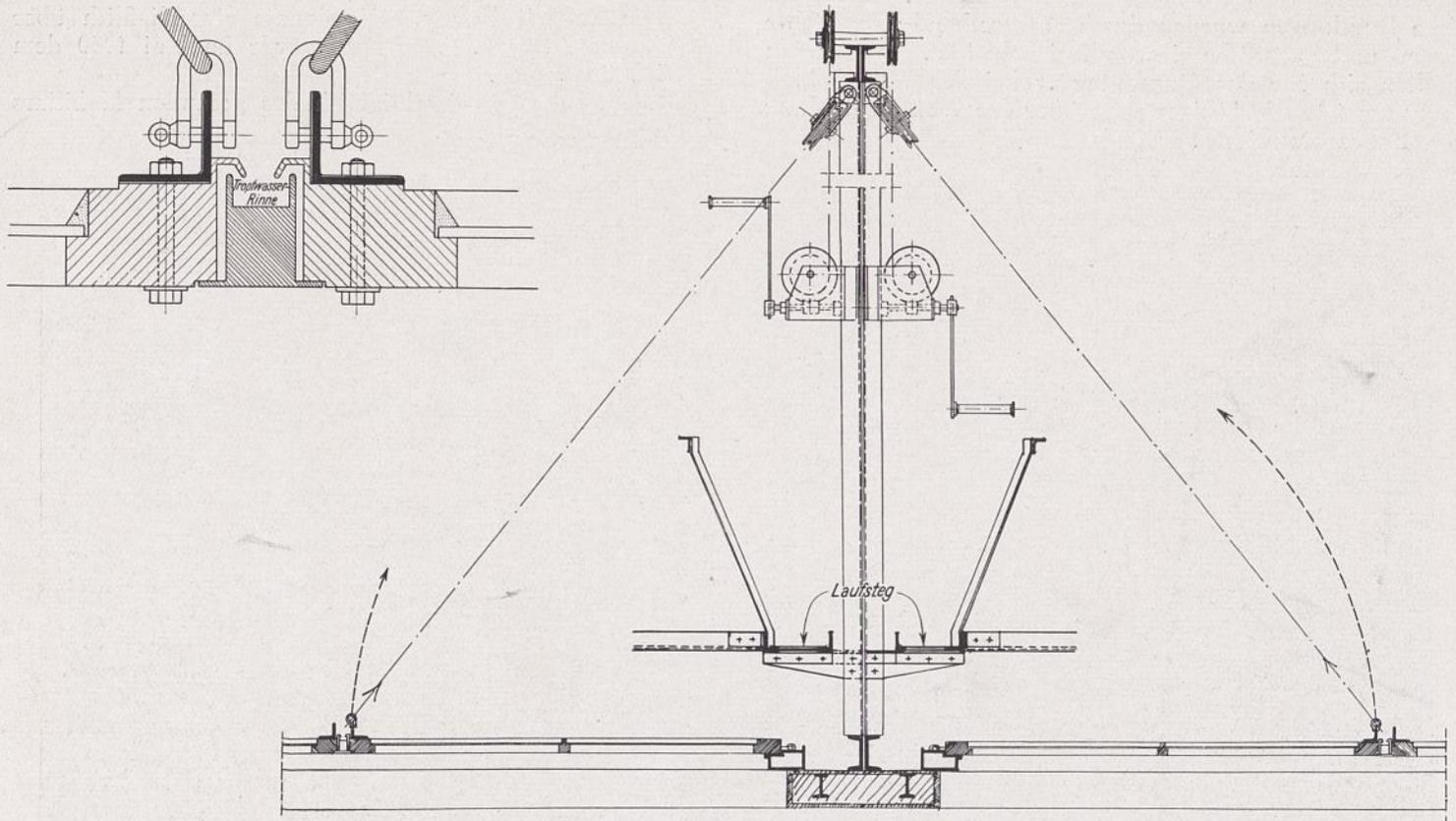


*Schwimmhalle im Bau.*



*Schwimmhalle.*

*Fußboden und Wände hellgrün abgetönte Mosaikplättchen (4x4 cm). Decke Vitralin-Lackfarbe hellgrün. Fenster: Rahmen und Sprossen weiß. Verglasung abgetöntes Kathedralglas.*



*Einzelheiten der Deckenfenster in der Schwimmhalle.  
Links Deckenfensterverschluss; rechts Windenantrieb zum Öffnen der Deckenfenster.*

faßt sechs kombinierte Apparate für Amts- und Hausverkehr sowie 15 Apparate für reinen Hausverkehr.

Die *Uhrenanlage* besteht aus einer Hauptuhr mit elektrisch-automatischem Aufzug und 17 Nebenuhren, die in minutlichen Abständen von der Hauptuhr gesteuert werden.

Um es den Besuchern der medizinischen und der Wannenbäder zu ermöglichen, notfalls Hilfe herbeizurufen, wurde eine *Lichtsignalanlage* mit etwa 140 Ruf- und Richtungslampen eingebaut.

Durch eine *Wasserstand-Fernmeldeanlage* wird der technische Betrieb der Anstalt erleichtert.

#### NEUE BAUMATERIALIEN.

Im Benchmen mit der Bauverwaltung des Bezirks Mitte haben die Osramwerke, Berlin, und die Porzellanfabrik Teltow eingehende Versuche zur Gewinnung eines härteren und beständigeren Materials an Stelle der bisher verwendeten Tonfliesen angestellt. Die Osramwerke brachten ein Glasprodukt „*Terflux*“ heraus, das sich in jeder Farbe, matt und glänzend, mit leicht gewellter oder gehämmelter Oberfläche herstellen läßt. Im Stadtbad Mitte ist der Warmluftraum der russisch-römischen Badeanlage — Frauenabteilung — in blaugrünen  $4 \times 4$  cm großen Plättchen ausgelegt. Die Anbringung erfolgte gleich der von Wandplatten in Zementputz. Die mechanische Festigkeit erscheint außerordentlich hoch.

Das Porzellanmosaik „*Teltower Plättchen*“ der Porzellanfabrik Berlin-Teltow, im Stadtbad im Format von  $4 \times 4$  cm verwendet, wurde nach ausgiebiger Erprobung in vielen Räumen des Stadtbades Mitte als Wand-, Fußboden- und Deckenbelag benutzt. Der Widerstand dieses Materials gegen atmosphärische Einflüsse erscheint sehr groß. Das Verlegen erfolgte in Zementmörtel in  $40 \times 40$  cm großen, mit der Außenseite auf Papier aufgeklebten Platten. Zur besseren Haftung im Putz war die Unterfläche aufgerauht. Als Farbton wurde ein grünliches Weiß gewählt, das infolge des verschiedenen Brandes im Ton variiert und die Fläche stark belebt. Von besonderer Bedeutung war, daß die an und für sich nicht zu glatte Oberfläche in Verbindung mit den zahlreichen Fugen ein Ausgleiten, insonderheit auf dem Fußboden des Schwimmbeckens und dessen Umgängen, ausschließen. Erforderliche Rundungen wurden durch entsprechend hergestellte Form- und Paßstücke einwandfrei bekleidet. Die Kosten stellten sich für das Quadratmeter bei der Wandbekleidung um 1,40 RM billiger gegenüber der Wandbekleidung mit Badeanstaltfliesen.

Die Verfügen der verwendeten Materialien erfolgte teils in reinem, teils in weißem Marmorzement. Da dieser in feuchten Räumen nicht beständig ist, wurde ein bisher in Berlin wenig bekannter weißer *belgischer Lafarge-Zement* unter Zusatz von Steinmehl verwendet. Eingehende Versuche technischer Prüfungsstellen stellten die Dauerhaftigkeit bei stärkster nasser Beanspruchung dieses Materials fest, das wohl als einziges vollkommen weiß bleibendes wasserbeständiges Verfügenmaterial auf dem Baumarkt zu nennen ist.

#### KONSTRUKTION.

Die konstruktive Ausführung der vorderen Bauteile ist in Ziegelbau mit tragenden Wänden vorgenommen. Die massiven Decken sind meist Hohlsteinträgerdecken. In den russisch-römischen Bädern kam für die Decken Eisenbeton zur Verwendung. Auch das Dach ist massiv in Steineisendeckung ausgeführt. Die Wände der eigentlichen Schwimmhalle wurden als Stahlskelettbau ummauert konstruiert, das Schwimmbecken ist in Eisenbeton und das Dach in Eisen mit Drahtverglasung hergestellt. Das Schwimmbecken ist unter Einziehung einer Dehnungsfuge mit Klebmasse gedichtet und mit Porzellanmosaik belegt. Umfassungswände, Schwimmbecken und Schwimmbeckenumgang bilden einen einheitlichen Eisenbetonkörper, auf den sich die Eisenkonstruktion der oberen Schwimmhalle aufsetzt.

#### ENTWURF, BAUZEIT, BAUKOSTEN.

Der Bau wurde von den städtischen Körperschaften nach dem Entwurf des Bezirksamts Berlin-Mitte, Oberbaurat Dr.-Ing. C. J e l k m a n n, genehmigt und unter dessen Oberleitung ausgeführt; hierbei übernahm Professor Dr. H. T e s s e n o w mit die künstlerische Verantwortung, insbesondere für die Gestaltung des Gebäudeinneren. Die örtliche Bauleitung lag in den Händen des Bezirksamts, Architekt A. M ü l l e r. Die maschinentechnischen Anlagen standen unter Aufsicht des städtischen Heiz- und Maschinenamtes, die Stark- und Schwachstromanlagen unter Leitung der Berliner städtischen Elektrizitätswerke A.-G., die statische Berechnung erfolgte durch die Ingenieure R u h n und S c h a i m.

Die Arbeiten waren pauschal vergeben.

Die Bauzeit betrug  $15\frac{1}{2}$  Monate einschließlich über drei Monate Streik. Der Bau wurde im Mai 1930 dem Betrieb übergeben.

Die Baukosten einschließlich des gesamten Mobiliars betragen 3 050 000 RM.



Sonnenbad.

# PRAKTISCHE UND THEORETISCHE UNTERSUCHUNG VON SCHWINGUNGSMESSERN ZUR AUFNAHME UND BEURTEILUNG VON VERKEHRERSCHÜTTTERUNGEN.

Von Dipl.-Ing. Werner Zeller, Hannover.

## I. EINLEITUNG<sup>1)</sup>.

Alle Schwingungsmesser, sie mögen konstruiert sein, wie sie wollen, lassen sich in eine der drei folgenden Gruppen einreihen:

1. Unterfrequenzinstrumente. Das sind die Schwingungsmesser, die auf dem Prinzip der Massenträgheit beruhen. Ihre Eigenfrequenz liegt unterhalb der Frequenzen, die gemessen werden sollen. Hierher gehören alle Seismographen.

2. Ueberfrequenzinstrumente. Die Eigenfrequenz dieser Schwingungsmesser liegt über den zu messenden Frequenzen.

3. Gleichfrequenz- oder Resonanzinstrumente. Hier ist Eigen- und Meßfrequenz gleich. Diese Apparate können nur in dem einen Fall, daß es sich um nur eine einzige, genau bekannte Meßfrequenz handelt, brauchbare Resultate liefern.

Neben dieser Einteilung ist es üblich, zu unterscheiden zwischen statischen und dynamischen Schwingungsmessern, zwischen registrierenden und nicht registrierenden, zwischen Amplituden-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsmessern, die, wofern sie registrieren, eine Weg-Zeit-, eine Geschwindigkeit-Zeit- oder eine Beschleunigung-Zeit-Linie aufzeichnen. Alle diese Unterscheidungen lassen sich der ersten Einteilung unterordnen, und zwar folgendermaßen:

### 1. Unterfrequenzinstrumente.

- a) Dynamische Instrumente. a) Amplitudenmesser: aa) registrierend, ββ) nicht registrierend. β) Geschwindigkeitsmesser: aa) registrierend, ββ) nicht registrierend.
- b) Statische Instrumente (Beschleunigungsmesser): aa) registrierend, ββ) nicht registrierend.

### 2. Ueberfrequenzinstrumente.

- a) Dynamische Instrumente (Amplitudenmesser): aa) registrierend, ββ) nicht registrierend.
- b) Statische Instrumente (Beschleunigungsmesser): aa) registrierend, ββ) nicht registrierend.

### 3. Gleichfrequenzinstrumente.

Zur Messung von Verkehrerschütterungen können nur Unter- oder Ueberfrequenzinstrumente in Frage kommen, da es sich stets um die verschiedensten zu messenden Frequenzen handelt. Die dritte Gruppe wird deshalb hier nicht weiter behandelt werden.

## II. THEORIE DER INSTRUMENTE.

### A. Unterfrequenzinstrumente.

a) Dynamische Instrumente (Amplitudenmesser, Geschwindigkeitsmesser). Amplitudenmesser und Geschwindigkeitsmesser unterscheiden sich in ihrer Bauart nicht; der Unterschied besteht nur darin, daß ein Amplitudenmesser mechanisch oder optisch registriert, während ein Geschwindigkeitsmesser elektrisch registriert. Die Bewegung einer bewickelten Masse im konstanten Magnetfeld erzeugt eine elektromotorische Kraft, die der Geschwindigkeit proportional ist.

1. Wirkungsweise. Schwingungen sind wie überhaupt alle Bewegung relativ. Zur Messung ist also in erster Linie ein festes Bezugssystem notwendig. Dies wird bei allen Unterfrequenzinstrumenten durch eine

<sup>1)</sup> Die hier geschilderten Untersuchungen sind mit Mitteln des Reichsverkehrsministeriums an der Technischen Hochschule Hannover beim Lehrstuhl des Prof. Dr.-Ing. Risch ausgeführt.

träge Masse geschaffen. Im Idealfall müßte die Masse bei einer Erschütterung in Ruhe bleiben und das ganze übrige Instrument genau die gleiche Bewegung mitmachen wie die Unterlage. Dieser Fall kann jedoch nie erreicht werden, denn er entspricht einer unendlich langen Eigenperiode  $T_0$  der Masse. Wenn nun die Masse aber auch nicht in Ruhe bleibt, sondern die Bodenbewegung in einem bestimmten Maßstab mitmacht, so ist das dann belanglos, wenn das Maß ihrer Mitbewegung bekannt ist. Handelt es sich bei einer Bodenbewegung nur um eine einzige ganz bestimmte Frequenz, so kann dieses Maß aus der Resonanzkurve entnommen werden. Diese Kurve (Abb. 1) liefert den Zusammenhang zwischen Ausschlag (Ampl.)  $A$  und erzwingender Frequenz bzw. Periode  $T$ . Sind die Schwingungen der Masse ungedämpft, so werden die Amplituden an der Stelle  $T = T_0$  (Resonanzstelle) unendlich groß. Der zeitliche Verlauf der Bewegungen der Masse relativ zum Apparatgestell wird vergrößert registriert, und die Aufzeichnungen können dann ein direktes Maß für die Bodenbewegung abgeben.

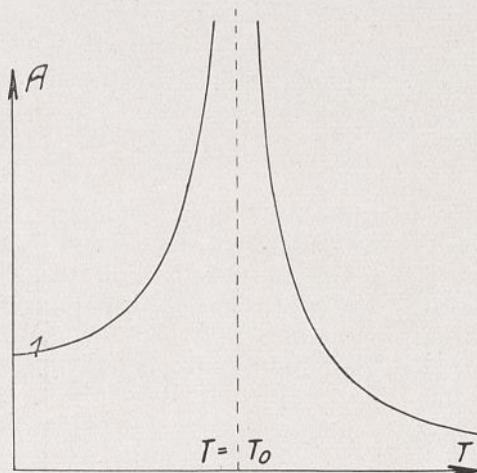


Abb. 1. Resonanzkurve.

Soweit diese Instrumente registrieren, geschieht dies im allgemeinen mechanisch, d. h. ein Platinstift schreibt auf einem berußten Papier oder es wird mit Tinte geschrieben. Die Tintenregistrierung hat den Vorteil, daß sie auf fortlaufendem Papier geschehen kann, wogegen die Rußschrift auf einer Trommel stattfinden muß. Beide Registrierarten haben aber den Nachteil, daß sie ein variables Element, nämlich die Reibung einführen. „... Die Schreibspitze kehrt nach einer Reihe von Schwingungen nicht in die Ruhelage zurück, sondern es bleibt der sog. Reibungsausschlag  $r$ , der durch die Reibungsgröße im Ruhezustand bedingt ist.“ Es gelingt zwar, dieses  $r$  in erster Näherung zu bestimmen, trotzdem ist aber für genauere Messungen eine optische Registrierung vorzuziehen. Eine solche wird bei diesen Instrumenten so bewerkstelligt, daß ein mitschwingender Spiegel in den Lichtweg einer optischen Abbildung eingeschaltet wird. Dabei ist, solange es sich um kleine Ausschläge  $\Theta$  der Masse handelt, für die  $\text{tg } 2\Theta = 2\Theta$  gesetzt werden kann, keine Korrektur nötig. (Galitzin.)

2. Entwicklung der Apparatkonstanten. Wäre es möglich, der trägen Masse eine unendlich hohe Eigenperiode, d. h. die Eigenfrequenz Null zu geben, so würden die Aufzeichnungen eines solchen Instruments die wahre Bodenbewegung bis auf den Maßstab unverfälscht wiedergeben. Da es aber nicht möglich ist, die-

sen Idealzustand zu erreichen, so ist nunmehr zu untersuchen, welchen Einfluß eine endliche *Eigenperiode* auf die Aufzeichnungen des Instruments hat.

Nach dem Gesagten erscheint es klar, daß der Einfluß um so geringer ist, je größer die Eigenperiode ist. Weil das Höherlegen der Eigenperiode aber mit einer Vermehrung der Masse verbunden ist, wird man sich mit einer verhältnismäßig niederen Eigenperiode begnügen. Dies ist ohne weiteres möglich, denn es gibt ein anderes Mittel, den schädlichen Einfluß der Eigenperiode stark zu verringern, nämlich eine *Dämpfung*. Die Eigenschwingung wird so gedämpft, daß ihre Ueberlagerung über die erzwungenen Schwingungen abgeschwächt, nach Möglichkeit vermieden wird. Würde man bei endlicher Eigenperiode auf Dämpfung verzichten, so müßte das Instrument bei einmaligem Anstoß nach dem Trägheitsgesetz dauernd seine Eigenschwingung ausführen.

Die Dämpfung geht nach einem Exponentialgesetz, u. zw. so, daß das Verhältnis  $\varepsilon$  zweier aufeinanderfolgenden Amplituden  $y_n$  und  $y_{n+1}$  (Dämpfungsverhältnis) konstant ist. Es gilt:

$$\varepsilon = e^{-\alpha \cdot \frac{T_0}{2}}$$

$\alpha$  heißt Dämpfungsfaktor und  $T_0$  ist die Eigenperiode<sup>2)</sup>. Der natürliche Logarithmus des Dämpfungsverhältnisses heißt das logarithmische Dämpfungsdekrement (Abnahme):

$$\Lambda = \ln \varepsilon = \alpha \cdot \frac{T_0}{2}$$

Eine bemerkenswerte Tatsache ist es, daß sich unter dem Einfluß der Dämpfung die Eigenperiode der Masse vergrößert, u. zw. nach dem Gesetz:

$$T_0 = T'_0 \frac{\sqrt{\pi^2 + \Lambda^2}}{\pi}$$

worin  $T_0$  die Eigenperiode des gedämpften Instruments und  $T'_0$  die unter Ausschaltung der Dämpfung bedeutet.

Von der Dämpfung ist zu unterscheiden die *Reibung* am Schreibstift. Jene geht nach einem Exponentialgesetz, diese geht nach einem linearen Gesetz. Die Reibung ist in erster und auch genügender Näherung berücksichtigt, wenn man das Dämpfungsverhältnis

$$\varepsilon = \frac{y_n}{y_{n+1}}$$

ersetzt durch

$$\varepsilon = \frac{y_n - r}{y_{n+1} + r}$$

Der Reibungsauslag  $r$  läßt sich nach Galitzin in erster Näherung berechnen als:

$$r = \frac{1}{4} (\bar{y}_n - \bar{y}_{n+2})$$

worin  $\bar{y}_n$  und  $\bar{y}_{n+2}$  Ausschläge des ohne Dämpfung frei schwingenden Instruments sind.

Eine weitere, wesentliche Apparatkonstante ist die *Vergrößerung*. Wie eingangs erwähnt, läßt sich die Amplitude, mit der eine gewisse erzwingende Frequenz aufgezeichnet wird, aus der Resonanzkurve entnehmen. Die Gleichung dieser Kurve ist für eine sin-förmige Zwangskraft, wie sich aus der Differentialgleichung des Problems nachweisen läßt:

$$\mathfrak{B} = V \cdot \frac{T_0'^2}{\sqrt{(T_0'^2 - T^2)^2 + \frac{\alpha^2 \cdot T_0'^4 \cdot T^2}{\pi^2}}}$$

worin  $\mathfrak{B}$  die jeweilige Vergrößerung ist. Für  $T = 0$  ergibt sich  $\mathfrak{B} = V$ ;  $V$  heißt Indikatorvergrößerung und ist für einen bestimmten Apparat konstant. — Die Vergrößerung  $\mathfrak{B}$  ist, wie aus der Formel hervorgeht, abhängig

<sup>2)</sup> Ableitung siehe z. B. Geiger u. Scheel, Handbuch der Physik, Band VIII.

<sup>3)</sup> Ableitung siehe Galitzin, Vorlesungen über Seismometrie, S. 487 bis 490.

von der erzwingenden Periode. Sobald es sich also nicht nur um die Aufnahme *einer* bestimmten Frequenz handelt, kann aus der Resonanzkurve das Maß der Mitbewegung der trägen Masse nicht mehr entnommen werden. Es ist mithin notwendig, für diesen allgemeineren Fall eine weitere Forderung, nämlich die der Konstanz der Vergrößerung im Meßbereich aufzustellen. Dieser Forderung kann bis zu einem gewissen Grad genügt werden durch geeignete Wahl des Dämpfungsfaktors  $\alpha$ , von dem ja  $\mathfrak{B}$  auch abhängig ist.

Aus Abb. 2 geht hervor, daß das Maximum der Kurven mit steigender Dämpfung immer niedriger wird, sich gleichzeitig nach links verschiebt und schließlich ganz verschwindet. Die am besten konstante Vergrößerung erhält man, wenn die Apparatkonstanten so gewählt werden, daß das Maximum der Resonanzkurve eben an die Stelle  $T = 0$  rückt, mit anderen Worten, ein möglichst großes, annähernd wagerechtes Stück besitzt. Die Bedingung dafür ist  $\frac{d\mathfrak{B}}{dT} = 0$ , für  $T = 0$ .

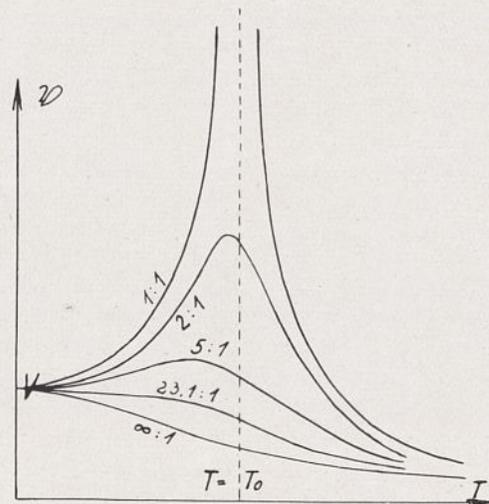


Abb. 2. Resonanzkurven für verschiedene Dämpfungsverhältnisse.

Die Durchführung der Rechnung ergibt für den Dämpfungsfaktor die Forderung:

$$\alpha^2 = \frac{2\pi^2}{T_0'^2}$$

Definitionsgemäß besteht auch die Beziehung:  $\Lambda = \alpha \cdot \frac{T_0}{2}$ .

Durch Eliminieren von  $\alpha$  ergibt sich, daß das gesuchte logarithmische Dekrement von der Eigenperiode des Instruments unabhängig wird und zwar:  $\Lambda = \pi$  oder  $\varepsilon = 23,1 : 1$ . Dieser Dämpfungszustand wird mit „halbaperiodisch“ bezeichnet.

Praktisch wird man nicht ganz bis zur halbaperiodischen Dämpfung gehen, sondern die Dämpfung so wählen, daß die Resonanzkurve noch ein geringes Maximum hat und zwar von der Größe des Fehlers, der zugelassen werden soll, z. B. 5 v H. Weicht das Maximum um 5 v H von  $V$  ab, so ist der Meßbereich des Instruments begrenzt durch den Wert  $T$ , bei dem die Kurve um 5 v H nach unten von  $V$  abweicht. Der Meßbereich ist jetzt größer als bei halbaperiodischer Dämpfung.

Endlich ist hier noch zu sagen, daß sich die Indikatorvergrößerung  $V$  bestimmen läßt, als:  $V = \frac{J}{L}$ , wobei  $J$  die Indikatorlänge ist, d. h. bei mechanischer Registrierung die Länge des Hebels, der, wenn er als einziger vorhanden wäre, dieselbe Vergrößerung hervorbringen würde, wie die angewandten mechanischen Uebersetzungen.  $L$  heißt die zu  $T_0'$  äquivalente Pendellänge, also die Länge, die ein Pendel haben müßte, wenn seine Periode  $T_0'$  ist:

$$L = \frac{g \cdot T_0'^2}{4\pi^2}$$

Weiter muß bei jedem Instrument die *Registriereschwindigkeit* bekannt sein, um die erzwingenden Perioden in Sekunden angeben zu können.

Wir haben somit für jedes Instrument die fünf Apparatkonstanten:

a) die Eigenperiode  $T_0$ . Sie wird unter Ausschaltung der Dämpfung bestimmt zu  $T'_0$ . Die Eigenperiode des gedämpften Instruments läßt sich daraus berechnen;

b) die Reibung  $r$ . Sie wird aus den Eigenschwingungen des Apparats unter Ausschaltung der Dämpfung bestimmt nach der Formel:

$$r = \frac{1}{4} (\bar{y}_n - \bar{y}_{n+2});$$

c) die Dämpfung. Das Dämpfungsverhältnis  $\varepsilon$  kann aus der Aufnahme der gedämpften Eigenschwingung entnommen werden als:

$$\varepsilon = \frac{y_n}{y_{n+1}}$$

oder unter Berücksichtigung der Reibung:

$$\varepsilon = \frac{y_n - r}{y_{n+1} + r};$$

d) die Indikatorvergrößerung  $V$ . Da  $V = \frac{J}{L}$ , so ist zu bestimmen

α) die Indikatorlänge  $J$ , und zwar ist:  $J = a \frac{M}{m}$ , worin  $M$  die Masse des Instruments bedeutet und  $a$  der Ausschlag der Schreibspitze ist, der durch eine Zusatzmasse  $m$  zur Gesamtmasse  $M$  hervorgerufen wird;

β) die äquivalente Pendellänge  $L$  nach:

$$L = \frac{g \cdot T_0'^2}{4\pi^2};$$

e) die Registriergeschwindigkeit.

5. Richtige Wahl der Apparatkonstanten. Bei näherer Betrachtung der Formel für die wahre Vergrößerung:

$$\mathfrak{B} = V \frac{T_0'^2}{\sqrt{(T_0'^2 - T^2)^2 + \frac{\alpha^2 \cdot T_0'^4 \cdot T^2}{\pi^2}}}$$

zeigt sich, daß alle fünf Apparatkonstanten darin enthalten sind. Unter der Voraussetzung, daß innerhalb des Meßbereichs die Vergrößerung z. B. um höchstens 2 vH nach beiden Seiten schwanken soll, läßt sich daraus die Eigenperiode in Abhängigkeit der Dämpfung für jeden Frequenzbereich berechnen. Es kann vorweggenommen werden, daß die größte Periode, die bei Verkehrserschütterungen auftritt, erfahrungsgemäß 0,2 Sekunden ist. Für diesen Fall ( $T = 0,2$  und  $\mathfrak{B} = 0,98 V$ ) ergibt sich der Zusammenhang:

$$T_0'^2 = -\frac{\pi^2 - \Lambda^2}{\pi^2 + \Lambda^2} \pm \frac{\sqrt{(\pi^2 - \Lambda^2)^2 + 0,04 (\pi^2 + \Lambda^2)^2}}{\pi^2 + \Lambda^2}.$$

Die weitestgehende Konstanz der wahren Vergrößerung wird erreicht für annähernd halbperiodische Dämpfung. Die Eigenperiode  $T_0$  ist insofern dabei noch von Einfluß, als für größere  $T_0$  der Meßbereich größer ist, wenn eine zulässige Abweichung der wahren Vergrößerung  $\mathfrak{B}$  von der Indikatorvergrößerung  $V$  nicht überschritten werden soll. Für unseren Meßbereich berechnet sich die Eigenperiode bei halbperiodischer Dämpfung ( $\Lambda = \pi$ ) zu  $T_0' = 0,45$  sek.

Um eine Genauigkeit von 2 vH zu gewährleisten, darf die praktisch benutzte Dämpfung nur um so viel geringer sein, daß das Maximum der Resonanzkurve höchstens um 2 vH höher liegt als  $V$ .

Was die Vergrößerung angeht, wären damit günstige Resultate erzielt. Die Aufzeichnungen sind aber immer noch gefälscht durch den Einfluß der Dämpfung. Durch die oben geforderte, annähernd halbperiodische Dämpfung werden nämlich die Eigenschwingungen nicht

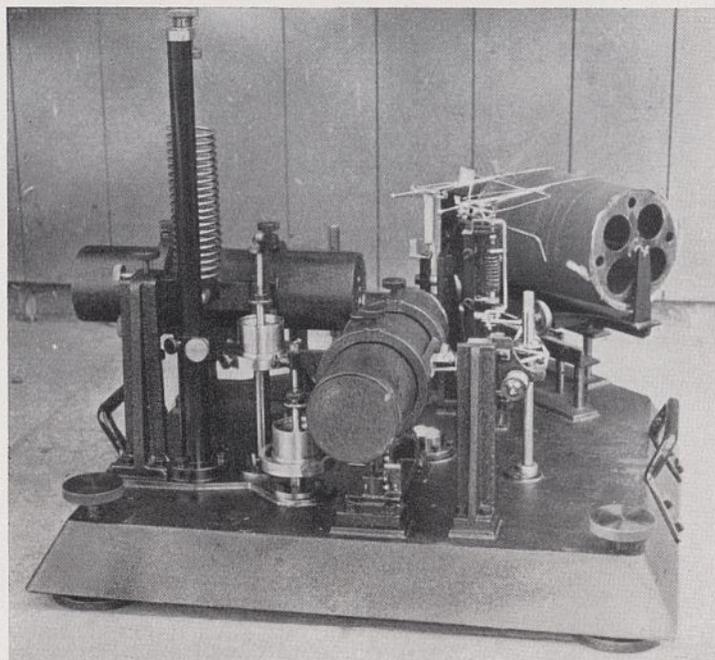


Abb. 5. Seismograph von Spindler und Hoyer.

beseitigt, noch viel weniger durch eine schwächere Dämpfung. Die Aufzeichnung des Instruments stellt nicht die tatsächliche Bodenbewegung dar, sondern eine Ueberlagerung dieser mit Eigenschwingungen. Falls es sich um eine konstante periodische erzwingende Kraft handelt, klingt die Eigenschwingung ab und schon nach einer Periode ist sie im Diagramm nicht mehr sichtbar. Sobald aber Stöße auftreten, ergibt sich ein unüberschaubares Zusammenwirken von Eigenschwingung und erzwingender Schwingung. Jene ist bei starker Dämpfung zwar nur in der ersten halben Periode vorhanden, innerhalb dieser Zeit haben aber schon mehrere Stöße stattgefunden. Jeder Stoß trifft die Eigenschwingung in einer anderen Phase und stößt sie immer wieder von neuem an, so daß in der ganzen Aufnahme überhaupt keine Stelle zu finden ist, an der der Einfluß der Eigenschwingung nicht vorhanden wäre.

Zusammenfassend läßt sich somit sagen: Erschütterungsmesser, die auf dem Grundsatz der Massenträgheit aufgebaut sind, müssen eine Eigenperiode von  $T_0' = 0,45$  sek und annähernd halbperiodische Dämpfung haben. Die Dämpfung wird zahlenmäßig durch den Grad der Genauigkeit festgelegt. Eine Ueberlagerung der Eigenschwingung ist bei nicht-konstanten Bewegungen nie zu vermeiden.

4. Der Seismograph von Spindler und Hoyer (Abb. 5). Auf einer schweren Grundplatte ist ein Vertikal- und ein Horizontalseismograph (beide unabhängig voneinander) so zusammengebaut, daß beide auf derselben Rußtrommel nebeneinander registrieren. Die Masse ist 12 000 g. Die Eigenperiode ohne Dämpfung beträgt  $T_0' = 0,44$  sek und das Dämpfungsverhältnis  $\varepsilon = 5$ . Die Eigenperiode ist für den Meßbereich der Verkehrserschütterungen richtig gewählt, die Dämpfung dagegen erscheint zu niedrig. Um innerhalb des Meßbereichs die Vergrößerung bis auf 2 vH konstant zu halten, müßte die Dämpfung annähernd halbperiodisch sein.

Die Resonanzkurve des Spindlerschen Apparates (Kurve 5 : 1 in Abb. 2) zeigt noch ein ausgeprägtes Maximum. Die Abszisse  $T$  des Maximums ist leicht berechenbar durch Differenzieren der Kurvengleichung und nachheriges Nullsetzen. Es ergibt sich:

$$T^2 - T_0'^2 + \frac{\alpha^2}{2\pi^2} \cdot T_0'^4 = 0,$$

darin ist:  $\alpha^2 = \frac{4\Lambda^2}{T_0'^2}$ . Durch Einsetzen der Konstanten  $T_0' = 0,44$  und  $\varepsilon = 5$  wird  $T = 0,534$  sek.

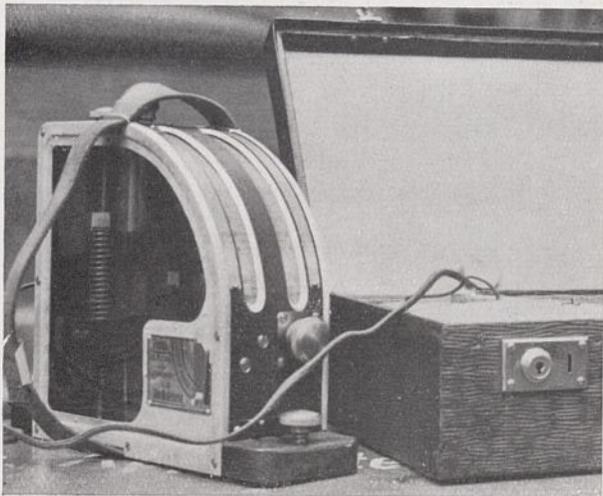


Abb. 4. Schenckscher Apparat.

Das Maximum liegt also schon außerhalb des Meßbereichs. Von Interesse ist nun der Betrag, um den die Vergrößerung an der Stelle  $T = 0,2$  sek, also im Höchstfall, von der Indikatorvergrößerung abweicht. Durch Einsetzen der Zahlen in die Kurvgleichung ergibt sich:  $\mathfrak{B} = 1,12 V$  für  $T = 0,2$ ; also eine Abweichung von 12 v H. Für das Maximum ( $T = 0,354$ ) selbst ist die Abweichung 25 v H.

Um diese Abweichung von 12 v H auf 2 v H herabzudrücken, müßte, wie eine leichte Rechnung zeigt, das Dämpfungsverhältnis  $\epsilon = 15$  gewählt werden. Sieberg begnügt sich in seiner Erdbebenkunde mit  $\epsilon = 5$ , also mit einer bis zu 25 v H schwankenden Vergrößerung. Eine um nur 2 v H schwankende Vergrößerung würde für  $\epsilon = 5$  erst für  $T \approx 0,18 T_0$  erreicht, d. h. beim Spindlerschen Apparat für  $T \approx 0,08$  sek.

Wir sehen somit, daß der Seismograph, so wie er gebaut ist, für konstante periodische erzwingende Schwingungen von  $T \approx 0,08$  sek richtige Resultate liefert, sofern man nur den Beginn der Aufzeichnung, wo die Eigenschwingung noch in Erscheinung tritt, außer acht läßt. Für allgemeinere Fälle, wo nicht konstante periodische Schwingungen oder rasch wechselnde Stöße auftreten, läßt sich aus dem Seismogramm dieses Instrumentes kein Schluß auf die wahre erzwingende Schwingung ziehen.

5. Der Geigersche Vibrograph. Die ganzen vorhergehenden Überlegungen lassen sich auch auf den Geigerschen Apparat (Abb. 5) anwenden. Er besitzt keine besondere Dämpfungseinrichtung, weshalb die Eigenperiode stets mit Dämpfung bestimmt werden muß. Erst nachher kann auf das ungedämpfte Instrument reduziert werden. Unter diesen Umständen ist auch eine Bestimmung der Reibung nicht möglich. Die Eigenperiode kann durch Verändern der Größe der trägen Masse verschiedenen Meßbereichen angepaßt werden. Ein Mangel des Instrumentes ist die geringe Dämpfung. Konstante

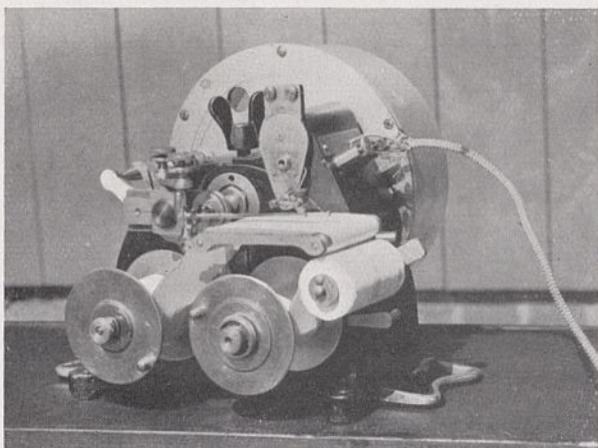


Abb. 5. Geigerscher Vibrograph.

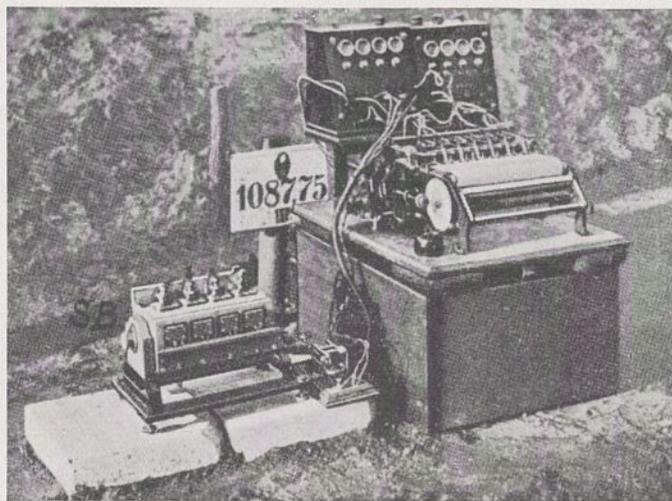


Abb. 6. Langerscher Apparat.

Vergrößerung kann also nur für sehr kleine Perioden erzielt werden. Aber ganz abgesehen davon, sobald es sich nicht mehr um konstante periodische Schwingungen handelt, tritt die Eigenschwingung in der Aufzeichnung des Apparats über den ganzen Schwingungsverlauf in Erscheinung, so daß aus den Resultaten ein Schluß überhaupt nicht mehr gezogen werden kann.

6. Der Schencksche Apparat (Abb. 4). Das Instrument ist grundsätzlich dasselbe wie der Spindlersche Seismograph und der Geigersche Vibrograph. Es handelt sich um einen nicht registrierenden, rein qualitativen Apparat, der ebenso zu beurteilen ist, wie jene beiden. Als weiterer schwerwiegender Nachteil kommt hier aber noch dazu, daß auf die Perioden nicht oder nur sehr schlecht geschlossen werden kann. Für die Beurteilung von Verkehrserschütterungen genügt aber, wie in einem späteren Abschnitt dargelegt wird, die Kenntnis der Amplitude allein in keinem Fall. Brauchbare Ergebnisse kann der Apparat nur dann liefern, wenn nichts anderes als gerade die Amplitude einer konstanten periodischen Schwingung gemessen werden soll.

#### b) Statische Instrumente (Beschleunigungsmesser).

Ein Beschleunigungsmesser liegt dann vor, wenn die Anzeigen des Instruments der wirkenden Kraft proportional sind. Alle Amplitudenmesser können auch als Beschleunigungsmesser angesprochen werden, so lange die erzwingende Schwingung eine reine sin-Schwingung ist. Der Auswertung der Aufzeichnungen muß dann nur ein anderer Maßstab zugrunde gelegt werden. In allen anderen Fällen können nur statische Instrumente als Beschleunigungsmesser ausgebildet werden.

1. Wirkungsweise. Eine Masse ist durch Federn so aufgehängt, daß sie die Spitze einer Mikrometerschraube berührt. Spitze und Masse liegen in einem elektrischen Stromkreis. Wird das Instrument in Richtung seines Freiheitsgrades einer Beschleunigung ausgesetzt, die so groß ist, daß sich die Masse ihrer Trägheit zufolge von der Schraubenspitze abhebt, so wird dies durch Stromunterbrechung angezeigt. Vorherige Eichung gibt die Möglichkeit zu unmittelbarer Messung derjenigen Beschleunigung, die im ganzen Beschleunigungsverlauf sicher erreicht, meistens auch überschritten wurde.

Der Vorzug dieser Instrumente gegenüber den dynamischen ist der, daß eine Beschleunigung richtig gemessen werden kann, einerlei ob sie periodisch oder stoßartig ist. Die Massenträgheit hat hier im oben angeführten Sinne keinen Einfluß. Andererseits ist aber im Hinblick auf Verkehrserschütterungen von großem Nachteil, daß die Frequenz bzw. Häufigkeit, mit der eine Beschleunigung auftritt, nicht gemessen werden kann. Die Kenntnis der Beschleunigung allein genügt ebensowenig wie die der Amplitude allein zur Beurteilung.

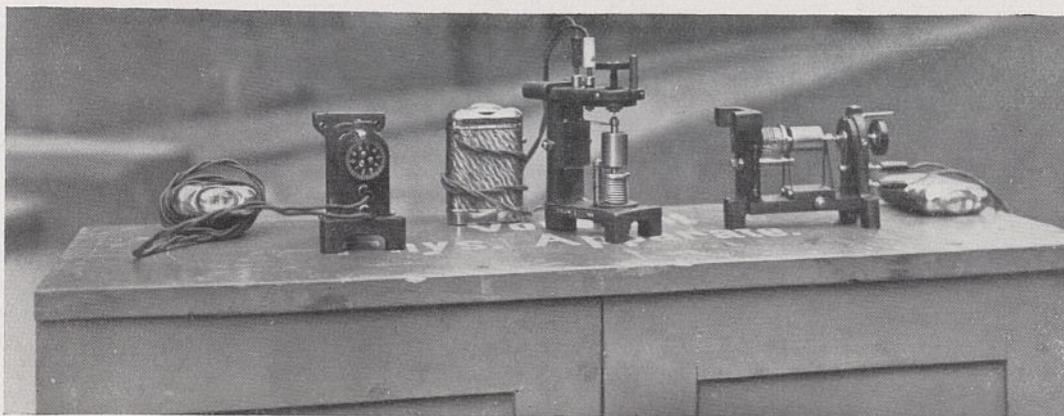


Abb. 7. Maximalbeschleunigungsmesser der Prospektion G. m. b. H., Göttingen.

2. Der Maximalbeschleunigungsmesser der Prospektion G. m. b. H., Göttingen. Abb. 7 zeigt drei Maximalbeschleunigungsmesser, die in den drei Koordinaten des Raums aufgestellt sind. Die elektrische Spannung wird durch je eine Taschenlampenbatterie geliefert. Der Kontakt von Mikrometerschraubenspitze und Masse ist parallel zur Glühbirne geschaltet, so daß bei Lösen des Kontakts ein Aufleuchten der Birne eintritt. Soll die maximale aufgetretene Beschleunigung gemessen werden, so ist ein mehrmaliges Wiederholen derselben Messung notwendig, wobei jedesmal das Instrument unempfindlicher gemacht wird durch Drehen an der Mikrometerschraube, so lange bis sich die Masse eben nicht mehr abhebt. Eine Beschleunigung kann damit etwa auf  $5 \text{ cm/sek}^2$  genau gemessen werden.

5. Der Langersche Apparat. Das Instrument (Abb. 6) besteht aus einem Satz Maximalbeschleunigungsmesser SB. Durch Federn werden die einzelnen Massen verschieden vorgespannt, so daß jede Masse erst dann vom Kontakt abgehoben wird, wenn die ihr zugeteilte Beschleunigung überschritten wird. Durch die Kontaktlösung werden über ein Relais Schreibstifte in Tätigkeit gesetzt. Der Apparat hat gegenüber dem vorhergehenden den Vorzug, daß schon nach einmaliger Messung die Maximalbeschleunigung bekannt ist mit der Genauigkeit, die das Instrument gibt, z. B.  $5 \text{ cm/sek}^2$ . Ein weiterer Vorzug ist der, daß wenigstens noch lange Perioden oder niedere Frequenzen, mit denen die Beschleunigungen auftreten, mitaufgezeichnet werden (Abb. 8). Eine leider zu niedere Grenze ist dieser Möglichkeit aber gesetzt durch die Trägheit, mit der die Relais arbeiten und dadurch, daß wesentlich kleinere Kontaktwege als  $0,1 \text{ mm}$  nicht mehr genau genug arbeiten. Aber auch wenn es gelänge, höhere Frequenzen zu messen, so könnte die Aufzeichnung doch nicht als ganz ideal angesprochen werden, weil es nicht möglich ist, Ueberlagerungsfrequenzen, die in den meisten Fällen auftreten, sichtbar zu machen.

### B. Ueberfrequenzinstrumente.

1. Allgemeine Entwicklung. Im Unterschied zu den Unterfrequenzinstrumenten, die auf der Massenträgheit beruhen, muß bei den Ueberfrequenzinstrumenten jede Trägheitswirkung so weit als irgend möglich vermieden werden. Die große Masse dort, die im Idealfall stets in Ruhe bleiben müßte, wird hier ersetzt durch einen Punkt, der die zu messende Schwingung möglichst genau mitmachen soll und zwar in vergrößertem Maßstab.

Für die Vergrößerung dieser Instrumente ergibt sich ebenso wie bei Unterfrequenzinstrumenten für eine sinförmige Zwangskraft:

$$\mathfrak{B} = \frac{V}{\sqrt{(1-z^2)^2 + 4\delta^2 z^2}} \quad 4)$$

4) Ableitung s. z. B. Steuding, S. 69/70. Dort bedeutet  $n_0$  die Kreisfrequenz, also den  $2\pi$ -fachen Betrag von dem hier gebrauchten  $n_0$ ; ferner steht statt  $n$  dort die Kreisfrequenz  $\omega$ .

dabei ist  $z = \frac{n}{n_0}$ , d. h. Meßfrequenz durch Eigenfrequenz  $\delta = \frac{\alpha}{2\pi n_0}$ ;  $\alpha$  ist der Dämpfungsfaktor, der bekanntlich mit dem logarithmischen Dekrement und dem Dämpfungsverhältnis durch:  $\Lambda = \ln \varepsilon = \alpha \cdot \frac{T_0}{2}$  zusammenhängt.  $V$  heißt die statische Vergrößerung, d. h. die Vergrößerung für die Frequenz  $n = 0$ .

Unter Berücksichtigung von:

$$\Lambda = \alpha \cdot \frac{T_0}{2}; T_0 = T'_0 \frac{\sqrt{\pi^2 + \Lambda^2}}{\pi} \quad \text{und} \quad T'_0 = \frac{1}{n_0}$$

läßt sich das logarithmische Dekrement schreiben zu:

$$\Lambda = \frac{\pi \cdot \delta}{\sqrt{1 - \delta^2}}$$

Die Aufzeichnung der Gleichung für die Vergrößerung liefert wieder die Resonanz- oder Vergrößerungskurve. Falls man die Abszisse reziprok wählt zu der der entsprechenden Darstellung bei den Unterfrequenzinstrumenten, erhält man genau dasselbe Kurvenbild wie dort. Die Dämpfungsverhältnisse sind die gleichen, das Maximum der Kurve rückt auch hier an die Stelle  $T = 0$  für  $\delta = \frac{1}{2} \sqrt{2}$  oder  $\Lambda = \pi$ .

Die Apparatkonstanten eines Ueberfrequenzinstrumentes sind dieselben wie die der Unterfrequenzinstrumente: Eigenfrequenz bzw. -periode, Reibung (für den Fall einer mechanischen Registrierung), Dämpfung, statische Vergrößerung und Registriergeschwindigkeit. Alle fünf Konstanten sind auch hier wieder in der Vergrößerungsformel enthalten und es lassen sich dieselben Ueberlegungen anstellen wie dort. Soll die Vergrößerung in einem Meßbereich von  $n \leq 200$  Hertz wiederum um höchstens  $2 \text{ vH}$  schwanken ( $n = 200$ ;  $\mathfrak{B} = 1,02 V$ ), so ergibt sich zwischen Eigenfrequenz und Dämpfung die Beziehung:

$$n_0^2 = \frac{\pi^2 - \Lambda^2}{\pi^2 + \Lambda^2} \cdot 10^6 \pm 10^5 \sqrt{\frac{100 (\pi^2 - \Lambda^2)^2}{(\pi^2 + \Lambda^2)^2} - 4}$$

Für den Fall gänzlichen Fehlens einer Dämpfung ( $\Lambda = 0$ ) wird:  $n_0 = 1400$  Hertz. Daraus ist zu ersehen, daß für den angegebenen Meßbereich, der erfahrungsgemäß für Verkehrserschütterungen bei weitem ausreicht, eine Dämpfung bei Ueberfrequenzinstrumenten gar nicht mehr angebracht zu werden braucht, wenn nur die Eigenfrequenz mindestens 1400 Hertz ist, vorausgesetzt, daß man sich mit einer Vergrößerungsschwankung von im höchsten Fall  $2 \text{ vH}$  begnügt. Bei einer solchen Konstantenwahl wäre auch keine Phasenverschiebung zwischen erzwingender und erzwungener Schwingung vorhanden<sup>5)</sup>.

5) Der Phasenverschiebungswinkel ist  $\varphi = \arctg \frac{2\delta z}{z^2 - 1}$ . Er äußert sich in einer Verschiebung des Maximums der Resonanzkurve nach links mit steigender Dämpfung.

Damit ist auch hier die erste Forderung für eine richtige Anzeige des Meßinstruments erledigt. Wir kommen jetzt zu der Behandlung des anderen fälschenden Einflusses, nämlich der Ueberlagerung der Eigenschwingung.

Durch den Verzicht auf eine Dämpfung ist eine dauernde Ueberlagerung zu erwarten, die aber dadurch unschädlich gemacht werden kann, daß die Eigenfrequenz sehr hoch gelegt wird. Dann wird der große Verlauf der Aufzeichnung das richtige Schwingungsbild darstellen und die Eigenfrequenz höchstens noch darin zum Ausdruck kommen, daß eine hohe Ueberlagerungswelle erscheint, die aber nur geringe Amplituden aufweist und infolgedessen ohne Schwierigkeiten weggedacht werden kann.

Müßten Schwingungen von höherer Frequenz als 200 Hertz aufgenommen werden und hätte man nicht die Möglichkeit, die Eigenfrequenz entsprechend hoch zu legen, so wäre eine Dämpfung unumgänglich. Dadurch würden sich aber wieder dieselben ungunstigen Verhältnisse einstellen wie bei den Unterfrequenzinstrumenten durch unübersichtliche Ueberlagerung der Eigenschwingung. Daß dies für konstante periodische Schwingungsvorgänge nicht in dieser Schärfe zutrifft, braucht nicht nochmal eingehend wiederholt zu werden.

2. Praktische Ausführungen dynamischer und statischer Ueberfrequenzinstrumente. Dynamisch wirkende Ueberfrequenzinstrumente, die also Amplituden anzeigen, sind für Spannungsmessungen gebaut worden. Diese Apparate verwenden eine bestimmte Meßlänge, deren Längenänderungen mechanisch, optisch oder elektrisch vergrößert aufgezeichnet werden. Die mechanischen Geräte entsprechen allerdings der Anforderung auf genügend hohe Eigenfrequenz keineswegs und müssen deshalb ausscheiden. Eine Ausnahme davon macht nur das Ritzgerät (Pabst, Zeitschr. d. V. d. I. 1929, Heft 46), bei dem ein Diamant die nicht-vergrößerte Bewegung auf eine Glasplatte ritzt. Die Aufzeichnungen werden unter starker mikroskopischer Vergrößerung ausgemessen. Die elektrischen und optischen Instrumente dieser Bauart werden in der Praxis ungern verwendet wegen ihrer hohen Stoßempfindlichkeit.

Statische Ueberfrequenzinstrumente haben diesen Nachteil nicht, wenn sich im eigentlichen Meßinstrument keinerlei bewegliche Teile befinden. Hierher gehört der von Ambronn von der Prospektion G. m. b. H. in Göttingen gebaute Piezoquarz-Beschleunigungsmesser. Eine eingehende Beschreibung dieses Instruments ist für später vorbehalten. Hier soll ein kurzer Hinweis auf seine Apparatenkonstanten genügen. Die Eigenfrequenzen liegen sehr hoch, eine besondere Dämpfung ist nicht vorgesehen. Die Registrierung geschieht optisch und zwar in einem veränderlichen Maßstabe (von Vergrößerung kann naturgemäß bei einem Beschleunigungsmesser nicht gesprochen werden). So wie das Instrument augenblicklich vorliegt, bietet es die Möglichkeit, Beschleunigungen von etwa 5 cm/sek<sup>2</sup> bis zum Betrage der Erdbeschleunigung und darüber hinaus bei entsprechender Einstellung zu messen.

### III. UEBERGANG VON DER SEISMOMETRIE ZUR ERSCHÜTTERUNGSMESSUNG

*und Entwicklung der Forderungen, die an einen wissenschaftlichen Erschütterungsmesser zu stellen sind.*

Der grundsätzliche Unterschied zwischen Erdbeben und Erschütterungen liegt in dem Periodenbereich der beiden. Während die Perioden der Erdbeben nach Sieberg zwischen 0,5 sek und etwa 70 sek liegen, sind die der Erschütterungen kleiner als 0,2 sek. Hier wird es im allgemeinen vorgezogen, statt der Perioden die Frequenzen anzugeben, um angenehmere Zahlen zu haben. Jeder Schwingungsmesser, sei er nun zur Messung von Erdbeben oder Erschütterungen bestimmt, muß zunächst der Forde-

rung genügen, daß innerhalb seines Meßbereiches die Vergrößerung konstant bleibt. Für den Fall der Erschütterungsmesser haben wir gesehen, daß zu diesem Zweck die Eigenperiode mindestens  $T_0 = 0,45$  sek betragen muß und daß am besten eine annähernd halbaperiodische Dämpfung verwendet wird. Bei Seismographen müßte die Eigenperiode entsprechend bei etwa 150 sek liegen. Derart hohe Eigenperioden werden aber nicht angewendet; solche von 1 bis 50 sek, gelegentlich bis 60 sek, sind in der Praxis üblich. Die notwendige Folge dieser niederen Eigenperiode ist, daß eine Konstanz der Vergrößerung im seitherigen Sinne nicht mehr zu erreichen ist, wie auch die Dämpfung gewählt wird. Unter diesen Umständen kann ein Instrument nur dann brauchbare Ergebnisse liefern, wenn es sich um die Aufnahme einzelner ganz bestimmter Perioden handelt. Dies ist in der Seismik der Fall, wenigstens in den Hauptphasen. Man rechnet dort zu jeder auftretenden Periode nach der Vergrößerungsformel die zugehörige Vergrößerung aus und sucht dann einen Schluß auf die wahre Bodenbewegung zu ziehen. Bisher ist nun aber immer noch abgesehen von der etwaigen Ueberlagerung der Eigenschwingung. Für konstante periodische Bewegungen bietet sie keine Schwierigkeiten. Der Einsatz der Schwingung wird in jedem Fall richtig gegeben. Ist die Dämpfung stark, d. h. etwa halbaperiodisch, so ist die Aufzeichnung ungefähr auf die Dauer einer halben Eigenperiode als gefälscht anzusehen, nachher ist die Zeichnung richtig. Kämen aber nicht konstante Schwingungen in Betracht, so wäre außer den Einsätzen wohl nichts mehr richtig. Die Eigenschwingung würde sich dann überall überlagern, und zwar deshalb überall, weil sie bis zum Einsetzen des nächsten Stoßes noch nicht abklingen konnte.

Für die Erschütterungsmessung liegen die Verhältnisse insofern schwieriger, als wir uns von vornherein auf nicht konstante periodische Schwingungen einstellen müssen. Während von einem Seismograph nur verlangt wird, daß seine Aufzeichnungen rechnerisch verfolgt werden können, müssen wir von einem Erschütterungsmesser außerdem noch eine maßstabgetreue Wiedergabe des Schwingungsvorganges fordern. Dazu kommt noch leichte Transportfähigkeit, d. h. möglichst geringes Gewicht. Die Gefahr der Rückwirkung des Apparates auf den Schwingungsvorgang ist nicht zu befürchten, solange Gewicht des Apparats und Gewicht der Masse, deren Schwingungen gemessen werden sollen, nicht von gleicher Größenordnung sind.

Da nun sowohl in der Seismometrie als in der Technik die von einer Bodenbewegung übertragenen Kräfte von großem, wenn nicht sogar von ausschließlichem Interesse sind, ist es notwendig, die Beschleunigungen, die in einem Schwingungsverlauf auftreten, zu kennen. Dazu stehen verschiedene Wege zur Verfügung. Der eine seither übliche ist der, daß die Weg-Zeit-Linie zweimal differenziert wird, und zwar graphisch oder numerisch, falls es sich um nicht konstante Bewegungen handelt. Sind die Schwingungen konstant, so ist die Beschleunigung durch eine einfache Maßstabänderung zu erhalten. Ein großer Mangel der graphischen und numerischen Differentiation ist, daß beide nur mit einer Genauigkeit von 30 bis 40 v H durchführbar sind, ganz abgesehen davon, daß eine solche Differentiation sehr zeitraubend ist. Läuft man noch Gefahr, daß die ursprüngliche Weg-Zeit-Linie fehlerhaft war, so liegt es auf der Hand, daß das Ergebnis jedenfalls sehr zweifelhaft ist. — Der andere weit bessere Weg ist die unmittelbare Aufnahme der Beschleunigungskurve.

Es läßt sich somit zusammenfassend sagen, die Forderungen, die an einen wissenschaftlichen Erschütterungsmesser gestellt werden müssen, sind, wie Steuding schon anführt<sup>6)</sup>:

1. es muß sich um ein registrierendes Instrument handeln, das in der Lage ist, einen Schwingungsvorgang

<sup>6)</sup> Steuding, S. 67.

naturgetreu wiederzugeben. Um zu möglichst genauen Resultaten zu kommen, ist ein Beschleunigungsmesser einem Amplitudenmesser vorzuziehen;

2. falls die Wiedergabe Fehler enthält, müssen diese zugänglich sein;
5. die Rückwirkung des Apparats auf den Schwingungsvorgang soll klein sein.

Betrachten wir unter diesen Gesichtspunkten nochmals die bereits besprochenen Apparate. Dynamische Unterfrequenzinstrumente können überhaupt nicht in Frage kommen, weil sie, abgesehen von konstanten periodischen Schwingungen, unter keinen Umständen eine getreue Wiedergabe liefern können. Die Ueberlagerung der Eigenschwingung ist die eine Fehlerquelle und die notwendige zweimalige Differentiation, um Beschleunigungen zu erhalten, die zweite.

Statische Unterfrequenzinstrumente kommen, soweit sie registrieren, wohl in Betracht. Hierher gehört der Langersche Apparat, der aber so, wie er bis jetzt vorliegt, leider noch nicht einwandfrei Frequenzen mitmessen kann. Sobald dieser Fehler zur vollen Befriedigung behoben ist, stellt der Apparat ein gutes technisches Meßinstrument für Erschütterungen dar. Zu wissenschaftlichen Zwecken wird er jedoch nur da herangezogen werden können, wo man den vollständigen Schwingungsverlauf nicht braucht, sondern mit Markierungen auskommen kann (siehe Abbildung 8).

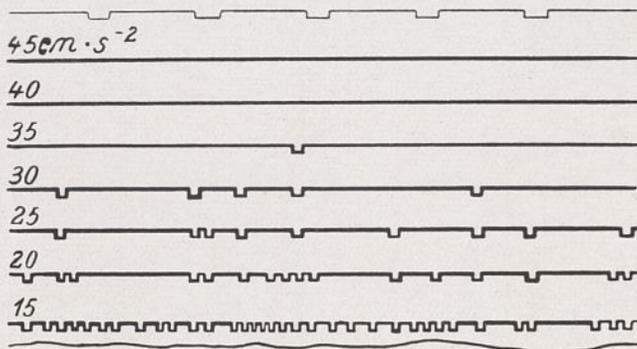


Abb. 8. Aufzeichnung des Beschleunigungsmessers von Langer-Thomé.

Den Anforderungen entsprechen am besten die Ueberfrequenzinstrumente. Ihr Hauptvorteil vor den Unterfrequenzinstrumenten besteht darin, daß die Eigenschwingung die Aufzeichnung hier wesentlich weniger stören kann. Denn auch bei verhältnismäßig schwacher Dämpfung kann angenommen werden, daß die Eigenschwingung nach der Zeitdauer einer Eigenperiode verschwunden ist, falls sie nicht in der Zwischenzeit wieder angestoßen wurde. Wird also die Eigenperiode wesentlich kleiner gewählt als die kleinste noch zu messende Periode, so ist die Eigenschwingung jedesmal, wenn wieder eine neue Kraft auftritt, abgeklungen. Dies wären die Verhältnisse bei dynamischen Ueberfrequenzschwingungsmessern. Der Einfluß der Eigenperiode ist zwar noch vorhanden, jedoch wesentlich weniger als bei Unterfrequenzinstrumenten. Was aber auch diese Apparate noch nicht geeignet macht zu Erschütterungsmessern, das ist wieder die Notwendigkeit des graphischen oder numerischen Differentiierens. Frei von diesem Mangel sind statische Ueberfrequenzinstrumente, als deren hervorragenden Vertreter bereits der Piezoquarzbeschleunigungsmesser genannt wurde. Die Eigenfrequenzen dieses Instrumentes liegen, wie gesagt, sehr hoch, so daß von einem schädigenden Einfluß der Eigenschwingung hier nicht mehr die Rede sein kann. Dieser Beschleunigungsmesser wird den Anforderungen, die an ihn als einen wissenschaftlichen Erschütterungsmesser gestellt werden, gerecht, weshalb er im nächsten Abschnitt eingehender behandelt werden soll.

Zum Schluß sei nochmal darauf hingewiesen, daß die Formel für die Vergrößerung sowohl bei Unter- als Ueberfrequenzinstrumenten unter der Voraussetzung eines sin-

förmigen Zwanges  $x = A \cdot \sin 2\pi nt$  abgeleitet ist und für andere beliebige erzwungene Schwingungen nicht abgeleitet werden kann. Die Anwendung auf Verkehrserschütterungen, die im allgemeinen als nicht konstante Bewegungen anzusehen sind, ist also höchstens näherungsweise richtig. Die Annahme, die dabei gemacht wird, ist die, daß irgendein Bogen in einer Aufzeichnung als einer sin-Schwingung angehörig betrachtet wird. Ein benachbarter Bogen, der vielleicht ganz anders aussieht, muß als Teil einer sin-Schwingung seiner Form behandelt werden.

Das Piezoquarzinstrument hat auch hier wieder einen Vorzug; seine Aufzeichnungen können nämlich, ohne auf die Vergrößerungsformel zurückzugehen, behandelt werden.

#### IV. DER PIEZOQUARZBESCHLEUNIGUNGSMESSER.

##### 1. Physik der Piezoelektrizität.

a) Beobachtungen am Quarz. Jeder Quarzkristall (Abb. 9) besitzt eine optische Achse  $O$  (Kristallachse) und drei zu  $O$  senkrecht stehende elektrische Achsen  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ , die unter sich wieder je einen Winkel von  $120^\circ$  bilden. Es wurde festgestellt, daß Quarzkristalle, die senkrecht zur optischen Achse  $O$  einer mechanischen Beanspruchung (Druck oder Zug) ausgesetzt wurden, elektrische Ladungen zeigten, und zwar auf zwei zu einer elektrischen Achse senkrechten Flächen. Diese Erscheinung heißt *Piezoeffekt*. Eine mechanische Beanspruchung in Richtung  $O$  hat dagegen keine Ladung zur Folge.



Abb. 9.

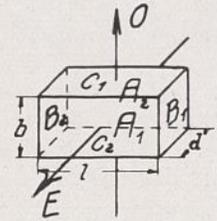


Abb. 10. Ein Piezoquarz.

Um diese Erscheinung genauer verfolgen zu können, wird aus einem Kristall ein sog. Piezoquarz (Abb. 10) herausgeschnitten, senkrecht zu einer elektrischen Achse. Wir bezeichnen die Flächen senkrecht zu  $E$  mit  $A_1$  und  $A_2$ , die Flächen senkrecht zu  $O$  mit  $C_1$  und  $C_2$  und die beiden übrigen Flächen mit  $B_1$  und  $B_2$ .

Aufgeladen werden stets nur die Flächen  $A_1$  und  $A_2$ , und zwar bei Druck auf  $A_1$  und  $A_2$  umgekehrt als bei Druck auf  $B_1$  und  $B_2$ . Zug erzeugt dieselbe Ladung mit umgekehrtem Vorzeichen. Einem Druck auf  $A_1$ ,  $A_2$  entspricht also ein Zug auf  $B_1$ ,  $B_2$ . Durch mechanische Beanspruchung der Flächen  $C_1$ ,  $C_2$  kann keine Ladung hervorgebracht werden.

b) Gesetze. Die experimentell gefundenen Grundgesetze sind: 1. Die Ladungen sind im elastischen Bereich dem Druck genau proportional, kehren sich also auch mit ihm um. 2. Bei gleichem Gesamtdruck ist die Ladung von den Maßen des Präparates unabhängig. 3. Der Piezoeffekt ist praktisch unabhängig von der Temperatur (Lissauer, Andreeff u. a.).

Das zweite Gesetz muß insofern noch eingeschränkt werden, als es nur Gültigkeit hat beim Vergleich von zwei Fällen, in denen beidemal entweder die Flächen  $A$  oder die Flächen  $B$  gedrückt werden. Die Proportionalitätskonstante zwischen Druck und Ladung heißt, falls die Flächen  $A$  gedrückt werden, Piezoquarzkonstante. Es gilt:  $Q = k \cdot P$ , wo  $Q$  die Ladung,  $P$  der Druck oder besser die Kraft und  $k$  die Piezoquarzkonstante ist. Bei Druck oder Zug auf die Flächen  $B$  müßte  $k$  noch mit dem Flächenverhältnis  $A : B$  multipliziert werden. Die Erklärung dafür ist darin zu suchen, daß dem Druck eigentlich eine

Ladungsdichte oder der Ladung eine Kraft proportional gesetzt werden müßte.

Die Piezoquarzkonstante wurde von J. und P. Curie, den Entdeckern der Piezoelektrizität, bestimmt zu  $k = 0,065$  elektrostatischen Einheiten auf  $1 \text{ kg}^7$ . Ein viel genauerer Wert stammt von Röntgen (1915) mit  $k = 0,0681$  elektrostatischen Einheiten auf  $1 \text{ kg}^7$ .

c) Eigenfrequenz und Dämpfung der Piezoquarze. Die Eigenfrequenz interessiert, um zu wissen, bis zu welcher Frequenz ein Piezoquarz Druckwechseln folgen kann. Die Berechnung geschieht nach:  $n = \frac{c}{2l}^7$ .  $c$  ist

die Schallgeschwindigkeit im Quarz:  $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ ,  $2l$  ist die Wellenlänge und  $l$  die in cm gemessene Länge, mit der der Quarz schwingt. Der Elastizitätsmodul des Quarzes ist:  $E = 7,9 \cdot 10^8 \text{ kg/cm}^2$ , seine Dichte  $\rho = 2,65 \text{ g/cm}^3$ . Es ergibt sich:  $n = \frac{2,725}{l} \cdot 10^5$  Hertz. Quarze mit der Eigenfrequenz  $10^6$  Hertz lassen sich also leicht herstellen.

Diese Eigenschwingungen sind nach Zenneck nur so minimal gedämpft, daß die Dämpfung ohne weiteres vernachlässigt werden kann.

d) Kapazität der Piezoquarze. Ladungen werden als Potentiale gemessen, infolgedessen tritt, da  $Q = C \cdot V$ , noch als weitere wesentliche Größe die Kapazität auf. Je geringer die Kapazität ist, um so größer ist das Potential, das einer bestimmten Ladung entspricht. Trotzdem wählt man aber die Kapazität der Piezoquarze zweckmäßig nicht so klein, daß die Kapazität der Verbindungsdrähte groß dagegen wäre. Zur Erhöhung der inneren Kapazität hat man die Möglichkeit, mehrere Quarze parallel zu schalten und sie etwa mit wechselnder Polarität übereinander zu legen (Abb. 12), damit sie alle dem gleichen Druck ausgesetzt werden können. Damit wird gleichzeitig die erzeugte Ladung  $Q$  entsprechend größer. Durch bekannte, parallel zu schaltende Zusatzkapazitäten kann die Empfindlichkeit beliebig herabgesetzt werden..

2. Beschreibung des Piezoquarzbeschleunigungsmessers. Das Instrument besteht aus verschiedenen Teilen, nämlich aus Meßkörper (A), Umformer (B), Schalt- und Kompensationsapparat (D) und Aufnahmeapparat (E) mit Filmkasten (siehe Abbildung 11).

a) Der Meßkörper. In dem Meßkörper befindet sich eine 500 g schwere Stahlmasse  $M$ , die fest eingespannt ist. Nach unten drückt sie auf sieben Piezoquarze ( $PQ$ ), die mit wechselnder Polarität übereinander liegen und deren Goldbelegungen parallel geschaltet sind. Die Abmessungen der Quarze sind  $6 \times 6 \times 2 \text{ mm}$ . Nach oben ist die Stahlmasse über eine Gummiplatte ( $G$ ) mit dem zu erdenden Gehäuse verbunden (s. Abb. 15).

Im Ruhezustand ist die Masse nur der Erdgravitation ausgesetzt. Die Gravitationsfeldstärke am Ort der Masse ist:  $K = M \times g$ . Kommt zur Erdbeschleunigung  $g$  noch eine zusätzliche Erschütterungsbeschleunigung  $b$  dazu, so addieren bzw. subtrahieren sich die beiden. Die sich so ändernde Feldstärke wirkt sich bei vertikaler Stellung des Meßkörpers durch Druckschwankungen auf die Quarzplatten aus. Die Druckschwankungen sind, da  $M$  in die Feldstärke eingeht, um so größer, je größer die Masse ist. Die Drücke nach oben werden in der Gummiplatte vernichtet. Eine Rückwirkung der Quarze auf die Stahlmasse ist nicht zu befürchten, einmal wegen der großen Verschiedenheit der Massen von Quarz und Stahlmasse, dann auch weil Quarz erheblich elastischer ist als Stahl. Solange die zu messenden Beschleunigungen kleiner als die Erdbeschleunigung  $g$  sind, bleibt die Feldstärke, die auf den Meßkörper wirkt,  $M \times (g \pm b)$  stets positiv. Ein Abheben des Körpers vom Boden kann also nie eintreten, weshalb in all diesen Fällen bloßes Aufstellen des Meß-



Abb. 11. Piezoquarzbeschleunigungsmesser.

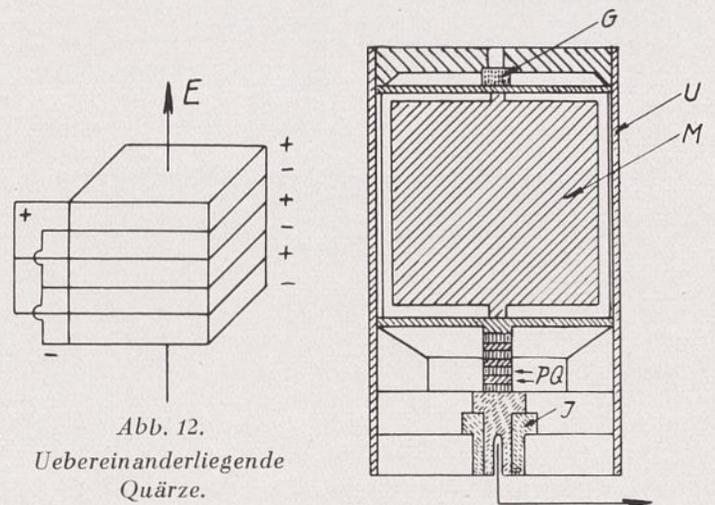
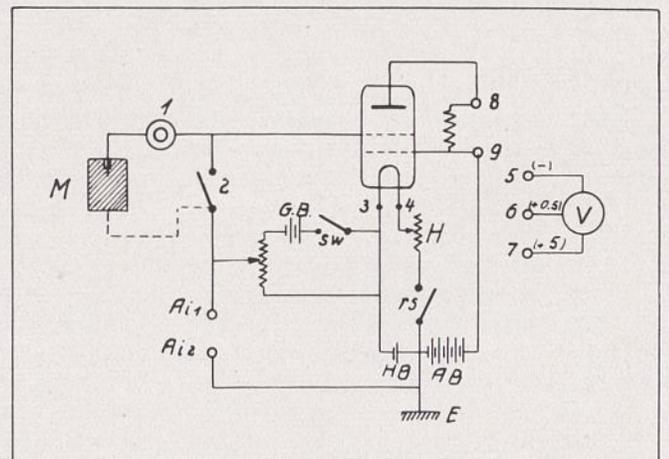


Abb. 12.

Uebereinanderliegende Quarze.

Abb. 15.

Meßkörper A in Abb. 11.



GB = Gittervorspannungsbatterie, HB = Heizbatterie, AB = Anodenbatterie, P = Potentiometer, H = Heizwiderstand, E = Erde, M = Meßkörper, V = Voltmeter.

Abb. 14. Umformer B in Abb. 11.

<sup>7)</sup> Siehe Handbuch der Physik, Band XIII, S. 325.

körpers genügt. Müßten Beschleunigungen größer als  $g$  gemessen werden, so wäre es notwendig, den Meßkörper mit dem betreffenden Gegenstand zu verschrauben.

Das sind die Verhältnisse bei vertikalen Beschleunigungen. Bei der Messung horizontaler Beschleunigungen ist Verschraubung dann nötig, wenn die wirkende Kraft größer ist als die Reibungskraft zwischen Meßkörper und seiner Unterlage.

Die Druckschwankungen erzeugen auf den Goldbelegungen der Piezoquarze Ladungsschwankungen oder da Ladung und Spannung proportional ist, Spannungsschwankungen. Diese werden dem Gitter einer Verstärkerröhre zugeführt. Um die schädliche Kapazität, durch die ein Teil der entstehenden Ladung gebunden wird und so nicht zur Röhre gelangen kann, klein zu halten, wird zur Verbindung ein möglichst kurzer Draht verwendet.

b) Der Umformer (Abb. 14). Der Umformer hat den Zweck, die an das Gitter gelegten Spannungsschwankungen in Schwankungen des Anodenstromes umzuwandeln und dabei gleichzeitig eine erhebliche Verstärkung zu liefern. Um den Apparat handlich zu gestalten, werden als Batterien Taschenlampenbatterien verwendet. Die Anodenbatterie besteht aus vier hintereinander geschalteten Einzelbatterien. Die dadurch entstehenden 16 Volt genügen bei Gebrauch einer Röhre mit zweitem Gitter (Telefunken RE 074 d). Als Heizbatterie werden zwei Einzelbatterien parallel geschaltet, um bei der verhältnismäßig starken Belastung eine längere Lebensdauer zu erzielen. Für die Gitterbatterie, die nur zur Eichung dient, genügt eine einzige Batterie. Sämtliche Spannungen können durch entsprechendes Stöpseln mit dem eingebauten Voltmeter  $V$ , für das zwei Meßbereiche von 0 bis 0,5 Volt und von 0 bis 5 Volt vorgesehen sind, gemessen werden.

Da die Erschütterungsbeschleunigungen Gitterspannungsänderungen hervorbringen, muß zur Eichung der Ausschlag gemessen werden, der einer bekannten Gitterspannungsdifferenz entspricht. Die gegebenen Größen lassen sich dann mit der Beschleunigung in Beziehung bringen: Durch eine Kraft  $P$  wird piezoelektrisch von einer Quarzplatte die Ladung:  $Q = k \cdot P$  erzeugt, oder:

$$Q = k \cdot m \cdot b = k \frac{G}{g} b, \text{ wobei } G \text{ das Gewicht der Stahl-}$$

masse im Meßkörper ist. Die Beschleunigung  $b$  entspricht also bei  $p$  Piezoquarzen einer Spannung:

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{k \cdot G \cdot b \cdot p}{g \cdot C}$$

Die Beschleunigung, die 1 Volt Spannungsdifferenz hervorbringt, ist demnach:

$$b = \frac{g \cdot C}{500 \cdot k \cdot G \cdot p}$$

Der Faktor 500 kommt herein, wenn  $C$  in cm und  $k$  in elektrostatischen Einheiten eingesetzt wird. Ist durch Eichung ermittelt, daß 1 Volt Spannungsdifferenz  $n$  Millimeter entspricht, so bedeutet 1 mm Ausschlag eine Beschleunigung von:

$$b = \frac{g \cdot C}{500 \cdot k \cdot G \cdot p \cdot n} \text{ cm/sek}^2,$$

für  $C = 40$  cm,  $k = 0,068$ ,  $G = 0,5$  kg,  $p = 7$  ergibt sich:  $b = \frac{548}{n}$  als Beschleunigung in cm/sek<sup>2</sup>, die einem Millimeter Ausschlag in der Aufzeichnung des Instruments entspricht.

c) Der Schalt- und Kompensationsapparat (Abb. 15). Von den Kontakten 8 und 9 am Umformer führt ein beliebig langes Kabel die erzeugten Stromschwankungen den beiden mit „Umformer“ bezeichneten Buchsen zu. Die zu messenden Stromschwankungen überlagern sich im Umformer dem Anodengleichstrom, von dem sie jetzt befreit werden durch eine Kompensation, d. h. durch Entgegenschalten einer anderen Spannung. Der dabei verwendeten Batterie  $B$  wird naturgemäß im allgemeinen kein Strom entnommen. Sie kann also fest miteingebaut werden.

Der andere Teil des Apparats, der Schaltapparat, wird mit einem 6 Volt-Akkumulator verbunden und dient zu Beleuchtung und Zeitzeichen.

d) Aufnahmeapparat und Filmkasten. Dem Galvanometer  $F$  (s. Abb. 11) werden jetzt die übrig bleibenden Stromschwankungen zugeführt durch Verbinden der Buchsen „Faden“ des Schaltapparats mit dem Galvanometer. Der Faden im Magnetfeld bewegt sich dann proportional den Schwankungen. Durch eine Optik wird ein Schattenbild des Fadens entworfen, das auf einem fortlaufenden Bromsilberpapierfilm aufgenommen wird. Die Beleuchtung dazu liefert eine überlastete Zwei-Voltbirne (+ im Bilde). Das mit ihr verbundene Kabel wird in die Buchsen „Fadenlampe“ des Schaltapparats gesteckt. Die Birne ist durch verschiedene Schrauben justierbar. Vor ihr ist eine verstellbare Linse, die als Kondensor wirkt. Die ebenfalls verstellbare abbildende Linse liegt auf der anderen Seite des Galvanometers. Gleichzeitig mit dem Faden muß auch ein Zeitzeichen photographiert werden. Die Einrichtung dazu befindet sich in dem Kasten  $E$ . Durch einen gewöhnlichen Klingelunterbrecher wird alle achtzigstel Sekunde der Lichtweg einer optischen Abbildung durch einen Spalt freigegeben. Um das Zeitzeichen in Betrieb zu setzen, hat man einen Dreifachstecker in die dafür vorgesehenen Buchsen des Apparats zu stecken. Das andere Ende des Kabels wird an den Aufnahmeapparat gelegt. Der Filmkasten  $H$  kann zur visuellen Beobachtung durch eine Mattscheibe ersetzt werden. Zur Filmaufnahme wird die Kurbel an der rechten Seite des Kastens gedreht. Die Filme sind, um Schwarz-Weiß-Kontraste möglichst scharf zu bekommen, hart zu entwickeln.

### 5. Die Genauigkeit des Piezoquarzinstrumentes.

a) Die möglichen Eigenfrequenzen und deren Einfluß auf die Aufzeichnung. Eigenschwingungen können an drei Stellen des Instruments auftreten, einmal bei den Quarzen, dann bei der Stahlmasse und schließlich im Galvanometer.

a) Eigenschwingungen der Piezoquarze.

Für die Abmessungen der Quarzplättchen ergibt sich nach der oben angeführten Formel:

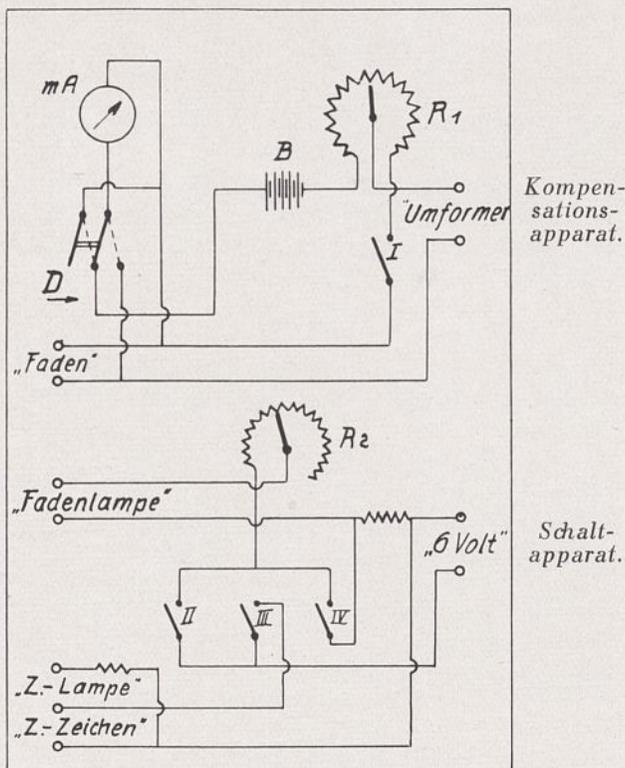


Abb. 15. Der Schalt- und Kompensationsapparat  $D$  in Abb. 11.

$$n_0 = \frac{2,725}{0,2} \cdot 10^5 = 1362000 \text{ Hertz}$$

in vertikaler Richtung

und

$$n_0 = \frac{2,725}{0,6} \cdot 10^5 = 454000 \text{ Hertz}$$

in horizontaler Richtung.

Diese Eigenfrequenz kann, da in dem Meßkörper alles fest eingespannt ist, nur mit einer äußerst minimalen Amplitude auftreten. Eine solche Eigenschwingung überlagert sich den aufzunehmenden Beschleunigungen. Es liegt auf der Hand, daß sie unter keinen Umständen in der Aufzeichnung sich bemerkbar machen kann.

β) Eigenschwingungen der Stahlmasse.

Die Berechnung geschieht ebenso wie bei den Quarzen. Es ergibt sich:  $n_0 = 2000$  Hertz. Hier ist der Elastizitätsmodul zu  $2,2 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$ , die Dichte zu  $8 \text{ g/cm}^3$  und die schwingende Länge der Stahlmasse zu  $4 \text{ cm}$  angenommen worden.

Für diese Frequenz gilt genau dasselbe wie für die der Piezoquarze. Irgendein schädigender Einfluß auf die Aufzeichnung ist auch hier ausgeschlossen.

γ) Eigenschwingungen des Galvanometerfadens.

Eigenfrequenz und Dämpfung des Fadens lassen sich nach einer von Schering angegebenen Methode<sup>8)</sup> experimentell bestimmen.

1. A. a. O. wird aus der Differentialgleichung für erzwungene, gedämpfte Schwingungen die Gleichung:

$$n \cdot M = \frac{n_0}{\sqrt{\left(\frac{n_0}{n} - \frac{n}{n_0}\right)^2 + 4\delta^2}}$$

abgeleitet.

Dabei bedeuten:  $n$  die erzwingende Frequenz,  $M$  den Abbildungsmaßstab, d. h. die Doppelamplitude, mit der das Instrument eine Frequenz  $n$  wiedergibt,  $n_0$  Eigenfrequenz und  $\delta$  die Dämpfungsgröße des Fadens (s. oben Seite 175).

$n \cdot M$  hat ein Maximum für  $n = n_0$  und zwar für jede Dämpfung. Die Eigenfrequenz  $n_0$  liegt also beim Maximum der Kurve.  $\delta$  berechnet sich für  $n = n_0$  zu:

$$\delta = \frac{1}{2M_0}, \text{ wobei } M_0 \text{ der zu } n_0 \text{ gehörige Abbildungsmaßstab ist.}$$

Für stärkere Dämpfung ist das Maximum der Kurve nicht mehr gut ausgeprägt. In diesem Fall kann  $n_0$  aus  $n_0 = \sqrt{n_1 \cdot n_2}$  bestimmt werden, wenn  $n_1$  und  $n_2$  zwei gemessene Frequenzen sind, die beide auf verschiedenen Seiten des Maximums liegen und die gleiche Ordinate  $n \cdot M$  haben.

2. Ist die Dämpfung schwächer als halbaperiodisch,  $\delta < \frac{1}{2}\sqrt{2}$ , so läßt sich  $n_0$  auch rechnerisch bestimmen aus der ebenfalls a. a. O. abgeleiteten Gleichung:

$$\frac{n_{\max}}{n_0} = \sqrt{1 - 2\delta^2}.$$

$n_{\max}$  ist die Frequenz, die am größten abgebildet wird mit  $M_{\max}$ . Dies eingesetzt in die unter 1. gegebene Gleichung liefert:

$$M_{\max} = \frac{1}{2\delta\sqrt{1 - \delta^2}}.$$

Wird hier also aus der Aufnahme  $M_{\max}$  und  $n_{\max}$  entnommen, so läßt sich zunächst die Dämpfung und nachher die Eigenfrequenz berechnen.

Die zweite Methode ist bequemer. Zu ihrer Anwendung ist es jedoch notwendig, daß  $\delta < \frac{1}{2}\sqrt{2}$  ist. Im vorliegenden Fall wurde dies durch einen Vorversuch mittels der ersten Methode festgestellt.

Die Versuchsanordnung war folgende (Abb. 16):

Den Galvanometerfaden  $F$  durchfließt Wechselstrom, dessen Frequenzen bei stets gleichbleibender Effektivstromstärke veränderlich sind. Der Transformator  $T$  spannt die angelegte Wechselspannung auf  $10 \text{ Volt}$  ab.

<sup>8)</sup> Handbuch der Physik, Band XVI, S. 526.

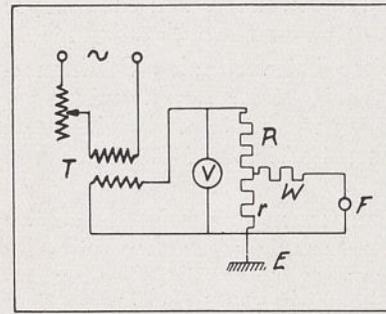


Abb. 16. Versuchsanordnung.

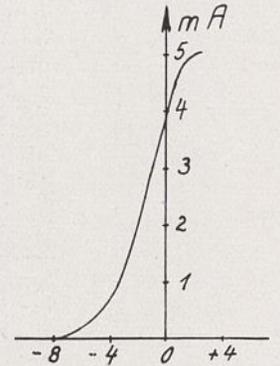


Abb. 17. Charakteristik der Röhre Telefunken RE 074d für 16 Volt Anodenspannung.

Ist das Verhältnis  $r : R$  zu  $10 : 1000 \text{ Ohm}$  und der Widerstand  $W$  zu  $10000 \text{ Ohm}$  gewählt, so herrscht an den Enden des Widerstandes  $r$  eine Spannung von  $\frac{10 \cdot 10}{1000} \text{ Volt}$  und durch den Faden fließt der Strom:  $\frac{10 \cdot 10}{1000} \cdot \frac{1}{10000} = 10^{-5} \text{ Ampère} = 0,01 \text{ mA}$ , ein Strom, den der Faden ohne weiteres vertragen kann.

Durch Aufnahmen der Fadenschwingungen bei geringster mechanischer Fadenspannung (Mikrometerschraube oben am Galvanometer ganz nach rechts gedreht!) ergab sich:

$M$ in mm! .....	6,5	6,5	7,0	9,0	3,0	1,0
$n$ in Hertz .....	4,5	20,5	51	100	200	400

Der Abbildungsmaßstab für die Frequenz, die mit größter Amplitude auftritt, ist:  $M_{\max} = \frac{9,0}{6,5} = 1,37$ . Damit errechnet sich die Dämpfung zu:  $\delta = 0,4$ , d. h.  $\Lambda = 1,37$  oder  $\varepsilon = 4$  und die Eigenfrequenz zu  $n_0 = 120 \text{ Hertz}$ .

Dieselben Aufnahmen bei stärkster mechanischer Fadenspannung (Mikrometerschraube ganz nach links!) ergaben:

$M$ in mm .....	3,5	3,5	3,6	5,0	10,0	2,3	1,5
$n$ in Hertz .....	8	22	52	110	250	400	500

In diesem Falle ist:  $M_{\max} = \frac{10,0}{3,5} = 2,86$  und somit die Dämpfung  $\delta = 0,52$ , d. h.  $\Lambda = 1,06$  oder  $\varepsilon = 3$  und die Eigenfrequenz  $n_0 = 280 \text{ Hertz}$ .

Die berechneten Werte der Eigenfrequenzen gelten bei fortgedachter Dämpfung und müssen jetzt noch auf das gedämpfte Instrument umgerechnet werden nach der Formel:

$$T_0 = T'_0 \frac{\sqrt{\pi^2 + \Lambda^2}}{\pi}.$$

Es ergibt sich bei schwächster mechanischer Fadenspannung  $110 \text{ Hertz}$  und bei stärkster Fadenspannung  $266 \text{ Hertz}$ .

Die Ergebnisse legen die Befürchtung nahe, die Fadeneigenschwingung könnte die Aufzeichnungen des Piezoquarzbeschleunigungsmessers fälschen. Eine störende Ueberlagerung ist jedoch im allgemeinen nicht zu erwarten, einmal weil die Eigenschwingungen wenigstens schwach gedämpft sind, und dann auch, weil bei stärkerer Fadenspannung die gewöhnliche Registriergeschwindigkeit die Eigenfrequenzen nicht mehr auflöst. Nur bei schwacher Fadenspannung kann unter ungünstigen Verhältnissen die Eigenschwingung in Erscheinung treten, aber meist nur so, daß sie ohne weiteres zu erkennen ist und weggedacht werden kann. Bei einem Neubau des Apparates ist dafür gesorgt, daß die Eigenfrequenz des Galvanometers noch wesentlich erhöht wird.

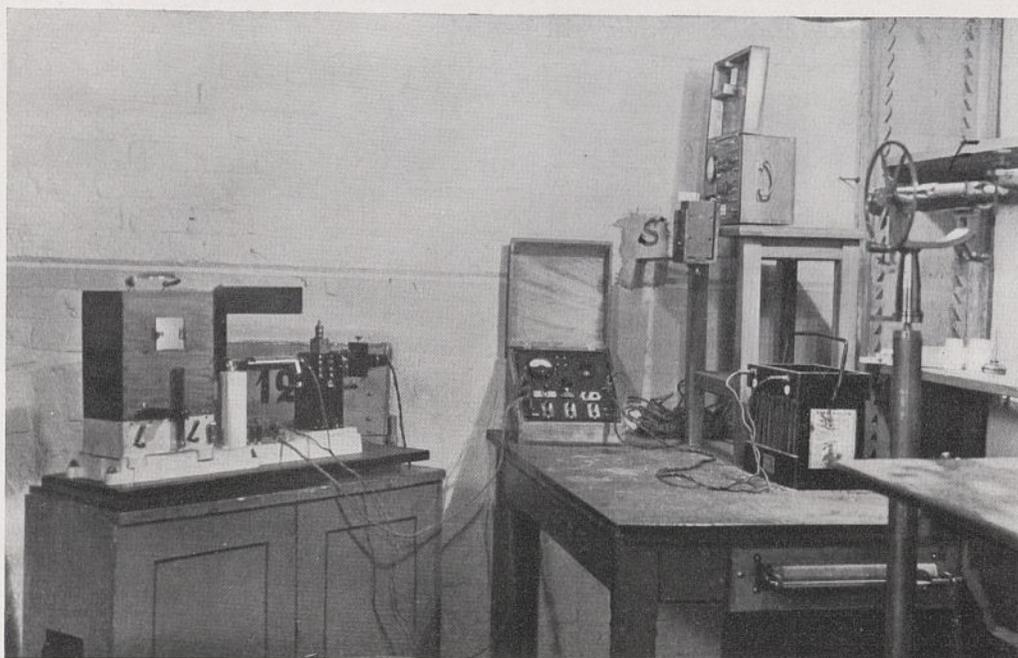


Abb. 18. Eichanordnung.

b) Die Genauigkeit der Eichung.

a) Voraussetzung der Eichung durch Gitterspannungsänderung. Durch Aufheben der Verbindung 1, 2 (s. Abb. 14) nach der Eichung und Verbinden von 1 mit dem Meßkörper wird die Ladung des Gitters durch Berührung zur Erde abgeleitet. Das Gitterpotential sinkt also auf Null. Soll die Eichung richtig sein, so muß sowohl Eichung wie Messung im mittleren Teil der Röhrencharakteristik (Abszisse: Gitterspannung in Volt; Ordinate: Anodenstrom in Milliampère) geschehen, der als geradlinig angesehen werden kann (Abb. 17). Man erkennt, daß dies für die vorliegenden Verhältnisse der Fall ist. Annahme von Geradlinigkeit ist bis zur Abszisse + 1 Volt zugänglich, so daß also Beschleunigungen, die nicht mehr als 1 Volt Gitterspannungsänderung hervorrufen, stets richtig gemessen werden.

β) Prüfung der Eichung. Die Richtigkeit der Eichung durch Variation der Gittervorspannung läßt sich auch experimentell bestätigen. Mittels eines schwingenden Stabes werden auf den Meßkörper bekannte Beschleunigungen übertragen und diese mit den Aufzeichnungen des Instruments verglichen.

1. Anordnung (Abb. 18). Ein gehärteter Stahlstab *S* mit einem Querschnitt  $25 \times 7$  mm und einer freien Länge von 40 cm ist 25 cm tief in eine feste Backsteinwand einzementiert. Um eine absolut starre Verbindung von Stab und Wand zu gewährleisten, sind an dem eingemauerten Teil des Stabes auf beiden Seiten kräftige U-Eisen angebracht. Mit einer Eisenfassung wird der Meßkörper auf den Stab geklemmt. Der Stab führt so eine fast ungedämpfte sin-Schwingung aus. Die erste Amplitude wird durch das Fernrohr *F* gemessen. Die Frequenz der Schwingung läßt sich mit Hilfe der Zeitmarkierung aus der Filmaufnahme entnehmen. Durch Frequenz und Amplitude ist die Beschleunigung gegeben.

2. Meßergebnisse (vgl. nebenstehende Tabelle).

Eichung durch Gitterspannungsänderung ergab: 1 mm Ausschlag entspricht  $11,5 \text{ cm/sek}^2$ .

Da die Genauigkeit der Fernrohrablesungen etwa 10 vH war und die Zahlen der Spalte III der Tabelle etwa mit einem Fehler von 5 vH behaftet sind, so liegen die Abweichungen der Spalte V alle innerhalb der Fehlergrenzen. Für diese Abweichungen ist das arithmetische Mittel mit seinem mittleren Fehler:

$$(4,5 \pm 1,4 \text{ vH}).$$

Wiederholungen der Versuche ergaben den gleichen mittleren Fehler. Die Eichung durch Gittervorspannungsänderung erweist sich demnach als richtig.

	I Gemessene Amplituden in mm	II Beschleunigungs- auschlag in der Aufnahme in mm	III Ergebnisse mit Gitter- spannungs- eichung in $\text{cm/sek}^2$	IV Ergebnisse, berechnet aus Am- plitude und Frequenz in $\text{cm/sek}^2$	V Ab- weichung der Erge- bnisse III von IV in vH
	a) der Stab schwingt mit 4,7 Hertz.				
Aufnahme 1	1,6	12,5	141	142	0,7
Aufnahme 2	1,6	13	147	142	3,5
Aufnahme 3	1,8	13	147	159	7,5
	b) der Stab schwingt mit 10 Hertz.				
Aufnahme 4	0,4	13	147	160	8,1
	c) der Stab schwingt mit 11,5 Hertz.				
Aufnahme 5	0,2	9	102	105	2,8

γ) Die Empfindlichkeit des Piezoquarzinstruments. Das Instrument arbeitet richtig, so lange die zu messenden Beschleunigungen nicht mehr als 1 Volt Spannungsänderung am Gitter hervorbringen. Da 1 Volt einer Beschleunigung von  $548 \text{ cm/sek}^2$  entspricht, so ist der Apparat ohne weiteres zur Messung bis zu dieser Grenze verwendbar. Zweckmäßig wird man also Röhrenheizung und mechanische Fadenspannung so wählen, daß der ganzen Filmbreite höchstens 1 Volt entspricht. Starke Heizung, die jedoch nicht über 4 Volt hinausgehen soll, und schwache Fadenspannung erhöhen die Empfindlichkeit.

Sollen Beschleunigungen gemessen werden, die größer sind als  $548 \text{ cm/sek}^2$  (für Verkehrserschütterungen kommt das nie in Frage), so lassen sich zu den Quarzbelegungen im Meßkörper noch Kapazitäten parallel schalten. In diesem Fall bringt erst eine entsprechend größere Beschleunigung 1 Volt Spannungsänderung hervor.

4. Ergebnis der Untersuchung des Piezoquarzbeschleunigungsmessers. Den Anforderungen, die an einen wissenschaftlichen Erschütterungsmesser zu stellen sind, entspricht der Piezoquarzbeschleunigungsmesser gut. Er liefert die getreue Wiedergabe des zeitlichen Verlaufs einer Beschleunigung. Der Maßstab (Vergrößerung) der Wiedergabe bleibt konstant, so lange der geradlinige Teil der Röhrencharakteristik nicht verlassen wird. Die Ueberlagerung einer Eigenschwingung

ist im allgemeinen nicht zu befürchten. Die Eichung ist einfach durchführbar und kann durch Aenderung der Gitterspannung stattfinden. Irgend welche Apparatkonstanten brauchen außerdem nicht bestimmt zu werden. Die Genauigkeit ist durchaus zureichend. Das Instrument ist für die verschiedensten Meßbereiche geeignet.

#### V. ENTWICKLUNG EINER ABSOLUTEN STÄRKE-SKALA FÜR ERDBEBEN UND ERSCHÜTTERUNGEN.

1. Das Maß der Erschütterung. Von praktischem Nutzen kann die Erschütterungsmessung erst dann sein, wenn es möglich ist, Erschütterungen zu vergleichen. Der Vergleich geschah seither an Hand der Erdbebenskala von Mercalli-Cancani, die bekanntlich auf Beschleunigungswerten aufgebaut ist. Diese Skala muß aber irgend welche Unvollkommenheit in sich tragen. Das geht allein schon daraus hervor, daß sich bei der Anwendung auf Verkehrserschütterungen ganz unmögliche Resultate ergaben.

Die Erschütterungsmessung kann von zwei verschiedenen Gesichtspunkten aus betrieben werden. Einmal interessiert der Einfluß von Erschütterungen auf Bauwerke und dann auch der auf den menschlichen Organismus.

Trifft eine Erschütterungswelle ein Bauwerk, so leistet die Energie der Welle an diesem Arbeit. Diese Arbeit besteht aus zwei Teilen, einmal aus der Verformungsarbeit, die das Gebäude in Schwingungen versetzt und also rückführbar (elastisch) ist, und dann aus der nicht-rückführbaren (plastischen) Verformungsarbeit, die eine bleibende Verformung und damit auch Wärme hervorruft. Es ist nun von ausschlaggebender Bedeutung, ob eine bestimmte Arbeit über eine längere Zeitdauer oder stoßartig geleistet wird. Im zweiten Fall ist die Erschütterung stärker. Man kann daraus schließen, daß die in der Zeiteinheit wirkende Schwingungsenergie ein Maß für die Erschütterung ist. Unter der Annahme, daß die Energie sin-förmig aufgenommen wird, läßt sie sich als die in der Zeiteinheit geleistete Arbeit berechnen. Diese Annahme erscheint durchaus berechtigt, denn sie verlangt in der Tat nur, daß in der Schwingungsaufnahme jede Viertelschwingung für sich sin-Charakter hat.

Der Schwingungsvorgang habe die Gleichung:

$$(1) \quad y = A \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t$$

daraus ergibt sich die Geschwindigkeit:

$$(2) \quad v = \frac{dy}{dt} = \frac{2\pi}{T} \cdot A \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t$$

und die Beschleunigung:

$$(5) \quad b = \frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{4\pi^2}{T^2} \cdot A \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t$$

da hier nur Absolutbeträge der Beschleunigung interessieren, kann auf das Vorzeichen verzichtet werden.

Die zu berechnende Leistung ist:

$$(4) \quad N = \frac{1}{\tau} \int_0^{T/4} K \cdot dy$$

dabei ist  $\tau = \frac{T}{4}$ , da die in der Zeiteinheit geleistete Arbeit über die Zeit  $\frac{T}{4}$  berechnet werden soll.

Durch:

$$(5) \quad K = m \cdot b, \text{ Gleichung (5) und (2) ergibt sich:}$$

$$(6) \quad N = \frac{4}{T} \cdot m \cdot \frac{8\pi^3}{T^3} \cdot A^2 \int_0^{T/4} \sin \frac{2\pi}{T} t \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t dt$$

Integration ergibt:

$$(7) \quad N = m \cdot \frac{8\pi^2 \cdot A^2}{T^3}$$

Führen wir statt der Periode die Frequenz ein durch  $T = \frac{1}{n}$  und ferner die Ausdrücke:

$$v_{\max} = \frac{2\pi}{T} \cdot A \text{ u. } b_{\max} = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot A$$

so läßt sich schreiben:

$$N = m \frac{b_{\max}^2}{2\pi^2 \cdot n} = m \cdot 2v_{\max}^2 \cdot n = m \cdot 8\pi^2 A^2 \cdot n^3.$$

Daraus soll jetzt der Begriff „Erschütterung S“ definiert werden als die Energie, die für die Zeit- und Masseneinheit aufgenommen wird.

$$S = \frac{N}{m} = \frac{b_{\max}^2}{2\pi^2 \cdot n} = 2v_{\max}^2 : n = 8\pi^2 \cdot A^2 \cdot n^3.$$

Die Dimension der „Erschütterung“ ist demnach  $\text{cm}^2/\text{sek}^3$ .

Wir sehen also, daß der Stärkegrad einer Erschütterung nicht nur von der Beschleunigung, sondern auch von der Frequenz, mit der diese Beschleunigung auftritt, abhängt. Eine bestimmte Beschleunigung wirkt um so stärker, mit je kleinerer Frequenz sie verbunden ist, oder hohe Frequenzen schaden nur, wenn sie mit entsprechend höheren Beschleunigungen auftreten.

Natürlich kann eine bestimmte Erschütterung S von verschiedenen Menschen immer noch verschieden wahrgenommen werden, je nach dem Grad der Uebung oder der Nervosität. Durchschnittswerte aufzustellen dürfte aber keine nennenswerten Schwierigkeiten bieten.

Bei der Untersuchung der Erschütterungswirkungen auf ein Bauwerk spielen elastische und plastische Verformung eine verschiedene Rolle. Jene kann einen Schaden im allgemeinen nicht hervorbringen, auch dann nicht, wenn die Schwingungsausschläge so groß wären, daß eine Beanspruchung über die Elastizitätsgrenze hinaus vorliegen würde. Das hat seinen Grund darin, daß ein Gebäude ein statisch sehr hochgradig unbestimmtes System darstellt. Bestimmte Teile, die einmal über die Elastizitätsgrenze beansprucht wurden, sind in Zukunft vor weiterer Beanspruchung geschützt, weil andere Teile diese Kräfte dann aufnehmen. Dasselbe gilt natürlich auch für die plastische Verformung. Es ist somit ersichtlich, daß mit der Uebertragung obiger Erschütterungsdefinition auf diesen Fall Vorsicht geboten ist, da ein Bauwerk unter Umständen viel Energie vernichten kann, ohne Schaden zu nehmen.

2. Aufstellung der Stärkeskala. Aus der Definition der Erschütterung S geht hervor, daß die Stärke dann bekannt ist, wenn zusammengehörige Werte von zwei der drei Größen A, v, b, n, gemessen werden. Registrierende Beschleunigungsmesser nehmen  $\bar{b}$  und n

auf. Mit der Abkürzung  $\kappa = \frac{\bar{b}^2_{\max}}{n}$  läßt sich die Erschütterung

schreiben:  $S = \frac{\kappa}{2\pi^2} \cdot (\kappa \text{ soll Erschütterungsfaktor}$

heißen). Eine Stärkeskala kann jetzt sowohl auf S als auf  $\kappa$  gegründet werden. Die Wahl von  $\kappa$  ist vorzuziehen, weil sich damit bequemere Zahlenwerte ergeben. In der folgenden Tabelle sind die Werte  $\kappa$  für alle Beschleunigungen und Frequenzen bzw. Perioden, die bei Erdbeben und Erschütterungen auftreten, berechnet. Die Abgrenzung der Stärkegrade ist so vorgenommen, daß sie im Erdbebenbereich noch ungefähr mit der Mercalli-Cancani-Skala übereinstimmen. Zur Beurteilung von Verkehrserschütterungen allein genügt ein Auszug aus dieser Tabelle. Es ergibt sich so:

- I. Grad:  $\kappa < 2$ ,
- II. Grad:  $\kappa$  von 2 bis 10,
- III. Grad:  $\kappa$  von 10 bis 50,
- VI. Grad:  $\kappa$  von 50 bis 250,
- V. Grad:  $\kappa$  von 250 bis 1000,
- VI. Grad:  $\kappa$  von 1000 bis 5000,
- VII. Grad:  $\kappa$  von 5000 bis 20 000,

Tabelle I.

Beschl. in cm/sek<sup>2</sup>.

Perioden	Frequenzen (Hertz)	0,25	0,5	1	2,5	5	10	20	40	60	80	100	200	500	400	500	1000
100	0,01	6,2	25	100	625	2500	10 000	40 000	160 000	360 000	640 000	1 M.	4 M.	9 M.	16 M.	25 M.	100 M.
50	0,02	3,1	12,5	50	312	1250	5000	20 000	80 000	180 000	320 000	500 000	2 M.	4,5 M.	8 M.	12,5 M.	50 M.
20	0,05	1,2	5	20	125	500	2000	8000	32 000	72 000	128 000	200 000	800 000	1,8 M.	3,2 M.	5 M.	20 M.
10	0,1	0,6	2,5	10	62,5	250	1000	4000	16 000	36 000	64 000	100 000	400 000	900 000	1,6 M.	2,5 M.	10 M.
5	0,2	0,3	1,2	5	31	125	500	2000	8000	18 000	32 000	50 000	200 000	450 000	800 000	1,25 M.	5 M.
2	0,5	0,1	0,5	2	12,5	50	200	800	3200	7200	12 800	20 000	80 000	180 000	320 000	500 000	2 M.
1	1	0,1	0,2	1	6,2	25	100	400	1600	3600	6400	10 000	40 000	90 000	160 000	250 000	1 M.
0,2	5		0,1	0,2	1,2	5	20	80	320	720	1280	2000	8000	18 000	32 000	50 000	200 000
0,1	10			0,1	0,6	2,5	10	40	160	360	640	1000	4000	9000	16 000	25 000	100 000
	15			0,1	0,4	1,6	6,6	26,6	106,6	240	426	660	2660	6000	10 660	16 660	66 700
0,05	20			0,1	0,5	1,2	5	20	80	180	320	500	2000	4500	8000	12 500	50 000
	25				0,2	1	4	16	64	144	256	400	1600	3600	6400	10 000	40 000
	50				0,2	0,8	3,5	13,5	53,5	120	215	350	1350	3000	5350	8350	33 500
	55				0,2	0,7	2,9	11,5	45,7	105	185	290	1150	2570	4570	7150	29 000
0,025	40				0,2	0,6	2,5	10	40	90	160	250	1000	2250	4000	6250	25 000
	45				0,1	0,5	2,2	8,9	35,5	80	142	220	890	2000	3550	5550	22 200
0,02	50				0,1	0,5	2	8	32	72	128	200	800	1800	3200	5000	20 000
	60				0,1	0,4	1,6	6,6	27	60	106,5	165	665	1500	2665	4165	16 650
	70				0,1	0,4	1,4	5,7	25	51,5	91	145	575	1285	2500	3600	14 500
	80				0,1	0,5	1,2	5	20	45	80	125	500	1125	2000	3125	12 500
	90				0,1	0,5	1,1	4,5	18	40	71	110	445	1000	1775	2600	10 600
0,01	100				0,1	0,5	1	4	16	36	64	100	400	900	1600	2500	10 000
	150					0,2	0,7	2,7	10,7	24	42,6	66	266	600	1066	1666	6670
0,005	200					0,1	0,5	2	8	18	32	50	200	450	800	1250	5000
	250					0,1	0,4	1,6	6,4	14,4	25,6	40	160	360	640	1000	4000

VIII. Grad:  $\kappa$  von 20 000 bis 100 000,IX. Grad:  $\kappa$  von 100 000 bis 500 000,X. Grad:  $\kappa$  von 500 000 bis 2,5 Millionen,XI. Grad:  $\kappa$  von 2,5 Mill. bis 10 Mill.,XII. Grad:  $\kappa$  von 10 Mill. an aufwärts.

Was die Beurteilung von Erdbeben betrifft, können auf diese Gradeinteilung die Erläuterungen der Mercalli-Cancani-Skala<sup>9)</sup> Anwendung finden.

<sup>9)</sup> Sieberg, S. 102 bis 104.

Nachträglich läßt sich noch untersuchen, woran es liegt, daß die Mercalli-Cancani-Skala, obwohl sie unvollständig ist, für Erdbeben gute und für Erschütterungen schlechte Resultate liefert. Offenbar bringt dies die große Verschiedenheit der beiden Frequenzbereiche mit sich. Eine Skala, die nur auf Beschleunigungen aufgebaut ist, kann auch nur für bestimmte Perioden richtig sein. Für die Mercalli-Cancani-Skala sind dies die mittleren Erdbebenperioden. Der Frequenzbereich der Verkehrserschütterungen ist 5 bis etwa 200 Hertz, der der

Tabelle II. Auszug aus Tabelle I für Erschütterungen.

Beschl. in cm/sek<sup>2</sup>.

Hertz	5	10	20	50	40	50	60	80	100	120	140	160	180	200	250
5	5	20	80	180	320	500	720	1 280	2 000	2 880	3 920	5 120	6 480	8 000	12 500
10	2,5	10	40	90	160	250	360	640	1 000	1 440	1 960	2 560	3 240	4 000	6 250
20	1,2	5	20	45	80	125	180	320	500	720	980	1 280	1 620	2 000	3 125
50	0,8	3,5	13,5	30	53,5	85,5	120	215	330	480	655	855	1 080	1 350	2 085
40	0,6	2,5	10	22,5	40	62,5	90	160	250	360	490	640	810	1 000	1 562
50	0,5	2	8	18	32	50	72	128	200	288	392	512	648	800	1 250
60	0,4	1,6	6,6	15	27	42	60	106,5	165	240	326	426	540	665	1 042
70	0,5	1,4	5,7	12,8	25	36	51,5	91	145	206	280	366	465	575	895
80	0,5	1,2	5	11,3	20	31	45	80	125	180	245	320	405	500	781
90	0,5	1,1	4,5	10	18	28	40	71	110	160	218	284	360	445	694
100	0,2	1	4	9	16	25	36	64	100	144	196	256	324	400	625

Erdbeben ist nach Sieberg 0,014 bis 2 Hertz (Perioden von 0,5 bis 70 sek). Der Erschütterungsbereich liegt also 100 bis 550 mal höher. Denkt man sich eine bestimmte Erschütterungsstärke einerseits durch eine Verkehrserschütterung ( $z = \frac{b_{\max}^2}{n}$ ) und andererseits durch ein Erdbeben ( $z = \frac{b_{\max E}^2}{n_E}$ ) hervorgebracht, so ergibt sich für die Beschleunigung der Verkehrserschütterung:

$$b_{\max} = b_{\max E} \cdot \sqrt{\frac{n}{n_E}}$$

Da  $\frac{n}{n_E}$  100 bis 550 ist, zeigt sich, daß die Maximalbeschleunigung einer Verkehrserschütterung 10 bis 19 mal größer sein kann, um dieselbe Wirkung zu erzielen, wie eine Erdbebenbeschleunigung. Die Mercalli-Cancani-Skala wird also in roher Annäherung für Verkehrserschütterungen wieder anwendbar, wenn die dort angegebenen Beschleunigungswerte mit 10 bis 19 multipliziert werden. Diese kurze Rechnung begründet den seither schon teilweise angewandten Faktor 10, der von Wittig willkürlich eingeführt wurde.

#### VI. MESSERGEBNISSE MIT DEM PIEZOQUARZBESCHLEUNIGUNGSMESSER.

1. Probemessung in und vor einem Gebäude an einer Großpflasterstraße. Der Versuchswagen war ein Sprengwagen, der von der Stadt Hannover zur Verfügung gestellt wurde. Der Wagen hat Elastikreifen und ein Gesamtgewicht von 9 Tonnen. Als Beispiel der Messungen sei hier ein Fall angeführt, in dem an drei Punkten vertikal gemessen wurde, zunächst auf dem Bürgersteig, dann im Obererdgeschoß und schließlich im Obergeschoß. Die Ergebnisse waren:

Geschwindigkeit (km/Std.)	Messort	Frequenzen (Schw./sek)	Beschleunigung (cm/sek <sup>2</sup> )	Erschütterungsstärke
15,5	Bürgersteig 5 m von Fahrbahn	65 20	rd. 5 bis zu 60	$z = 0,4$ (I. Gr.) $z = 180$ (IV. Gr.)
24	Obererd- geschoß, 7 m von Fahrbahn, nahe Hauswand	50 16,5	rd. 10 rd. 15	$z = 2$ (I.-II Gr.) $z = 14$ (III. Gr.)
23	Ober- geschoß, 6 m von Fahrbahn, nahe Hauswand	50	50	$z = 50$ (III.-IV. Gr.)

Die Angabe der Erschütterungsstärke ist nur für das subjektive Empfinden richtig. Die objektive Wirkung

ist geringer, und zwar vor allem im Obergeschoß, wo die Aufnahme fast konstante, reine sin-Schwingungen zeigt. Die Erschütterung wird dort durch die Resonanz des Fußbodens erheblich verstärkt. Für das Gebäude ist daraus jedoch ein Schaden nicht abzuleiten.

Bei diesen Aufnahmen wurde absichtlich mit der geringsten mechanischen Fadenspannung gearbeitet. Ein Einfluß der Galvanometerfadeneigenfrequenz läßt sich bei Messung auf dem Bürgersteig feststellen. Bei jeder plötzlichen, stärkeren Beschleunigung sind einige Eigenschwingungen zu erkennen. Es ist aber ein leichtes, sich diese Schwingungen wegzudenken.

2. Schlüsse aus den bisherigen Messungen. Die höheren Häufigkeiten (Frequenzen), die mit kleiner Beschleunigung auftreten, können von vornherein außer acht bleiben. Abgesehen davon läßt sich sagen: die Häufigkeiten sind am kleinsten an der Straße und im Erdgeschoß. Mit den Stockwerken zeigt sich eine Zunahme der Häufigkeit. Die Geschwindigkeit des Versuchswagens scheint keinen Einfluß zu haben.

Was die Maximalbeschleunigung anbetrifft, so ist eine erhebliche Abhängigkeit von der Wagengeschwindigkeit festzustellen, ebenso hängen die Beschleunigungen von der Entfernung der Meßstelle ab. Die beiden letzten Abhängigkeiten sind für die verschiedensten Straßen von Langer und Thomé schon untersucht worden. (Zeitschr. des V. d. I. 1928, Nr. 44, Seite 1561 ff.) Die Abnahme der Maximalbeschleunigung mit der Entfernung wird sehr stark, sobald man sich von der Straße in das Erdgeschoß eines Hauses begibt. Mit den Stockwerken ist wieder eine Zunahme bemerkbar.

Teilweise wurden dieselben Erschütterungen vergleichsweise auch mit dem Spindler-Hoyerschen Seismograph gemessen. Die von diesem Instrument aufgezeichnete Weg-Zeit-Linie wird zweimal differentiiert und dann mit den Ergebnissen des Piezoquarzbeschleunigungsmessers verglichen. Die Abweichungen sind so groß, daß von irgendeiner Uebereinstimmung gar nicht mehr gesprochen werden kann. Nur bei der Aufnahme von konstanten sin-Schwingungen, wie z. B. im Obergeschoß, ergeben sich übereinstimmende Resultate.

#### VII. ZUSAMMENFASSUNG.

Das Ergebnis der vorliegenden Arbeit läßt sich dahin zusammenfassen:

Zur Messung von Verkehrserschütterungen sind Unterfrequenzinstrumente (auf dem Grundsatz der trägen Masse beruhend) dynamischer Art nicht brauchbar. Eben-sowenig sind Instrumente geeignet, die nur eine der vier Größen: Amplitude, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Frequenz zu messen gestatten. Durch eingehende Untersuchung wird dargetan, daß ein statisches Ueberfrequenzinstrument, wie es in dem Piezoquarzbeschleunigungsmesser der Prospektion geschaffen ist, den Anforderungen der wissenschaftlichen Erschütterungsmessung genügt.

Weiter wird der Begriff „Erschütterung“ mathematisch definiert als die für die Zeit- und Masseneinheit ver-nichtete Energie. Darauf wird eine Stärkeskala gegründet, die sowohl für Erschütterungen als auch für Erdbeben Gültigkeit hat. Im Erdbebenbereich stimmt sie nahe mit der Mercalli-Cancani-Skala überein.