

LIS - Berichte

Nr. 56

Untersuchungen zur Ermittlung
der Wahrnehmungsschwelle
bei Einwirkung von Erschütterungen
auf den Menschen

- Beschreibung der Versuchsanlage -



Herausgeber:

Landesanstalt für Immissionsschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen
Wallneyer Straße 6

D-4300 Essen 1

1985

ISSN 0720-8499

Landesanstalt für Immissionsschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen
ISSN 0720-8499

Untersuchungen zur Ermittlung der
Wahrnehmungsschwelle bei Einwirkung
von Erschütterungen auf den Menschen

- Beschreibung der Versuchsanlage -

Dr. H. Splittgerber, M. Klein und P. Neutz

I n h a l t s v e r z e i c h n i s

Zusammenfassung

Summary

1. Einführung
2. Allgemeine Problematik
3. Abgrenzung und Begründung der Untersuchungen
4. Ziel der Untersuchungen und Vorgehensweise
5. Verwendete Versuchsanlage
 - 5.1. Versuchsraum
 - 5.1.1. Allgemeines
 - 5.1.2. Lage des Versuchsraumes
 - 5.1.3. Gestaltung und Ausstattung des Versuchsraumes
 - 5.1.4. Kopplungselemente
 - 5.2. Anlage zur Erregung der Erschütterungsreize
 - 5.2.1. Auswahl des Erregersystems
 - 5.2.2. Funktionsweise der servohydraulischen Erregeranlage
 - 5.2.3. Realisierte Eigenschaften der Erregeranlage
 - 5.2.3.1. Eigenrauschen
 - 5.2.3.2. Klirrfaktor und Dynamik der Hydropulsanlage
 - 5.2.3.3. Eigenfrequenzen der Erregeranlage
 - 5.2.3.4. Störschwingungen auf der Tischplatte in horizontalen Richtungen; Auswirkungen von exzentrischen Belastungen der Tischplatte
 - 5.2.3.5. Zeitliche Stabilität der technischen Eigenschaften
 - 5.2.3.6. Leistungsgrenzen der Erregeranlage
 - 5.3. Versuchsdurchführung und rechnergestützte Ansteuerung der Erregeranlage
 - 5.3.1. Anforderungen an das Instrumentarium zur Versuchsdurchführung
 - 5.3.1.1. Steuerung des Versuchsablaufs
 - 5.3.1.2. Dokumentation des Versuchsablaufs
 - 5.3.1.3. Dokumentation der Versuchsergebnisse
 - 5.3.1.4. Bereitstellung der Erschütterungssignale
 - 5.3.1.5. Folgerungen für die Auswahl des Instrumentariums
 - 5.3.2. Auswahl des Ansteuerungssystems
 - 5.3.2.1. Verwendete Geräte
 - 5.3.2.2. Beschreibung der Signalausgabe
 - 5.3.3. Beispiel für eine Versuchsdurchführung
 - 5.3.3.1. Versuchsablauf
 - 5.3.3.2. Beschreibung der Erschütterungssignale
 - 5.3.3.3. Untersuchungsmethodik bei diesem Beispiel
 - 5.3.3.4. Kontrolle zwischen Ist- und Sollwerten

6. Weitere kennzeichnende Merkmale der Versuchsanlage

6.1. Geräuschverhalten

6.1.1. Allgemeines

6.1.2. Geräuschpegel im Versuchsraum

6.2. Klima- und Lichtverhältnisse

Schrifttum

UNTERSUCHUNGEN ZUR ERMITTLUNG DER WAHRNEHMUNGSSCHWELLE BEI EINWIRKUNG VON
ERSCHÜTTERUNGEN AUF DEN MENSCHEN - BESCHREIBUNG DER VERSUCHSANLAGE -

Dr. H. Splittgerber, M. Klein und P. Neutz

Z u s a m m e n f a s s u n g

Bei der Beurteilung von Erschütterungseinwirkungen auf Menschen, die sich in Gebäuden aufhalten, ist die Kenntnis des Bereiches der beginnenden subjektiven Wahrnehmung wichtig. Dieser Bereich sollte für die im Immissionsschutz auftretenden Erschütterungsimmissionen ausreichend genau bekannt sein. Zur Durchführung von Untersuchungen zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle wurde eine Versuchsanlage in einen Versuchsraum eingebaut, der etwa wie ein Wohnraum ausgestattet worden ist. Zur Erzeugung der Erschütterungsreize wurde aufgrund der gestellten Anforderungen an möglichst verzerrungsfreie Ausführung von beliebigen Erschütterungsamplituden im Frequenzbereich von etwa 2 Hz bis 100 Hz bei Schwinggeschwindigkeitsamplituden im Bereich von etwa 0,02 mm/s bis 3 mm/s bei ausreichend großem Rauschabstand ein hydraulischer Schwingungserreger verwendet. Die Funktionsweise der servo-hydraulischen Erregeranlage und ihre technischen Eigenschaften, insbesondere in bezug auf das Eigenrauschen, den Klirrfaktor, der ausnutzbaren Dynamik und der Eigenfrequenzen der Erregeranlage werden beschrieben. Zur Versuchsdurchführung wird die Erregeranlage durch einen Personal-Computer angesteuert. Die automatisierte Ablaufsteuerung der Versuche wird beschrieben, insbesondere die Bereitstellung der Erschütterungssignale, die Art der Dokumentation des Versuchsablaufs und der Versuchsergebnisse. Ein Ablauf wird als Beispiel aufgezeigt. Weitere Merkmale der Versuchsanlage in Bezug auf die Geräuschpegel im Versuchsraum und die Klima- und Lichtverhältnisse werden angegeben.

S u m m a r y

For the evaluation of the effects of vibrations on man in buildings knowledge of the threshold of subjective perception is essential. In fact the entire range of perceived vibrations occurring in the environment should be known with sufficient accuracy. In order to determine the perception threshold an experimental set-up was installed into a test room which had been furnished for this purpose like a living room. A servohydraulic vibration generator is used to produce distortion free vibration amplitudes within the frequency range of about 2 Hz to 100 Hz at vibration velocity amplitudes ranging from about 0.02 mm/s to 3 mm/s and a sufficiently large signal to noise ratio. The mode of operation of the vibration generator and its technical features are discussed. Particularly its signal to noise ratio, distortion factor, useful dynamic range and resonance frequencies are addressed. During the tests the vibration generator is controlled by a computer. A common personal computer is used for this purpose. A description of the automated control of the test

runs is given. It deals with the generation and preparation of the vibration signals, the type of recording of the test runs and the test results. One test run is explained as example. The further characteristics of the experimental set-up as to noise levels caused in the experimental room as well as to the required air and lighting conditions are given.

1. E i n f ü h r u n g

Mit zunehmender Technisierung und Urbanisierung treten im Wohnumfeld des Menschen Belastungen auch durch Erschütterungsimmissionen auf. Der Mensch war in seiner Entwicklungsgeschichte bisher keinen Erschütterungen ausgesetzt, wie sie nach Form und Intensität in der technischen Umwelt auf ihn einwirken.

Wenn auch der Mensch bereit zu sein scheint, z.B. beim Benutzen von Fahrzeugen unvermeidbare mechanische Schwingungen (Erschütterungen) hinzunehmen, so bewertet er bei Aufenthalt in Gebäuden bereits im Bereich der beginnenden Wahrnehmung liegende Erschütterungen negativ, das heißt, sie sind für ihn fremdartig und beeinträchtigend.

Die bisherigen Angaben über die "Wahrnehmungsschwelle" in dem im Immissionschutz interessierenden Frequenzbereich von etwa 2 Hz bis 80 Hz sind unzureichend. Bisher sind Untersuchungen zur Ermittlung der "Wahrnehmungsschwelle" fast ausschließlich mit sinusförmigen Schwingungen vorgenommen worden. In Gebäuden in der Nachbarschaft von Industrieanlagen oder von Verkehrswegen festgestellte Erschütterungsimmissionen sind jedoch überwiegend nichtsinusförmig, sondern haben komplexe Amplituden-Zeitverläufe.

Für diese Arten von Erschütterungen fehlen ausreichend gesicherte Angaben zur "Wahrnehmungsschwelle".

Wegen der unterschiedlichen Disposition einzelner Menschen bei möglichen Erschütterungsexpositionen und wegen individueller Unterschiede bei der Rezeption und der Reaktion handelt es sich bei der sogenannten "Wahrnehmungsschwelle" nicht um eine diskrete "Schwelle" (Stufensprung), sondern um einen "Bereich der beginnenden Wahrnehmung", der noch einer entsprechenden Definition bedarf.

2. A l l g e m e i n e P r o b l e m a t i k

Der menschliche Körper ist ein äußerst kompliziertes mechanisches und biologisches System. Bei der Abbildung des Körpers auf ein "Modell" sind bei den interessierenden "mechanischen" Eigenschaften zahlreiche elastische und dämpfende "Elemente" mit zum Teil linearen wie auch nichtlinearen Eigenschaften in Erwägung zu ziehen [1]; siehe Abbildung 1. Die mechanischen Eigenschaften der "Elemente" sind zudem von Mensch zu Mensch unterschiedlich.

Das "biologische System" ist im Vergleich zum "mechanischen System" keineswegs einfacher, insbesondere, wenn auch psychologische Wirkungen einbezogen werden.

Physiologisch kann die Auswirkung von physikalischen oder chemischen Reizen, die aus der Umwelt auf den Menschen einwirken, als Stoffwechseländerung oder als Potentialverschiebung nachgewiesen werden [2]. Sie kann aber auch an sich selbst "introspektiv" wahrgenommen werden oder an einer anderen Versuchsperson "subjektiv" durch Befragen in Erfahrung gebracht werden. Diese zuletzt genann-

te Möglichkeit setzt dabei eine ganz bestimmte geistige Zugänglichkeit des gereizten Organismus voraus, den man als "Wachbewußtsein" bezeichnet [2].

In den Körper eingeleitete Erschütterungen sind physikalische Reize, die durch physikalisch meßbare Variable gekennzeichnet werden können. Es soll die Korrespondenz zwischen einer meßbaren Größe des Erschütterungsreizes und der Reaktion von Menschen in Form einer "bewußten Wahrnehmbarkeit" untersucht werden. Diese Fragestellung gehört zum Aufgabenbereich der Psycho-Physik [3].

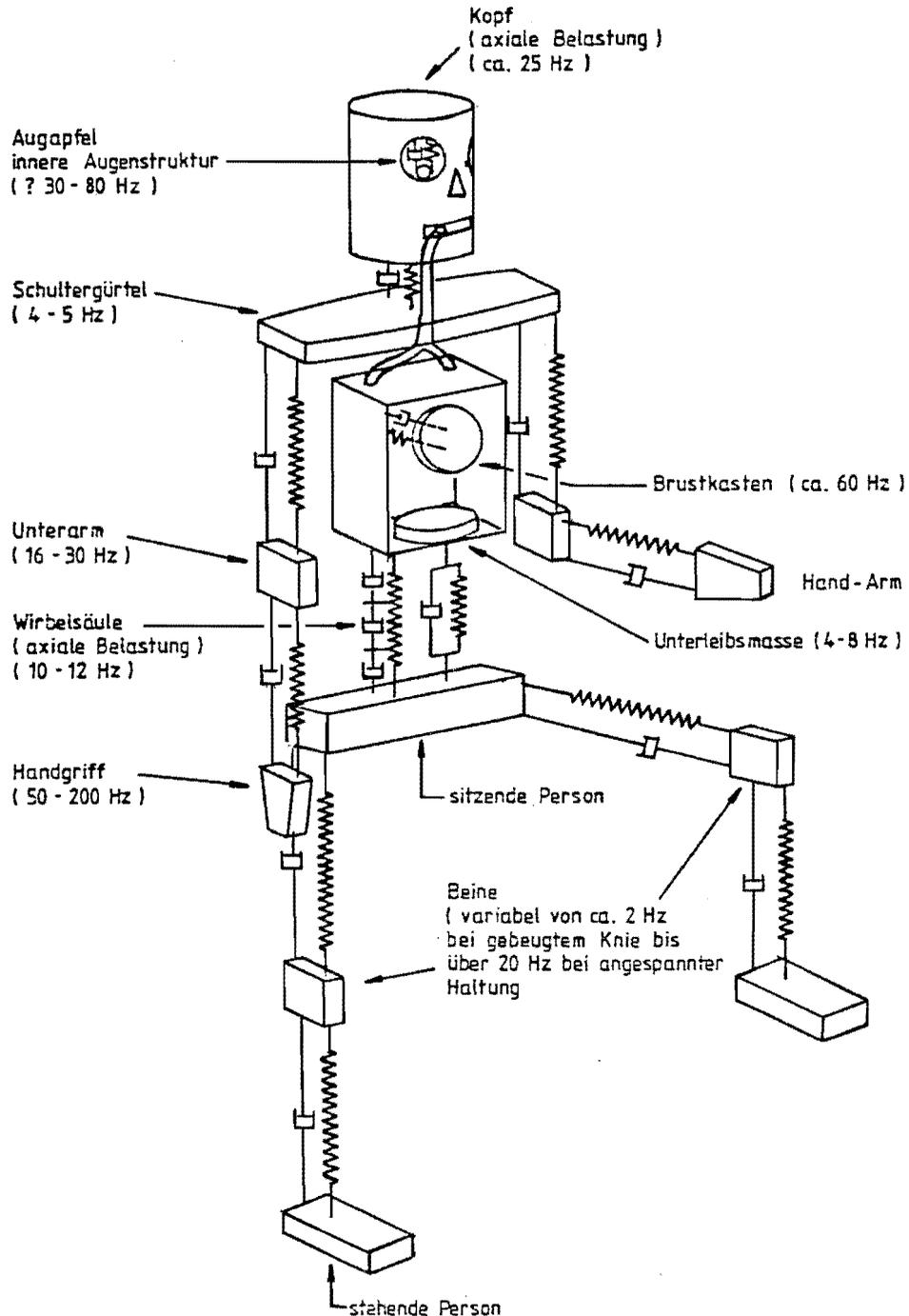


Abb. 1: Vereinfachtes Modell (mech.) des menschlichen Körpers mit den typischen Resonanzfrequenzen verschiedener Körperteile, RASMUSSEN [1]

Bei der Zuordnung der Objektrelationen - hier der subjektiven Reaktionen der Versuchspersonen auf die eingeleiteten Erschütterungsreize - zu den gewählten Zahlenrelationen für die physikalische Größe (dem Meßsystem) wird angenommen, daß Isomorphie vorliegt [3]. Das gewählte Meßsystem wird somit als Abbildung (Modell) für die Objektrelationen herangezogen.

Auf den Menschen einwirkende Erschütterungen können den ganzen Körper oder Teile desselben zu Schwingungen anregen. Man ist der Meinung, daß es über die Reizung der Mechanorezeptoren der Haut und der Muskelspindeln sowie des Gleichgewichtsorgans im Ohr zu einer quantifizierbaren Stärke der Wahrnehmung kommt. Bisher vorliegende Untersuchungen haben ergeben, daß für die Reaktion von Menschen auf einwirkende Erschütterungen nicht nur die Stärke, die Frequenz, die Einwirkungsrichtung und die Einleitungsstelle in den Körper von Bedeutung sind, sondern auch die Körperhaltung [4, 5, 6].

Erschütterungen können nicht nur von festen Gegenständen, z.B. vom Fußboden über die Füße oder vom Stuhl über die Sitzfläche in den Körper eingeleitet werden, sondern z.B. auch durch Luftdruckschwankungen in der den Menschen umgebenden Atmosphäre. Diese Art der Einleitung wird in der vorliegenden Studie nicht untersucht.

Für den Prozeß der Bewußtseinsbildung einer Sinneswahrnehmung - hier der Wahrnehmung von Erschütterungsreizen - ist das in Abbildung 2 dargestellte Modell herangezogen worden, bei dem auch wirksame Einflußparameter berücksichtigt worden sind [6].

Die Wirkung der von außen auf den Menschen einwirkenden Belastungen wird als Beanspruchung bezeichnet. Dies gilt auch für die in Betracht stehenden Reize in Form von Erschütterungen.

Die Reaktion auf derartige Beanspruchungen können zu einer bewußten Wahrnehmung oder zu einer unbewußten Einwirkung, z.B. auf das vegetative Nervensystem führen. Die bewußten Wahrnehmungen werden subjektiv bewertet und z.B. als Störung, Beeinträchtigung oder Belästigung erlebt. Die Bewertung von derartigen Reizen ist von individuellen und situativen Bedingungen abhängig.

Beim Aufenthalt in Gebäuden haben nicht nur die unmittelbar wahrnehmbaren (fühlbaren) Erschütterungen Einfluß auf die subjektive Bewertung, sondern auch sichtbare und hörbare Auswirkungen der Erschütterungen im Raum. Bei Erschütterungswahrnehmungen sind nach bisheriger Erfahrung von den Sinnenorganen auch das Gehör- und Sehorgan betroffen.

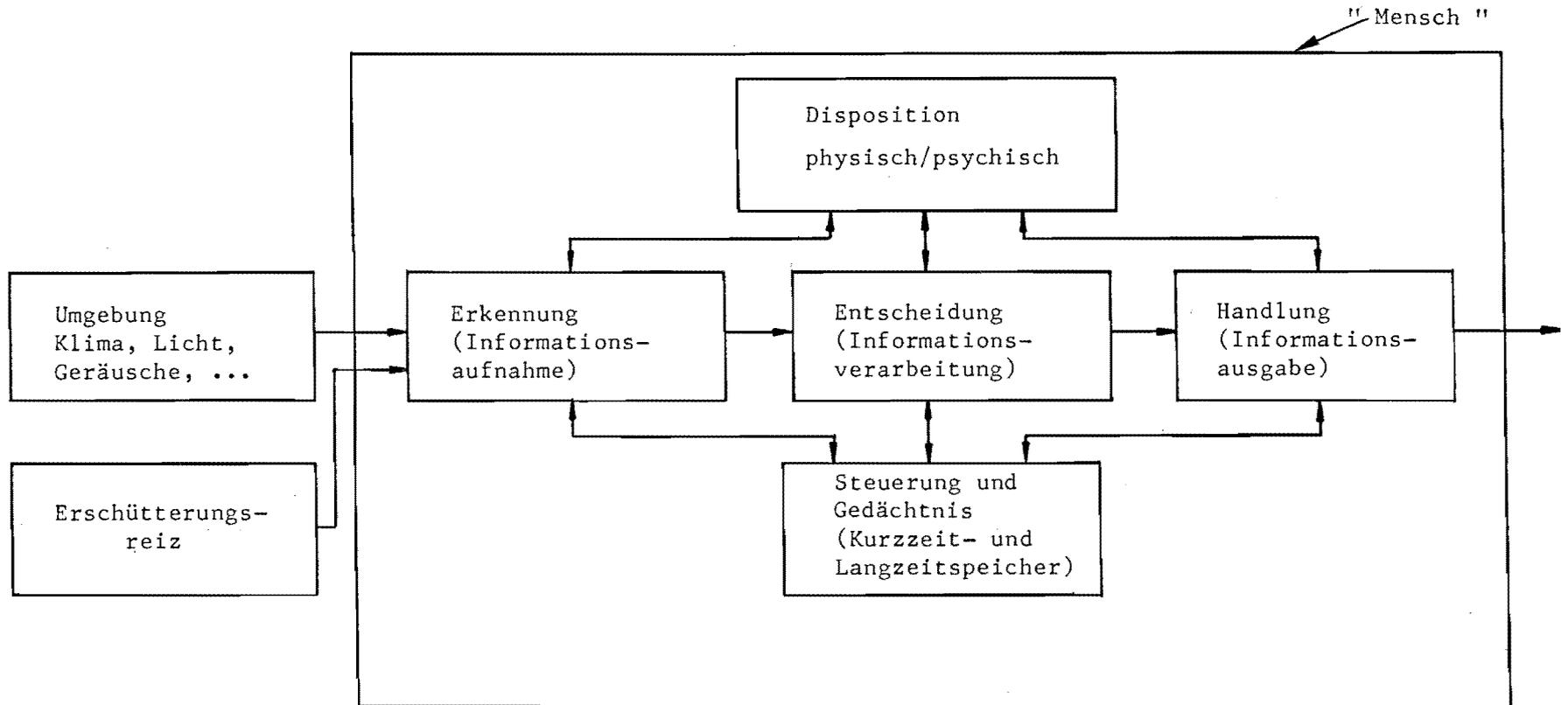


Abb. 2: Vereinfachtes Modell für den Ablauf von Erschütterungswahrnehmungen beim Menschen

3. A b g r e n z u n g u n d B e g r ü n d u n g d e r U n t e r - s u c h u n g e n

Bei der Beurteilung der Einwirkung von Erschütterungen auf Menschen, die sich in Gebäuden, insbesondere in Wohnungen, aufhalten, ist die Kenntnis des Bereiches der beginnenden subjektiven Wahrnehmung von fundamentalem Interesse, weil oft bereits "wahrnehmbare" Erschütterungen unerwünscht sind.

Dieser Wahrnehmungsbereich sollte für alle im Immissionsschutz vorkommenden Erschütterungsarten, z.B. für allgemeine periodische Schwingungen, für nichtperiodische Schwingungen (transiente Schwingungen) und auch für stochastische Schwingungen, ausreichend genau bekannt sein.

Da bisher, wie bereits erwähnt, die Wahrnehmungsschwelle fast ausschließlich nur für sinusförmige Schwingungen - und wegen des Versuchsaufwandes auch für jeweils nur wenige Versuchspersonen, oft weniger als 10, untersucht worden ist - soll der Bereich der beginnenden Wahrnehmung für die genannten komplexen Erschütterungsarten untersucht werden.

Von folgenden Variablen wird vermutet, daß sie Einfluß auf die subjektive Wahrnehmbarkeit haben:

- die Art der in den Menschen eingeleiteten Erschütterungen, die klassifiziert werden können in allgemein periodische Signale, stochastische und transiente (kurzzeitige) Erschütterungsreize sowie Pulsfolgen
- die Körperhaltung; zunächst werden Ganzkörperschwingungen in sitzender Körperhaltung in die Untersuchungen einbezogen
- die Reizeinleitungsdauer und das Zeitmuster der dargebotenen Erschütterungsreize
- das Kopplungselement zwischen der Versuchsperson und der Tischplatte der Erregeranlage, z.B. ein Stuhl bei Untersuchung der sitzenden Körperhaltung
- inter- und intraindividuelle Gegebenheiten der Versuchspersonen
- Alter, Gewicht und Geschlecht der Versuchspersonen
- die Umgebungsbedingungen im Versuchsraum, wie Licht-, Klima- und Geräuschverhältnisse
- Status-Merkmale der Versuchspersonen, bzw. die Art der ausgeübten beruflichen Tätigkeit, z.B. überwiegend geistig tätig und keinen wesentlichen Erschütterungen während der beruflichen Tätigkeit ausgesetzt oder überwiegend schwer körperlich tätig und oft beruflich starken Erschütterungen ausgesetzt.

In die Untersuchungen soll eine größere Anzahl von Versuchspersonen einbezogen werden, um für die "Wahrnehmungsschwelle" Korrelationen zwischen den physikalischen Werten der Erschütterungsreize und den genannten Einflußparametern aufzusuchen und um Angaben zur Wahrnehmungsschwelle mit ausreichender statistischer Genauigkeit zu machen.

Der Bereich der beginnenden Wahrnehmung soll für die unterschiedlichen Erschütterungsarten in Anlehnung an die Umgebungsbedingungen festgestellt werden, die in Wohn- bzw. vergleichbaren Räumen angetroffen werden. Sie werden daher nicht auf einem "Prüfstand" mit den dabei üblichen Einflüssen von maschinentechnischen, hydraulischen und sonstigen Störeinflüssen durchgeführt, sondern in einem Versuchsraum, durch den ein Wohn- bzw. Büroraum weitgehend simuliert wird.

4. Ziel der Untersuchungen und Vorgehensweise

Es soll die "Antwort" (subjektive Reaktion) von Versuchspersonen auf eingeleitete Erschütterungsreize im Bereich der beginnenden Wahrnehmung ("Ansprechempfindlichkeit") in Form von Wahrscheinlichkeitsaussagen beschrieben werden. Dabei sollen insbesondere die Umgebungsbedingungen beachtet werden, die beim Erschütterungsimmissionsschutz (Nachbarschaftsschutz) in Wohn- bzw. vergleichbaren Räumen vorliegen.

Bei der Versuchsdurchführung wird angenommen, daß die Versuchsperson im Augenblick des Versuches wie ein "Meßinstrument" funktioniert und die "Antwort" schätzt. Es wird die sogenannte "indirekte Methode" angewendet, das heißt, die Versuchsperson indiziert das Ausmaß ihrer Reaktion mittels einer Antwortkategorie ja/nein; es bedeutet "ja": Erschütterungen werden subjektiv wahrgenommen und "nein": Erschütterungen sind subjektiv nicht wahrnehmbar.

Zur Bestimmung der Reizschwelle wird ein Reaktionsschema auf nominalem Niveau verwendet; d.h., die Reaktionen werden in zwei Klassen eingeteilt (dichotomische Schätzskala). Dabei geschieht die Charakterisierung der beiden Klassen nur durch die Zuordnung der Aussagen "ja": gerade spürbar und "nein": nicht spürbar [8]. Die Vorgehensweise ist durch eine Verknüpfung der genannten Schätzskala mit Kennwerten zur Beschreibung der Erschütterungsreize (Erregung) bei Berücksichtigung von Kovariablen gekennzeichnet.

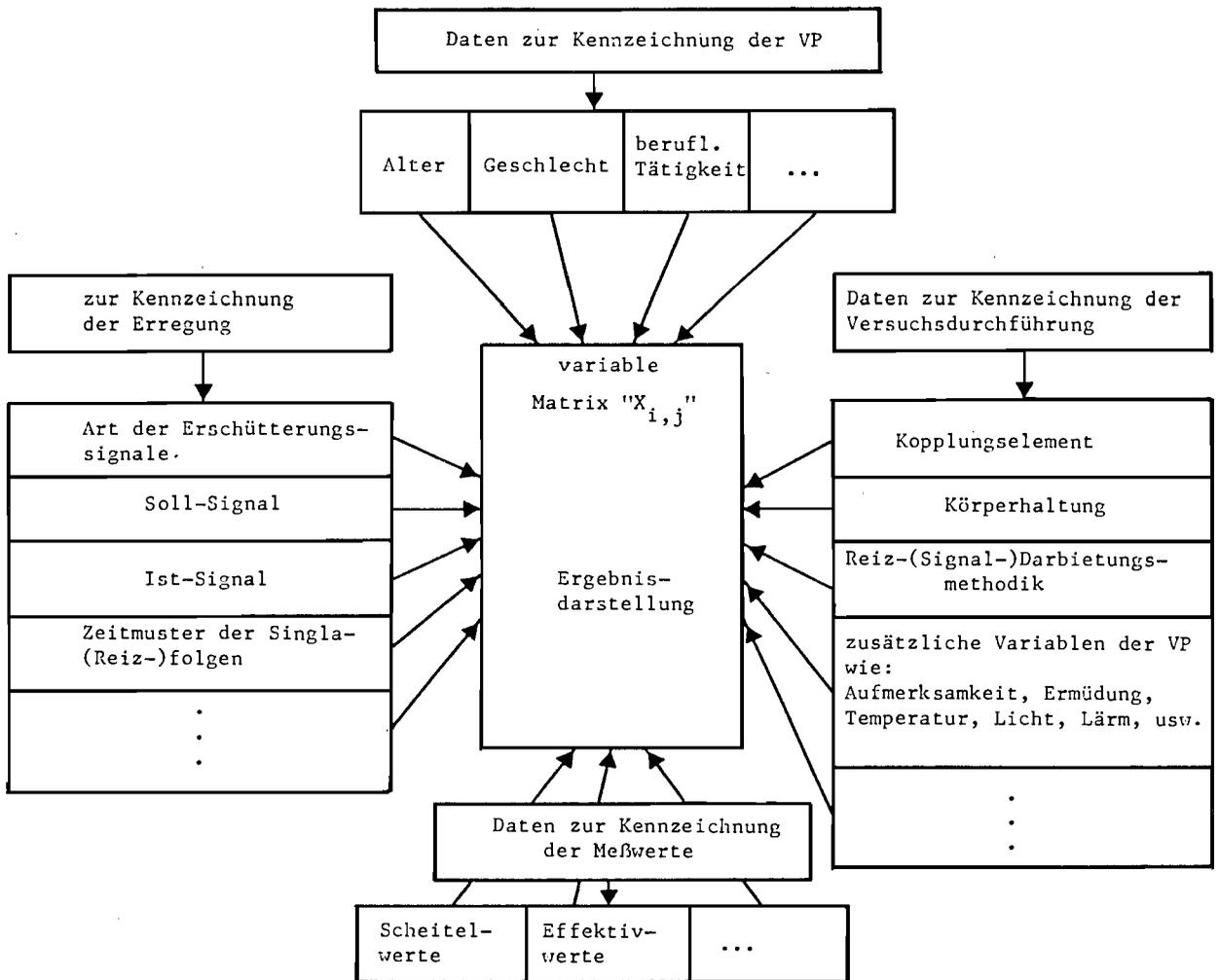
Es ist davon auszugehen, daß die "Wahrnehmungsschwelle", das heißt, die Entscheidung der Versuchsperson an der Schwelle ja/nein, durch verschiedene Variable (Parameter) beeinflusst wird. Diese kann man in folgende Gruppen zusammenfassen:

- Parameter, die die Versuchsperson kennzeichnen, wie Alter, Gewicht, Geschlecht, usw.
- Parameter, die die Erschütterungsreize (Erregung) kennzeichnen, wie die Art der Erschütterungssignale, das Zeitmuster der Signale usw.
- Parameter, die die Versuchsdurchführung kennzeichnen, wie die Untersuchungsmethodik, die Körperhaltung, die Reizdarbietungs-Methodik usw.
- Werte zur Kennzeichnung der Meßwerte im Augenblick der Entscheidungsfindung der Versuchspersonen bei der Wahrnehmungsschwelle, z.B. die Scheitelwerte, Effektivwerte usw.

Die Zusammenhänge zwischen der Reaktion der Versuchsperson, dem Erschütterungsreiz und weiteren Variablen sind in Abb. 3 in einer Matrix dargestellt.

Bei den Untersuchungen wird eine möglichst fehlerfreie, unverzerrte und objektive Skalierung angestrebt. Das wird erreicht, wenn ein bestimmter Ausprägungsgrad des Erschütterungsreizes von beliebig vielen, voneinander unabhängigen Individuen (Versuchspersonen) in gleicher Weise skaliert wird [7]. Das setzt folgende Bedingungen voraus:

- Isomorphie der Reizgrundlage. Das bedeutet, daß jede Versuchsperson gleiche Informationen über den zu beurteilenden Sachverhalt besitzt, was durch gleiche Information der Versuchspersonen mittels eines "Informationsbogens" im vorliegenden Fall erreicht wird.
- Isomorphie des Kategorisierungsprozesses. Das bedeutet, daß die Erschütterungsreize von allen Versuchspersonen in gleicher Weise verarbeitet werden, was mindestens zunächst vorausgesetzt wird. Irrendwelche mögliche Einflüsse auf das "Wachbewußtsein" und damit auf den Ablauf der Reizverarbeitung bleiben hier zunächst außer Betracht.



$X_{i,j}$ = Element der Matrix (Meßwert von j am i -ten Individuum)

$i = 1,2 \dots N$ = verschiedene Individuen (VP) oder Wiederholungen eines Versuches

$j = 1,2 \dots n$ = Ausprägungsgrad (Meßwert) eines Reizes

Abb. 3: Zusammenhänge zwischen der Reaktion der Versuchsperson, dem Erschütterungsreiz und weiteren Variablen

5. Verwendete Versuchsanlage

5.1. Versuchsraum

5.1.1. Allgemeines

Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen zur verbesserten Beurteilung von Erschütterungsimmissionen im Nachbarschaftsschutz beitragen. Deshalb wurde vorgesehen, die Untersuchungen nicht auf einem "Prüfstand" (Prüfsitz bzw. Schütteltisch) durchzuführen, wie er ausschließlich bei den bisher bekannt gewordenen Ermittlungen der Wahrnehmungsschwelle in mehr oder weniger vergleichbarer Weise für einwirkende sinusförmige Schwingungen verwendet worden ist. Bei den Versuchspersonen soll bei den geplanten Untersuchungen weitgehend der Eindruck vermieden werden, sich auf einem "Prüfstand" zu befinden mit unmittelbarem Kontakt und Einblick in die umfangreichen technischen Einrichtungen zur Erregung der Erschütterungsreize und den mit diesen verbundenen Auswirkungen von Lärm, Ölgeruch usw.

Für die Durchführung der Versuche wurde deshalb ein Versuchsraum vorgesehen, der etwa wie ein Wohnraum ausgestattet worden ist. Die Art und die Ausstattung des Versuchsraumes sind auch mit den Räumen vergleichbar, wie sei bei Büroräumen verwendet werden.

5.1.2. Lage des Versuchsraumes

Der Versuchsraum wurde in einer großen Versuchshalle (Abmessungen etwa 20 x 30m; Höhe ca. 10 m) etwa 1,50 m oberhalb des Hallenflures in der Landesanstalt für Immissionsschutz des Landes NRW, Essen aufgebaut. Der in Raum-in-Raum-Bauweise erbaute Versuchsraum wurde dicht an der nach Südosten liegenden Hallenlängswand der großen Versuchshalle aufgebaut. Die Längswände der Versuchshalle bestehen überwiegend bis zum Dachfirst aus Glasflächen. Abbildung 4 zeigt den Aufbau des Versuchsraumes im Querschnitt.

5.1.3. Gestaltung und Ausstattung des Versuchsraumes

Der Versuchsraum einschließlich des daneben angeordneten Meßraumes ist in einer Holzkonstruktion errichtet, und zwar in zweischaliger Spanplattenbauweise. Die Innenflächen der Räume sind mit einer weißen Kunststoffschicht versehen.

Der Versuchsraum hat eine Größe von 2,90 m x 4,50 m; Grundrißfläche ca. 13 m². Die Raumhöhe beträgt etwa 2,50 m.

Im Fußboden des Versuchsraumes ist eine steife Tischplatte mit den Grundrißabmessungen von 0,80 m x 1,30 m angeordnet, die mit einer "Hydroplus-Anlage" zu Erschütterungen angeregt werden kann.

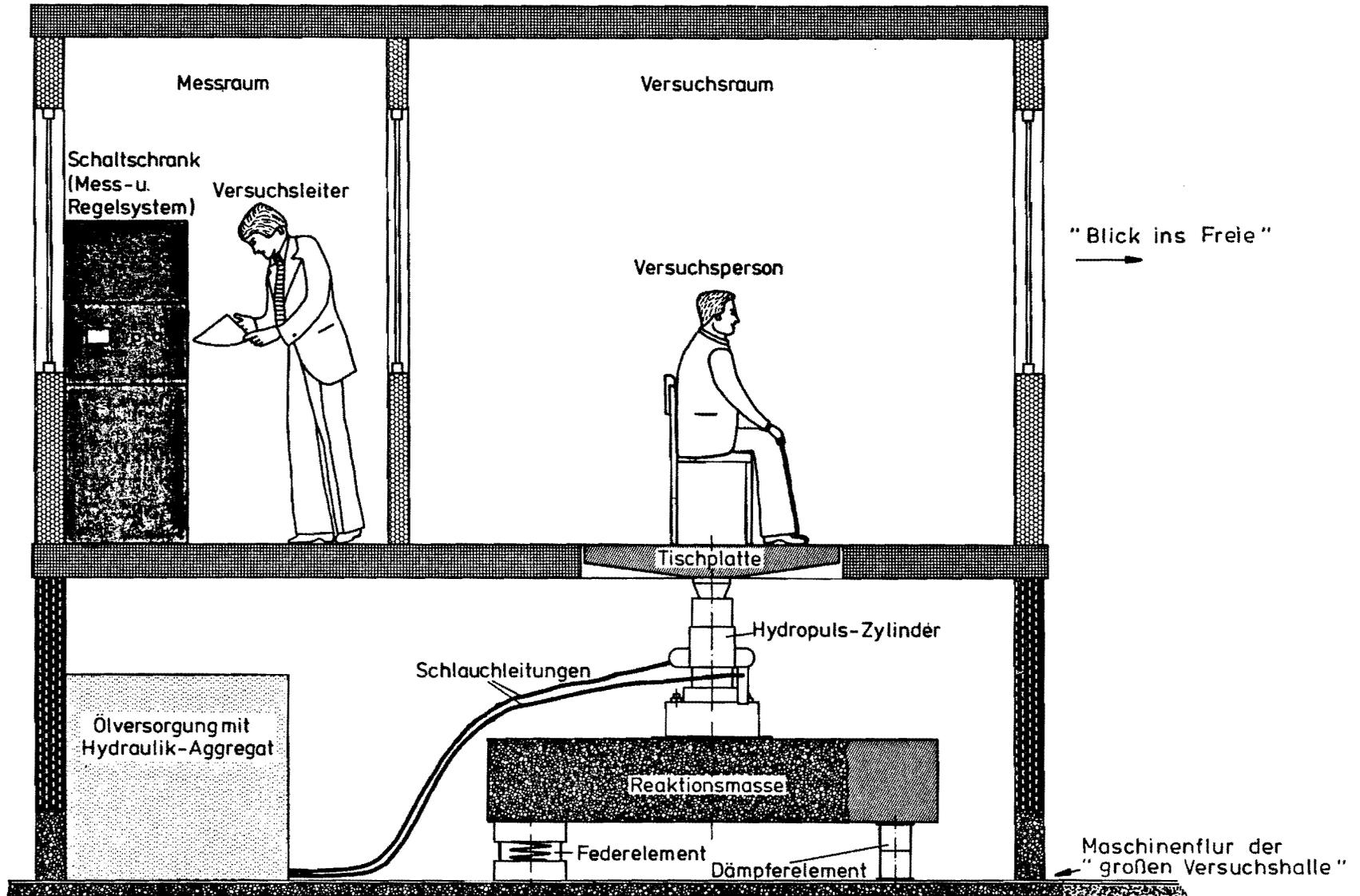


Abb. 4: Querschnitt der Versuchsanlage

Im Versuchsraum sind zur Seite der südöstlich gelegenen Längswand der großen Versuchshalle - das ist die Blickrichtung der Versuchspersonen in sitzender Körperhaltung - drei Fenster mit den Abmessungen von je 1,12 m x 1,30 m vorhanden. Zwischen dem Versuchsraum und dem Meßraum ist weiterhin ein großes Fenster (2,0 m x 1,40 m) angeordnet. Die Sichtverbindung zwischen Meßraum und Versuchsraum kann durch einen Vorhang unterbrochen werden.

Der Fußboden des Versuchsraumes ist mit einem Velourteppichboden abgedeckt. Die "Tischplatte" kann wahlweise mit einem Kunststoff-Bodenbelag oder auch mit einem passend geschnittenem Stück Velour-Teppichboden abgedeckt werden.

Der Versuchsraum ist mit einem kleinen Besuchertisch und zwei Polsterstühlen möbliert. Die Fenster sind mit Gardinen versehen.

Die nach DIN 52212 ermittelte Nachhallzeit des Versuchsraumes lag vor der Ausstattung des Versuchsraumes mit Teppichboden und Gardinen bei Anregung mit breitbandigem Rauschen und auch bei Anregung durch einen Knall (Pistolenschuß) im Bereich von $T \approx 0,9 \dots 1,0$ Sekunden [8]. Nach der Ausstattung wurde für die Nachhallzeit ein Wert im Bereich von $T \approx 0,5 \dots 0,7$ Sekunden festgestellt.

5.1.4. Kopplungselemente

Die Reaktion von Menschen auf einwirkende Erschütterungsimmissionen ist von der Körperhaltung (stehend, sitzend, liegend) abhängig und auch von der Einwirkungsrichtung der Erschütterungen, nämlich parallel oder quer zur Wirbelsäule [4, 5]. Beim ungebundenen Aufenthalt des Menschen in seinem Wohnbereich kann die Körperhaltung und damit die auf den Körper bezogene Erschütterungseinwirkung beliebig wechseln. Obwohl dieser Umstand für die Beurteilung von Erschütterungsimmissionen bedeutsam ist, soll in die vorgesehenen Untersuchungen zunächst nur die sitzende und die stehende Körperhaltung einbezogen werden, und zwar bei Anregung parallel zur Wirbelsäule. Später können auch Ganzkörperschwingungen in liegender Körperhaltung untersucht werden.

Als Kopplungselement zwischen der Versuchsperson und der Tischplatte wird bei Versuchen in sitzender Körperhaltung zunächst ein Holzstuhl verwendet.

Auch wenn dieses Sitzmöbel derzeit in Wohnungen nur noch wenig gebraucht wird, werden die Versuche deshalb vorrangig mit diesem "Kopplungs-Element" durchgeführt, weil dabei praktisch keine Änderung zwischen den Erschütterungsamplituden auf der Tischplatte und auf der Sitzfläche des Holzstuhles im interessierenden Frequenzbereich festgestellt wurde. Später sollen auch weitere Sitzmöbel in die Untersuchungen einbezogen werden.

5.2. Anlage zur Erregung der Erschütterungsreize

5.2.1. Auswahl des Erregersystems

Bei der technischen Realisierung der Erregeranlage sollten möglichst folgende Anforderungen erfüllt werden.

- a) Eine Tischplatte soll an allen Punkten ihrer Oberfläche identische, ausschließlich einachsige (lotrechte) Bewegungsabläufe ausführen, die durch ein elektrisches Steuersignal kleiner Leistung eindeutig vorgegeben werden können.
- b) Die Tischplatte soll im Frequenzbereich von 2 Hz bis 100 Hz sowie im Amplitudenbereich der Schwinggeschwindigkeit von 3 mm/s bis 0,02 mm/s beliebige Bewegungsabläufe möglichst verzerrungsfrei ausführen. Hierbei sollen Nutzlasten mit Massen bis zu ca. 90 kg möglich sein.
- c) Das mechanische Eigenrauschen der Tischplatte darf bei abgeschaltetem Steuersignal, jedoch bei eingeschalteter Anlage nicht größer als etwa $v_{\text{Rausch,eff}} = 0,003$ mm/s sein, wenn der Rauschanteil im Frequenzbereich 1 Hz bis 1 kHz bestimmt wird.
- d) Die Tischplatte soll solche Abmessungen besitzen, daß es möglich ist, auf ihr eine Versuchsperson auf einer Liege oder einem Stuhl unterzubringen.
- e) Die nach a) bis c) geforderten Eigenschaften dürfen durch auf der Tischplatte mit Exzentrizitäten im Bereich bis zu einigen Zentimetern aufgebraachte Lasten von bis zu etwa 90 kg nicht wesentlich beeinflusst werden.
- f) Die Tischplatte und ihr Antriebssystem sind auf geeignete Weise gegenüber ihrem Fundament (Hallenboden) zu entkoppeln; d.h., mechanische Schwingungen des einen Teils dürfen sich praktisch nicht auf das andere Teil übertragen. Diese Bedingung soll in vertikaler Richtung und in beliebiger horizontaler Richtung erfüllt sein.
- g) Es ist sicherzustellen, daß die Tischplatte keine Bewegungen ausführen kann, die zu gesundheitlichen Schäden der Versuchspersonen führen könnten; d.h., durch mechanische Anschläge sind die Bewegungen auf höchstens ± 1 mm zu begrenzen.
- h) Das Betriebsgeräusch sollte so niedrig sein, daß die Versuchspersonen möglichst nicht durch Sekundäreffekte in ihren Entscheidungen beeinflusst werden.

Zur Erfüllung dieser Forderungen wurde unter den bekannten, nach verschiedenen Verfahren arbeitenden Erregern:

- Gelenkgetriebe
- Unwuchtmassen auf rotierenden Wellen
- Elektrodynamische Erreger
- Hydraulische Erreger

der letztgenannte Erreger ausgewählt. Die Auswahl geschah aus der Überlegung, daß Maschinen mit hydraulischem Antrieb in hohem Maße reibungs- und spielfrei arbeiten, große Kräfte aufbringen können und weitgehend unempfindlich gegen Querkräfte sind. Der fortgeschrittene technische Entwicklungsstand der Servoventile gestattet es, mit ihnen präzise Bewegungsabläufe hydraulischer Erreger zu steuern.

Schwingungserreger werden in der Regel zu Prüfzwecken eingesetzt - beispielsweise bei Untersuchungen zur Schwingfestigkeit von Bauteilen. Dazu ist es meist erforderlich, verhältnismäßig große dynamische Kräfte zu erzeugen und mit diesen den Prüfgegenstand zu belasten.

Bei dem hier vorliegenden Untersuchungsziel zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle kommt es dagegen darauf an, sehr geringe Erschütterungssignale als Erschütterungsreize zu erzeugen, die durch die Resterschütterungen derartiger Anlagen nicht verdeckt werden dürfen.

Die im folgenden beschriebene Hydropulsanlage der Firma Schenck, Darmstadt, wurde daher aus dem Angebot derartiger Maschinen ausgewählt und nach Prüfung und Modifikation zur Realisierung der vorgenannten Forderungen in der LIS errichtet.

5.2.2. Funktionsweise der servohydraulischen Erregeranlage

Wie in Abb. 5 dargestellt, erfolgt die mechanische Erregung der Versuchspersonen mit Hilfe eines Hydropulszylinders, dessen Kolbenstange fest mit einer Tischplatte aus Stahl verschraubt ist. Auf dieser Tischplatte befindet sich die Versuchsperson.

Die hydraulischen Kräfte zur Bewegung des Kolbens werden von dem rechts im Bild dargestellten Hydraulikaggregat aufgebracht. Der Bewegungsablauf wird durch das unmittelbar am Zylinder angebrachte Servoventil gesteuert, in dem dieses den Ölstrom für die eine oder andere Bewegungsrichtung des Kolbens mehr oder weniger freigibt. Das Servoventil wird nun seinerseits durch ein elektrisches Signal angesteuert. Die Messung des Istwertes der Bewegung erfolgt durch einen der beiden an der Kolbenstange angebrachten Wegaufnehmer, dessen Signal einem Regelkreis zugeführt wird, der durch Veränderung des Steuerstroms des Servoventils die Differenz zwischen Soll- und Istsignal ausregelt.

Der Hydraulikzylinder ist mit sogenannten hydrostatischen Lagern für die Kolbenstange ausgestattet, die nach einem von der Firma Schenck entwickelten Verfahren die Lagerreibung und das Spiel der Kolbenstange im Zylinder gegenüber anderen Lagerungsarten erheblich reduzieren und damit die Steuerungsfähigkeit der Anlage verbessern. Der Zylinder ist statisch für eine Nennkraft von ± 100 kN und dynamisch für ± 80 kN ausgelegt. Sein Nennhub beträgt nominell 40 mm. Durch Einbau einer mechanischen Hubbegrenzung auf 2 mm wurde die Forderung g) - Gefährdung von Versuchspersonen zuverlässig auszuschließen - erfüllt. Der Zylinder ist in der Lage, Querkräfte bis zu 10 % der Nenn-Längskraft ohne Reduzierung der Steuerungsfähigkeit der Bewegungsabläufe zu verarbeiten und erfüllt damit die Forderung e).

Die Druckölversorgung des Zylinders erfolgt durch ein Hydraulikaggregat mit einer Nennförderleistung von 12 l/min bei einem Nennbetriebsdruck von $280 \cdot 10^5$ Pa (280 bar), der jedoch mit Hilfe eines Drosselventils reduziert werden kann.

Das Servoventil, welches in Abhängigkeit vom Steuersignal die Öldurchflußrichtung und die Ölmenge regelt, ist üblicherweise ein zweistufiges Servoventil, dessen Aussteuerungskennlinie in Abb. 6 dargestellt ist. Bei Untersuchungen zur Überprüfung der gestellten technischen Anforderungen ergab sich jedoch die Notwendigkeit, anstelle des zweistufigen, zwei parallel geschaltete einstufige Ventile kleinerer Gesamtleistung einzusetzen, die im Prinzip ähnliche Aussteuerungskennlinien aufweisen. Servoventile dieser Art sind in der Lage, den Ölstrom bis zu Frequenzen von über 100 Hz noch mit ausreichender Genauigkeit zu steuern.

Bei dem geschlossenen Regelkreis der Schwingweg-Folgeregelung, der in der Abb. 7 dargestellt ist, wird der Istwert des Weges mit dem im Zylinder eingebauten Schwingwegaufnehmer kontinuierlich gemessen und mit dem vorgegebenen Sollwert verglichen. Abweichungen des Istwertes vom Sollwert führen zu Änderungen des Servoventilstellsignals und damit zu einer Einwirkung auf die Regelstrecke. Die Aufgabe der Regeleinrichtung ist es, die Amplituden- und Phasenabweichungen bei Sollwertänderungen und unter dem Einfluß von Störgrößen möglichst gering zu halten und zugleich das System davor zu bewahren, selbsterregte Schwingungen auszuführen. Dies wird durch entsprechende Anpassung von Proportional (P)-, Integral (I)- und Differential (D)-Gliedern des Reglers an das Zeitverhalten der Regelstrecke erreicht.

Zur Ansteuerung der Anlage werden die Sollsignale, wie in Abschnitt 5.3 beschrieben, als schwinggeschwindigkeitsproportionale, elektrische Signale kleiner Leistung in die Regelstrecke eingespeist. Diese Steuersignale werden in einem Integrator integriert und somit als wegproportionale Spannungen mit den ebenfalls wegproportionalen Istwerten des Wegaufnehmers für die Hydropuls-Folgeregelung verglichen.

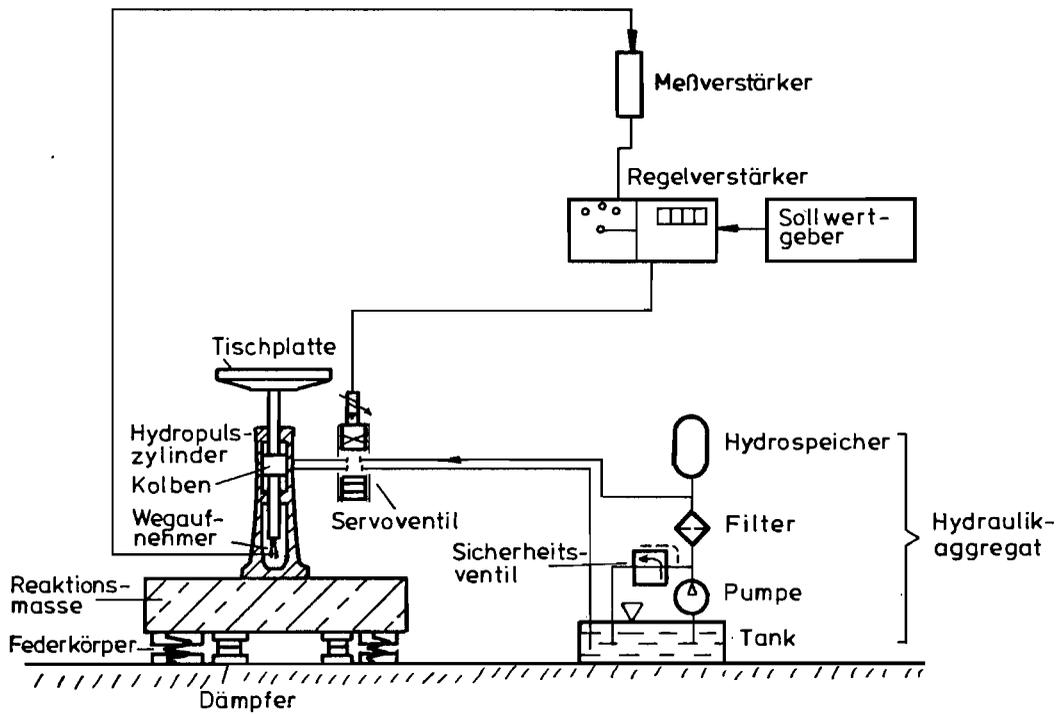


Abb. 5: Wesentliche Systemteile der Hydropuls-Erregeranlage

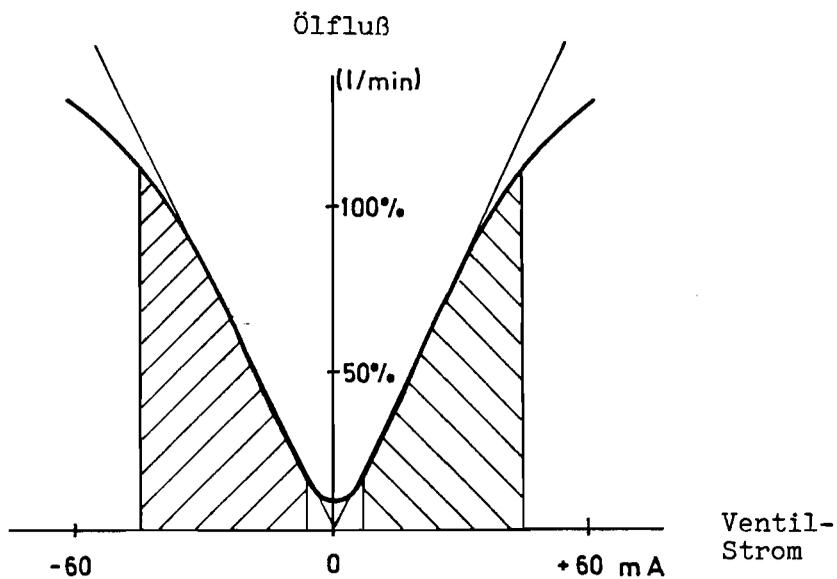


Abb. 6: Aussteuerungs-Kennlinie (schematisch) eines Servoventils. Schraffiert dargestellt ist der Bereich linearer Aussteuerung

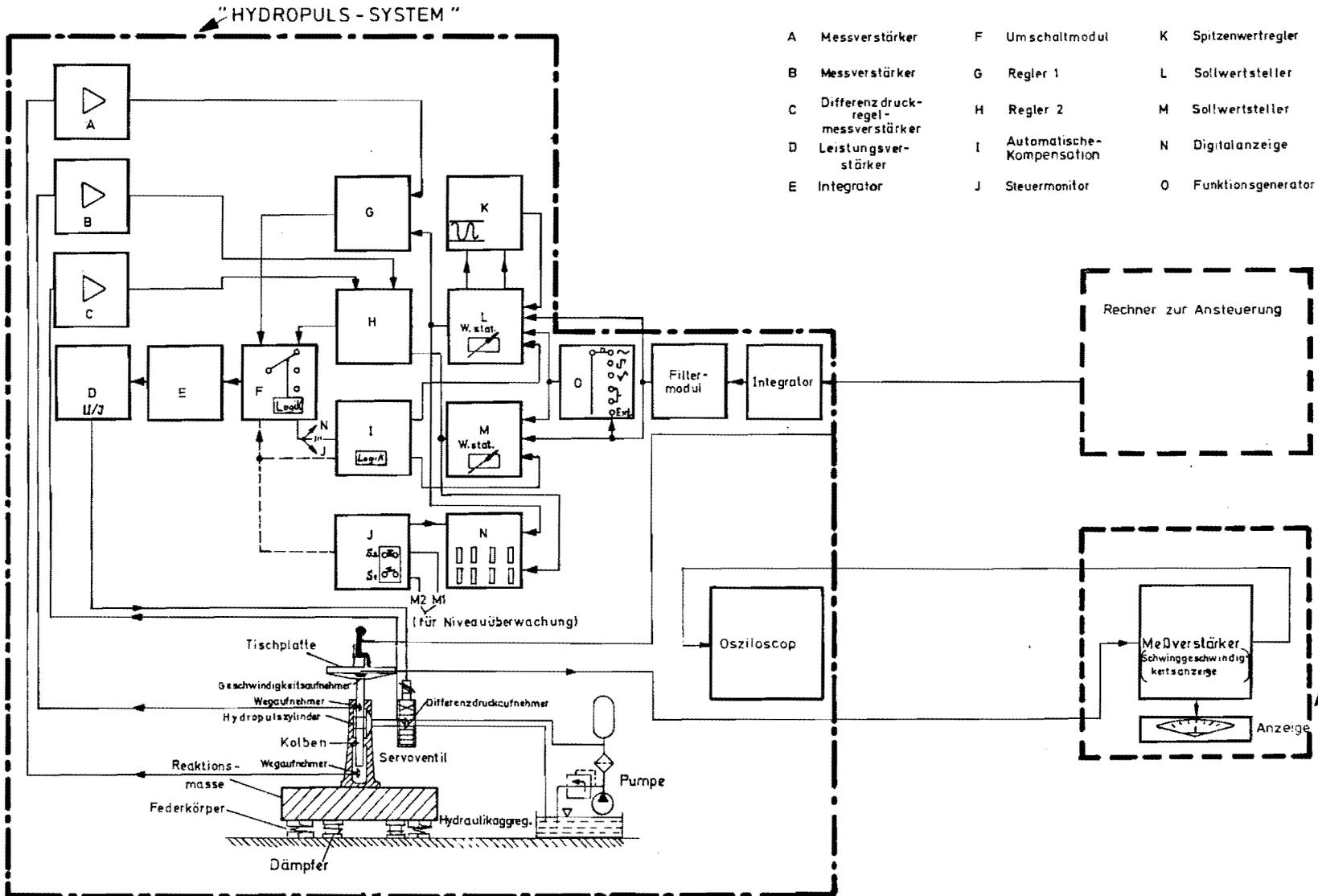


Abb. 7: Blockschaltbild des Hydropulsregelkreises einschließlich der rechnergestützten Ansteuerung

5.2.3. Realisierte Eigenschaften der Erregeranlage

Bei Erschütterungsimmissionen haben insbesondere diejenigen Bedeutung, deren wesentliche Amplitudenanteile im Bereich von etwa 1 Hz bis 100 Hz liegen. Aus bisher veröffentlichten Ergebnissen über die Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle bei sinusförmigen Schwingungen ist bekannt, daß diese Schwelle im Frequenzbereich von etwa 5 Hz bis 100 Hz im Bereich von Schwinggeschwindigkeitsamplituden von etwa $\hat{v} = 0,15$ mm/s bis 0,8 mm/s liegt. Da vermutet wird, daß bei nichtsinusförmigen Schwingungen (Erschütterungen) auch noch geringere Schwinggeschwindigkeitsamplituden subjektiv wahrgenommen werden, wurde gefordert, daß die Anlage im Bereich von etwa 2 Hz bis 100 Hz bei Schwinggeschwindigkeitsscheitelwerten im Bereich von $\hat{v} = 0,02$ mm/s bis 3,0 mm/s betrieben werden kann. Der geforderte Schwinggeschwindigkeits-Frequenz-Bereich ist in Abb. 8 im entsprechenden Diagramm dargestellt, aus dem zugleich für sinusförmige Schwingungen die entsprechenden Schwingweg- und Schwingbeschleunigungsamplituden abgelesen werden können.

Man erkennt, daß die Anlage noch bei für maschinentechnische Anlagen außerordentlich geringen Schwingwegamplituden im Bereich von etwa 0,1 μ m bis zu 200 μ m möglichst formtreu für alle möglichen Arten von vorgegebenen Erschütterungssignalen betrieben werden soll.

Wie weitgehend diese Forderungen von der realen Anlage eingehalten werden können, soll im folgenden erläutert werden.

5.2.3.1. Eigenrauschen

Durch das nie ganz zu vermeidende Eigenrauschen von Erregeranlagen wird die untere Aussteuerungsschwelle festgelegt, bei der die Bewegungen der Tischplatte noch überwiegend durch das Sollsignal und nur zum kleinen Teil durch Rauschen beeinflusst sind. Damit dieser Anteil gering bleibt, wurde ein Rauschabstand von > 10 dB gefordert. Bei einer Aussteuerungsuntergrenze von $\hat{v} = 0,02$ mm/s Schwinggeschwindigkeit resultiert hieraus ein Rauschanteil, der im gesamten Frequenzbereich der Anlage einem Effektivwert der durch Rauschen verursachten Resterschütterungen von weniger als $v_{\text{eff}} = 0,006$ mm/s entspricht.

Die Resterschütterungen, die auf der Tischplatte bei fehlender Aussteuerung noch festgestellt werden können, sind im wesentlichen auf zwei Ursachen zurückzuführen. Der eine Anteil wird durch die Resterschütterungen des Fundamentes (Reaktionsmasse), auf dem die Gesamtanlage steht, verursacht und kann entsprechend Forderung f), siehe Abschnitt 5.2.1, durch die Auslegung der schwingungsisolierten Lagerung beeinflusst werden.

Der zweite Anteil wird durch das Eigenrauschen des Ölstroms verursacht, das seinerseits von den Eigenschaften des Öls, des Servoventils und der elektronischen Regelung bestimmt ist.

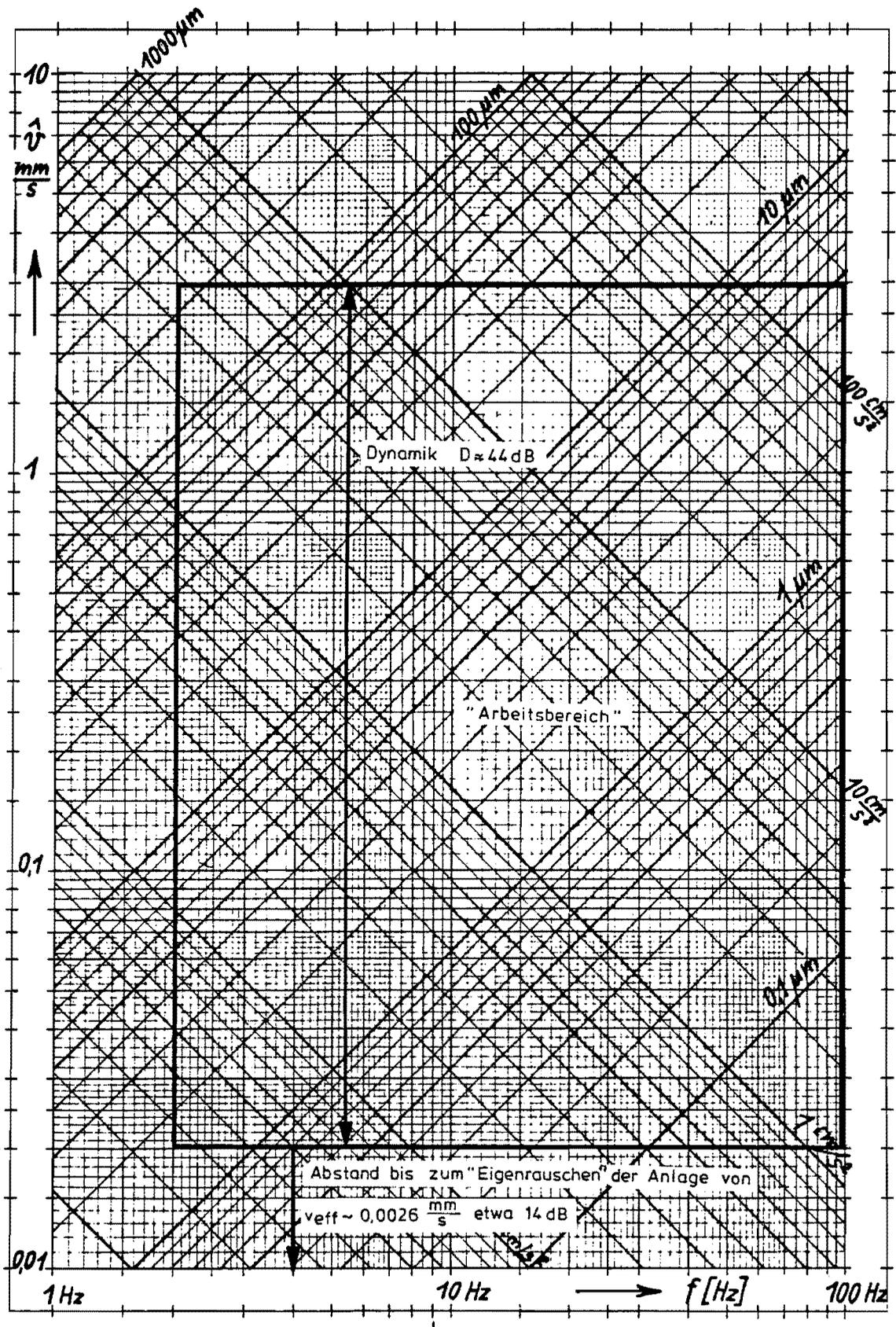


Abb. 8: Arbeitsbereich im Schwinggeschwindigkeits-Frequenz-Diagramm

Zur Vermeidung der Übertragung der Bodenunruhe auf die Tischplatte wurde der Hydropulszylinder fest mit einer Reaktionsmasse (quadratische Betonplatte mit den Abmessungen von etwa 2,25 m x 2,25 m x 0,42 m; Gesamtmasse etwa 5.540 kg) verbunden.

Die Reaktionsmasse ist so bemessen, daß die Schwinggeschwindigkeitsamplituden dieser Masse infolge der beim Betrieb des Hydropulszylinders auftretenden Reaktionskräfte genügend klein bleiben. Die Schwinggeschwindigkeitsamplituden auf der Reaktionsmasse betragen weniger als 5 % der auf der Tischplatte auftretenden Werte. Die als dicke Betonplatte ausgebildete Reaktionsmasse ist auf Stahlschraubenfedern weichelastisch gelagert mit einer niedrigsten Eigenfrequenz in vertikaler Richtung von etwa 1,1 Hz. Außerdem sind parallel zu den Federkörpern auch Dämpfer (Viskositätsdämpfer) angeordnet, um ein schnelles Abklingen von unbeabsichtigten Bewegungen der Reaktionsmasse zu erreichen. Durch die auf diese Weise vorgesehene sehr tief abgestimmte elastische Lagerung wird eine wirksame aktive und passive Schwingungsisolierung erreicht. Es wird sowohl die Übertragung von Störkräften von der Hydropuls-Anlage auf die Umgebung mit gutem Isolierfaktor herabgesetzt als auch die Übertragung von störenden Erschütterungen aus der Umgebung (Störpegel im Erdboden) auf die Tischplatte der Versuchsanlage sehr wirksam verhindert.

Für die in dieser Art schwingungsisolierte Anlage wurde mit der nachfolgend beschriebenen Meßkette das Eigenrauschen gemessen:

- Meßwertaufnehmer: Beschleunigungsaufnehmer mit einer Kennfrequenz von $f_K = 4,5$ kHz; lineares Übertragungsverhalten (< 10 %-Abweichungen): 0,2 Hz bis 1 kHz.
- Anzeigegerät: Schwingungsmesser mit Anzeige des Effektivwertes oder Anzeige des Spitzenwertes; lineares Übertragungsverhalten im Bereich von 0,3 Hz bis 1 kHz.
- Analysiergeräte: Integrierender Echtzeit-Terz-Analysator (Terzmittelfrequenzen von 2,5 Hz bis 20 kHz) mit der Möglichkeit zur vorwählbaren Langzeitintegration.
Zweikanal-Fast-Fourier-Transformation-Echtzeit-Analysator (FFT-Analysator) zur Analyse und Anzeige von Momentanwertspektren oder zur Bildung von "gemittelten Spektren" mit vorwählbarer Anzahl der zu mittelnden Spektren.

Für das Eigenrauschen der Anlage, d.h. bei eingeschalteter betriebsbereiter Anlage ohne Signalansteuerung, wurden im Frequenzbereich von etwa 0,3 Hz bis 1 kHz folgende Effektivwerte und größte Scheitelwerte der Schwinggeschwindigkeitsamplituden festgestellt:

Meßort: In der Mitte der Tischplatte in vertikaler Richtung ohne Zusatzbelastung.

Effektivwert: $v_{\text{eff}} \approx 0,0026 \text{ mm/s}$
 Spitzenwerte: $\hat{v}_{\text{max}} \approx 0,008 \dots 0,01 \text{ mm/s}$

An dem genannten Meßort wurden die gleichen Werte für das Eigenrauschen nach Belastung der Tischplatte mit einer Masse von etwa 60 kg, die in Form von 5 Bleiblöcken aufgebracht worden ist, festgestellt.

Für das Eigenrauschen an Meßorten in der Mitte der Tischplattenränder und an den Ecken in vertikaler Richtung wurden folgende Werte festgestellt:

$$\begin{aligned} v_{\text{eff}} &\approx 0,006 \text{ mm/s} \\ \hat{v}_{\text{max}} &\approx 0,02 \text{ mm/s} \end{aligned}$$

Weiterhin wurde das Eigenrauschen auch für den Zustand festgestellt, bei dem auf der Tischplatte als Kopplungselement ein Holzstuhl angeordnet und dieser mit einer Zusatzmasse von etwa 60 kg (5 Bleiblöcke) belastet war. Als Meßort wurde etwa die Mitte des vorderen Randes der Stuhlsitzfläche gewählt. Folgende Werte wurden durch Messung ermittelt:

$$\begin{aligned} v_{\text{eff}} &\leq 0,01 \text{ mm/s} \\ \hat{v}_{\text{max}} &\leq 0,03 \text{ mm/s} \end{aligned}$$

Dabei war die Größe der Werte geringfügig von der Anordnung der 5 gleich großen Bleiblöcke auf der Stuhlsitzfläche abhängig.

In Abbildung 9 ist als Beispiel ein Terz-Pegel-Diagramm für das Eigenrauschen dargestellt. Dieses wurde in der Mitte der unbelasteten Tischplatte in vertikaler Richtung als gemitteltetes Spektrum über eine Integrationszeit von 24 Minuten ermittelt. Deutlich herausragende Amplitudenanteile sind in den Terzbereichen bei den Mittenfrequenzen von 16 Hz, 160 Hz und 400 Hz erkennbar.

Im Schmalbandamplitudenspektrum nach Abb. 10 sind im Eigenrauschen im Frequenzbereich von etwa 150 bis 600 Hz mindestens 8 herausragende Spitzenwerte erkennbar.

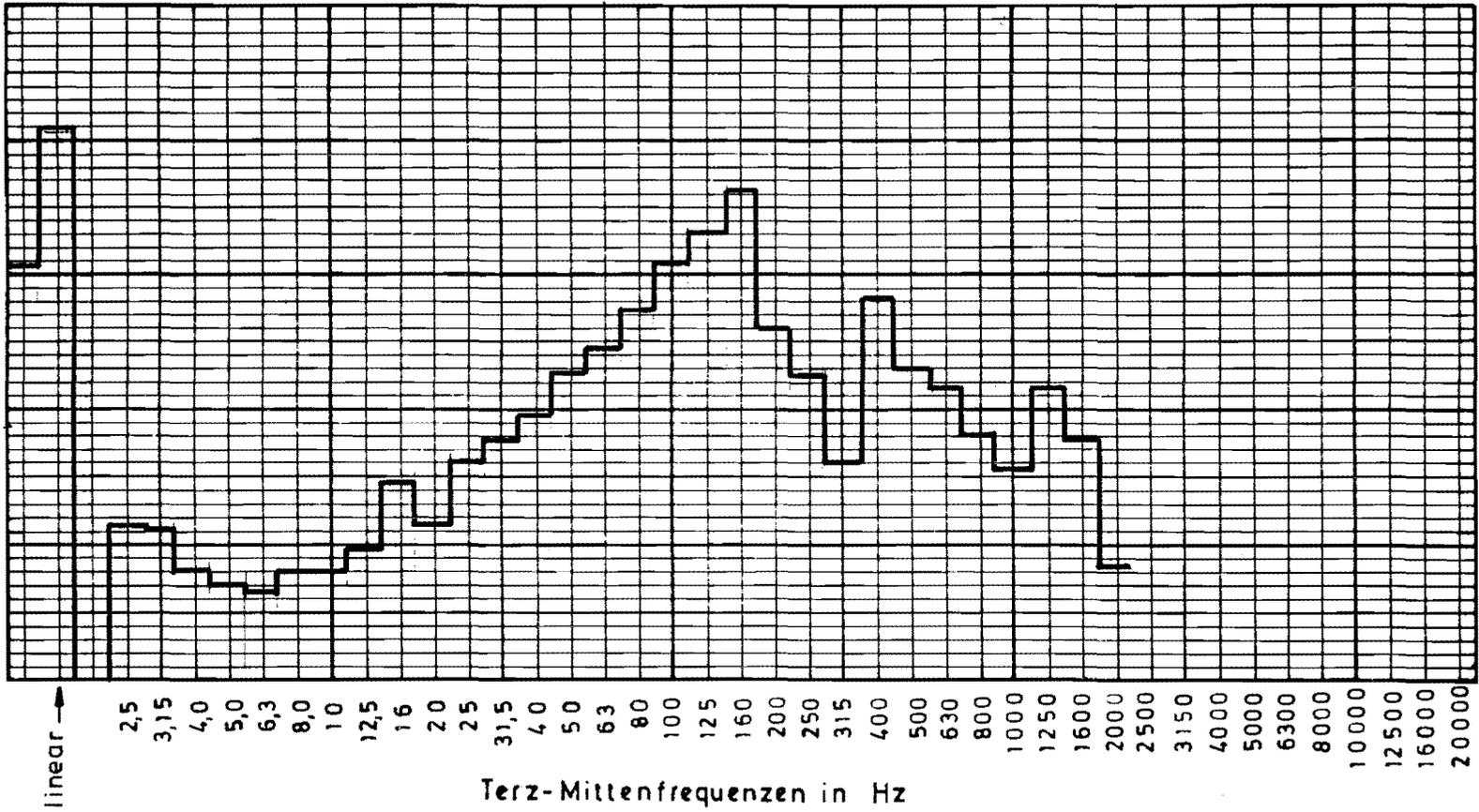
Die von der Umgebung (Bodenunruhe) über die abgefederte Reaktionsmasse und den Hydropuls-Zylinder in die Tischplatte eingeleiteten Resterschütterungen bei vollständig abgeschalteter Anlage wurden in der Mitte der Tischplatte in vertikaler Richtung gemessen.

Im Frequenzbereich von 0 Hz bis 1 kHz wurden folgende Werte festgestellt:

$$\begin{aligned} v_{\text{eff}} &\leq 0,0014 \text{ mm/s} \\ \hat{v} &\leq 0,0025 \text{ mm/s} \end{aligned}$$

↑ Schwinggeschwindigkeit v (Effektivwerte) in mm/s

0,01
0,001
0,0001



46 dB
26 dB
6 dB
↑ Schnellepegel L_v in dB [re $5 \cdot 10^{-5}$ mm/s]

Abb. 9: Beispiel für die Frequenzabhängigkeit des "Eigenrauschens" im Terzpegel-Diagramm; Meßort: Mitte der Tischplatte; Meßrichtung: vertikal

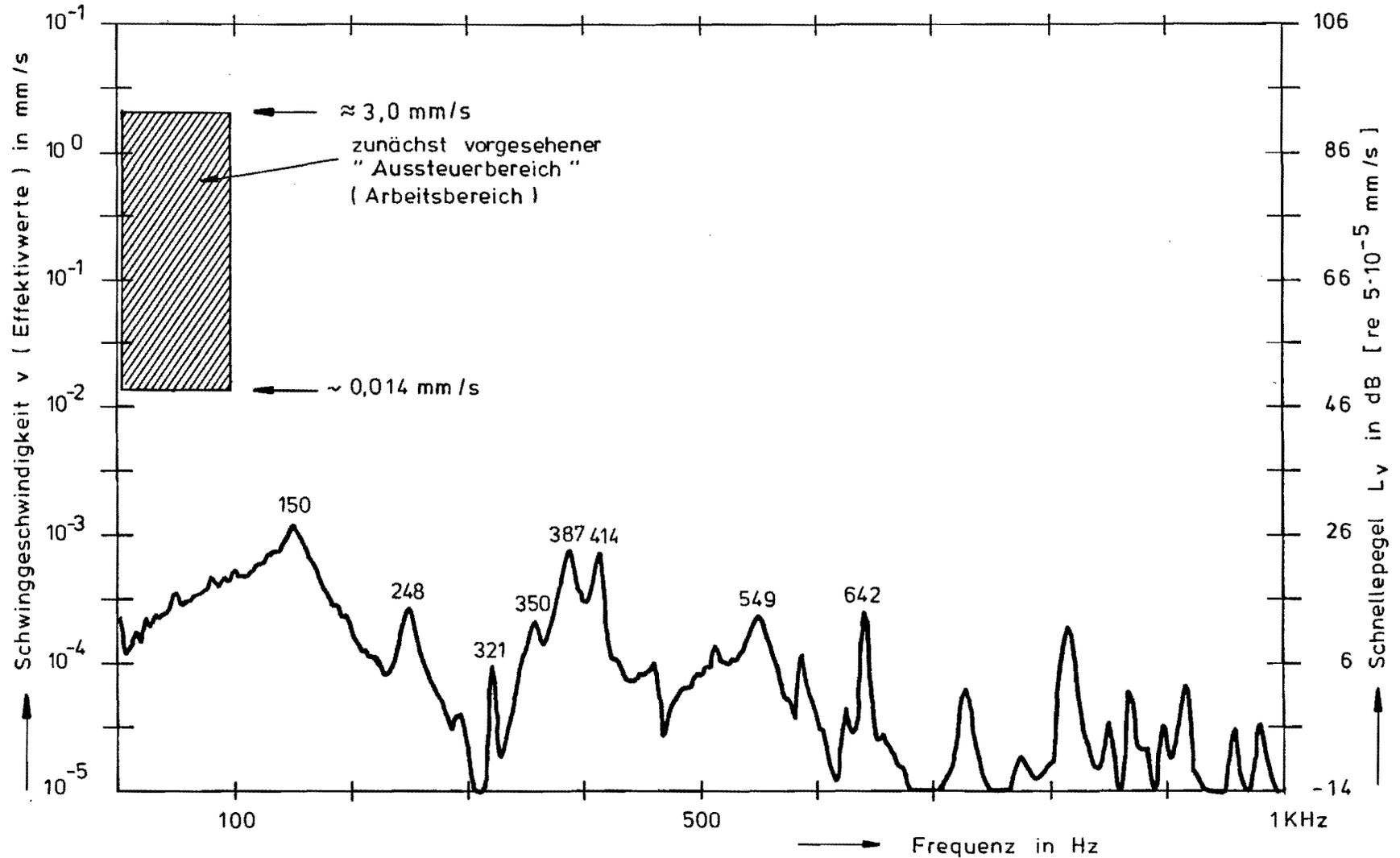


Abb. 10: "gemitteltetes Amplitudenspektrum" (FFT-Analyse) des "Eigenrauschens";
 Meßgröße: Schwinggeschwindigkeit; Meßort: Mitte der Tischplatte; Meß-
 richtung: vertikal; Anzahl der Mittelungen: 100

Die hier erzielten niedrigen Werte des Eigenrauschens konnten erst im Rahmen längerer Untersuchungen erreicht werden. Insbesondere erbrachte der Austausch des zweistufigen Servoventils großer Nennleistung gegen 2 parallel geschaltete einstufige Servoventile mit 1 l/min Nennleistung in Verbindung mit der Zurücknahme des Betriebsdrucks von $280 \cdot 10^5$ Pa auf ca. $100 \cdot 10^5$ Pa (100 bar) derartig niedrige Rauschanteile.

5.2.3.2. Klirrfaktor und Dynamik der Hydropulsanlage

Der Klirrfaktor ist ein Maß für den im Nutzsignal (Istsignal) enthaltenen Anteil an Oberwellen, der durch nichtlineare Verzerrungen des Sollsignals auf dem Übertragungsweg vom elektrischen Eingang - hier der Regelstrecke - bis zur Bewegung der Tischplatte entsteht. Damit ist er auch ein Maß dafür, wie unverfälscht die Tischplatte dem Sollsignal zu folgen vermag. Der Klirrfaktor ist im allgemeinen frequenzabhängig und wird in % angegeben. Seine Größe ist immer aussteuerungsabhängig und nur im linearen Teil der Aussteuerungskennlinie konstant.

Im unteren Aussteuerungsbereich ist der Oberwellengehalt des Nutzsignals einerseits durch das Eigenrauschen und andererseits durch diejenigen Oberwellen bestimmt, die durch die in diesem Bereich nichtlinear verlaufende Aussteuerungskennlinie des Servoventils erzeugt werden, siehe Abb. 6. Bei kleinem Nutzsignal ist der Störabstand gering und der Klirrfaktor hoch. Erhöht man den Pegel des Nutzsignals bis in den linearen Aussteuerungsbereich, so verbessert sich nicht nur der Störabstand, sondern es verringern sich auch die durch die Aussteuerungskennlinie bedingten Oberwellen. Der Klirrfaktor sinkt also ab und bleibt im linearen Aussteuerungsbereich annähernd konstant. An der Aussteuerungsobergrenze wiederum ist guter Störabstand vorhanden, jedoch nehmen hier die Oberwellenanteile zu, da die Aussteuerungskennlinie abknickt. Dieses Abknicken ist durch das Erreichen des maximal möglichen Ölstroms des verwendeten Ventils bedingt. Der Klirrfaktor und damit die Verzerrungen steigen wieder an. Hier kann zwar Abhilfe durch Verwendung eines leistungsfähigeren Ventils erfolgen, jedoch verschlechtert sich dadurch der bei kleinen Aussteuerungen zu fordernde geringe Eigenstörpegel.

Die Ergebnisse der durchgeführten Klirrfaktormessungen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Eine Frequenzabhängigkeit des Klirrfaktors für Frequenzen zwischen 5 und 100 Hz wurde nicht festgestellt. Dies wird auf den guten Frequenzgang des Servoventils zurückgeführt.

Tabelle 1: Klirrfaktoren

Scheitelwerte der Schwinggeschwindigkeitsamplituden \hat{v} in mm/s	Klirrfaktor K
0,02	< 20 %
0,05	< 8 %
0,10	< 3,5 %
0,20	< 3 %
0,50	< 2 %
1,00	< 2 %
2,00	< 4 %

Der Einfluß von unerwünschten Oberwellen auf das Istsignal bei Schwinggeschwindigkeitsamplituden mit verhältnismäßig geringem Abstand zum Eigenrauschen der Anlage ist beispielhaft im Schwinggeschwindigkeitszeitverlauf der Abbildung 11 dargestellt.

Die Dynamik, d.h. der mit tolerierbaren Verzerrungen ausnutzbare Aussteuerungsbereich, wird bei kleinen Aussteuerungen durch das Eigenrauschen und bei großen Aussteuerungen durch den maximalen Ölstrom des verwendeten Ventils bestimmt. Bei der realisierten Anlage konnte eine Dynamik von > 40 dB erzielt werden. Dies entspricht im linearen Maßstab einem Amplitudenbereich der Istsignale von mehr als 1 : 100. Zur Einstellung der bestmöglichen Übertragungsfunktion der Gesamtanlage, d.h. möglichst schnelles Einschwingen ohne Überschwingen, muß das Regelsystem optimiert werden.

Hierzu wurde die Anlage mit rosa Rauschen als Sollsignal angesteuert. Das Istsignal wurde in der Mitte der mit 60 kg Nutzlast belasteten Tischplatte gemessen. Durch systematisches Verändern der Einstellungen des PID-Reglers konnte schließlich der in Abb. 12 dargestellte Verlauf des Amplituden-Frequenzgangs erzielt werden. Er weist im gesamten zur Nutzung vorgesehenen Frequenzbereich lediglich maximale Abweichungen von ± 1 dB auf. Dies ist neben einem guten Phasenfrequenzgang die Voraussetzung für eine optimale Übertragung beliebig aus mehreren Frequenzkomponenten zusammengesetzter Sollsignale.

Die Amplitudenabnahme im Frequenzbereich unterhalb von 3 Hz ist lediglich auf die Grenzfrequenz des zur Messung des Frequenzgangs benutzten Integrators und nicht der Anlage selbst zurückzuführen. Die Anlage weist bis zu 0 Hz konstantes Übertragungsverhalten auf.

Der Abfall bei Frequenzen oberhalb von 140 Hz ist durch das Verhalten des Servoventils bedingt, das aufgrund seiner Eigenfrequenz schnelleren Vorgängen nicht mehr folgen kann.

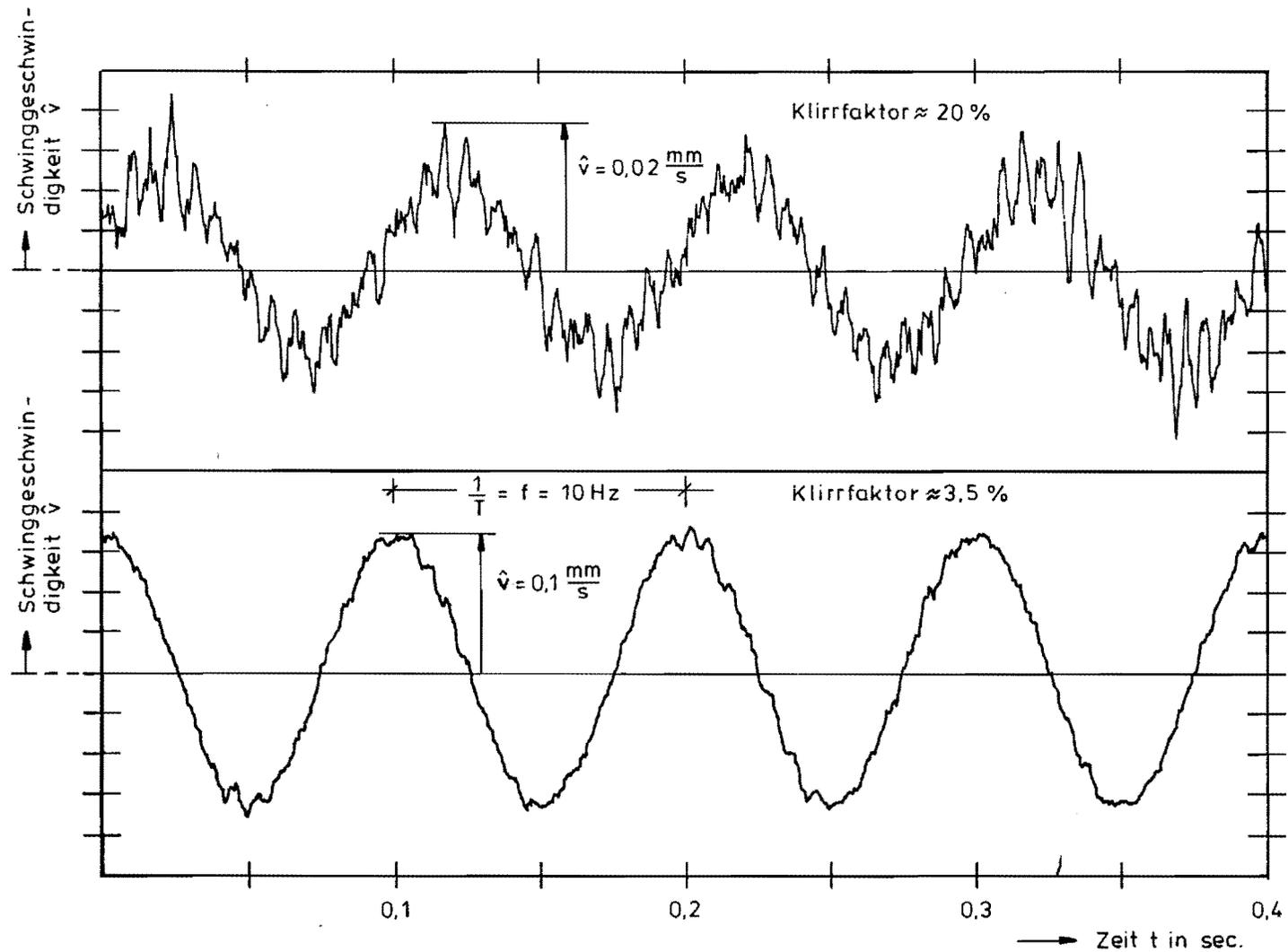


Abb. 11: Darstellung des Einflusses von unerwünschten Oberwellen (Eigenrauschen) auf das Eingangssollwertsignal beim Betrieb der Hydropulsanlage bei verhältnismäßig kleinen Schwinggeschwindigkeitsamplituden im \hat{v} -t-Bild (Zeitbereich)

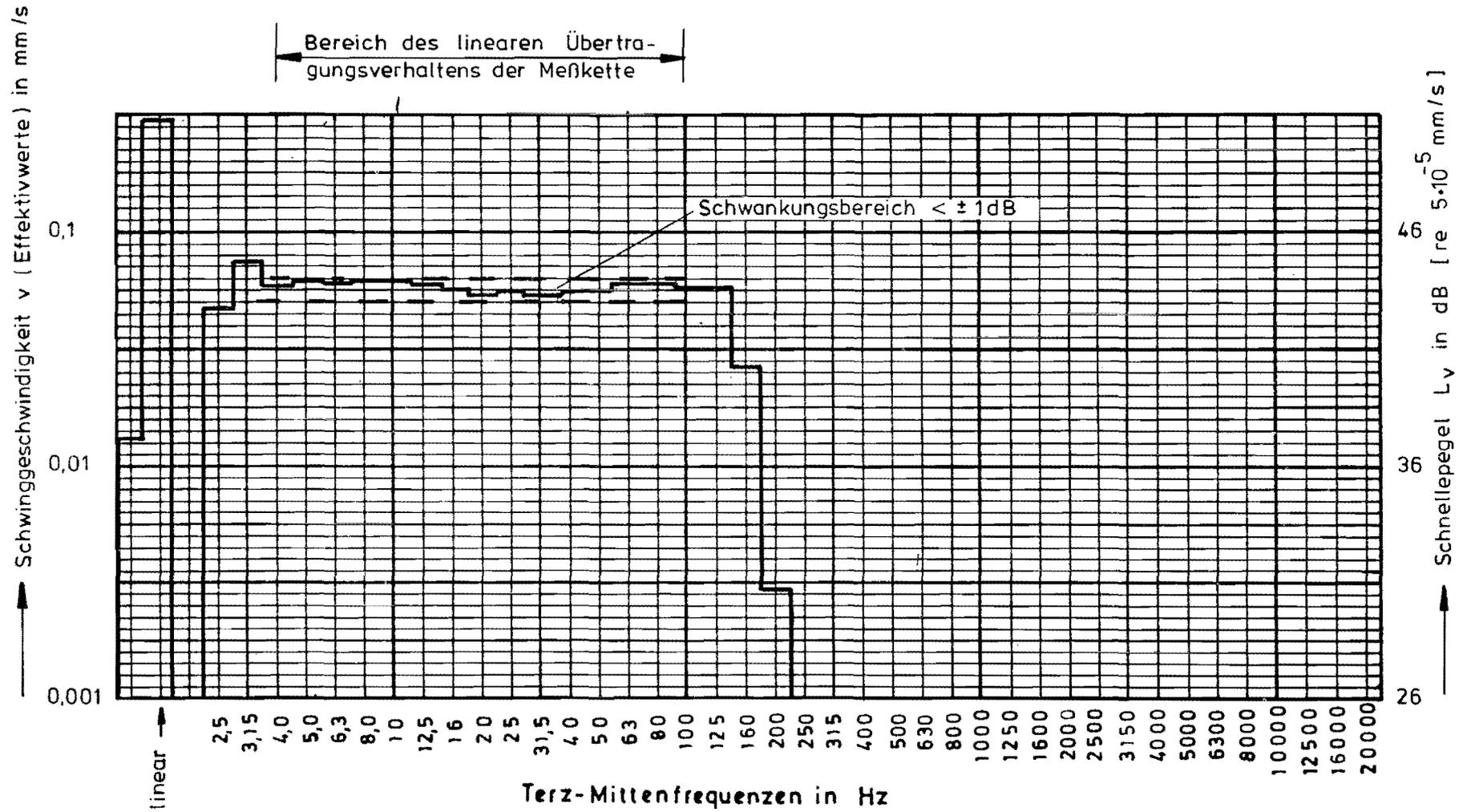


Abb. 12: "gemittelter Amplituden-Frequenzgang" der Erregeranlage nach Optimierung des P-I-D-Folgereglers; Meßort: Tischmitte; Meßrichtung: vertikal; Mittelungszeit: 1 Minute

5.2.3.3. Eigenfrequenzen der Erregeranlage

Die im Eigenrauschen bei einzelnen Frequenzen herausragenden Amplitudenanteile (siehe Abb. 10) sind vermutlich durch Eigenfrequenzen des mechanischen Systems der Erregeranlage bedingt. Der Aufbau der Anlage, bei dem im Betriebszustand auch hydraulische Feder- und Dämpfungselemente Einfluß haben, besteht aus folgenden Teil-Systemen:

- der mit der Kolbenstange fest verbundenen Tischplatte (Größe 80 cm x 130 cm), die aus einer mehrfach verrippten Stahlkonstruktion besteht. Die Kolbenstange ist hydrostatisch gelagert und ruht im Betriebszustand in vertikaler Richtung auf einer unter Druck stehenden Ölsäule;
- dem Hydropuls-Zylinder, der zunächst mit einer Stahlgrundplatte verbunden ist. Die Stahlgrundplatte ihrerseits ist über Stehbolzen mit einer weiteren Stahlplatte verbunden, die mit Hilfe von einbetonierten Ankerschrauben mit der Beton-Reaktionsmasse verbunden ist (siehe Abb. 4);
- der Reaktionsmasse in Form einer Betonplatte, die tief abgestimmt auf Feder- und Dämpfungselementen gelagert ist.

Die rechnerische Ermittlung der Eigenfrequenzen dieses komplizierten mechanisch-hydraulischen Systems ist wegen der geeigneten Modellfindung und der anzusetzenden Feder- und Dämpfungselemente schwierig, zumindest sehr aufwendig.

Sollte es sich bei weiteren Anforderungen zur Verbesserung des Störabstandes als notwendig erweisen, das Eigenrauschen der Anlage noch weiter zu vermindern, ist für Verbesserungsmaßnahmen eine Zuordnung von herausragenden Spitzen im Eigenrauschen zu Eigenfrequenzen des mechanisch-hydraulischen Systems zweckmäßig.

Durch Anschlagen der Tischplatte der Erregeranlage im Betriebszustand mit einem Gummihammer an mehreren Stellen an den Plattenrändern und in Plattenmitte wurden frei ausklingende Schwingungsvorgänge angeregt. Daraus wurden für die Eigenfrequenzen mit Hilfe von Spektralanalysen (FFT-Analyse, gemittelte Amplitudenspektren) folgende Werte festgestellt:

1. Erregung: An der Mitte einer Schmalseite der Tischplatte in vertikaler Richtung oder auch beim Anschlagen der Tischplatte in Plattenmitte
- Meßort: In der Mitte der gegenüberliegenden schmalen Seite der Tischplatte in vertikaler Richtung am Rand der Platte
- Ergebnisse: Herausragende Spitzen im Amplitudenspektrum wurden insbesondere bei folgenden Frequenzen festgestellt:

$$\begin{aligned}
 f_{s1} &= 34 \text{ Hz} \\
 f_{s2} &= 107 \text{ Hz} \\
 f_{s3} &= 135 \text{ Hz} \\
 f_{s4} &= 248 \text{ Hz} \\
 f_{s5} &= 382 \text{ Hz} \\
 f_{s6} &= 414 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

2. Erregung: An der Mitte einer Längsseite der Tischplatte oder auch in Plattenmitte in vertikaler Richtung

Meßort: In der Mitte der gegenüberliegenden längeren Seite der Tischplatte am Plattenrand in vertikaler Richtung

Ergebnisse: Herausragende Spitzen im Amplitudenspektrum wurden insbesondere bei folgenden Frequenzen festgestellt:

$$\begin{aligned}
 f_{b1} &= 40 \text{ Hz} \\
 f_{b2} &= 135 \text{ Hz} \\
 f_{b3} &= 248 \text{ Hz} \\
 f_{b4} &= 382 \text{ Hz} \\
 f_{b5} &= 414 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

Die auf diese Weise ermittelten "Eigenfrequenzen" der Erregeranlage treten überwiegend auch im Eigenrauschen der Anlage auf, wie man durch Vergleich mit dem Amplitudenspektrum in Abb. 10 erkennt.

Verhältnismäßig einfach ist die Zuordnung der niedrigsten Eigenfrequenz des Teilsystems "Masse des Kolbens" im Hydropulszylinder einschließlich der mit ihr fest verbundenen Masse der Tischplatte und der Masse der bei Versuchen auf der Tischplatte vorhandenen Versuchsperson, gelagert auf der im Betriebszustand unter Druck stehenden "Ölsäule als Federelement" in vertikaler Richtung. Diese Eigenfrequenz wurde ebenfalls durch "Anschlagen" des Systems meßtechnisch ermittelt; es ergaben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned}
 f_{E1} \quad (\text{ohne Versuchsperson}) &= 150 \text{ Hz} \\
 f_{E1} \quad (\text{mit Versuchsperson, etwa 70 kg}) &= 130 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

5.2.3.4. Störschwingungen auf der Tischplatte in horizontalen Richtungen; Auswirkung von exzentrischen Belastungen der Tischplatte

Folgende Störschwingungen in den horizontalen Meßrichtungen wurden bei eingeschalteter Erregeranlage ohne Ansteuerung mit Eingangssignalen in der Mitte der Tischplatte gemessen:

In horizontaler Richtung parallel zur längeren Seite des Tisches, d.h. in Blickrichtung der Versuchsperson bei Untersuchung in sitzender Körperhaltung (Index: y)

$$v_{y,eff} \approx 0,003 \text{ mm/s}$$

$$\hat{v}_{y,max} \approx 0,008 \dots 0,01 \text{ mm/s.}$$

Im gemittelten Amplitudenspektrum (FFT-Analyse) nach Abb. 13 sind im Eigenrauschen im Frequenzbereich unterhalb von etwa 700 Hz bei folgenden Frequenzen herausragende Spitzen erkennbar:

f_{y1}	=	25 Hz
f_{y2}	=	34 Hz
f_{y3}	=	80 Hz
f_{y4}	=	109 Hz
f_{y5}	=	220 Hz
f_{y6}	=	321 Hz
f_{y7}	=	349 Hz
f_{y8}	=	391 Hz
f_{y9}	=	429 Hz
f_{y10}	=	642 Hz

In horizontaler Richtung, parallel zur kürzeren Seite des Tisches, d.h. quer zur y-Richtung (Index: x) wurden folgende Störschwingungen bei eingeschalteter Erregeranlage ohne Ansteuerung mit Eingangssignalen in der Mitte der Tischplatte gemessen:

$$v_{x,eff} \approx 0,003 \text{ mm/s}$$

$$\hat{v}_{x,max} \approx 0,009 \dots 0,01 \text{ mm/s.}$$

Im gemittelten Amplitudenspektrum (FFT-Analyse) nach Abb. 14 sind im Eigenrauschen im Frequenzbereich unterhalb von etwa 700 Hz bei folgenden Frequenzen herausragende Spitzen erkennbar:

f_{x1}	=	25 Hz
f_{x2}	=	40 Hz
f_{x3}	=	80 Hz
f_{x4}	=	137 Hz
f_{x5}	=	220 Hz
f_{x6}	=	296 Hz
f_{x7}	=	321 Hz
f_{x8}	=	350 Hz
f_{x9}	=	390 Hz
f_{x10}	=	429 Hz
f_{x11}	=	642 Hz.

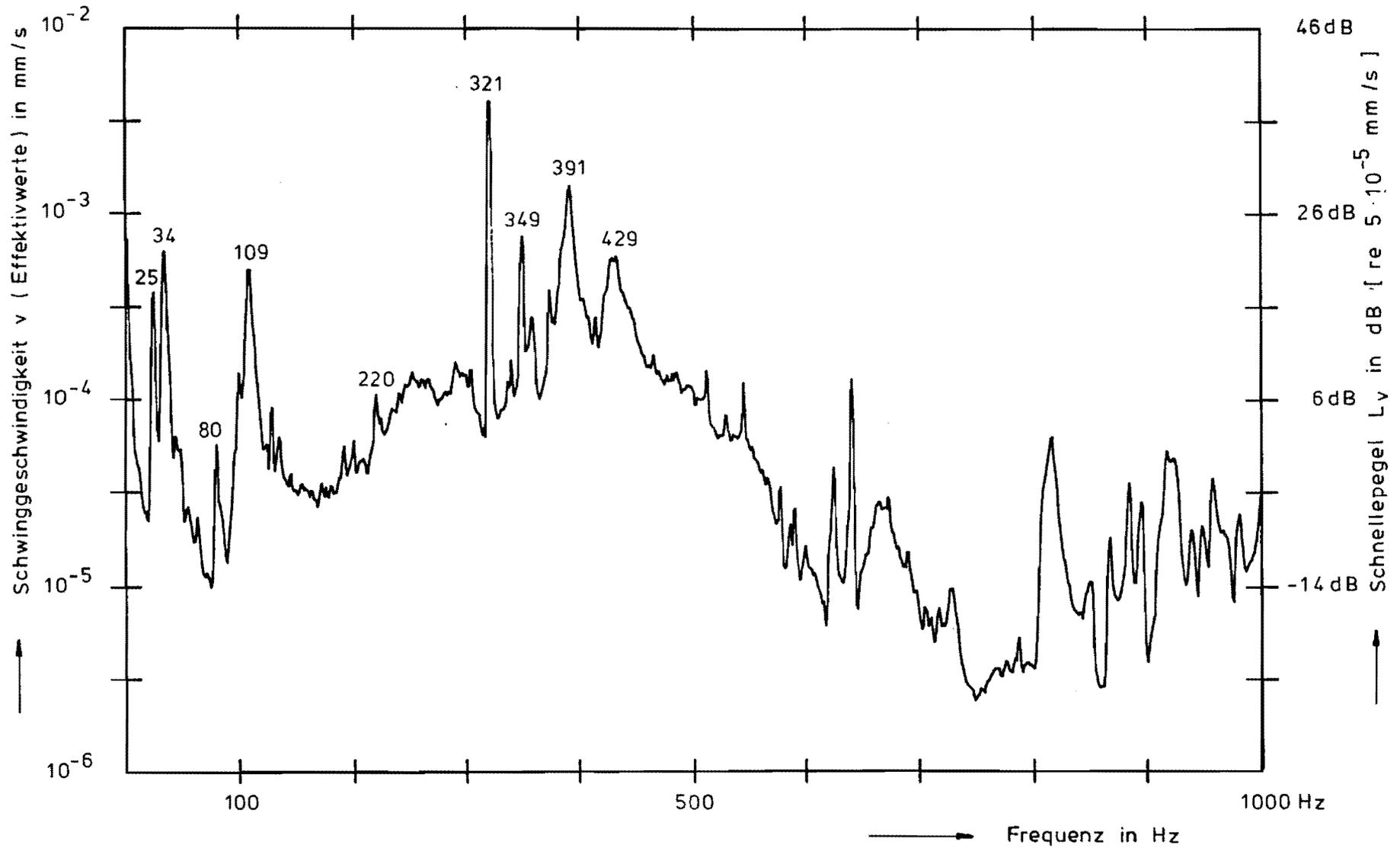


Abb. 13: "gemittelttes Amplitudenspektrum" (FFT-Analyse) des "Eigenrauschens";
 Meßgröße: Schwinggeschwindigkeit; Meßort: Tischmitte; Meßrichtung: horizontal y-Richtung; Anzahl der Mittelungen: 100

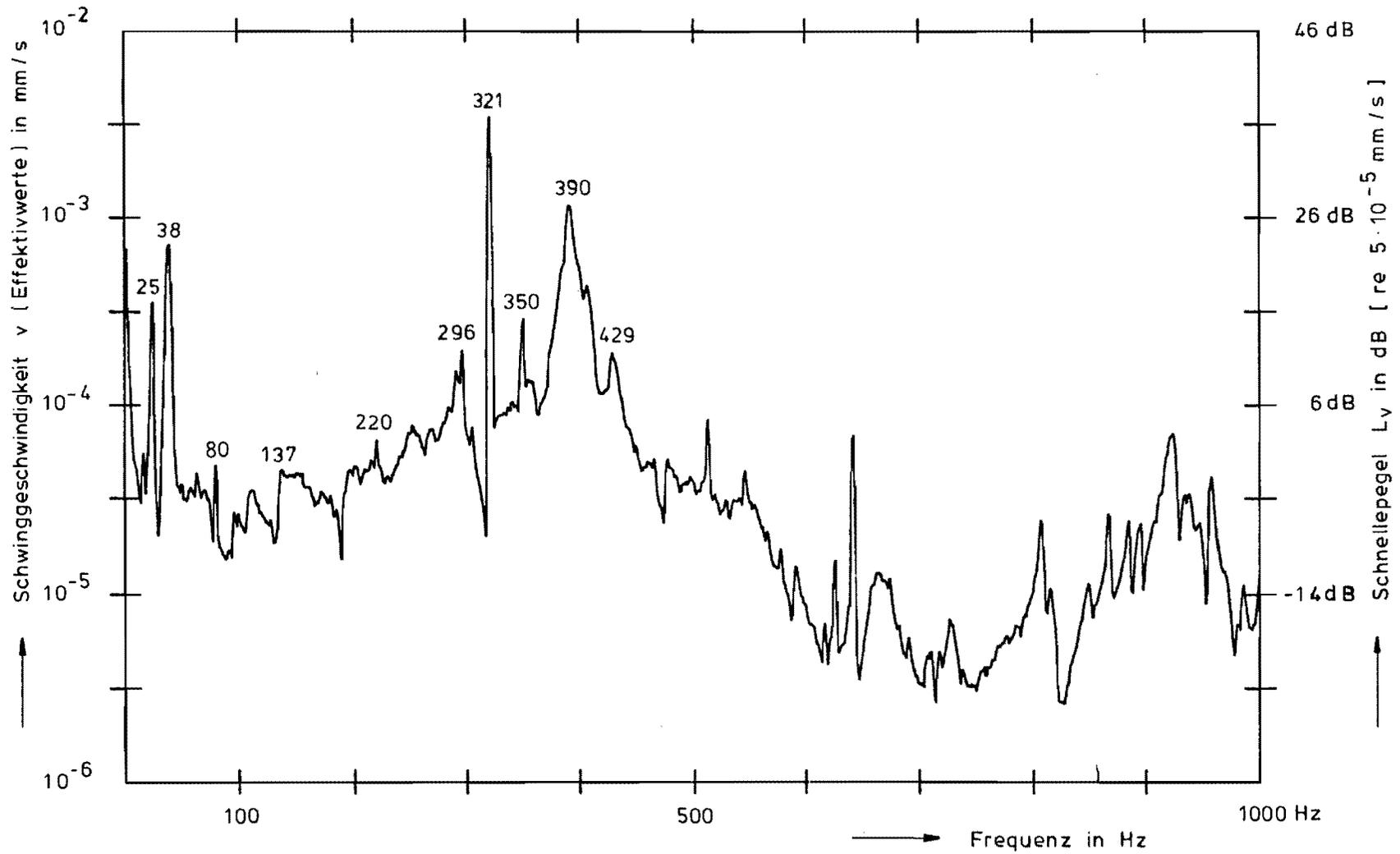


Abb. 14: "gemittelttes Amplitudenspektrum" (FFT-Analyse) des "Eigenrauschens";
 Meßgröße: Schwinggeschwindigkeit; Meßort: Tischmitte; Meßrichtung: horizontal x-Richtung; Anzahl der Mittelungen: 100

Bei der Durchführung der Versuche ist vorgesehen, das verwendete Kopplungselement, z.B. einen Stuhl, derart auf der Tischplatte anzuordnen, daß sich der Schwerpunkt der Versuchsperson möglichst genau über der Mitte der Tischplatte und damit in Verlängerung der Achse des Hydropuls-Längszylinders befindet. Die zulässige Biegebelastung des Zylinders bei exzentrischer Längskrafteinleitung wird bei den vorgesehenen Untersuchungen bei weitem nicht ausgeschöpft, weil die zulässige Querkraft 10 kN beträgt.

Die Auswirkungen von möglichen exzentrischen Belastungen der Tischplatte durch unbeabsichtigte Gewichtsverlagerungen der Versuchsperson auf dem Kopplungselement auf das Eigenrauschen wurde wie folgt meßtechnisch abgeschätzt:

Die Tischplatte wurde durch 5 gleichgroße Blei-Blöcke (Gesamtmasse 60 kg) so belastet, daß die Krafteinleitung in einem Abstand von 200 mm von der Zylinderlängsachse erfolgt.

Dabei wurde für das Eigenrauschen, gemessen in Plattenmitte in vertikaler Richtung, keine Veränderung im Vergleich zur zentrischen Belastung festgestellt. Bei exzentrischer Belastung wurden im Frequenzbereich von 0 Hz bis 1 kHz folgende Werte für das Eigenrauschen gemessen:

$$\begin{aligned} v_{\text{eff}} &\approx 0,003 && \text{mm/s} \\ \hat{v}_{\text{max}} &\approx 0,009 \dots 0,01 && \text{mm/s} \end{aligned}$$

5.2.3.5. Zeitliche Stabilität der technischen Eigenschaften

Um zu überprüfen, ob sich auch bei der Durchführung der Untersuchung mit eingeschalteter Anlage über mehrere Stunden je Tag das Verhalten der Anlage in bezug auf das Eigenrauschen verändert, wurde dieses nach dem Warmlaufen der Anlage (ca. 30 Minuten) über mehrere Stunden meßtechnisch erfaßt. Dabei wurde festgestellt, daß der Eigengeräuschpegel bei Beobachtung über 8 Stunden im Bereich zwischen $v_{\text{eff}} = 0,0025 \dots 0,050$ mm/s lag. Der Mittelwert ergab sich zu $v_{\text{eff}} = 0,0035$ mm/s ohne erkennbare Zeitabhängigkeit, gemessen im Frequenzbereich von 0,5 ... 100 Hz.

Zur Verfügbarkeit wurden bisher keine systematischen Erhebungen angestellt. Die Untersuchungen zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle werden seit ca. 8 Monaten durchgeführt. Die Anlage war während dieser Zeit an Werktagen bis zu 6 Stunden täglich in Betrieb. Kleinere technische Defekte traten an einem der beiden Servoventile (Undichtigkeit) und an einem Schaltmodul auf.

Da es sich bei der in der Hydropuls-Anlage verwendeten Regelstrecke - wie bei jedem Regelkreis - um ein schwingungsfähiges System mit mehr oder weniger stark ausgeprägtem Dämpfungsverhalten und Eigenfrequenzen handelt, wurden auch die zu Beginn jeder Versuchsreihe kalibrierten Erschütterungssignale im Arbeitsbereich (Schwinggeschwindigkeits-Frequenz-Bereich, s. Abb. 8) stichprobenartig während der Versuche laufend überprüft. Diese Überprüfung ergab keine feststellbaren Änderungen der zu Beginn der Versuche vorgegebenen Erschütterungssignale, so daß auch die Regeleinrichtung langzeitstabiles Verhalten aufweist.

5.2.3.6. Leistungsgrenzen der Erregeranlage in bezug auf Signalformen im Frequenzbereich von 0 Hz bis 100 Hz

Durch die Überprüfung der technischen Eigenschaften der verwendeten Hydropuls-Erregeranlage wurde festgestellt, daß Erschütterungsreize mit genügendem Störabstand und vertretbar kleinem Klirrfaktor im Frequenzbereich von etwa 1 Hz bis 100 Hz in folgendem Bereich der Schwinggeschwindigkeitsamplituden erzeugt werden können:

$$\hat{v}_{\text{Minimum}} \approx 0,02 \text{ mm/s}$$

$$\hat{v}_{\text{Maximum}} \approx 3,2 \text{ mm/s.}$$

In diesem Bereich können alle möglichen Arten von Erschütterungssignalen (Sollwertsignale), deren Amplitudenanteile überwiegend im genannten Frequenzbereich liegen, ausreichend reproduziert werden, so daß sie als Istwertsignale an der Tischplatte der Anlage zur Verfügung stehen.

Als mögliche Erschütterungsarten stehen z.B. in Betracht:

- harmonische Schwingungen
- periodische Schwingungen
- stochastische Schwingungen
- transiente (kurzzeitige) Schwingungen
- Erschütterungssignale von im Immissionsschutz relevanten Erschütterungsquellen (evtl. normiert), die z.B. in der Nachbarschaft von Webereien, von Schmiedehämmern, vom Straßenverkehr usw. in praktischen Fällen gemessen und geeignet gespeichert zur Verfügung stehen.

5.3. Versuchsdurchführung und rechnergestützte Ansteuerung der Erregeranlage

5.3.1. Anforderungen an das Instrumentarium zur Versuchsdurchführung

Bei der Planung der Versuchsdurchführung ergaben sich zu Beginn grundsätzliche Fragen nach dem einzusetzenden Instrumentarium. Diese Fragen bedurften sorgfältiger Überlegungen, da ihre Schlußfolgerungen Auswirkungen auf die Qualität des gesamten Versuchsprogramms erwarten ließen.

So ergaben sich u.a. folgende Fragestellungen:

- a) Welche Versuchsabläufe sind möglicherweise durchzuführen?
- b) Wie wird der Versuchsablauf gesteuert und wie können die möglichen Versuchsanordnungen eindeutig dokumentiert werden?

- c) Wie werden die Ergebnisse dokumentiert und ausgewertet?
- d) Mit welchen Signalen sollen die Untersuchungen durchgeführt werden?
- e) Wie werden diese Signale erzeugt?

Umfassende Untersuchungen zur Wahrnehmungsschwelle von Erschütterungen bedingen wegen der Vielschichtigkeit des Problems eine große Anzahl von unterschiedlichen Versuchsreihen. Somit konnte die Grundsatzfrage a) nur sehr allgemein beantwortet werden und es zeigte sich, daß manche Vorgaben von den Ergebnissen erster Versuche und den daraus sich ergebenden Problemstellungen abhängig waren.

So ergab sich schon in einem sehr frühen Stadium die Notwendigkeit einer möglichst flexiblen Lösung für die übrigen Problemkreise. Für die Entscheidung über das einzusetzende Instrumentarium bedeutet das, daß die derzeit abzusehenden Aufgaben der Versuchsdurchführung mit möglichst geringen Einschränkungen erfüllbar sein müssen. Außerdem ist im Hinblick auf die zahlreichen Versuche ein im Kern einheitliches Verfahren erstrebenswert, das durch geringfügige Modifikationen bei allen Untersuchungsmethoden beibehalten werden kann. Die wesentlichen Aufgaben der Versuchsdurchführung sollen im folgenden erläutert werden.

5.3.1.1. Steuerung des Versuchsablaufs

Der Inhalt eines Versuchs, z.B. die darzubietenden Erschütterungssignale (Anzahl, Art, Reihenfolge und Dauer) sowie die Art und Weise ihrer Darbietung wird durch die jeweils vorgegebene Untersuchungsmethode festgelegt. Hieraus ergibt sich für die Versuchsdurchführung eine versuchsspezifische zeitliche und logische Abfolge, in der bestimmte grundsätzliche Aufgaben erfüllt werden müssen.

Dazu zählen z.B. die Auswahl des Signals aus einer Signalbibliothek, die Signalausgabe an die Hydropulsanlage über eine bestimmte Dauer, die Einhaltung festgelegter Pausenzeiten zwischen zwei Signaldarbietungen, die Ermittlung der Reaktion des Probanden auf die Reizdarbietung, das Variieren der Signalamplitude innerhalb eines bestimmten Amplitudenbereiches in Abhängigkeit von der Reaktion und schließlich die Bestimmung der Wahrnehmungsschwelle.

Zu diesen Grundfunktionen kommen versuchsabhängig weitere Aufgaben hinzu, z.B. das Einschalten eines optischen Signals im Versuchsraum während der Signalausgabe zur Kontrolle für die Versuchsperson oder Ermittlung der Zeitspanne, die vom Beginn der Signaldarbietung bis zur Reaktion der Versuchsperson verstreicht.

Um die Summe aller Tätigkeiten innerhalb eines Versuchs im vorgegebenen Zeitraster zuverlässig ausführen zu können, ist die Unterstützung des Versuchsleiters durch ein automatisiertes Verfahren geboten. Der Versuchsleiter kann sich dann völlig auf seine Überwachungsaufgaben konzentrieren. Hierzu gehört z.B. die Beobachtung der Versuchsperson sowie die Kontrolle der Meßgeräte.

5.3.1.2. Dokumentation des Versuchsablaufs

Unter der Dokumentation des Versuchsablaufs ist die lückenlose Speicherung aller zu einem bestimmten Versuch gehörenden Parameter, einschließlich der dabei eingesetzten Erschütterungssignale sowie der Ergebnisse zu verstehen. Die Dokumentation dient nicht nur der vollständigen Versuchsbeschreibung, sondern sie ermöglicht bei entsprechender Ausführung jederzeit mit geringem Aufwand Versuchswiederholungen, um beispielsweise für eine bestimmte Versuchsanordnung das Probandenkollektiv zu erweitern. Nicht zuletzt ist eine eventuell erforderliche Fehlersuche nur mit Hilfe einer sorgfältigen Dokumentation durchführbar.

Prinzipiell kann die Versuchssteuerung sowohl manuell als auch automatisch erfolgen. Bei einer manuellen Ablaufsteuerung durch den Versuchsleiter muß jeder durchgeführte Versuch protokolliert werden. Dies bedeutet für den Versuchsleiter eine zusätzliche Aufgabe, die er während des Versuchs zu erfüllen hat. Schwierig wird es bei der Protokollierung der Anregungssignale. Fehler, die bei der manuellen Einstellung des Signals, z.B. an einem Funktionsgenerator entstehen und unmittelbaren Einfluß auf die Reaktion der Versuchspersonen haben, werden nicht sicher erkannt. Bei der Entscheidung über die Art der Signalbereitstellung ist daher die spätere Dokumentationsmöglichkeit zu berücksichtigen.

Eine automatisierte Steuerung dagegen ist durch das zugrundeliegende Programm selbstdokumentierend. In den einzelnen Programmschritten ist der Versuchsablauf eindeutig beschrieben und sicher nachvollziehbar.

5.3.1.3. Dokumentation der Versuchsergebnisse

Das Untersuchungsziel des jeweiligen Versuchs bestimmt die Versuchsergebnisse, die festgehalten werden sollen. Es ist sinnvoll, die Art, in der diese Ergebnisse gespeichert werden, an die beabsichtigte Auswertung anzupassen. Der Umfang der zu erwartenden Daten und die geplante Anwendung statistischer Auswertemethoden erfordert den Einsatz einer Datenverarbeitungsanlage. Dies legt nahe, die Versuchsergebnisse sofort nach ihrer Entstehung so auf einem vom Rechner lesbaren Datenträger abzulegen, daß die zur Verfügung stehenden Auswerteprogramme unmittelbar eingesetzt werden können. Dieses Verfahren schließt aus, daß Schreibfehler beim manuellen Erstellen einer Ergebnistabelle oder Übertragungsfehler bei der späteren Eingabe in den Rechner auftreten. Vor allem ermöglicht es aber die kurzfristige Auswertung der Versuche, wodurch die Effektivität der Versuchsanlage wesentlich erhöht wird.

5.3.1.4. Bereitstellung der Erschütterungssignale

Die für die Untersuchung in Frage kommenden Signale können in unterschiedlichen Formen vorliegen.

Im einfachsten Fall kann das Signal mit Hilfe eines Funktionsgenerators erzeugt

und direkt an die Hydropulsanlage übergeben werden. Hierbei handelt es sich in der Regel um einfache Signale, z.B. Rechteckimpulse, Sinusschwingungen, usw., die oft als Prüfsignale verwendet werden.

Weiterhin liegt eine Reihe von Erschütterungssignalen vor, die bei Messungen in der Praxis im Rahmen des Immissionsschutzes gewonnen und analog oder digital auf Magnetband oder auch als Schrieb auf Papier gespeichert wurden.

Schließlich ist geplant, Untersuchungen anhand von komplexen Signalen durchzuführen, die in mathematisch analytischer Form vorgegeben werden.

In der Form, in der diese Signale ursprünglich vorliegen, sind sie zum größten Teil nur unter hohem, vielfältigem Geräteaufwand und allen damit verbundenen Fehlermöglichkeiten bzw. überhaupt nicht zur Ansteuerung der Hydropulsanlage geeignet. Es wird daher nach einer einheitlichen, für die Anlage geeigneten Form gesucht, in die alle Anregungssignale vor ihrer Verwendung gebracht werden müssen. In Abhängigkeit von den zur Verfügung stehenden Wandlungsmöglichkeiten wurde entschieden, jeden Signalverlauf in eine Folge von äquidistanten Stützstellen umzuwandeln und digital auf einem Datenträger abzulegen. Jede dadurch erzeugte Zeitreihe läßt sich durch eine Digital-/Analog-Wandlung und anschließende Filterung wieder in den ursprünglichen Kurvenverlauf zurückführen, der dann in Form eines Wechselspannungssignals als direkte Eingangsgröße für die Hydropulsanlage zur Verfügung steht.

Die digitale Form der Signalspeicherung bietet zudem wesentliche Vorteile. So können die Signale bei Versuchswiederholungen oder großen Probandenkollektiven ohne Qualitätsverlust beliebig oft verwendet werden. Das Reizangebot kann exakt wiederholt werden. Damit wird ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit gewährleistet. Außerdem kann bei entsprechender Wahl des Datenträgers die Signalausgabe in eine automatisierte Versuchsdurchführung mit einbezogen werden.

Durch das einheitliche Format, in dem die Signale zur Verfügung stehen, werden ständig wechselnde teure Geräteaufbauten überflüssig. Die Verfügbarkeit der Anlage wird dadurch beträchtlich erhöht. Daneben ist auch das Problem der Dokumentation zufriedenstellend und ohne weiteren Aufwand gelöst.

5.3.1.5. Folgerungen für die Auswahl des Instrumentariums

Die in den vorigen Abschnitten diskutierten Aspekte und ihre Lösungsvarianten führten nach Abwägung der Vor- und Nachteile zu der Entscheidung, für die anstehenden Aufgaben einen Prozeßrechner einzusetzen. Diese Entscheidung ist hauptsächlich darin begründet, daß ein Teil der genannten Aufgaben nur durch den Einsatz eines Rechners lösbar ist. Darüber hinaus können aber auch weitere anfallende Routineaufgaben von diesem Rechner bearbeitet werden.

Eine insgesamt automatisierte Ablaufsteuerung hat im Vergleich zur manuellen Steuerung klare Vorteile:

- Die einzelnen Teilbereiche der Versuchsdurchführung können optimal aufeinander abgestimmt werden. Durch eine weitgehende Standardisierung sind für unterschiedliche Versuche nur geringfügige Änderungen im Steuerungsprogramm und im Geräteaufbau erforderlich. Hierdurch ergibt sich eine beträchtliche Zeit- und Kostenersparnis.
- Der Versuchsleiter wird von umfangreichen Bedien- und Einstellarbeiten befreit. Damit werden mögliche Fehler auf ein Minimum reduziert. Die automatisierte Ablaufsteuerung gewährleistet, daß innerhalb einer Versuchsreihe jeder Versuch in gleicher Weise verläuft und demzufolge auch jede Versuchsperson dabei gleichen Bedingungen unterliegt. Dies ist eine wichtige Voraussetzung im Hinblick auf eine Auswertung der Versuchsergebnisse mittels statistischer Methoden.
- Der Prozeßablauf ist durch das Steuerungsprogramm eindeutig festgelegt, eine weitergehende Protokollierung der einzelnen Versuche etwa in Form einer Checkliste entfällt.
- Die Reaktion der Versuchsperson auf die dargebotenen Erschütterungsreize wird dem Rechner durch eine geeignete Rückmeldung unmittelbar mitgeteilt. Daraus resultierende Varianten im Versuchsablauf können vom Rechner verzögerungsfrei veranlaßt werden. Durch die direkte Kommunikation zwischen Versuchsperson und Rechner können zusätzliche Ergebnisse gewonnen werden, z.B. Feststellung der Reaktionszeiten auf unterschiedliche Signalverläufe.
- Der Rechner legt die Versuchsergebnisse so formatiert auf einem Datenträger ab, daß die Auswerteprogramme direkt darauf zugreifen können. Darüber hinaus erfolgt automatisch eine eindeutige Kennzeichnung des Datensatzes über den Zeitpunkt des Versuchs (Datum, Uhrzeit) sowie über die Versuchsvariante, die Versuchsperson und den Versuchsleiter. Die Nummer der Versuchsvariante wird dem Programm vorgegeben, die Nummer der Versuchsperson und des Versuchsleiters erfolgt als einzige Eingabe an den Rechner zu Beginn eines jeden Versuchs.
- Schließlich wird noch folgender Vorteil der Versuchsautomatisierung erwähnt. Die Kodierung eines Prozeßablaufs in eine Programmiersprache setzt voraus, daß vor Aufnahme der Versuche über die Vorgehensweise völlige Klarheit herrscht. Jeder Schritt ist vorher im Detail festzulegen. Der Zwang der vollständigen Planung hat den Effekt, daß bei diesen Untersuchungen subjektiv willkürliche Entscheidungen des Versuchsleiters ausgeschlossen sind. Dadurch wird eine wesentliche Voraussetzung für die geforderte Reproduzierbarkeit erfüllt.

5.3.2. Auswahl des Ansteuerungs-Systems

5.3.2.1. Verwendete Geräte

Nach einer Analyse der Aufgabenstellung und der daraus resultierenden Anforderungen an das Rechnersystem erwies sich ein gängiger Personal-Computer als ausreichend. Gewählt wurde ein APPLE IIe, weil dieser Typ ein hohes Maß an Flexibilität bei geringen Kosten aufweist, da er durch ein großes Angebot an Zusatzkarten an viele Aufgabenstellungen angepaßt werden kann.

Die Programmierung konnte bis auf die zeitkritischen Teile der Signalausgaben in BASIC durchgeführt werden. Dies hat sich inzwischen als Vorteil herausgestellt, da durch die Wahl einer Interpretiersprache eine schnelle Änderung der Programme mit kurzen Testzeiten möglich ist.

Der Aufbau der automatisierten Ablaufsteuerung ist in Abb. 15 schematisch dargestellt. Die wesentlichen Bau-Einheiten sind:

- 1 Personal-Computer, Typ APPLE IIe mit 64 k Byte RAM,
mit folgenden Erweiterungen:
 - 1 Uhr/Clock, Typ Mountain Computer
 - 1 16-Kanal A/D- und D/A-Wandler, Typ Mountain Computer
 - 2 Diskettenlaufwerke zu je 140 k Byte Speicherkapazität
 - 1 Drucker
 - 1 Monitor
 - 1 Analog-Multiplizierer
 - 1 Tiefpaßfilter
 - 1 Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer, Typ Schenck T7
 - 1 Voltmeter, Typ Brüel & Kjaer, 2425
 - 1 Rückmeldeeinrichtung
 - 4 Signalleuchten

5.3.2.2. Beschreibung der Signalausgabe

Die aufgrund der jeweils gewählten Methodik benötigten Signale können prinzipiell auf drei Arten bereitgestellt werden:

- Berechnung nach analytischer Formulierung der Signalform.
- Abtastung von elektrischen, erschütterungsproportionalen Signalen entweder bei Messungen in praktischen Fällen oder nach Speicherung auf Magnetband.
- Abtastung eines Papierschriebs auf einem Digitalisiertisch.

Nach der Umwandlung stehen die Anregungssignale in jedem Fall als einheitlich formatierte Zeitreihen zur Verfügung. Diese Zeitreihen repräsentieren in Form äquidistanter Stützstellen den ursprünglichen schwinggeschwindigkeitsproportionalen Kurvenverlauf mit einer Amplitudenauflösung von 2^7 bit. Die zeitliche

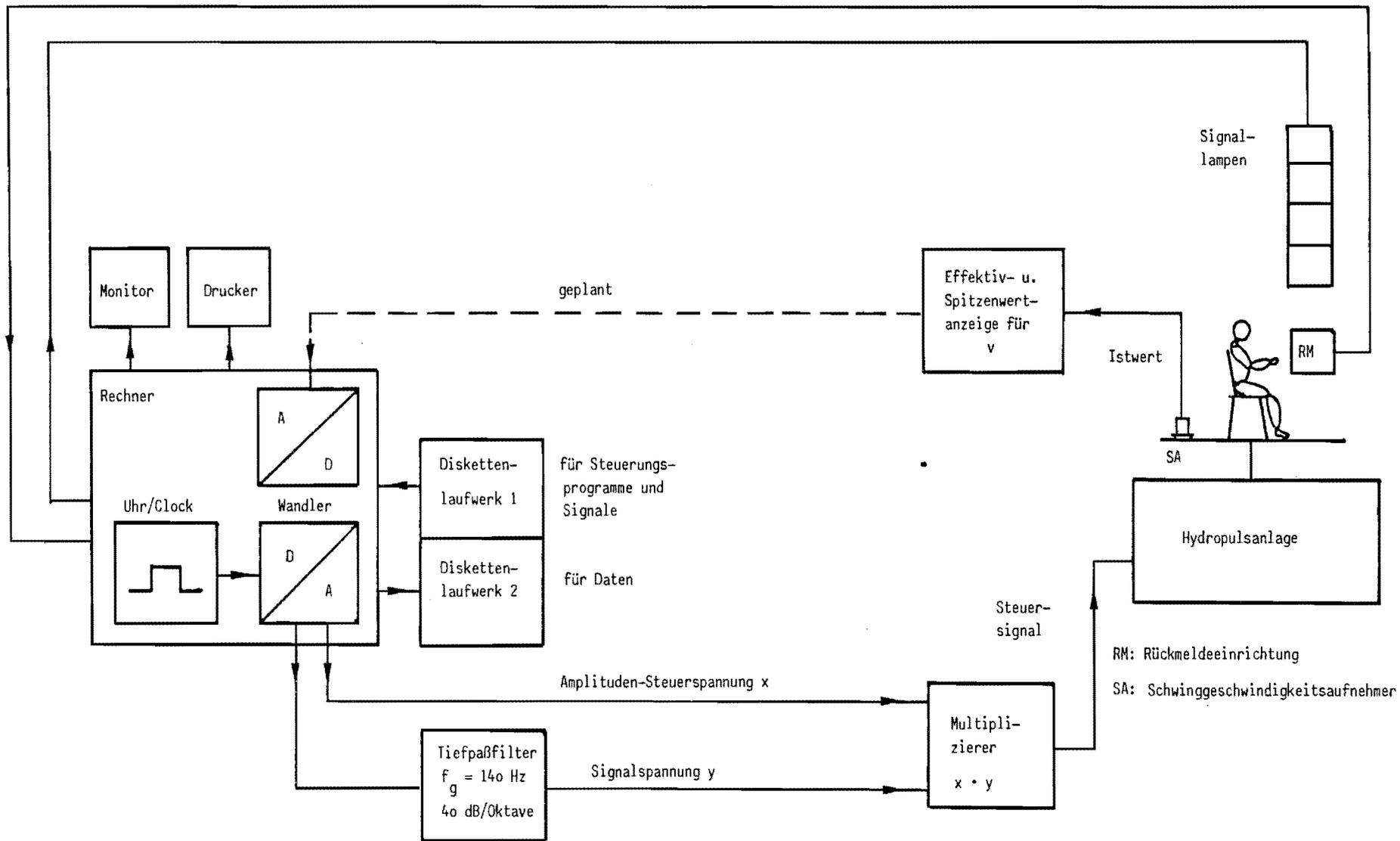


Abb. 15: Blockschaltbild der automatisierten Ablaufsteuerung

Auflösung der Stützstellen wurde auf 2 ms festgelegt. Somit erlaubt die hier gewählte Methode die Ausgabe von Signalen mit Frequenzanteilen bis < 250 Hz (NYQUIST-Theorem).

Das Steuerungsprogramm veranlaßt bei Versuchsbeginn die Übernahme des gewünschten Erschütterungssignals von einer Diskette als Datenträger in einen dafür reservierten Speicherbereich des Rechners. Jede Kurvenstützstelle belegt dabei genau eine Speicherzelle.

Sobald im Versuchsablauf die Signalausgabe an die Hydropulsanlage vorgesehen ist, wird von der automatischen Steuerung ein spezielles Hilfsprogramm aktiviert. Dieses in Maschinensprache kodierte Programm hat die Aufgabe, in Abständen von 2 ms nacheinander alle Kurvenpakete aus den Speicherzellen auszulesen und die digitalen Inhalte dem Digital/Analog-Wandler zuzuführen. Das hierzu erforderliche Zeitraster wird von der eingebauten Uhr über eine Interruptsteuerung generiert. Der Einsatz eines Maschinenprogramms gewährleistet, daß die im Rechner zur Signalausgabe notwendigen Vorgänge ausreichend schnell erfolgen. Damit ist es auch möglich, daß das Steuerungsprogramm quasi parallel die Antwort der Versuchsperson beobachten und registrieren kann.

Die Ausgangsspannung des Wandlers liegt im Bereich zwischen -5 V und $+5$ V. Durch die im Rechner verarbeitete 8 bit breite Datenstruktur wird eine Auflösung der Analogspannung in 256 diskrete Einzelschritte von je 39 mV ermöglicht. Der Digitalwert 0 führt dabei zu einer Analogspannung von -5 V, der Wert 256 zu $+5$ V.

Der relative Wandlungsfehler beträgt nach Angaben des Herstellers ± 39 mV.

Da die Umsetzung in diskrete Spannungsstufen erfolgt, kann der Signalverlauf am Wandlerausgang nur in Form einer Treppenkurve abgegriffen werden. Dieses erfordert eine Kurvenglättung mit Hilfe eines Tiefpaßfilters. Die Grenzfrequenz des Filters wurde zu 140 Hz gewählt. Dieser Wert liegt erheblich über dem für die Untersuchung vorgesehenen Frequenzbereich und ausreichend unter der theoretischen Nyquistgrenze; es stellt somit keine Einschränkung dar.

In Abb. 16a) sind die einzelnen Schritte im Verlauf der Signalwandlung grafisch erläutert:

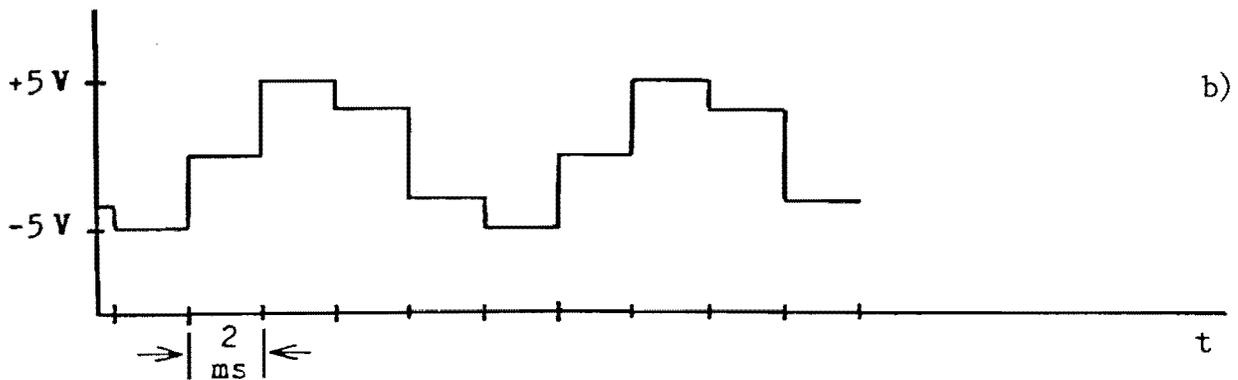
Abb. 16a) zeigt beispielhaft die Speicherbelegung durch das Signal, Abb. 16b) zeigt die nach der Wandlung des Signals entstehende treppenförmige Spannungs-kurve und Abb. 16c) den gefilterten Spannungsverlauf.

Um das Anregungssignal im Verlauf eines Versuchs mit unterschiedlichen Amplituden darbieten zu können, wird es zusammen mit einer Steuerspannung einem Analog-Multiplizierer zugeführt (siehe Abb. 15). Die Höhe der Steuerspannung bestimmt den Faktor, mit dem die Signalamplitude multipliziert wird. Die elektrische Auslegung des Multiplizierers wurde so gewählt, daß einer Steuerspannung von $+5$ V der Faktor 1 entspricht. Die Steuerspannung wird im Rechner in der gewünschten Größe durch das Programm digital erzeugt und über einen zweiten Digital/Analog-Wandlerkanal in 126 möglichen Abstufungen bereitgestellt. Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß bei der Erzeugung des Anregungssignals der volle Dynamikbereich des Wandlers genutzt werden kann und somit eine hohe Auflösung des Signals erreicht wird.

Speicherinhalt (dezimal) nach Übernahme des Signals vom Datenträger in den Rechner a)

0	127	255	195	60	0	127	255	195	60				
n	n+1									Nummer der Speicherzelle			

Signal am Ausgang des Digital-/Analog-Wandlers



Signal am Ausgang des Tiefpaßfilters

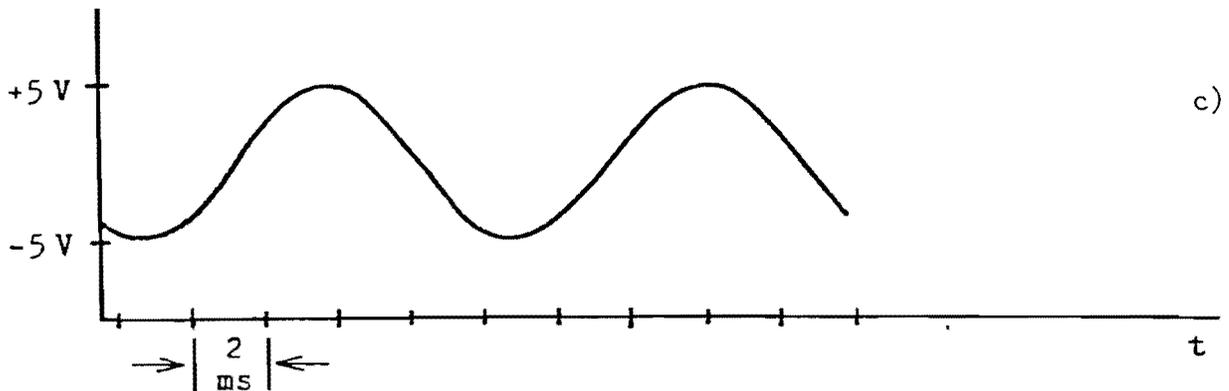


Abb. 16: Beispiel für eine Signalausgabe - Wandlung eines 100-Hz-Sinussignals

5.3.3. Beispiel für eine Versuchsdurchführung

Die im vorigen Abschnitt beschriebene Signalausgabe ist nur ein Teil des Versuchsablaufs. Zusätzlich werden von der rechnergestützten Ansteuerung weitere Aufgaben erledigt. Um dies anschaulich darzustellen, wird im folgenden beispielhaft für die verschiedenen geplanten Versuchsanordnungen eine vollständig beschrieben.

5.3.3.1. Versuchsablauf

Der als Beispiel gewählte Versuchsablauf ist in Abb. 17 als Flußdiagramm dargestellt. Das Steuerungsprogramm erwartet zunächst Eingaben zur Identifikation des Versuchsleiters, der Versuchsversion sowie der Versuchsperson. Danach werden in diesem Beispiel sieben sinusförmige Anregungssignale nacheinander angeboten. Die Aussteuerung der Amplituden erfolgt für jedes Signal zunehmend in fester Abstufung. Sobald die Versuchsperson Erschütterungsreize wahrnimmt, teilt sie dies durch Knopfdruck an der Rückmeldeeinrichtung mit. Aus den Meldungen ermittelt dann der Rechner nach den für diese Versuchssituation festgelegten Kriterien die signalbezogenen Wahrnehmungsschwellen. Nach Beendigung des Versuchs werden die Ergebnisse durch Ausdruck auf Papier dokumentiert und auf einer Diskette für die Auswertung gespeichert.

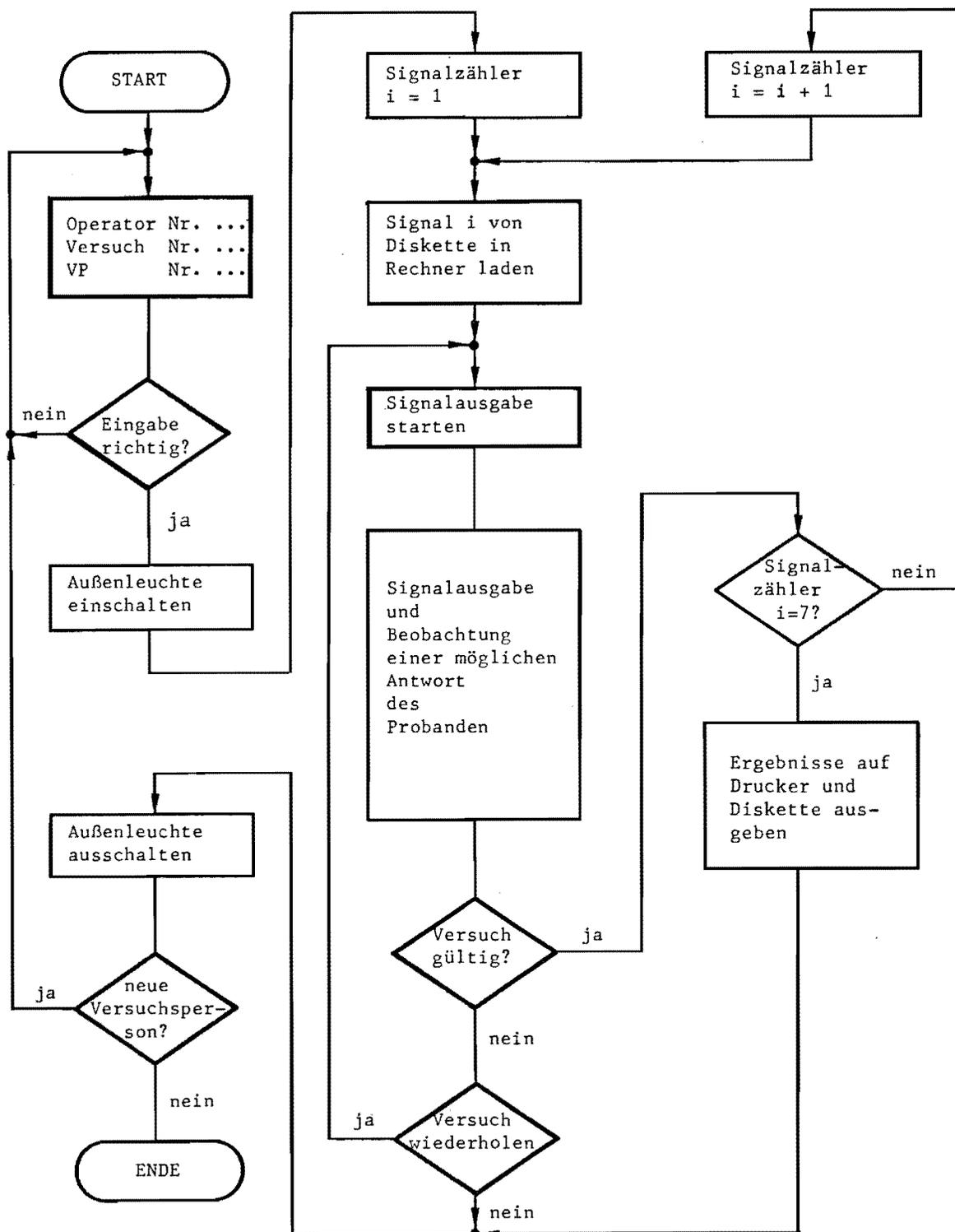
5.3.3.2. Beschreibung der Erschütterungssignale

Als Anregungssignale werden bei diesem Versuch Sinusschwingungen mit den Frequenzen 3, 5, 10, 15, 20, 25 und 30 Hz verwendet. Die Signaldauer beträgt 10 s. Während der ersten bzw. letzten Sekunde wird das Signal "weich" ein- bzw. ausgeschaltet, um eine schlagartige Anregung der Anlage und der Versuchsperson zu verhindern. Die Aussteuerung der Schwinggeschwindigkeitsamplituden erfolgt für jedes Signal in 16 diskreten, etwa logarithmisch gestuften Amplituden im Bereich zwischen $\hat{v} = 0,06 \text{ mm/s}$ und $\hat{v} = 2,00 \text{ mm/s}$.

5.3.3.3. Untersuchungsmethodik bei diesem Beispiel

Bei jedem der sieben Anregungssignale beginnt die Darbietung mit einem sogenannten Informationssignal der Schwinggeschwindigkeitsamplitude $\hat{v} = 0,8 \text{ mm/s}$. Dabei soll die Versuchsperson die Charakteristik des Signals kennenlernen, um bei niedrigen Amplituden im Bereich der Wahrnehmungsschwelle besser entscheiden zu können.

Wird das Informationssignal wahrgenommen, so beginnt die Untersuchung bei der Amplitude $\hat{v} = 0,06 \text{ mm/s}$. Die Aussteuerung der Signalamplitude wird bei jeder weiteren Darbietung so lange um eine der insgesamt 16 Stufen erhöht, bis die Versuchsperson bei drei aufeinanderfolgenden Stufen meldet, daß sie das Signal wahrgenommen hat. Der untere der zugehörigen Amplitudenwerte wird bei dieser



An den gekennzeichneten Stellen (—) hat der Versuchsleiter Eingriffsmöglichkeiten in die Ablaufsteuerung.

Die eingeschaltete Außenleuchte untersagt den Zutritt zur Anlage während des Versuchs.

Abb. 17: Flußdiagramm des Versuchsablaufs

Untersuchungsmethodik als Wahrnehmungsschwelle definiert und als Ergebnis festgehalten. Außerdem wird die Zeit zwischen dem Beginn der Signalausgabe und der Meldung als Reaktionszeit der Versuchsperson für diese Amplitude ermittelt. Wird dagegen das Informationssignal nicht gespürt, so erfolgt von dort aus die Erhöhung der Signalaussteuerung bis drei aufeinanderfolgende Meldungen vorliegen. Die Ergebnisse werden, wie oben beschrieben, festgehalten. Wird die oberste Schwinggeschwindigkeitsamplitude des Untersuchungsbereichs $\hat{v} = 2,00 \text{ mm/s}$ erreicht, ohne daß drei aufeinanderfolgende Meldungen vorliegen, wird die Schwelle als nicht bestimmbar dokumentiert. Die Dauer einer Signalausgabe beträgt jeweils 10 s. Zwischen zwei Darbietungen mit steigender Amplitude liegt eine Pause von 5 s. Während der Signaldarbietung leuchtet bei der hier gewählten Untersuchungsmethodik eine Signallampe zur optischen Information der Versuchsperson auf.

Die Antwort der Versuchsperson auf einen wahrgenommenen Erschütterungsreiz erfolgt durch Knopfdruck an der Rückmeldeeinrichtung. Der Rechner bestätigt den Empfang der Meldung, indem er für die Versuchsperson sichtbar eine weitere Signallampe bis zum Ende der augenblicklichen Signalausgabe einschaltet.

Die beschriebene Ansteuerung führt zu Versuchsdauern von etwa 10 Minuten.

5.3.3.4. Kontrolle zwischen Ist- und Sollwerten

Die Reaktion der Hydropulsanlage auf die vom Rechner gelieferten Steuersignale wird mit Hilfe eines an der Erregerplatte montierten Schwinggeschwindigkeitsaufnehmers und einem kalibrierten Voltmeter überwacht. Dies dient dazu, stichprobenweise die Amplituden zu kontrollieren und das Langzeitverhalten der gesamten Anlage zu erfassen. Es ist geplant, diese Kontrollfunktion bei genügend Erfahrung über die Anlage an den Rechner zu übertragen und darüber hinaus bei Bedarf eine Regelstrecke Rechner-Hydropulsanlage-Referenzempfänger-Rechner einzurichten (siehe Abb. 15).

6. Weitere kennzeichnende Merkmale der Versuchsanlage

6.1. Geräuschverhalten

6.1.1. Allgemeines

Bei der Untersuchung von Sinneswahrnehmungen im Bereich der Wahrnehmungsschwelle (beginnende bewußte Wahrnehmung) soll die Reaktion (Antwort) auf verhältnismäßig sehr geringe Reize festgestellt werden. Es wird vermutet, daß diese Reaktion durch sonstige im Versuchsraum auftretende Störungen, z.B. durch Lärm beeinflusst werden kann [9].

Außerdem ist dem Umstand Beachtung zu schenken, daß u.U. bestimmte Istwert-Signale, die an der Tischplatte anstehen, von dieser abgestrahlt werden und auch als Luftschall für die Versuchsperson hörbar sind. Dieser Einfluß könnte auf die Entscheidung der Versuchsperson über die Schwelle: wahrnehmbar/nicht wahr-

nehmbar des Erschütterungsreizes Einfluß haben. Daher wurden die im Versuchsraum vorhandenen Geräusche festgestellt, und zwar bei folgenden Betriebszuständen:

- ohne Betrieb der Hydropulsanlage
- mit Betrieb der Hydropulsanlage bei verschiedenen Betriebszuständen.

6.1.2. Geräuschpegel im Versuchsraum

Zur Messung der Geräusche wurde ein integrierender Echtzeit-Analysator eingesetzt, der sowohl als integrierender Terz-Analysator als auch als integrierender Schallpegelmessgerät zur Messung des unbewerteten oder zur Messung des A-bewerteten Schallpegels verwendet werden kann. Er erfüllt die Anforderungen an Präzisions-Schallpegelmessgerät nach DIN 45633, Teil 1 [10].

Das Mikrofon wurde in etwa 1,30 m Höhe über dem Fußboden (etwa Ohrhöhe der Versuchsperson bei sitzender Körperhaltung) über der Vorderkante der Erreger-Tischplatte (entspricht etwa der Raummitte) angeordnet. Gemessen wurde jeweils der A-bewertete gemittelte Schalldruckpegel L_{AFm} über eine Mittelungszeit von 10 Sekunden. Die bei verschiedenen Betriebszuständen festgestellten Schallpegel sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

In Abb. 18 ist als Beispiel das Terzpegel-Diagramm des Schallpegels dargestellt, welches bei Betrieb der Hydropulsanlage bei sinusförmiger Ansteuerung mit $f = 30$ Hz gemessen worden ist (Mittelungszeit: 10 Sekunden). Man erkennt, daß die Schallpegel mit der Terzmittenfrequenz von 31,5 Hz deutlich gegenüber den Schallpegeln der benachbarten und auch der weiteren Terzen herausragen. Die Ursache dafür liegt darin, daß die Tischplatte (Stahlkonstruktion, bestehend aus einer Blechplatte mit mehrfacher Anordnung von Rippen zur Versteifung; die Tischplatte ist auch ringsum durch Stahlbleche versteift) bei der Ansteuerung mit $f = 30$ Hz durch die Schwingungsbewegungen Luftschallpegel bei dieser Frequenz im Versuchsraum erzeugt. Diese sind bei höheren Frequenzen - etwa oberhalb von 40 Hz - und beim Betrieb von größeren Schwingungsgeschwindigkeitsamplituden - etwa oberhalb von $v_{eff} > 0,5$ mm/s - hörbar. - Sollte sich bei der weiteren Durchführung der Versuche ergeben, daß dieser mit tonhaltiger Geräuscherregung verbundene Betrieb der Versuchsanlage Einfluß auf die Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle der Erschütterungsreize hat, sind Minderungsmaßnahmen vorgesehen.

6.2. Klima- und Lichtverhältnisse

Bei der Gestaltung und Ausstattung des Versuchsraumes wurde angestrebt, daß in bezug auf die Klima- und Lichtverhältnisse das bei Aufenthaltsräumen in Hochbauten, z.B. in Wohnungen und Büros, übliche Raumklima herrscht.

Der Raum hat drei zur Außenseite gelegene Fenster mit freier Sicht in eine unverbauete Landschaft mit Blick zum Horizont. Damit herrschen tagsüber die in Aufenthaltsräumen in Hochbauten üblichen Tageslichtverhältnisse.

Tabelle 2: Schallpegel im Versuchsraum bei verschiedenen Betriebszuständen

Betriebszustand	Schallpegel im Versuchsraum L_{AFm}
Hydropulsanlage abgeschaltet; Geräusche aus der Umgebung der großen Versuchshalle	34 dB
Hydropulsanlage eingeschaltet; Leerlauf ohne Signalansteuerung	42 dB
Hydropulsanlage eingeschaltet; Leerlauf; ohne Signalansteuerung und Raum-Entlüftungsventilator eingeschaltet	50 dB
Hydropulsanlage eingeschaltet mit sinusförmiger Signalansteuerung $f = 10$ Hz bei $v_{eff} = 0,5$ mm/s bei $v_{eff} = 1,0$ mm/s	41 dB 41 dB
Hydropulsanlage eingeschaltet mit sinusförmiger Signalansteuerung $f = 30$ Hz bei $v_{eff} = 0,1$ mm/s bei $v_{eff} = 0,5$ mm/s	41 dB 42 dB
Hydropulsanlage eingeschaltet mit sinusförmiger Signalansteuerung $f = 60$ Hz bei $v_{eff} = 0,1$ mm/s bei $v_{eff} = 1,0$ mm/s	42 dB 44 dB
Hydropulsanlage eingeschaltet mit sinusförmiger Signalansteuerung $f = 80$ Hz bei $v_{eff} = 0,1$ mm/s bei $v_{eff} = 1,0$ mm/s	42 dB 57 dB

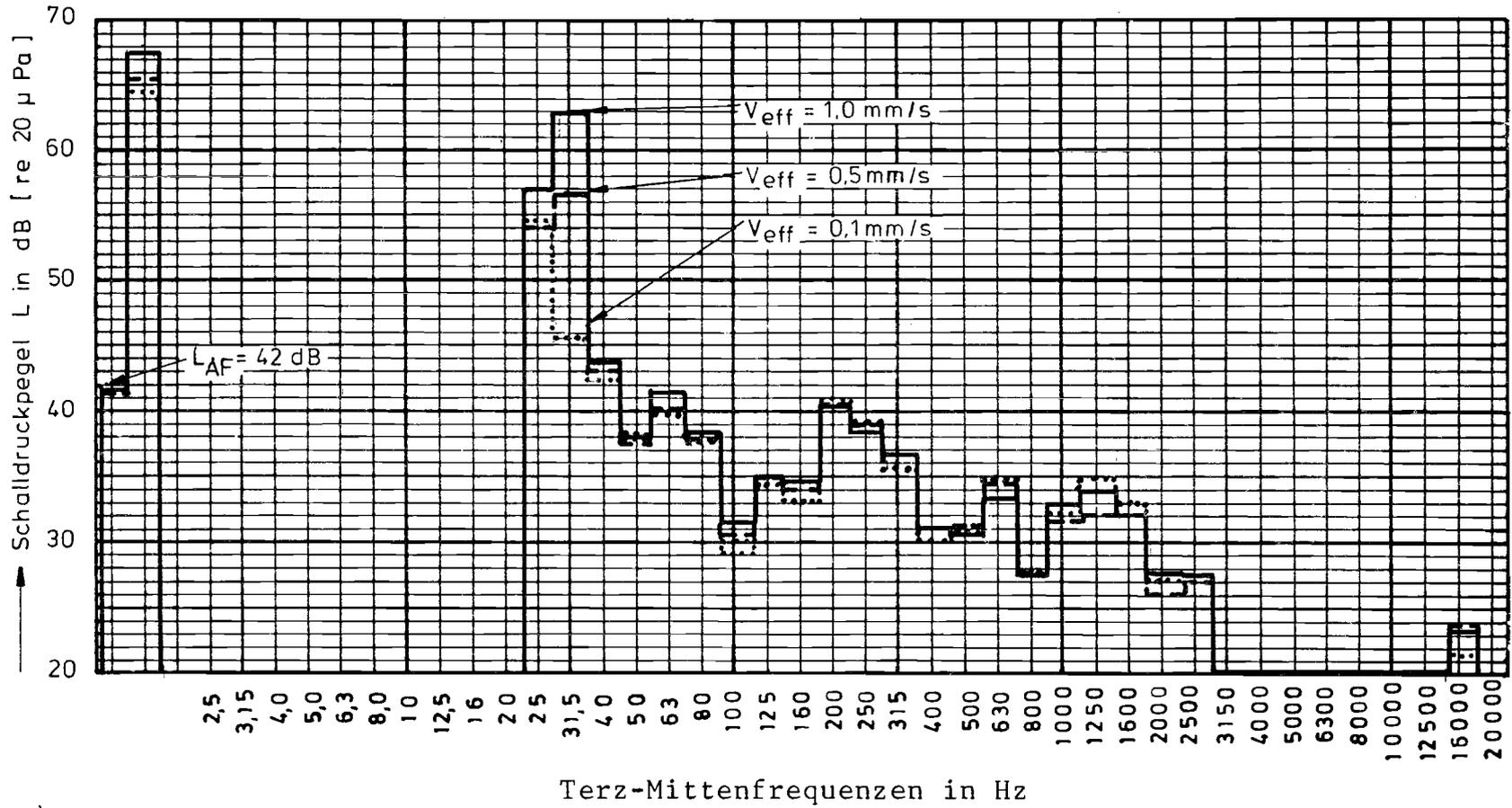


Abb. 18: Geräuschpegel im Versuchsraum beim Betrieb der Hydropuls-Erregeranlage; Ansteuerung: verschiedene sinusförmige Schwinggeschwindigkeitsamplituden bei $f = 30 \text{ Hz}$; Mittelungszeit: 10 s

Die Versuche wurden bei Raumtemperaturen durchgeführt, die überwiegend im Bereich von 19°C bis 22°C lagen; an einigen Tagen bei hoher Sonneneinstrahlung stiegen die Raumtemperaturen auch darüber hinaus etwas an, sie lagen jedoch immer unterhalb von 24°C. Die relative Luftfeuchte im Raum lag überwiegend im Bereich zwischen 40 und 50 %. Im Versuchsraum kann zusätzlich durch einen Ventilator der Luftwechsel erhöht werden und Temperatur und Luftfeuchte entsprechend beeinflußt werden.

S c h r i f t t u m

- [1] RASMUSSEN, G.:
Human Body Vibration Exposure and its Measurement,
Technical Review, (1982) No. 1.
Hrsg.: Brüel und Kjaer, Dänemark.
- [2] KEIDEL, W.D.:
Sinnesphysiologie, Teil 1.
Allgemeine Sinnesphysiologie - Visuelles System.
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1971.
- [3] SIXTL, F.:
Meßmethoden der Psychologie.
Verlag Julius Beltz, Weinheim 1967.
- [4] MEISTER, F.J.:
Die physiologische Wertung von Erschütterungsmessungen.
Akustische Z., 2 (1937), S. 1.
- [5] DIECKMANN, D.:
Einfluß vertikaler mechanischer Schwingungen auf den Menschen.
Int. Z. angew. Physiol. einschl. Arbeitsphysiologie, 16 (1957),
S. 519.
- [6] MIWA, T.:
Evaluation Methods for Vibration Effects
Part 1: Measurements of Threshold and Equal Sensation
Contours of whole Body for Vertical and Horizontal
Vibrations.
Ind. Health, (1967), 5, S. 183.
- [7] CLAUSS, G.:
Zur Methodik von Schätzskalen in der empirischen Forschung,
Probleme und Ergebnisse der Psychologie, (1968),
H. 26, S. 7-53.
- [8] DIN 52 212:
Bauakustische Prüfungen - Bestimmung des Schallabsorptions-
grades im Hallraum (Jan. 1961).
- [9] MCKAY, J.R.:
Human Response to Vibration:
Some Studies of Perception and Startle.
Thesis, University of Southampton, England 1972.
- [10] DIN 45 633, Bl. 1:
Präzisionsschallpegelmesser,
Allgemeine Anordnungen (März 1970).

Berichte der

LANDESANSTALT FÜR IMMISSIONSSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN, ESSEN

- LIS-Berichte -

Die LIS-Berichte haben spezielle Themen aus den wissenschaftlichen Untersuchungen der LIS zum Gegenstand. Die in der Regel umfangreichen Texte sind nur in begrenzter Auflage vorrätig. Einzelexemplare werden Interessenten auf Anforderung kostenlos zur Verfügung gestellt.

Anforderungen sind zu richten an die

Landesanstalt für Immissionsschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen
Wallneyer Str. 6
4300 E s s e n 1

- Berichte-Nr. 1: KRAUTSCHEID, S. und P. NEUTZ:
(vergriffen) LIDAR zur Fernüberwachung von Staubemissionen.
- Nachweis der Kalibrierfähigkeit eines LIDAR-Systems - (1978).
- Berichte-Nr. 2: BUCK, M.:
(vergriffen) Die Bedeutung unterschiedlicher Randbedingungen bei der Messung und Beurteilung der Luftqualität (1978).
- Berichte-Nr. 3: SCHEICH, G.:
(vergriffen) Entwicklung und Anwendung von Ausbreitungsmodellen und Luftüberwachungsprogramme in den USA (1979).
- Berichte-Nr. 4: SPLITTGERBER, H. und K.H. WIETLAKE:
(vergriffen) Ermittlung der Luftschalldämmung von Bauelementen für Industriebauten am Bau (1979).
- Berichte-Nr. 5: SPLITTGERBER, H.:
(vergriffen) Zur Problematik der Meßgrößen und Meßwerte bei Erschütterungsmissionen (1979).
- Berichte-Nr. 6: STRAUCH, H. und K.H. GOLDBERG:
(vergriffen) Ermittlung der Dämmwirkung von Dachentlüftern für Werkshallen im Einbauzustand unter Berücksichtigung der baulichen Nebenwege (1979).
- Berichte-Nr. 7: KRAUSE, G.M.H., B. PRINZ UND K. ADAMEK:
(vergriffen) Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Falschfarbenfotografie für die Aufdeckung und Dokumentation von Immissionswirkungen auf Pflanzen (1980).
- Berichte-Nr. 8: WIETLAKE, K.H.:
(vergriffen) Erschütterungsminderung durch "Direktabfederung" von Schabotte-Schmiedehämmern (1980).
- Berichte-Nr. 9: STRAUCH, H.:
(vergriffen) Methoden zur Aufstellung von Lärminderungsplänen (1980).
- Berichte-Nr. 10: HILLEN, R.:
(vergriffen) Untersuchung zur flächenbezogenen Geräuschbelastungs-Kennzeichnung
-Ziele, Methodik, Ergebnisse- (1980).
- Berichte-Nr. 11: MANNS, H., H. GIES und W. STRAMPLAT:
(vergriffen) Erprobung des Staub-Immissionsmeßgerätes PH62I für die kontinuierliche Bestimmung der Schwebstoffkonzentration in Luft (1980).
- Berichte-Nr. 12: GIEBEL, J.:
(vergriffen) Verhalten und Eigenschaften atmosphärischer Sperrschichten (1981).
- Berichte-Nr. 13: BRÖKER, G., H. GLIWA und E. MEURISCH:
Abscheidegrade von biologisch- und chemisch-aktiven Aggregaten zur Desodorierung osmogener Abluft von Tierkörperbeseitigungsanlagen (1981).

- Berichte-Nr. 14: BRANDT, C.J.:
(vergriffen) Untersuchungen über Wirkungen von Fluorwasserstoff auf Lolium Multiflorum und andere Nutzpflanzen (1981).
- Berichte-Nr. 15: WELZEL, K. und H.D. WINKLER:
(vergriffen) Emission und interner Kreislauf von Thallium bei einem Drehrohrofen mit Schwebegaswärmeaustauscher zur Herstellung von Portlandzementklinker unter Einsatz von Purpurerz als Eisenträger. - 1. Bericht - (1981).
- Berichte-Nr. 16: PRINZ, B. und E. KOCH:
Umweltpolitik und technologische Entwicklung in der VR China (1984).
- Berichte-Nr. 17: BRÖKER, G. und H. GLIWA:
Untersuchungen zu den Dioxin-Emissionen aus den kommunalen Hausmüllverbrennungsanlagen in Nordrhein-Westfalen (1982).
- Berichte-Nr. 18: BUCK, M., H. IXFELD und K. ELLERMANN:
Die Entwicklung der Immissionsbelastung in den letzten 15 Jahren in der Rhein-Ruhr-Region (1982).
- Berichte-Nr. 19: PFEFFER, H.U.:
Das Telemetrische Echtzeit-Mehrkomponenten-Erfassungssystem TEMES zur Immissionsüberwachung in Nordrhein-Westfalen (1982).
- Berichte-Nr. 20: BACH, R.W.:
(vergriffen) über Schätzfunktionen zur Bestimmung hoher Quantile der Grundgesamtheit luftverunreinigender Schadstoffkonzentrationen aus Stichproben (1982).
- Berichte-Nr. 21: STRAUCH, H.:
(vergriffen) Hinweise zur Anwendung flächenbezogener Schalleistungspegel (1982).
- Berichte-Nr. 22: SPLITTGERBER, H.:
Verfahren zur Auswertung von Erschütterungsmessungen und zur Beurteilung von Erschütterungsimmissionen (1982).
- Berichte-Nr. 23: KRAUSE, G.M.H.:
(vergriffen) Immissionswirkungen auf Pflanzen - Forschungsschwerpunkte in den Vereinigten Staaten von Amerika. Bericht über eine Reise in die USA und die Teilnahme am 13. Air Pollution Workshop in Ithaca, N. Y., in der Zeit vom 02.05.-24.05.1981 (1982).
- Berichte-Nr. 24: KÜLSKE, S.:
(vergriffen) Analyse der Periode sehr hoher lokaler Schadstoffbelastungen im Ruhrgebiet vom 15.01.1982 bis 20.01.1982 (1982).
- Berichte-Nr. 25: VAN HAUT, H. und G.H.M. KRAUSE:
(vergriffen) Wirkungen von Fluorwasserstoff-Immissionen auf die Vegetation (1982).
- Berichte-Nr. 26: KOCH, E., V. THIELE, J. GIEBEL, H. STRAUCH und P. ALTENBECK:
Empfehlungen für die problemgerechte Erstellung von Immissionsschutzgutachten in Bauleitplanverfahren (1982).
- Berichte-Nr. 27: MANNS, H., H. GIES und G. NITZ:
(vergriffen) Verbesserung der Zuverlässigkeit und Vergleichbarkeit von Messungen zur Ermittlung aromatischer Kohlenwasserstoffe in der Außenluft (1982).
- Berichte-Nr. 28: PRINZ, B., G.M.H. KRAUSE und H. STRATMANN:
Vorläufiger Bericht der Landesanstalt für Immissionsschutz über Untersuchungen zur Aufklärung der Waldschäden in der Bundesrepublik Deutschland (1982).
- Berichte-Nr. 29: GIEBEL, J.:
(vergriffen) Untersuchungen über Zusammenhänge zwischen Sperrschichthöhen und Immissionsbelastung (1983).

- Berichte-Nr. 30: MANN, H. und H. GIES:
Ergebnisse der Laborprüfung und Optimierung des meßtechnischen Teiles der Ozon-
Meßplätze im Meßnetz LIMES-TEMES (1983).
- Berichte-Nr. 31: BEINE, H., R. SCHMIDT UND M. BUCK:
Ein Meßverfahren zur Bestimmung des Schwefelsäure- und Sulfatgehaltes in Luft
(1983).
- Berichte-Nr. 32: BEIER, R. und P. BRUCKMANN:
Messung und Analyse von Kohlenwasserstoff-Profilen im Rhein-Ruhrgebiet (1983).
- Berichte-Nr. 33: FRONZ, W.:
(vergriffen) Ermittlung von Verkehrsgeschwindigkeits-Immissionen
- zum tageszeitlichen Verlauf des Geräuschpegels und des Verkehrsaufkommens an
Bundes- und Sammelstraßen (1983).
- Berichte-Nr. 34: BRÖKER, G.:
Zusammenfassende Darstellung der Emissionssituation in Nordrhein-Westfalen und
der Bundesrepublik Deutschland für Stickstoffoxide (1983).
- Berichte-Nr. 35: PIORR, D. und R. HILLEN:
Veränderung akustischer Kenngrößen infolge der nächtlichen Abschaltung von
Lichtsignalanlagen (1983).
- Berichte-Nr. 36: BUCK, M., H. IXFELD und K. ELLERMANN:
Benzol-Immissionsmessungen im Lande Nordrhein-Westfalen (1983).
- Berichte-Nr. 37: BACH, R.-W. und H. STRATMANN:
Untersuchungen zur Bestimmung der Aufnahmezeit des IRMA-Gerätes bei verschiedenen
Anströmverhältnissen (1983).
- Berichte-Nr. 38: WIETLAKE, K.H.:
Beurteilung und Minderung tieffrequenter Geräusche (1983).
- Berichte-Nr. 39: STRAUCH, H. und K. SCHWENGER:
Geräusche und Erschütterungen, verursacht durch elektrisch angetriebene
Wärmepumpen (1983).
- Berichte-Nr. 40: BRÖKER, G. und B. SCHILLING:
(vergriffen) Schwermetallemissionen bei der Verbrennung kommunaler Klärschlämme (1983).
- Berichte-Nr. 41: HILLEN, R.:
(vergriffen) Über Möglichkeiten zur Verbesserung der Qualität von Schießgeräuschmessungen im
Immissionsbereich (1983).
- Berichte-Nr. 42: KLEIN, M.:
(vergriffen) Untersuchung zur Schallausbreitung im Freien - Ziele, Physik der
Schallausbreitung, Vorgehensweise, Ergebnisse - (1983).
- Berichte-Nr. 43: PFEFFER, H.-U., S. KÜLSKE und R. BEIER:
Jahresbericht 1981 über die Luftqualität an Rhein und Ruhr.
Ergebnisse aus dem telemetrischen Immissionsmeßnetz TEMES in Nordrhein-Westfalen.
(1984)
- Berichte-Nr. 44: BUCK, M., H. IXFELD und R. BEIER:
Immissionsbelastung durch Fluor-Verbindungen in der Nachbarschaft der
Aluminiumhütte LMG in Essen. (1984).
- Berichte-Nr. 45: STRAUCH, H. und R. HILLEN:
Geräuschimmissionen in Großstädten; Flächenbezogene Kennzeichnung dieser
Geräuschimmissionen (1984).
- Berichte-Nr. 46: BUCK, M. und P. BRUCKMANN:
Air quality surveillance in the Federal Republic of Germany (1984).

- Berichte-Nr. 47: BEIER, R.:
Kohlenwasserstoffbelastung in Ahlen - eine statistische Analyse - (1984).
- Berichte-Nr. 48: SCHADE, H.:
Prognose der Schadstoffemissionen aus Verbrennungsanlagen im Belastungsgebiet
Rheinschiene-Süd für die Jahre 1985 und 1990 (1984).
- Berichte-Nr. 49: STRATMANN, H.:
Wirkungen von Luftverunreinigungen auf die Vegetation.
Bewertung der Luftanalyse auf der Grundlage weiterentwickelter Dosis-
Wirkungsbeziehungen für Schwefeldioxid und Ozon zur Ursachenaufklärung der
neuartigen Waldschäden (1984).
- Berichte-Nr. 50: GOLDBERG, K.H.:
Untersuchungen zu Schießlärminderungen, dargestellt an Fallbeispielen (1984)
- Berichte-Nr. 51: Messen und Beurteilen von Lichtimmissionen (1984).
- Berichte-Nr. 52: Pfeffer, H.-U.:
Qualitätssicherung in automatischen Immissionsmeßnetzen.
Teil 3: Ringversuche der staatlichen Immissions- Meß- und Erhebungsstellen in der
Bundesrepublik Deutschland (STIMES).
Ergebnisse für die Komponenten SO₂, NO_x, O₃ und CO (1984).
- Berichte-Nr. 53: BEIER, R.:
Zur Planung und Auswertung von Immissionsmessungen gemäß TA-Luft 1983 (1985).
- Berichte-Nr. 54: BRÖKER, G. und H. GLIWA:
Polychlorierte Dibenzodioxine und Furane in den Filterstäuben und Schlacken der
zwölf Hausmüllverbrennungsanlagen in Nordrhein-Westfalen sowie einiger
Sondermüllverbrennungsanlagen (1985).
- Berichte-Nr. 55: KÜLSKE, S., J. GIEBEL, H.-U. PFEFFER und R. BEIER:
ANALYSE der Smoglage vom 16. bis 21. Januar 1985 im Rhein-Ruhr-Gebiet.
Teil 1: Textband;
Teil 2: Meßergebnisse (in Vorbereitung)

Anmerkung:

Die LIS-Berichte - auch die vergriffenen - stehen Interessenten in zahlreichen Universitäts- und Hochschulbibliotheken zur Ausleihe bzw. Einsichtnahme zur Verfügung.