

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 33 (1955)

Heft: 6

Artikel: Die Erzeugung von Ultraschall mit Ferriten

Autor: Enz, Ulrich

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-874232>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 12.01.2026

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

TECHNISCHE MITTEILUNGEN

BULLETIN TECHNIQUE

PTT

BOLLETTINO TECNICO

Herausgegeben von der Schweizerischen Post-, Telegraphen- und Telefonverwaltung. Publié par l'administration des postes, télégraphes et téléphones suisses. Pubblicato dall'amministrazione delle poste, dei telegrafi e dei telefoni svizzeri

Die Erzeugung von Ultraschall mit Ferriten

Von Ulrich Enz, Zürich

534.321.9:669.112.228.1

Zusammenfassung. Die Ferrite haben bekanntlich seit einiger Zeit ein breites Anwendungsgebiet als magnetische Kernmaterialien gefunden. Es hat sich nun gezeigt, dass sich auch die magnetostriktiven Eigenschaften der Ferrite für elektroakustische Zwecke ausnutzen lassen. Auch hier bieten die verschwindend kleinen Wirbelstromverluste Vorteile. Im folgenden wird die Eignung von Ferriten in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung für die Erzeugung von Ultraschall untersucht, und einige Ausführungen und Anwendungen beschrieben. Der Artikel ist ein Auszug aus einer an der Abteilung für industrielle Forschung (Afi) der Eidg. Technischen Hochschule in Zürich entstandenen Dissertation, die demnächst erscheinen wird.

Résumé. On sait que depuis quelque temps on fait un large emploi des ferrites pour la confection de noyaux magnétiques. Or, on a constaté que leurs propriétés magnétostrictives peuvent aussi être utilisées à des fins électroacoustiques. Le fait que les pertes par courants parasites sont insignifiantes présente ici aussi des avantages. L'auteur examine dans quelle mesure les ferrites peuvent être utilisés, selon leur composition, pour engendrer des ultrasons, et décrit quelques expériences et applications. L'article est extrait d'une thèse élaborée à la section des recherches industrielles de l'Ecole polytechnique fédérale à Zurich et qui paraîtra prochainement.

1. Die verschiedenen Erzeugungsmethoden

Unter Ultraschall versteht man elastische Schwingungen mit Frequenzen oberhalb der Hörgrenze, also oberhalb etwa 20 000 Schwingungen pro Sekunde. In Luft lassen sich solche Schwingungen durch Pfeifen (Galton, Hartmann) und vor allem durch Sirenen erzeugen, und in Flüssigkeiten, abgesehen von Flüssigkeitspfeifen (Pohlmann), vor allem durch die elektroakustischen Wandler. Diese übertragen eine zugeführte Hochfrequenzleistung in akustische Energie in der Flüssigkeit. Für die verschiedenen elektroakustischen Wandler wird immer ein fundamentaler Effekt verwendet, nämlich die Magnetostraktion bei den Schwingern aus Nickel und den magnetostriktiven Legierungen, der inverse piezoelektrische Effekt bei Quarz und vielen andern Kristallen wie Turmalin, Zinkblende usw., und schliesslich die Elektrostraktion bei dem ferroelektrischen Bariumtitanat und den verwandten Verbindungen. Die erreichbaren Schallintensitäten liegen bei diesen drei Wandlerarten durchwegs höher als bei den andern Methoden. Für die praktische Anwendung entscheidet der Wirkungsgrad der Energieumwandlung sowie die Einfachheit und Betriebssicherheit der Anordnung.

2. Verwendung von Ferriten

Ferrite sind magnetische Mischkristalle aus Metalloxyden und können im allgemeinen in der Form $(Me O) Fe_2O_3$ dargestellt werden, wobei Me ein zwei-

wertiges Metall Mn, Mg, Ni, Co oder auch eine Gruppe, zum Beispiel (Zn_xNi_{1-x}) oder $(LiFe_{0.5})$, darstellen kann. Die Ferrite können als polykristalline Sinterkörper hergestellt werden und haben mechanisch ähnliche Eigenschaften wie Porzellan. Die Magnetostraktion bewegt sich in weitem Rahmen von praktisch verschwindenden Werten bei Mangan-Zink-Mischferriten bis zum Wert $\lambda_s = 128 \cdot 10^{-6}$ bei Cobaltferrit. Als Vergleich sei der Wert für Nickel mit $\lambda_s = 34 \cdot 10^{-6}$ angeführt. Die Versuche haben gezeigt, dass sich gewisse Ferrite gut zur Ultraschallerzeugung eignen. Der Hauptvorteil der Ferrite besteht darin, dass infolge der kleinen Leitfähigkeit die Wirbelstromverluste eine verschwindend kleine Rolle spielen. Ein weiterer Vorteil ist die grosse chemische Beständigkeit der Ferrite gegen Säuren, Laugen usw. Ein Nachteil liegt in der Tatsache, dass die mechanische Festigkeit (besonders die Zugfestigkeit) beschränkt ist und daher nicht beliebig grosse Schallleistungen erzeugt werden können. Wir werden aber an anderer Stelle zeigen, dass die praktisch erreichbaren Intensitäten in der gleichen Grössenordnung wie bei Nickelschwingern liegen.

3. Verschiedene Ferrite als Schallgeber

Zur Abklärung, welche Ferrite optimale Eigenschaften zur Erzeugung von Ultraschall haben, werden verschiedene Ferrite hergestellt und deren magnetische Eigenschaften gemessen. In der folgenden

Tabelle I sind für verschiedene Nickel-Zink-Ferrite die chemische Zusammensetzung, die Anfangspermeabilität μ_0 , die Sättigungsmagnetostriktion λ_s und der Faktor

$$K = \frac{\delta \frac{\Delta l}{l}}{\delta H} = \frac{\delta \frac{\Delta l}{l}}{\delta B} \cdot \frac{\delta B}{\delta H}$$

angegeben. Darin sind:

$$\frac{\Delta l}{l} = \text{die relative Längenänderung,}$$

$$H = \text{das angelegte äussere Magnetfeld und}$$

$$B = \text{die Magnetisierung.}$$

Ferner ist das polarisierende Feld H_0 , bei welchem K bestimmt worden ist, angegeben.

Die Zusammensetzung dieser Ferrite ist folgende:

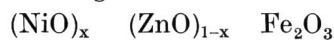


Tabelle I

x	μ_0	$\lambda_s \cdot 10^6$	$K \cdot 10^7$	H_0
1	14	26	3,0	22
0,9	20	23,5	3,0	15
0,8	35	21	3,6	10
0,7	60	18	4,0	6
0,6	90	14,5	4,75	5
0,5	140	11	5,6	4

Der Faktor K ist ein Mass für die Güte eines Schwingers, denn massgebend ist nicht die totale Magnetostriktion, sondern die pro Einheit des angelegten Feldes erreichte Verkürzung. Es lässt sich zeigen, dass eine statische Magnetostriktion $\lambda_s = 10 \cdot 10^{-6}$ genügt zur Erzielung einer grossen Schallintensität (in Wasser theoretisch bis 1000 Watt cm^{-2}).

Ausser diesen Nickel-Zink-Ferriten wurden noch andere Ferrite hergestellt, so zum Beispiel reiner Manganferrit $(\text{MnO}) \text{Fe}_2\text{O}_3$ und $(\text{NiO})_{0,25} (\text{ZnO})_{0,25} (\text{MnO})_{0,5} \text{Fe}_2\text{O}_3$. Dieser letztere Ferrit besitzt zwar einen relativ kleinen K -Faktor ($K = 2$), hat aber wesentlich kleinere Hystereseverluste als ein entsprechender Nickel-Zink-Ferrit, wodurch sich auch höhere Wirkungsgrade ergeben.

4. Der Wirkungsgrad der Ferritschwinger

Die in einem Ferritschwinger auftretenden Verluste sind von sehr verschiedenem Charakter. Im wesentlichen lässt sich unterscheiden zwischen rein magnetischen (oder elektrischen) Verlusten und solchen, die durch die Bewegung des Schwingers bedingt sind. Von jenen sind zu erwähnen: Hystereseverluste, Wirbelstromverluste, Nachwirkungsverluste und die Kupferverluste in den Wicklungen, unter diesen die magnetomechanische Hysterese und die Dämpfung infolge innerer Reibung. Eine genauere Analyse zeigt, dass die Wirbelstromverluste, Kupferverluste und die innere Reibung bei Ferriten eine sehr untergeordnete

Rolle spielen. Einen relativ kleinen Beitrag ergeben die Nachwirkungsverluste A_H

$$A_H = 5 \cdot 10^{-8} B^2 C_N / \mu$$

Die Nachwirkungsverlustkonstante C_N beträgt für einen Nickel-Zink-Ferrit mit 40 % Zn

$$C_N = 4 \cdot 10^{-3}$$

Damit werden die Nachwirkungsverluste bei einer Magnetisierung von 1000 Gauss (entspricht einer mittleren Schalleistung) und mit einer Frequenz von 30 kHz

$$A_H = 6 \cdot 10^{-2} \text{ Watt sec cm}^{-3}$$

Der Hauptanteil der Verluste sind Hystereseverluste A_H . Die Messung ergibt für den obigen Fall

$$A_N = 12 \cdot 10^{-2} \text{ Watt sec cm}^{-3}$$

Der restliche Teil der Verluste ist bedingt durch die magnetomechanische Hysterese, die in diesem Falle einen Beitrag von

$$A_{MH} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Watt sec cm}^{-3}$$

ergeben.

Der Schwinger wurde ausgemessen bei einer Eingangsleistung von 24 Watt und einer Ultraschallleistung von 18 Watt. Der totale Wirkungsgrad betrug 75 %. Der Schwinger ist in Fig. 1e abgebildet.

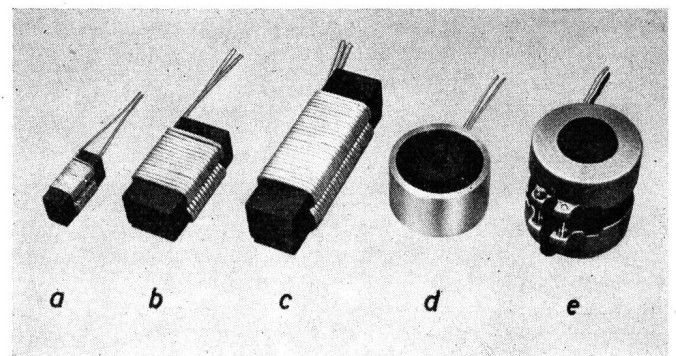


Fig. 1. Ausführungsformen von Ferritschwingern

- a) aus zusammengeklebten Ferritplatten (Resonanzfrequenz 65 kHz);
- b) gleiche Bauart (Resonanzfrequenz 40 kHz);
- c) aus einem Stück herausgearbeitet (Resonanzfrequenz 20 kHz);
- d) Stabschwinger mit topfförmigem Kraftschluss aus hochpermeablem Ferrit (Resonanzfrequenz 80 kHz);
- e) gleiche Bauart (Resonanzfrequenz 35 kHz)

Der höchste mit Ferritschwingern erreichte Wirkungsgrad betrug 94 %, welcher Wert sehr hoch liegt im Vergleich mit andern magnetostriktiven Schwingern.

5. Das Ersatzschema des Wandlers

Zu jedem elektroakustischen Wandler lässt sich ein rein elektrisches Ersatzschema angeben, was im analogen Bau der Gleichungen für elektrische Schwingkreise und mechanische Federpendel begründet ist. In der bei magnetostriktiven Schwingern anzuwendenden Analogie entspricht dem Strom eine Geschwindigkeit und der Spannung eine Kraft. (Flüssigkeitsdruck auf die Endfläche des magnetostriktiven

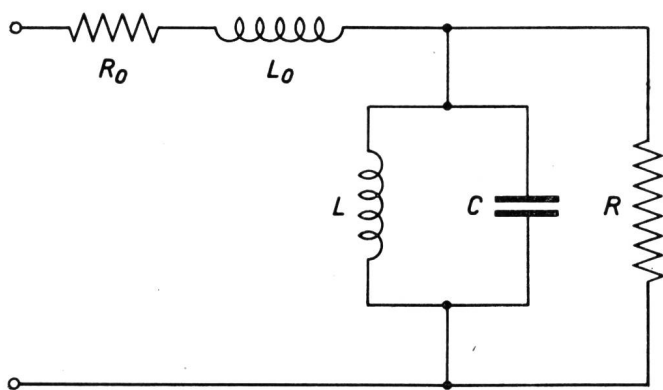


Fig. 2. Ersatzschema des magnetostruktiven Wandlers (Ausführung e in Fig. 1)

Schwingers.) Eine genauere mathematische Durchführung dieses Gedankens ergibt folgendes Ersatzschema des magnetostruktiven Schwingers (Fig. 2).

Die Resonanzfrequenz des Schwingkreises entspricht der mechanischen Eigenfrequenz des Schwingers. Der Abschlusswiderstand R ist das elektrische Äquivalent zum akustischen Strahlungswiderstand. Der in R verbrauchten Energie entspricht die abgestrahlte Schallenergie.

$$R = \frac{k_o^2}{V_w \varrho_w F} \quad k_o = \frac{2 \varnothing_o N k E \mu_\Delta \mu_o}{l}$$

Darin bedeuten:

- k_o = elektromechanischer Kopplungsfaktor
- F = strahlende Fläche
- $\varrho_w V_w$ = Schallhärte in der Flüssigkeit
- \varnothing_o = polarisierender Fluss durch den magnetostruktiven Wandler
- N = Windungszahl
- k = Magnetostruktionskoeffizient
- E = Elastizitätsmodul
- μ_Δ = reversible Permeabilität
- l = Länge des magnetostruktiven Stabes
- μ_o = $1,25 \cdot 10^{-6}$ Volt sec Amp $^{-1}$ m $^{-1}$

Für einen bestimmten Schwinger ergibt sich für den Abschlusswiderstand

$$R = 32 \Omega$$

Der experimentell bestimmte Wert stimmt innerhalb 10 % mit diesem Resultat überein.

6. Erreichbare Intensität und Schallkonzentration

Von entscheidender Bedeutung für die praktische Anwendung von Ferritschwingern ist die Frage, wie weit diese die auftretenden mechanischen Spannungen ertragen. Beim Überschreiten der Elastizitätsgrenze kommt es bei keramischem Material zum Bruch, während zum Beispiel bei Nickel lediglich eine plastische Deformation eintritt. Es lässt sich nun theoretisch zeigen, dass bei einer verfügbaren Magnetostruktion von $\lambda_s = 10 \cdot 10^{-6}$ und Abstrahlung einer ebenen Welle von der Oberfläche des Ferrites eine Intensität von 1000 Watt cm $^{-2}$ erreichbar wäre. Diese ausserordentlich hohe Leistung ist aus verschiedenen Gründen nicht erreichbar. Vor allem tritt schon bei

sehr viel kleineren Intensitäten Kavitation auf, das heisst, die Flüssigkeit reisst in der Zugphase der Welle auseinander unter Bildung von Hohlräumen. Dies bewirkt, dass trotz erhöhter Amplitude der strahlenden Fläche die abgestrahlte Leistung konstant bleibt.

Der zweite wesentliche Grund für die begrenzte erreichbare Schalleistung liegt in der Festigkeit des Materials.

Zur Abklärung dieser Frage wurden eine Anzahl Ferritstäbe der Dimension $14 \times 14 \times 60$ mm in Wasser bis zum Bruch belastet. Die Eingangshochfrequenzleistung wurde gemessen und variierte beim Bruch zwischen 60 und 120 Watt. Der tiefste Wert entspricht einer Intensität von etwa 10 Watt cm $^{-2}$. Diese Leistung wurde auch bei einem Dauerversuch über 100 Stunden erreicht, ohne dass der Ferrit zersprang.

Dieser Befund ist in guter Übereinstimmung mit den statischen Druck- und Zugversuchen, die gleichzeitig durchgeführt wurden.

Die Bruchlast bei dichtgesinterten Ferriten unter Zug beträgt im Mittel 140 kg*cm $^{-2}$, unter Druck 7500 kg*cm $^{-2}$.

Dieses Ergebnis legt es nahe, nach Mitteln zu suchen, um die Zugfestigkeit zu erhöhen. Dies wurde zunächst durch Imprägnation der Ferrite mit Kunstharzen (Marco-Resin, Araldit) versucht. Das Ergebnis war aber immer so, dass gleichzeitig mit der Erhöhung der mechanischen Festigkeit eine grosse Erhöhung der Dämpfung eintrat, so dass die Ferrite als Resonatoren nicht mehr brauchbar waren.

Eine Verbesserung kann dadurch erreicht werden, dass beim Sintern zum Beispiel PbO zugesetzt wird oder dass der vorgesinterte poröse Ferrit mit einer Bleisalzlösung getränkt und ein weiteres Mal gesintert wird. Dadurch steigert sich die mechanische Festigkeit, bleibt jedoch in der Grössenordnung von 200 kg*cm $^{-2}$.

Eine grosse Verbesserung bringt die mechanische Vorspannung der Schwinger, die die gute Druckfestigkeit ausnützt.

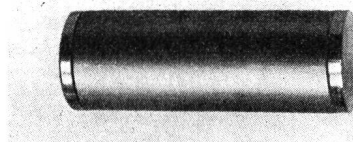


Fig. 3. Stabförmiger vorgespannter Ferritschwinger

Eine günstige Ausführung zeigt Fig. 3. Ein zentraler Stahlstab durch den röhrenförmigen Ferritschwinger nimmt den Zug auf, so dass im Ferrit nur ein wechselnder Druck, nie aber ein Zug auftritt. Die Dimensionen von Stahlstift und Stahlscheiben sind so gewählt, dass die Eigenfrequenz des Stahlteiles übereinstimmt mit der Eigenfrequenz des Ferrites. Verkittet man Stahlstift und Ferrit, so erhält man eine sehr stabile Einheit. Ein Schwinger mit den Dimen-

sionen von Fig. 3 konnte in Luft mit 50 Watt Eingangsleistung betrieben werden, ohne zu zerbrechen. Die nötige Vorspannung liegt in der Grössenordnung von 400 kg*. Diese kann zum Beispiel durch Ausnutzung des Unterschiedes der thermischen Ausdehnungskoeffizienten erzielt werden.

Die Schwingungsamplitude kann auch durch Schallkonzentration vergrössert werden. Hierzu dient ein konusförmiges Stahlstück mit exponentieller Berandung. Die Amplitude vergrössert sich um einen Faktor

$$\alpha = \frac{D_0}{D}$$

wenn D_0 und D die Durchmesser an den beiden Stabenden sind. In Fig. 4 ist eine Ausführung mit $\alpha = 10$

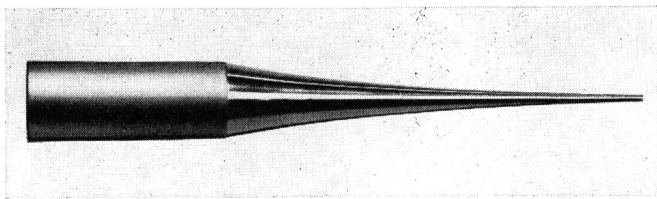


Fig. 4. Ferritschwinger mit konusförmigem Impedanztransformator aus gehärtetem Stahl

abgebildet. Die Amplitude an der Spitze beträgt $2,5 \cdot 10^{-3}$ cm bei 38 kHz, was einer Beschleunigung von über 100 000 g entspricht (g = Erdbeschleunigung).

7. Praktische Ausführungen und Anwendungen

Die Zahl der vorgeschlagenen Anwendungsmöglichkeiten des Ultraschalles ist sehr gross, dagegen ist die Zahl der realisierten Anwendungen immer noch beschränkt, nicht zuletzt wegen des teilweisen Fehlens von einfachen und betriebssicheren Lösungen zur Erzeugung des Ultraschalles. Die Anwendungen lassen sich unterscheiden in

- anwendungen, bei denen die Ausbreitung von Wellen eine Rolle spielt (Messung der Elastizitätskonstante, Materialprüfung, Echolot).
- anwendungen, bei denen die Einwirkung von Ultraschallenergie eine Rolle spielt (medizinische Anwendungen, Emulsionen, Entgasung von Flüssigkeiten; ferner in neuerer Zeit Reinigung von kleinen Formstücken und Bohren in sehr harte Materialien).

Die praktische Ausführung eines Ferritschwingers hängt ab vom Verwendungszweck. Sollen zum Beispiel in Flüssigkeiten hohe Intensitäten zur Erzeugung von starken Kavitationszonen erreicht werden, so wird man eine Form mit einer zur Wellenlänge relativ kleinen strahlenden Fläche wählen, dagegen sind für die Abstrahlung von ebenen, gerichteten Wellen relativ kleine Intensitäten bei grossen strahlenden Flächen nötig.

In Fig. 1 sind die mit a und b bezeichneten Schwinger aus Ferritplatten zusammengeklebt. Zur Vermeidung des schädlichen Einflusses der Querkon-

traktion in den Querstegen werden diese aus Ferrit mit geringer Magnetostraktion hergestellt. Als Klebemittel dient heisshärtendes Araldit. Wesentlich ist, dass die Schwinger mit grosser Präzision hergestellt werden. Wählt man für die Wicklung einen säurefest isolierten Draht (z. B. Polyäthylen), so lassen sich mit diesem Schwinger beispielsweise Säuren direkt beschallen. Eine ähnliche Ausführung zeigt Fig. 1c, jedoch ist bei diesem Schwinger die Form aus einem vollen Stück herausgearbeitet worden. Dies bedingt jedoch leistungsfähige Diamantschleifwerkzeuge.

Eine einfach herzustellende Form ist diejenige nach Fig. 1e. Ein runder Stab, der an den beiden Enden durch Ferritplatten mit ausgesparten Löchern geführt ist, wird in der Grundschiwingung (etwa 35 kHz) erregt. Der magnetische Kraftschluss wird durch diese Platten und ein Rohr aus hochpermeablem Material hergestellt. Die Antriebswicklung befindet sich zwischen Rohr und Stab. Die Ferrite für den abgebildeten Schwinger stammen von der Philips AG. Ein nach dem gleichen Prinzip für 80 kHz gebauter Schwinger ist in Fig. 1d abgebildet.

Bei allen diesen Ferriten erfolgt die Vormagnetisierung durch einen überlagerten Gleichstrom in der Antriebswicklung.

Zum Schluss sei noch der elektrische Teil kurz gestreift. Bei den Versuchen mit Leistungslautschall wurde das Signal eines Oszillators mit einem zweistufigen Breitband-Gegentakt-Verstärker von 200 Watt Ausgangsleistung verstärkt (Fig. 5). Als Ausgangstransformator dient ein Ferrittransformator mit Impedanzstufenschalter.



Fig. 5. Breitband-Gegentaktverstärker für 200 Watt Ausgangsleistung (Frequenzbereich 10–300 kHz)

Schwinger aus Ferriten wurden bereits mit Erfolg praktisch verwendet, so Schwinger mit einem Aufbau wie Fig. 1d zur Reinigung von Uhrenbestandteilen und ferner Schwinger mit Exponentialkonus (Fig. 4) für Bohrversuche in Korund.

Adresse des Verfassers: Ulrich Enz, Dipl.-Phys. ETH, Rotstrasse 30, Zürich 57.