

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 37 (1946)
Heft: 21

Artikel: Impedanzröhren für Frequenzmodulation
Autor: Klauser, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061133>

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: 16.01.2026

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

Es ist dem Entschluss der Behörden der Stadt Luzern und der Leitung des Kunstmuseums Luzern zu verdanken, dass die künstliche Beleuchtung der Räume durchgeführt werden konnte, und dass da-

durch auch dem Werk tätigen in dessen Freizeit am Abend die Ambrosiana zugänglich gemacht wurde.

Adresse der Autoren:

H. Hodel, EW der Stadt Luzern, Luzern;
E. Schneider, dipl. Ingenieur, Direktor der Lumar A.-G., Basel.

Impedanzröhren für Frequenzmodulation

Von H. Klauser, Zürich

621.396.619.23

Es wird ein Ueberblick über Wirkungsweise und Anwendung der Impedanzröhrenschaltung gegeben. Insbesondere soll ihre Verwendung für die Frequenzmodulation von Sendern untersucht werden. Es zeigt sich, dass Penthoden mit quadratischem Kennlinienverlauf und grosser mittlerer Steilheit, als steuerbare Induktivität geschaltet, die Bedingungen für verzerrungsfreie Modulation am besten erfüllen. Anhand einer Formelübersicht können Grösse und Verlauf des Frequenzhubes für die einzelnen Schaltungen berechnet werden. Die Unterdrückung der gleichzeitig auftretenden Amplitudenmodulation ist für eine bestimmte Frequenz möglich. Die Frequenzmodulation mittels Raumladungssteuerung wird am Schluss kurz erwähnt.

1. Einleitung

Es darf als bekannt vorausgesetzt werden, dass Elektronenröhren zur Erzeugung von variablen Scheinwiderständen verwendet werden. Das Anwendungsgebiet dieser «Impedanzröhren» erstreckt sich auf die Frequenzsteuerung und die automatische Scharfabstimmung von Schwingkreisen, auf das Abstimmen von Brücken in Messgeräten und die Erzeugung von negativen Induktivitäten und Kapazitäten. Als ein Spezialfall der Frequenzsteuerung kann nun die Frequenzmodulation eines Schwingkreises angesehen werden, bei der die Frequenz im Takte der Niederfrequenz gesteuert, also moduliert wird.

Die Frequenzmodulation eines Senders erfordert demnach eine von der Modulationsamplitude abhängige Veränderung der frequenzbestimmenden Grössen L und C des Steueroszillatorkreises. Dies lässt sich mit einer als steuerbare Impedanz geschalteten Röhre verwirklichen, indem diese dem Oszillatorkreis parallelgeschaltet wird. Im folgenden sollen nun Wirkungsweise und Schaltungsmöglichkeiten der Impedanzröhre, sowie die Bedingungen für verzerrungsfreie Modulation kurz untersucht werden.

2. Wirkungsweise und Ersatzschaltungen der Impedanzröhre

Die Wirkungsweise der Impedanzröhre beruht im wesentlichen darauf, dass ein phasendrehender Spannungsteiler am Steuergitter einen gegenüber der hochfrequenten Anodenwechselspannung phasenverschobenen Anodenwechselstrom erzeugt. Die auf diese Weise erzeugte Impedanz ist bei gleichbleibenden Spannungen nur von der Röhrensteilheit abhängig und kann somit durch deren Aenderung gesteuert werden.

Bei Frequenzmodulation wäre es natürlich erwünscht, eine steuerbare Reaktanz herzustellen, die keinen Verlustwinkel aufweist. Dies erfordert aber eine Phasendrehung von genau 90° , was nur für eine feste Frequenz durch Anwendung eines doppelten Drehgliedes durchführbar ist.

L'auteur donne tout d'abord un aperçu du fonctionnement et de l'utilisation du couplage à lampe de glissement, notamment pour la modulation de fréquence des émetteurs. Montées en self-induction variable, les penthodes à caractéristique quadratique et à forte pente moyenne sont les tubes les mieux appropriés à une modulation sans distorsion. Des formules permettent de déterminer la grandeur et la variation du swing de fréquence pour les différents couplages. Pour une fréquence donnée, il est possible de supprimer la modulation d'amplitude qui se produit simultanément. L'auteur termine son exposé en mentionnant brièvement la modulation de fréquence par variation de la charge spatiale.

Fig. 1 zeigt das prinzipielle Schema einer Impedanzröhre. R_1 und R_2 sind die für die Phasendrehung benötigten Widerstände, R_3 wird dargestellt durch die Anoden-Kathoden-Kapazität der Röhre.

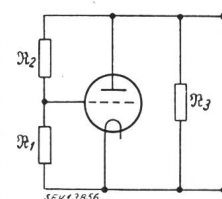


Fig. 1.

Prinzipielles Schaltschema einer Impedanzröhre

Mit Hilfe der Vierpoltheorie lässt sich der Eingangsscheinleitwert G_a der Schaltung bestimmen [1]¹⁾.

$$G_a = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{S R_1}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

Der letzte Summand in Gleichung (1) stellt den von der Röhrensteilheit S abhängigen Scheinleitwert dar. Die beiden ersten Summanden dürfen ohne weiteres vernachlässigt werden, da einerseits bei Verwendung von Penthoden der Innenwiderstand R_1 sehr gross und andererseits der durch C_{ak} dargestellte Widerstand R_3 bedeutungslos ist, da diese Kapazität der Schwingkreiskapazität parallelgeschaltet wird. Damit geht (1) über in die Form

$$G_a = \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{S R_1}{R_1 + R_2} \quad (1a)$$

wofür das in Fig. 2 gezeichnete Ersatzschema gilt. Dieses lässt sich noch weiter vereinfachen, wenn

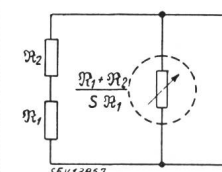


Fig. 2.

Vereinfachtes Ersatzschema der Impedanzröhrenschaltung nach Gleichung (1a)

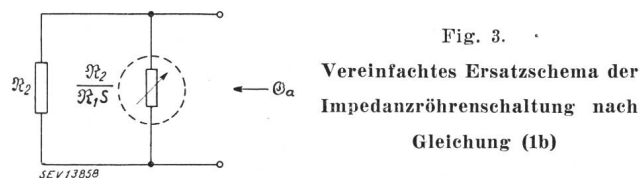
man voraussetzt, dass der Spannungsteilerwiderstand R_2 viel grösser ist als der Widerstand R_1 . Für den

¹⁾ s. Literaturverzeichnis am Schluss.

Eingangsscheinleitwert erhält man dann die einfache Beziehung

$$\mathfrak{G}_a = \frac{1}{\mathfrak{R}_2} + \frac{\mathfrak{R}_1}{\mathfrak{R}_2} S \quad (1b)$$

mit dem vereinfachten Ersatzschema Fig. 3.



aktanz, das heisst: der Phasenwinkel zwischen Anodenspannung und Anodenstrom beträgt annähernd 90°. Die Fälle I und IV ergeben eine steuerbare *Kapazität*, II und III eine steuerbare *Induktivität*. Die Fälle I und III sind zudem (im vereinfachten Ersatzschaltbild) dämpfungsarm.

Da, wie schon angedeutet, die Phasendrehung um 90° mit einfachem Drehglied nicht durchgeführt werden kann, wird unsere gesteuerte Reaktanz einen kleinen Verlustwinkel haben. Der Ersatzwiderstand der Röhre selbst zerfällt also in eine Reaktanz X_R und einen parallel dazu liegenden ohmschen Widerstand R_R , der ebenfalls steilheitsabhängig ist und bei Frequenzmodulation eine zu-

Tabelle I

Fall	Schaltschema	vereinfachtes Ersatzschema nach Fig 3	\mathfrak{G}_a nach Formel (1b)	R_p	C_R bzw. L_R
I			$j \omega C_2 (1 + R_1 S)$	∞	$C_R = C_2 R_1 S$
II			$\frac{1}{R_2} \left(1 + \frac{S}{j \omega C_1} \right)$	R_2	$L_R = \frac{C_1 R_2}{S}$
III			$\frac{1}{j \omega L_2} (1 + R_1 S)$	∞	$L_R = \frac{L_2}{R_1 S}$
IV			$\frac{1}{R_2} (1 + j \omega L_1 S)$	R_2	$C_R = \frac{L_1 S}{R_2}$

Wird abwechselungsweise einer der beiden Spannungsteilerwiderstände \mathfrak{R}_1 und \mathfrak{R}_2 reell gemacht, während für den anderen einmal eine Kapazität,

sätzliche Amplitudenmodulation verursacht. Die Tabelle II enthält den Ersatzwiderstand der Röhre allein, ohne jede Vernachlässigung.

Tabelle II

Fall	I	II	III	IV
\mathfrak{R}_1	R_1	C_1	R_1	L_1
\mathfrak{R}_2	C_2	R_2	L_2	R_2
R_R	$\frac{1 + (\omega R_1 C_2)^2}{S (\omega R_1 C_2)^2}$	$\frac{1 + (\omega R_2 C_1)^2}{S}$	$\frac{R_1^2 + (\omega L_2)^2}{S R_1^2}$	$\frac{R_2^2 + (\omega L_1)^2}{S (\omega L_1)^2}$
L_R bzw. C_R	$C_R = \frac{C_2 R_1 S}{1 + (\omega C_2 R_1)^2}$	$L_R = \frac{1 + (\omega R_2 C_1)^2}{\omega^2 R_2 C_1 S}$	$L_R = \frac{R_1^2 + (\omega L_2)^2}{\omega^2 L_2 R_1 S}$	$C_R = \frac{R_2 L_1 S}{R_2^2 + (\omega L_1)^2}$

das andere Mal eine Induktivität gesetzt wird, so ergeben sich vier verschiedene Schaltungsmöglichkeiten, die in Tabelle I zusammengestellt sind. Die vier Fälle zeigen folgendes:

Der durch die Röhre dargestellte steuerbare Scheinwiderstand ist in erster Annäherung eine Re-

3. Die Bedingungen für verzerrungsfreie Modulation

a) Die kapazitive Impedanzröhre

Bei gegebenen Schaltelementen des Phasendrehers ist die durch die Röhre erzeugte Kapazität C_R

eine lineare Funktion der Steilheit S (vgl. Tabellen I und II). Sie schaltet sich der Schwingkreis-kapazität C_0 parallel (Fig. 4).

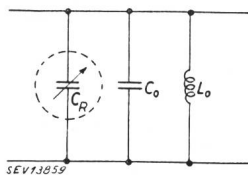


Fig. 4.
Kapazitive Impedanzröhre im Schwingkreis

Die Forderung für verzerrungsfreie Modulation besteht nun darin, dass sich die *Steilheit linear mit der Steuergitterspannung* ändern soll, was durch Aussteuerung im *quadratischen* Bereich der Kennlinie erreicht wird. Nur dann ergeben sich auch *lineare Kapazitätsänderungen*, die, wenn sie klein genug sind, in bezug auf die Grundkapazität C_0 auch *lineare Frequenzänderungen* ergeben. Der geradlinig verlaufende Teil der Steilheitskennlinie lässt sich durch die Gleichung

$$S_{\min} + S_{\max} = 2 S_0 \quad (2)$$

charakterisieren, wo S_{\min} und S_{\max} die bei der Aussteuerung erreichten Extremwerte der Steilheit bezeichnen, und S_0 die mittlere Steilheit im Arbeitspunkt bedeutet. Gleichung (2) ist somit eine allgemeine Modulationsgleichung. Durch Bildung der Resonanzbeziehungen und unter Berücksichtigung der Tatsache, dass der Frequenzhub sehr klein ist im Verhältnis zur Oszillatorfrequenz ω_0 , lässt sich die Modulationsgleichung (2) unter folgenden Bedingungen erfüllen [3]:

1. $R_2 \gg R_1$ d. h. in Worten:
2. $\Delta C_R \ll C_0$ Der Spannungsteilerwiderstand R_2
3. $C_{R\max} \ll C_0$ muss wesentlich grösser sein als R_1 .

($R_2 \sim 5 \dots 10 R_1$). Sowohl die maximale, durch die Röhre dargestellte Kapazität $C_{R\max}$, als auch die für den erforderlichen Frequenzhub erzeugte Kapazitätsänderung ΔC_R müssen klein sein im Vergleich zur Schwingkreis-kapazität C_0 .

b) Die induktive Impedanzröhre

Die durch die Röhre erzeugte Induktivität L_R schaltet sich der Kreisinduktivität L_0 parallel (Fig. 5).

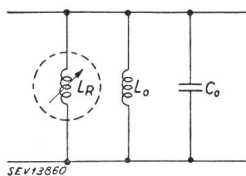


Fig. 5.
Induktive Impedanzröhre im Schwingkreis

Die Modulationsgleichung (2) ist hier unter folgenden Bedingungen erfüllbar [3]:

1. $R_2 \gg R_1$
2. $\Delta L \ll L$

Die Bedingung 1 ist dieselbe wie unter a). Die Änderung der Induktivität muss klein bleiben im Verhältnis zur Gesamtinduktivität. Eine Forderung an die Grösse der durch die Röhre dargestellten Induktivität L_R besteht hier nicht. Daraus ist ersichtlich, dass bei einer induktiven Impedanzröhre

unter Voraussetzung gleicher Modulationsverzerrungen ein grösserer Frequenzhub erreichbar ist als bei einer kapazitiven Impedanzröhre.

4. Der Frequenzhub

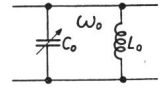
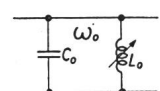
Für den Frequenzhub gelten die Gleichungen

$$\Delta f = H = \frac{f_0}{2 C_0} \Delta C_R \quad \text{kapazitive Röhre} \quad (3)$$

$$\Delta f = H = \frac{f_0}{2 L_0} \Delta L \quad \text{induktive Röhre} \quad (4)$$

In Tabelle III sind die Formeln für den Frequenzhub zusammengestellt, und zwar für kapazitive und induktive Verstimmung des Oszillatorkreises. Anhand dieser Formeln kann der Frequenzgang des Hubes sofort überblickt werden.

Tabelle III

Oszillatorkreis	Kapazitive Röhre (Fall I und IV)	Induktive Röhre (Fall II und III)
	$H = (-) \frac{\omega_0^3 L_0}{4 \pi} \Delta C_R$	$H = (-) \frac{\omega_0 L_0}{4 \pi L_{R0}^2} \Delta L_R$ ¹⁾
	$H = (-) \frac{\omega_0}{4 \pi C_0} \Delta C_R$	$H = (-) \frac{1}{4 \pi C_0 L_{R0}^2 \omega_0} \Delta L_R$ ¹⁾

¹⁾ L_{R0} bedeutet die bei der mittleren Steilheit S_0 durch die Röhre dargestellte Induktivität.

Es sind Schaltungen bekannt, die eine Konstanthaltung des Frequenzhubes weitgehend ermöglichen, worauf hier nicht eingegangen werden kann [2, 6].

5. Die Unterdrückung der Amplitudenmodulation

Unter Umständen kann es erwünscht sein, die gleichzeitig mit der Frequenzmodulation auftretende Amplitudenmodulation zu unterdrücken. Dies ist aber nur für eine feste Oszillatorfrequenz und durch Verwendung eines doppelten Phasendrehgliedes möglich. In Fig. 6 ist eine kapazitive Impedanzröhre mit doppeltem R-C-Glied dargestellt.

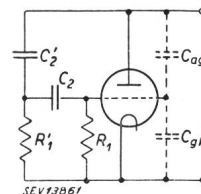


Fig. 6.
Kapazitive Impedanzröhre mit doppeltem Phasendrehglied

Die Bedingung für 90°-Phasendrehung lautet hier

$$\omega_0^2 R_1 R_1' C_2 C_2' = 1 \quad (5)$$

Bei höheren Frequenzen müssen jedoch die Röhrenkapazitäten C_{ag} und C_{gk} mitberücksichtigt werden, wodurch Gleichung (5) auf der rechten Seite noch zusätzliche Glieder erhält.

Eine weitere Möglichkeit zur AM-Kompensation bietet der «Gegentakt-Modulator», der zudem noch bedeutend grössere Frequenzhübe ergibt und somit kleinere Modulationsverzerrungen liefert [4].

6. Frequenzmodulation mit Raumladungssteuerung

Grundsätzlich kann auch die gitterspannungsabhängige Raumladungskapazität einer Elektronenröhre für die Frequenzmodulation benutzt werden. Die Raumladungskapazität ist jedoch im allgemeinen nur in engen Grenzen linear variierbar. Deshalb eignet sich diese Modulationsart nur bei höheren Frequenzen (über 100 MHz). Ein wesentlicher Vorteil ist der, dass die Oszillatorröhre selbst moduliert werden kann, was allerdings einen erheblichen Amplitudenmodulationsgrad mit sich bringt.

Literatur

- [1] *Feldtkeller, R.*: Spannungsgesteuerte Scheinwiderstände. *Telegr., Fernspr.- u. Funk-Techn.* Bd. 27(1938), Nr. 6, S. 205...210.
- [2] *Weitzenmiller, F.*: Frequenzsteuerung mit Elektronenröhren. *Funktechn. Mh.* Bd. 1940, Nr. 2, S. 17...23.
- [3] *Bohnenstengel, H.*: Die Frequenzmodulation mittels Reaktanzröhren. *Telegr., Fernspr., Funk- u. Fernseh-Techn.* Bd. 33(1944), Nr. 3, S. 41...45.
- [4] *Hund, A.*: *Frequency Modulation.* New York, 1942. S. 175 ff.
- [5] *Sturley, K. R.*: *Frequency Modulation.* S. 19 ff.
- [6] Schweizer Patent Nr. 234 678 (Kl. 120 f).

Adresse des Autors:

H. Klauser, dipl. Ing., Steinwiesstrasse 32, Zürich 7.

Neue Entwicklungen im österreichischen Wasserrecht

Von Edmund Hartig, Wien

333.93(436)

Das österreichische Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft stellte im April 1946 einen Entwurf zu einer ersten Wasserrechtsnovelle auf. Eine zweite soll im Herbst 1946 ausgearbeitet werden. Es sind dies die ersten Schritte zum Aufbau eines neuen österreichischen Wasserrechtes, das in der Hauptsache die Einführung einer planmässigen Wasserwirtschaft, eine wesentliche Erweiterung der Wassergenossenschaften und eine Neuauftellung der Wasserbücher beabsichtigt. Der Artikel erwähnt kurz die Entwicklung und den heutigen Stand der österreichischen Wasserwirtschaft und bespricht die rechtlichen Fragen und Umstellungsprobleme, die sich bei der Einführung eines neuen Wasserrechtes ergeben.

Le ministère autrichien de l'agriculture et des forêts a établi, en avril 1946, un projet d'une première série de nouvelles lois concernant les droits d'eau. Une seconde série de lois sera établie en automne. Il s'agit des premières mesures prises en vue de l'établissement d'une nouvelle législation autrichienne sur les forces hydrauliques, qui vise à régler l'économie hydraulique de l'Autriche, à accroître l'importance des sociétés coopératives de force hydraulique et à remanier les registres des droits d'eau. M. Hartig décrit brièvement l'évolution de l'économie hydraulique autrichienne et l'état actuel de celle-ci, puis s'occupe des questions juridiques et des problèmes de reconversion soulevés par l'introduction d'une nouvelle législation des forces hydrauliques.

Das erste grosse Werk österreichischer Wasserrechtsgesetzgebung ist über 70 Jahre, davon ein halbes Jahrhundert hindurch überhaupt unverändert, bestehen geblieben. Es war eine gemeinsame Schöpfung von Staat und Kronländern (österreichisches Reichsgesetz, betreffend die der Reichsgesetzgebung vorbehaltenen Bestimmungen des Wasserrechtes, 1869, und Landesgesetze über Benützung, Leitung und Abwehr der Gewässer, 1870 bis 1873). Dem österreichischen Bundes-Wasserrechtsgesetz vom 19. Oktober 1934 war eine ähnlich lange Geltungsdauer nicht beschieden. Eine kleinere Novellierung im Sommer 1945, die hauptsächlich für Bauvorhaben von besonderer Bedeutung eine Bevorzugung und ein bevorzugtes Verfahren festlegt, wie dies schon vorher durch Vorschriften ausserhalb des Wasserrechtsgesetzes der Fall gewesen ist, soll in diesem Zusammenhang gar nicht weiter hervorgehoben werden. Ende April 1946 jedoch hat das österreichische Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft eine wesentlich umfangreichere Novelle allen beteiligten Kreisen zur Stellungnahme übermittelt und hiebei für Herbst oder Winter 1946 noch eine zweite Wasserrechtsnovelle angekündigt.

Dem Bundes-Wasserrechtsgesetz von 1934 geschähe Unrecht, wollte man es deshalb für ein schlechtes oder rückständiges Werk halten. Es wurde lange und gründlich vorbereitet, kam in vollem Einvernehmen mit den Bundesländern zustande, hat die reichen Erfahrungen einer 60jährigen Judikatur sowie die technischen Fortschritte sorgfältig verwertet und ist darum bei seinem Erscheinen durchwegs als ein völlig modernes, allen Wünschen

entsprechendes Gesetz lebhaft begrüsst und anerkannt worden. Wenn trotzdem schon nach 12 Jahren eine Aenderung in grossem Ausmasse erfolgen muss, hängt dies mit der Absicht zusammen, eine grundsätzliche Umstellung auf planmässige Wasserwirtschaft und die wesentliche Ausgestaltung und Erweiterung der Wassergenossenschaften zu erreichen. Diesen beiden hauptsächlichsten Bestrebungen gesellt sich neben einigen zeitbedingten kleineren Änderungen die Absicht hinzu, die Wasserbücher auf eine breitere, tragfähige Grundlage zu stellen.

Es sind also im wesentlichen wirtschaftliche Erwägungen, die für die Erneuerung des Wasserrechtsgesetzes massgebend sind, Erwägungen, deren zwingende Notwendigkeit schon durch einen flüchtigen Vergleich zwischen dem Oesterreich vor zehn Jahren und dem heutigen Oesterreich offenkundig wird. Damals hatte eine langjährige wirtschaftliche Depression ihren Tiefpunkt erreicht, und es war nicht abzusehen, wann eine fühlbare Belebung eintreten würde. Wasser war so gut wie überall in Hülle und Fülle vorhanden und die Nachfrage nach Wasserkraft wurde nicht nur durch den schlechten Geschäftsgang von Industrie und Gewerbe, sondern auch dadurch unterbunden, dass polnische, böhmische und reichsdeutsche Kohle im Wettbewerb um den österreichischen Markt zu Bedingungen erhältlich waren, mit denen Oesterreichs weisse Kohle nicht überall konkurrieren konnte. Namentlich in den stärker bevölkerten östlichen Gebieten waren Industrie und Landwirtschaft, Haushaltung und Bahnen, zum Teil sogar die Elektrizitätserzeugung selbst, fast ausschliesslich oder doch überwiegend