**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 65 (1974)

**Heft:** 5

**Artikel:** Optimale Wahl der Signalfrequenz für Gleisstromkreise bei 16 2/3-Hz-Traktion

**Autor:** Hofstetter, E.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-915365

**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:** 10.07.2025

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

# Optimale Wahl der Signalfrequenz für Gleisstromkreise bei $16^2/_3$-Hz-Traktion

Von E. Hofstetter

656.256.3

## 1. Einleitung

Gleisstromkreise dienen der automatischen Frei- und Belegtmeldung von Gleisabschnitten und bilden damit die Grundlage für den Betrieb moderner Eisenbahnsicherungsanlagen. Das Prinzip des Gleisstromkreises ist recht einfach: Die beiden voneinander isolierten Schienen des zu überwachenden Gleisabschnittes werden als Zweidraht-Übertragungssystem zwischen einen Sender S (Fig. 1) und einen Empfänger E geschaltet. Steht ein Fahrzeug in dem zu überwachenden Abschnitt, so wird die Signalübertragung vom Sender auf den Empfänger unterbunden, und damit die Belegung des Abschnittes in einem Ruhestromsystem angezeigt.

Da bei elektrischer Traktion das Gleis als Rückstromleiter dient, ist bei der Signalübertragung des Gleisstromkreises mit einem beträchtlichen Störpegel zu rechnen. Für eine zuverlässige und sichere Ausscheidung von Nutz- und Störsignal am Gleisstromkreis ist daher die Wahl der Signalfrequenz von entscheidender Bedeutung. Diese Wahl hängt aber neben dieser Rücksicht auf die Traktionsart auch von den sicherungstechnischen Bedingungen an den Gleisstromkreis, von der zulässigen Spannung am Gleis und von der verfügbaren Signalleistung ab.

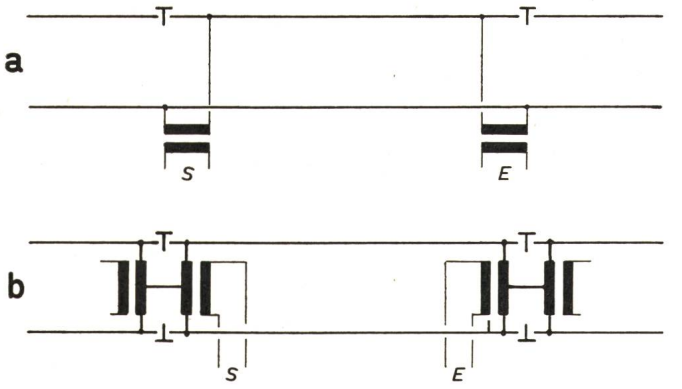


**Fig. 1 Einschienig (a) und zweischienig (b) isoliertes Gleis**
*S* Sender *E* Empfänger

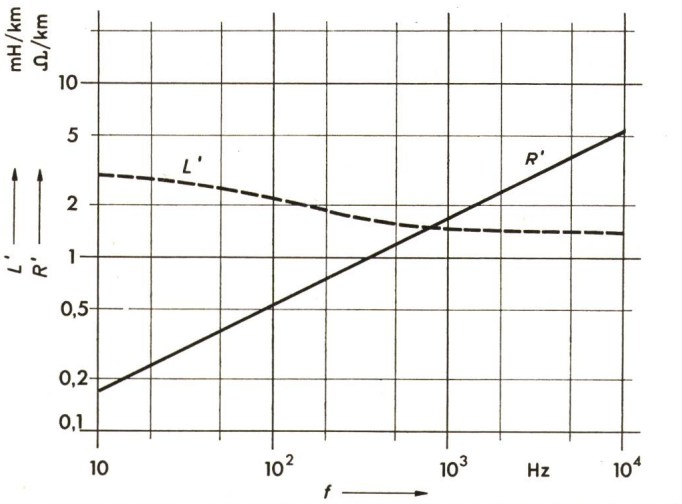


**Fig. 2 Widerstandsbelag $R'$ und Induktivitätsbelag $L'$ des Gleises in Funktion der Frequenz $f$**

## 2. Voraussetzungen und Bedingungen

### *2.1 Gleisparameter*

Die Forschungs- und Versuchsanstalt ORE des Internationalen Eisenbahnverbandes UIC hat am Gleis als Übertragungsleitung umfangreiche Messungen durchgeführt. Als Hauptresultat dieser Messungen sind in Fig. 2 der Widerstandsbelag $R'$ und der Induktivitätsbelag $L'$ der Gleisschleife als Funktion der Frequenz dargestellt. Beide Werte sind infolge der Stromverdrängung in der ferromagnetischen Schiene stark frequenzabhängig. Die Kapazität der Schienen gegeneinander ist so klein, dass sie für die meisten Belange bis zu einer Signalfrequenz von mindestens 10 kHz vernachlässigt werden darf.

### *2.2 Bedingungen an den Gleisstromkreis*

In den «Grundsätzen für die Ausbildung elektrischer Apparate zu Eisenbahnsicherungsanlagen» des Eidgenössischen Amtes für Verkehr und der Generaldirektion SBB vom 29. Dezember 1972 sind die Bedingungen an Gleisstromkreise folgendermassen definiert:

«Die Stromkreise sind so zu dimensionieren, dass sie unter folgenden Bedingungen einwandfrei arbeiten:

a) minimaler Bettungswiderstand auf Stationsgleisen 1,5 Ωkm
b) minimaler Bettungswiderstand auf Streckengleisen 2,5 Ωkm
c) maximaler Bettungswiderstand in beiden Fällen unendlich

Dabei dürfen folgende Werte der Shuntempfindlichkeit nicht unterschritten werden:

a) bei Weichen und kurzen Isolierabschnitten unter 300 m Länge 1,0 Ω
b) bei Isolierabschnitten, die länger sind als 300 m 0,5 Ω»

Das Gleisbett kann für die beiden Schienen als Übertragungsleitung einen recht schlechten Isolator ergeben. Die «Grundsätze» setzen daher Grenzwerte für den Isolations- oder «Bettungswiderstand» zwischen den beiden Schienen eines Gleises. Der Minimalwert wird dabei für Stationsgleise infolge der grösseren Verschmutzung durch Bremsstaub tiefer angegeben als für Streckengleise.

In der Übertragungstechnik wird zur Vereinfachung der Berechnung nicht mit dem Isolationswiderstand $R$, sondern mit dessen Reziprokwert $G = 1/R$, mit dem Leitwert, gearbeitet. Bei den Grenzen $\infty$ und 1,5 bzw. 2,5 Ωkm für den Bettungswiderstand nach den Grundsätzen ergeben sich für den Ableitungsbelag $G'$ (auf Längeneinheit bezogener Ableitwert $G$)

- für Stationsgleis: $G' = 0...0{,}67$ S/km
- für Streckengleis: $G' = 0...0{,}4$ S/km.

Die Bedingung der Shuntempfindlichkeit in den «Grundsätzen» bedeutet, dass ein Nebenschluss durch Fahrzeugachsen von 1,0 Ω beziehungsweise 0,5 Ω noch sicher als Gleisbelegung angezeigt werden muss.

### *2.3 Übertragungseigenschaften des Gleises*

Mit den Messwerten über den Widerstandsbelag $R'$, mit der aus dem Induktivitätsbelag $L'$ abgeleiteten Reaktanz $X' = \omega L'$ und mit der maximalen Bettungsableitung $G'$ nach den Bedingungen lässt sich der Übertragungsbelag $\gamma = \alpha + j\beta$ berechnen mit seinen Bestandteilen:

Dämpfungsbelag $\alpha = \sqrt{\tfrac{1}{2} G' (\sqrt{R'^2 + X'^2} + R')}$

und

Phasenbelag $\beta = \sqrt{\tfrac{1}{2} G' (\sqrt{R'^2 + X'^2} - R')}$

Für die Wellenimpedanz ergibt sich

$$Z_w = \sqrt{\frac{R' + jX'}{G'}} = \frac{\alpha + j\beta}{G'}$$

und als Betrag davon

$$|Z_w| = \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{G'}$$

$\alpha$, $\beta$ und $|Z_w|$ sind in Fig. 3 als Funktion der Frequenz für $G' = 0{,}4$ S/km (Streckengleis) und $G' = 0{,}67$ S/km (Stationsgleis) angegeben.

*2.4 Ersatzschema des Gleisstromkreises*

Die Abschlusstransformatoren des Gleisstromkreises nach Fig. 1 dienen der galvanischen Trennung und der Impedanzanpassung zwischen Gleis und Kabel. Wenn alle Werte auf das Gleis bezogen werden (Transformatorübersetzung 1 : 1), so ergibt sich für den Gleisstromkreis ein Ersatzschema nach Fig. 4.

In diesem Schema ist der Sender als Wechselspannungsquelle mit der Spannung $U_0$ dargestellt. In Serie zu dieser Quelle ist der Vorwiderstand $R_1$ geschaltet, der ein Kurzschliessen des Gleises durch die Fahrzeugachsen ohne Überlastung der Sendespannungsquelle ermöglicht. Der Empfänger ist in Fig. 4 mit seinem Eingangswiderstand $R_2$ angegeben. Die Spannungen am Gleis sind $U_1$ auf der Sende- und $U_2$ auf der Empfangsseite.

Für den Gleis-Vierpol mit

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

gelten bei $G \neq 0$ und mit $l$ = Abschnittslänge:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_w \sinh \gamma l \\ (1/Z_w) \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix}$$

Bei $G = 0$ reduziert sich die Vierpolmatrix auf:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & (R' + jX')\, l \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## 3. Sicherungstechnisch bedingte Wahl der Signalfrequenz

*3.1 Minimal erforderliche Sendespannung*

Bei gegebener Sendespannung $U_0$ ist die Empfangsspannung $U_2$ dann am kleinsten, wenn die Bettungsableitung $G'$ ihren Maximalwert, das heisst $G' = 0{,}4$ S/km für Streckengleis oder $G' = 0{,}67$ S/km für Stationsgleis erreicht. Bei nicht belegtem Gleis ist dann der Zusammenhang zwischen $U_0$ und $U_2$ gegeben als:

$$U_0/U_2 = (1 + R_1/R_2) \cdot \cosh\gamma l + (R_1/Z_w + Z_w/R_2) \sinh\gamma l$$

Beim üblichen, symmetrischen Abschluss mit

$$R_1 = R_2 = R_a$$

wird daraus:

$$U_0/U_2 = 2 \cosh\gamma l + (R_a/Z_w + Z_w/R_a) \sinh\gamma l$$

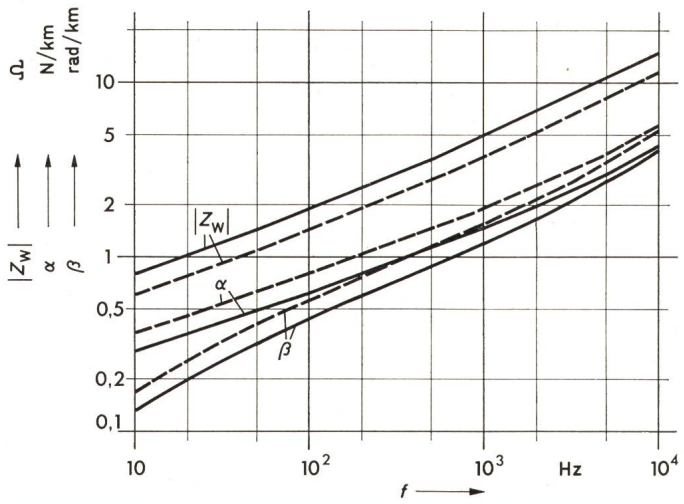


**Fig. 3** **Wellenimpedanz $|Z_w|$, Dämpfungsbelag $\alpha$ und Phasenbelag $\beta$ des Gleises in Funktion der Frequenz $f$**

——— bei $G' = 0{,}4$ S/km (Streckengleis)

– – – – bei $G' = 0{,}67$ S/km (Stationsgleis)

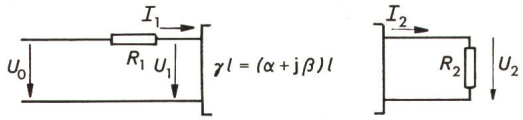


**Fig. 4** **Ersatzschema eines Gleisstromkreises**

$\alpha$ Dämpfungsbelag des Gleises

$\beta$ Phasenbelag des Gleises

$\gamma$ Übertragungsbelag des Gleises

Weitere Bezeichnungen siehe im Text

Bei freiem Gleis muss die Sendespannung $U_0 = U_{0\,\min}$ mindestens so gross sein, dass auf der Empfangsseite die Spannung $U_2$ den Anzugswert des Empfängers $U_2 = U_{2\,an}$ erreicht, so dass der oben gegebene Ausdruck als Grenze für den Quotienten $U_{0\,\min}/U_{2\,an}$ betrachtet werden kann.

*3.2 Maximal zulässige Sendespannung*

Die Bedingung über die Shuntempfindlichkeit nach Abschnitt 2.2 bedeutet, dass eine Belegung des Gleises mit dem Grenzwert $R_s$ der Shuntempfindlichkeit (0,5 Ω oder 1,0 Ω) nur auf eine Empfangsspannung $U_2$ führen darf, die den Abfallwert des Empfängers $U_{2ab}$ nicht überschreitet. Die Empfangsspannung $U_2$ ist aber offenbar bei fehlender Bettungsableitung $G' = 0$ am grössten.

Berechnet man $U_0/U_2$ als Funktion des Ortes der Gleisbelegung mit $R_s$, so stellt man fest, dass $U_0/U_2$ bei Abschluss mit $R_1 = R_2 = R_a$ für die Belegung in der Abschnittsmitte ein Maximum erreicht und für die Belegung an den Abschnittsenden minimal und gleich gross wird. Für die Berechnung der maximal zulässigen Sendespannung $U_{0\,\max}$ ist daher die Belegung an den Abschnittsenden massgebend. Für diese Fälle wird

$$U_{0\,\max}/U_{2ab} = 1 + (1/R_s + 1/R_a) \cdot (R_a + (R' + jX')\, l)$$

*3.3 Zulässiger Schwankungskoeffizient*

Als Quotient der Resultate aus den Abschnitten 3.1 und 3.2 ergibt sich:

$$(U_{0\,\max}/U_{2\,ab})/(U_{0\,\min}/U_{2\,an}) = (U_{0\,\max}/U_{0\,\min}) \cdot (U_{2\,an}/U_{2\,ab})$$

Darin bedeuten:

$U_{0\,\max}/U_{0\,\min} = \mu$ = Schwankung der Sendespannung

$U_{2\,an}/U_{2\,ab} = q$ = Anzug/Abfall-Verhältnis des Empfängers

Beide Koeffizienten $\mu$ und $q$ erreichen im Idealfall den Wert 1. Für die Spannungsquelle bedeutet dies eine vollkommene Stabilisierung, für den Empfänger die theoretische Grenze des Anzug-Abfall-Verhaltens.

Für den totalen Schwankungskoeffizienten $\mu q$ gilt:

$$\mu q = \frac{1 + (1/R_s + 1/R_a) \cdot [R_a + (R' + j X') l]}{2 \cosh \gamma l + (R_a/Z_w + Z_w/R_a) \sinh \gamma l}$$

Für die Berechnung von $\mu q$ sind ausser $R_a$ alle Parameter bekannt. Zur Erzielung einer optimalen Leistungsübertragung vom Sender auf den Empfänger bei grösster Bettungsableitung sollte mit dem Betrag der Wellenimpedanz

$$R_a = | Z_w |$$

abgeschlossen werden. $| Z_w |$ erreicht aber bei tiefen Frequenzen nach Fig. 3 Werte, die nahe bei der geforderten Shuntempfindlichkeit $R_s = 0{,}5\ \Omega$ oder $1{,}0\ \Omega$ liegen.

Der Abschluss mit $Z_w$ stellt daher bei tiefen Signalfrequenzen zu enge Grenzen für die Realisierbarkeit des Gleisstromkreises. Für $l = 0$ wäre beispielsweise

$$\mu q = 1 + \tfrac{1}{2} R_a/R_s$$

was bei $R_a = 1{,}0\ \Omega$ und $R_s = 1{,}0\ \Omega$ den totalen Schwankungskoeffizienten auf

$$\mu q \leqq 1{,}5$$

begrenzen würde.

Damit auch bei tiefen Signalfrequenzen der Gleisstromkreis annehmbare Eigenschaften erhält, muss dort auf den leistungsoptimalen Abschluss mit $R_a = | Z_w |$ verzichtet werden. Für die Berechnung von $\mu q$ wurde daher für den Abschluss der grössere Wert von

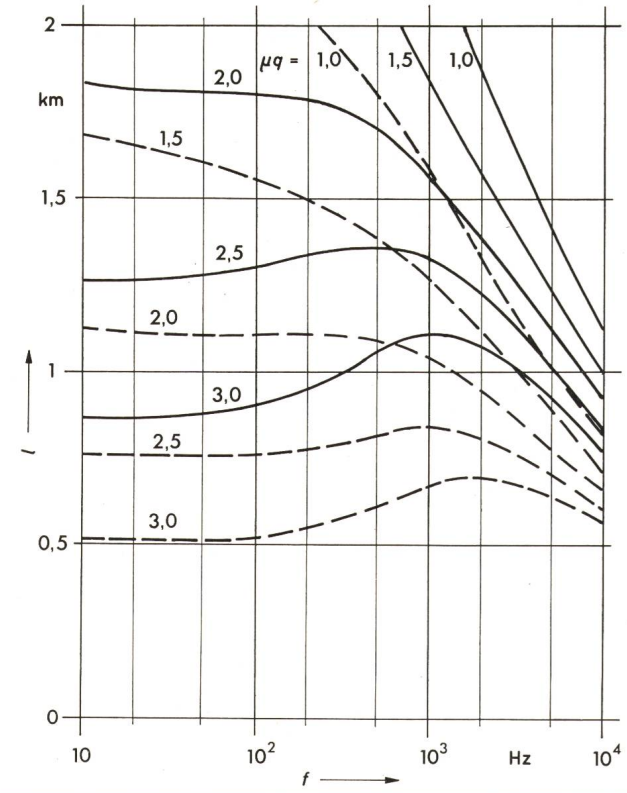


**Fig. 5 Aus sicherungstechnischen Gründen zulässige Abschnittslängen $l$ in Funktion der Signalfrequenz $f$**

——— bei $G' = 0{,}4$ S/km (Streckengleis)

– – – – bei $G' = 0{,}67$ S/km (Stationsgleis)

Weitere Bezeichnungen siehe im Text

$$R_a = | Z_w | \text{ oder } R_a = 4{,}0\ \Omega$$

gewählt. In Fig. 5 ist als Resultat einer solchen Berechnung die zulässige Abschnittslänge als Beurteilungskriterium zur Frequenzwahl bei vorgegebenen totalen Schwankungskoeffizienten $\mu q$ dargestellt.

Bei der Beurteilung der Werte der Fig. 5 ist zu berücksichtigen, dass $\mu q = 1{,}5$ für die praktische Realisierung der Apparate schon einen recht tiefen Wert bedeutet, da die Stabilisierung der Sendespannung mit signaltechnischer Sicherheit garantiert werden muss, denn ein fehlerhaftes Ansteigen der Sendespannung würde auf eine Verschlechterung der Shuntempfindlichkeit führen. In analogem Sinn gilt für den Empfänger, dass die Abfallspannung $U_{2ab}$ nicht unter den vorgegebenen Wert sinken darf.

Aus dem Verlauf der zulässigen Abschnittslänge nach Fig. 5 ist zu entnehmen, dass für $\mu q \leqq 1{,}5$ die Signalfrequenz möglichst tief gewählt werden sollte. Bei $\mu q = 2$ sind die Abschnittslängen bis 300 Hz Signalfrequenz praktisch konstant. Ab $\mu q \geqq 2{,}5$ sind Optimalwerte der Signalfrequenz bei 500 ... 2000 Hz erkennbar.

## 4. Leistungsbedingte Wahl der Signalfrequenz

Da die Sendeenergie gemäss Abschnitt 3.3 vorzugsweise aus einer stabilisierten Spannungsquelle bezogen werden soll, die aber für den Eisenbahnbetrieb aus naheliegenden Gründen unterbruchslos zur Verfügung stehen muss, spielt der Leistungsbedarf für den Gleisstromkreis eine wesentliche Rolle.

Aus Abschnitt 3.1 ist die minimale Sendespannung über $U_{0\,min}/U_{2\,an}$ bekannt. Bei gegebenem Anzugswert auf der Empfangsseite $U_{2\,an}$ kann somit die Kurzschluss-Sendeleistung bei belegtem Gleis berechnet werden als

$$P_{0\,min} = U_0^2{}_{min}/R_a$$

Die Empfangs-Anzugsspannung $U_{2\,an}$ muss bei höchster Bettungsableitung und freiem Gleis gerade noch erreicht werden. Sie entspricht daher der minimalen Empfangsspannung für den nicht belegten Gleisstromkreis. Für eine zuverlässige Erfassung der Belegung durch die Fahrzeugachsen [1][1]) darf dieser Wert nicht zu klein gewählt werden. Die in Abschnitt 2.2 erwähnten Vorschriften enthalten darüber keine Angaben. Aus der Literatur [2] ist aber bekannt, dass 1,0 V Empfangsspannung nicht unterschritten werden soll.

Mit $U_{2\,an} = 1$ V, mit $U_{0\,min}/U_{2\,an}$ gemäss Abschnitt 3.1 und mit Abschlusswiderständen nach Abschnitt 3.3 ergeben sich bei Kurzschluss-Sendeleistungen $P_{0\,min} = 3$, 10 oder 30 W zulässige Abschnittslängen nach Fig. 6. Da die maximale Sendespannung nach Definition aus Abschnitt 3.3 $\mu U_{0\,min}$ beträgt, kann die Kurzschluss-Sendeleistung bei höchster Sendespannung bis $\mu^2 P_{0\,min}$ ansteigen.

Die Sendeleistung ergibt als Auswahlkriterium keine optimale Signalfrequenz, tiefe Werte der Frequenz werden aber infolge der günstigeren Übertragungseigenschaften des Gleises bevorzugt.

## 5. Durch Berührungsspannung am Gleis gegebene Signalfrequenz

Aus Gründen der Unfallverhütung soll die Berührungsspannung am Gleis nicht zu hoch werden. Ohne besondere Vorschrift in dieser Beziehung kann die Kleinspannungsgrenze von 50 V als zulässiger Wert angenommen werden.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Die Spannung $U_1$ am sendeseitigen Ende des Gleisabschnittes (Fig. 4) wird bei freiem Gleis und $G' = 0$ am grössten. Als Beziehung zur Sendespannung $U_0$ gilt dann:

$$\frac{U_0}{U_1} = \frac{2\,R_a + (R' + \mathrm{j}\,X')\,l}{R_a + (R' + \mathrm{j}\,X')\,l}$$

Mit der Grenze $U_1 = 50$ V lässt sich damit die maximale Sendespannung $U_{0\,\max}$ angeben. Andrerseits ist $U_{0\,\min}/U_{2\,\mathrm{an}}$ aus Abschnitt 3.1 und $U_{0\,\min}$ für $U_{2\,\mathrm{an}} = 1$ V aus Abschnitt 4. bekannt. Für die Schwankung $\mu$ der Sendespannung lässt sich daraus ableiten:

$$\mu = \frac{U_{0\,\max}}{U_{0\,\min}} = \frac{U_1}{U_{2\,\mathrm{an}}} \cdot \frac{\sqrt{\dfrac{(2\,R_a + R'\,l)^2 + (X'\,l)^2}{(R_a + R'\,l)^2 + (X'\,l)^2}}}{2\cosh\gamma\,l + (R_a/Z_w + Z_w/R_a)\sinh\gamma\,l}$$

$U_1 = 50$ V und $U_{2\,\mathrm{an}} = 1$ V eingesetzt ergeben für $\mu = 1$ oder 2 zulässige Abschnittslängen nach Fig. 7.

Die Grenzen, welche durch die Berührungsspannung am Gleis gesetzt werden, begünstigen ebenfalls tiefe Frequenzen. Allerdings tritt diese Beschränkung hinter den leistungs- und sicherungstechnisch bedingten Grenzen zurück.

## 6. Beeinflussung durch Traktionsströme

Die Rückwirkung der Traktion auf den Gleisstromkreis hat einen entscheidenden Einfluss auf die Wahl der Signalfrequenz. Bei der Ableitung eines entsprechenden Auswahlkriteriums müssen aber gewisse Annahmen getroffen werden, die weniger gut fundiert sind als die Grundlagen zu den Abschnitten 3 bis 5. So ist beispielsweise als wesentliche Grösse das Oberwellenspektrum des Traktionsstromes nicht genügend genau bekannt, oder es müssen gewisse Annahmen darüber getroffen werden, wie gut im Empfänger Nutz- und Störsignale voneinander getrennt werden können. Bei der Beurteilung der Resultate dieses Abschnittes sind daher die Unsicherheiten der Voraussetzungen zu berücksichtigen.

### *6.1 Beeinflussungsspannung am isolierten Abschnitt*

Der isolierte Gleisabschnitt bildet eine ausgedehnte Empfangsschleife für magnetische Wechselflüsse, die durch das Traktionssystem verursacht werden. Beim einschienig isolierten Abschnitt ist der nächstliegende und darum entscheidende stromführende Leiter die Rückstromschiene des eigenen Abschnittes. Sind $R'$ und $L'$ Widerstands- und Induktivitätsbelag der Gleisschleife gemäss Abschnitt 2.3, so hat der Rückstrom $I$ durch die Rückleitungsschiene im Abschnitt als induzierte Spannung und als Spannungsabfall am Längswiderstand der Schiene eine Spannung von

$$\tfrac{1}{2}\,I\sqrt{R'^2 + X'^2}\;l$$

zur Folge.

Für den Gleisstromkreis interessiert die dadurch hervorgerufene Störspannung an den Abschlusswiderständen $R_a$. Diese Spannung ist dann am grössten, wenn die Bettungsableitung verschwindet, also für $G' = 0$. In diesem Fall ist die Rückwirkungsspannung nur auf die Impedanz der Schleife $(R' + \mathrm{j}X')\,l$ und die beiden Abschlusswiderstände $R_a$ belastet, was auf einen Schleifenstrom von

$$\frac{\tfrac{1}{2}\,I\sqrt{R'^2 + X'^2}\;l}{2\,R_a + (R' + \mathrm{j}\,X')\,l}$$

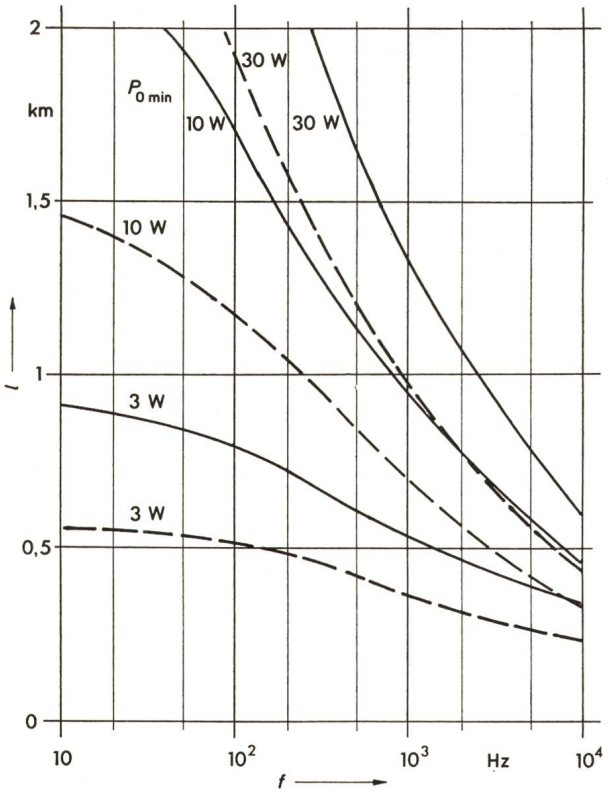


**Fig. 6** **Bei gegebenen Kurzschluss-Sendeleistungen $P_{0\,\min}$ mögliche Abschnittslängen $l$ in Funktion der Signalfrequenz $f$**

——— bei $G' = 0{,}4$ S/km (Streckengleis)
– – – – bei $G' = 0{,}67$ S/km (Stationsgleis)

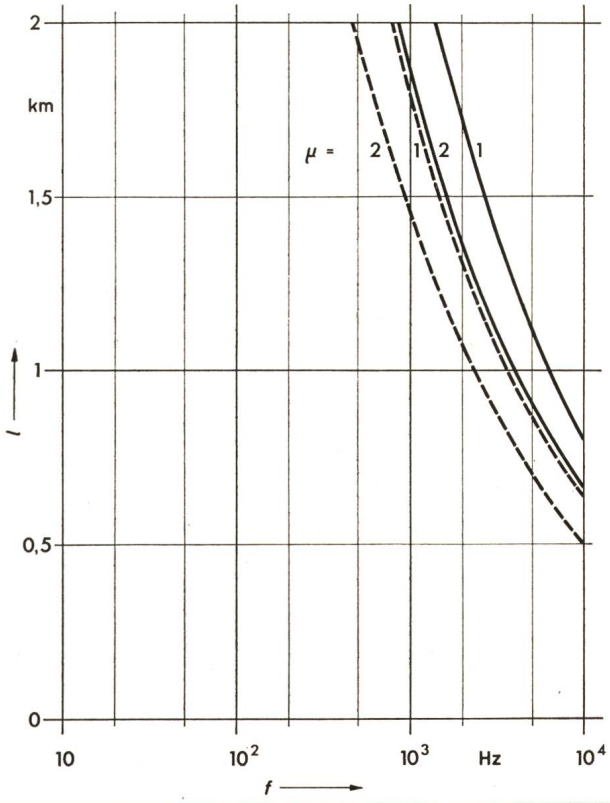


**Fig. 7** **Bei 50 V Berührungsspannung am Gleis zulässige Abschnittslänge $l$ in Funktion der Signalfrequenz $f$**

——— bei $G' = 0{,}4$ S/km (Streckengleis)
– – – – bei $G' = 0{,}67$ S/km (Stationsgleis)
$\mu$ Schwankung der Sendespannung

führt. An den beiden Abschlusswiderständen $R_a$ entsteht dadurch je eine Störspannung $U_s$ von:

$$U_s = \tfrac{1}{2} I \frac{R_a \sqrt{R'^2 + X'^2}\, l}{\sqrt{(2 R_a + R' l)^2 + (X' l)^2}}$$

Beim zweischienig isolierten Abschnitt fliesst der Traktionsstrom durch beide Schienen des Gleises. Bei idealer Symmetrie wird durch diesen Strom im eigenen Abschnitt keine Störspannung hervorgerufen, dagegen ist mit induzierten Spannungen von andern Traktionsstromleitern zu rechnen. Der nächste solche Leiter ist bei Doppelspur das Nachbargleis. Zwischen diesem Nachbargleis und der isolierten Gleisschleife beträgt der Gegeninduktivitätsbelag $M' = 0{,}07$ mH/km. Der Strom $I$ im Nachbargleis wird also eine Spannung $I \omega M' l$ induzieren und an den Abschnittsenden eine Störspannung

$$U_s = I \frac{R_a \omega M' l}{\sqrt{(2 R_a + R' l)^2 + (X' l)^2}}$$

verursachen.

Die angegebenen Störspannungen können entsprechend dem Oberwellenanteil $I\nu$ des Stromes $I$ und der Frequenzabhängigkeit von $R'$, $X'$ und $\omega M'$ in ein Störspannungs-Frequenzgemisch aufgeteilt werden.

### *6.2 Oberwellengehalt des Traktionsstromes*

Aus verschiedenen Quellen [3; 4; 5; 6; 7; 8] ist in Fig. 8 der grösste Oberwellengehalt, bezogen auf eine $16^2/_3$-Hz-Grundwelle als Funktion der Oberwellenfrequenz zusammengefasst. Dabei sind allerdings die geraden Oberwellen weniger gut definiert als die ungeraden, da gerade Oberwellen vorwiegend auf unerwünschte Asymmetrien der Aussteuerung von Stromrichterfahrzeugen und auf transiente Vorgänge bei raschen Aussteuerungsänderungen zurückzuführen sind.

Bei der Berechnung der Oberwellenstörspannung am Gleisstromkreis ist zu bedenken, dass die Traktions-Grundfrequenz $f_1$ nicht unbedingt stabil ist, sondern um einen Betrag $\pm \Delta f$ schwanken kann. Infolge dieser Schwankung bleibt zwischen der Oberwelle mit der Ordnungszahl $\nu$ und jener der Ordnungszahl $\nu + 2$ eine Frequenzlücke von

$$2 f_1 \left(1 - \frac{\Delta f}{f_1} (\nu + 1)\right)$$

als kleinster Abstand zwischen zwei ungeraden Oberwellen.

Die Lücke zwischen aufeinanderfolgenden Oberwellen ist dagegen nur

$$f_1 \left[1 - \frac{\Delta f}{f_1} (2\nu + 1)\right]$$

Diese Lücken zwischen zwei ungeraden oder zwischen allen Oberwellen nehmen daher vom Ausgangswert 33 Hz, beziehungsweise $16^2/_3$ Hz aus mit steigender Ordnungszahl $\nu$ ab, bis sie schliesslich ganz verschwinden. Für $\Delta f/f_1 = 3\,\%$ sind diese Fenster zwischen ungeraden Oberwellen ab $\nu = 33$ oder 550 Hz, zwischen sämtlichen Oberwellen schon ab $\nu = 17$ oder 285 Hz geschlossen. Bei der Angabe von $\Delta f/f_1$ ist nicht der Normalfall des Verbundbetriebes im Traktionsnetz massgebend, sondern der im ungünstigsten Fall noch mögliche Inselbetrieb. Die Annahme $\Delta f/f_1 = 3\,\%$ dürfte daher für $16^2/_3$-Hz-Netze der Wirklichkeit entsprechen.

Die Breite der Oberwellenlücke gibt einen Hinweis darauf, ob eine Ausfilterung zwischen Oberwellenbeeinflussung und Signalfrequenz des Gleisstromkreises überhaupt möglich ist.

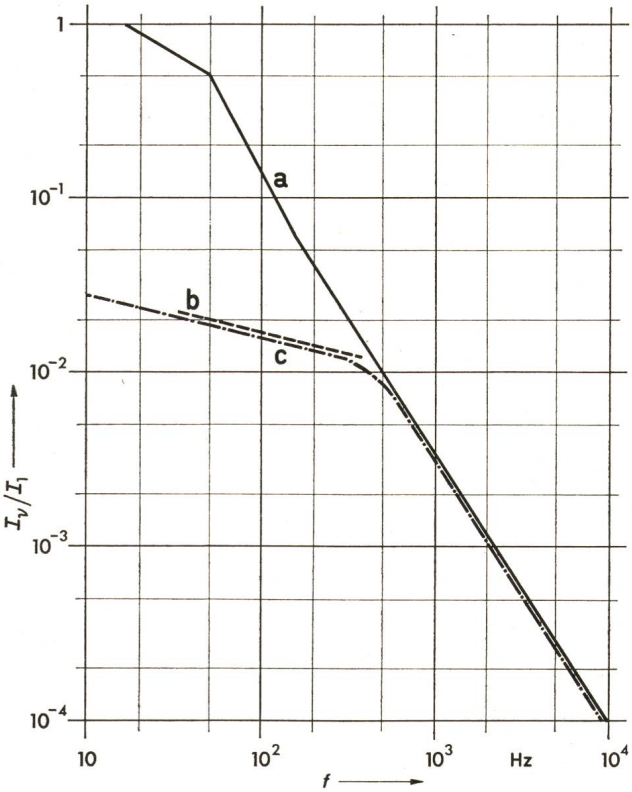


**Fig. 8 Oberwellengehalt des Traktionsstromes, bezogen auf die Grundwelle**

*a* Maximalwerte der ungeraden Oberwellen
*b* Maximalwerte der geraden Oberwellen
*c* nach Ausfilterung zu berücksichtigender Oberwellenrest des Traktionsstromes, bezogen auf die Grundwelle

Dabei ist ausserdem zu beachten, dass kleine Filterbandbreiten zu grosse Reaktionszeiten des Gleisstromkreises verursachen können. Für die Abschätzung der durch Filter nicht ausscheidbaren Restbeeinflussung wird daher angenommen, dass bis zu einer Frequenz von 500 Hz die Signalfrequenz in die Lücken zwischen zwei ungerade Oberwellen gelegt werde, und dass dort die Höhe der geraden Oberwellen als nicht auszufilternder Rest berücksichtigt werden müsse. Über 500 Hz ist infolge der geschlossenen Oberwellenfenster eine Ausfilterung gar nicht mehr möglich. In Fig. 8 ist nach diesen Annahmen als Kurve *c* der nach Ausfilterung zu berücksichtigende Beeinflussungsanteil des Stromes angegeben.

### *6.3 Zulässiger Traktions-Rückstrom*

Bei bekannter Grenze der Störspannung $U_s$ kann nach Abschnitt 6.1 der zulässige Oberwellenstrom $I\nu$ und mit Hilfe des Quotienten $I\nu/I_1$ nach Verlauf *c* aus Fig. 8 schliesslich der zulässige Grundwellenstrom $I_1$ der Traktions-Rückleitung durch das Gleis berechnet werden.

Zur Bestimmung der noch tragbaren Störspannung $U_s$ als nicht ausfilterbarer Rest der Oberwellen-Beeinflussung kann in einem theoretischen Grenzfall angenommen werden, dass bei geeigneter Modulationsart und Codierung das Nutzsignal bis zu einem gleichgrossen Störsignal noch richtig empfangen werden kann. Nach den Voraussetzungen von Abschnitt 4 wurde für das Nutzsignal ein Minimalwert $U_{2\,an} = 1{,}0$ V angenommen. Für die Berechnung des zulässigen Traktions-Rückstromes kann daher $U_s = 1{,}0$ V als realistische Basis dienen. Dabei wird als selbstverständlich vorausgesetzt, dass das Nutzsignal gegenüber den Störsignalen eine genügend hohe

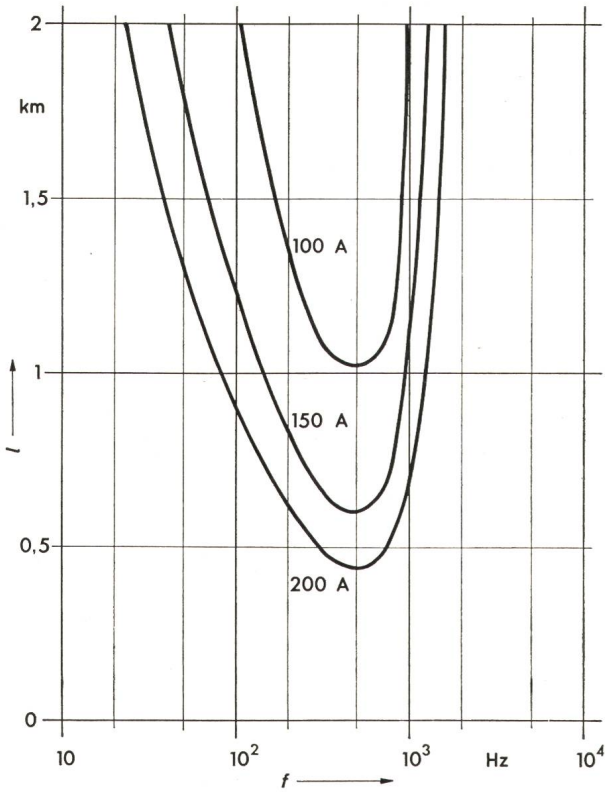


**Fig. 9 Zulässige Länge einschienig isolierter Abschnitte bei Rückstrom-Grundwellen $I_1$ = 100, 150 und 200 A**

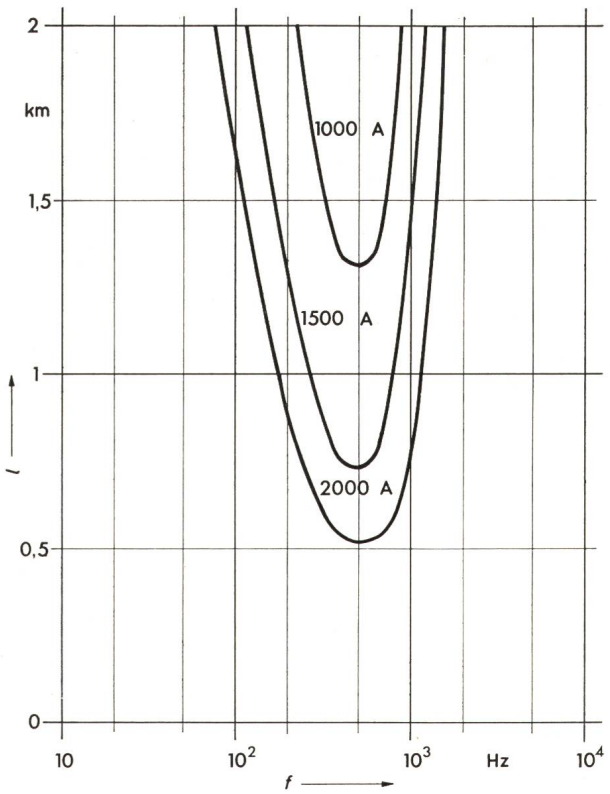


**Fig. 10 Zulässige Länge zweischienig isolierter Abschnitte bei Rückstrom-Grundwellen $I_1$ = 1000, 1500 und 2000 A**

Redundanz aufweise, und dass der Empfänger ein Überschreiten des genannten Störpegels nicht als sicherheitswidrige Freimeldung eines belegten Gleises, sondern höchstens als falsche Belegungsmeldung des freien Gleises auswerte.

In den Fig. 9 und 10 ist nicht der zulässige Rückstrom $I_1$, sondern die bei vorgegebenem Strom $I_1$ noch mögliche Abschnittslänge als Funktion der Signalfrequenz dargestellt. Nach diesen Diagrammen wäre 500 Hz als ungünstigste Signalfrequenz zu bezeichnen.

Die Unterschiede in den möglichen Abschnittslängen für ein- oder zweischienig isolierte Gleisstromkreise sind frequenzabhängig. Bei diesem Vergleich ist zu beachten, dass in Fig. 9 (einschienig isolierte Abschnitte) die angegebenen Stromwerte zehnmal kleiner sind als in Fig. 10 (zweischienig isolierte Gleisstromkreise).

## 7. Weitere Auswahlkriterien

Neben den bisher genannten Auswahlkriterien wären noch weitere Gesichtspunkte zur Frequenzbestimmung zu berücksichtigen, die sich aber nicht leicht durch konkrete Zahlenangaben erfassen oder gar als zulässige Abschnittslänge ausdrücken lassen.

So wird beispielsweise die Energieübertragung über die üblichen Stellwerkkabel mit zunehmender Frequenz schlechter, oder das Nebensprechen des Nutzsignales zwischen benachbarten Gleisen grösser. Andrerseits dürfte der apparative Aufwand für Filter bei hohen Frequenzen wesentlich geringer sein als bei tiefen.

## 8. Folgerungen

Aus den vier Auswahlkriterien – sicherungstechnische Bedingungen, Leistungsbedarf, Berührungsspannung am Gleis und Beeinflussung durch Traktions-Oberwellen – lässt sich

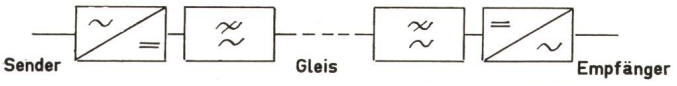


**Fig. 11 Prinzip der Gleichspannungs-Signalübertragung über das Gleis mit Möglichkeit zur galvanischen Trennung und Impedanzanpassung zwischen Kabel und Gleis auf Sende- und auf Empfangsseite**

nicht eine optimale Signalfrequenz ableiten. Dies gilt besonders dann, wenn die Signalfrequenz nicht der Abschnittslänge zugeordnet wird, sondern aus praktischen Gründen für alle Abschnitte gleich gewählt werden soll.

Als eindeutige Resultate lassen sich aber doch angeben, dass die zweischienig isolierte Anordnung gegenüber der einschienigen im Frequenzbereich unter 2000 Hz wesentlich höhere Abschnittslängen bei gleichem Traktions-Rückstrom zulässt, und dass bei einschienig isolierten Abschnitten eine gute Vermaschung der Rückleitung von parallelen Gleisen zur Verminderung des Rückstromes pro Gleis sehr erwünscht ist. Ausserdem lässt sich bei allen Auswahlkriterien feststellen, dass die Extrapolation auf Signalfrequenz $f = 0$ die besten Resultate ergäbe.

Diese Extrapolation auf null entspricht dem mit Gleichspannung als Nutzsignal betriebenen Gleisstromkreis, der auf einschienig isolierten Abschnitten dort eine verbreitete Anwendung gefunden hat, wo nicht mit Beeinflussungen durch benachbarte Gleichstrombahnen gerechnet werden muss. Bei der bisherigen Lösung für den Gleichspannungs-Gleisstromkreis mussten als Nachteile hingenommen werden, dass Mittel für die galvanische Trennung und die Impedanzanpassung zwischen Gleis und Kabel fehlten. In einer Anordnung nach Fig. 11 können diese Nachteile behoben werden. Auf der Sendeseite wird das Gleichspannungsnutzsignal aus einer

Wechselspannungsquelle über Transformator und Gleichrichter mit nachfolgendem Tiefpass gewonnen. Moderne Halbleiter mit genügend dimensioniertem Überspannungsschutz erlauben derartige Lösungen. Auf der Empfangsseite ist ein Wechselrichter mit Transformatorausgang zur Signalumformung erforderlich, der allerdings bei einer Signalspannung von rund 1 V bereits arbeiten soll. Für solche Zwecke ist ein Tunneldioden-Oszillator mit vorgeschaltetem Tiefpass nach Fig. 12 sehr geeignet.

Diese Empfangsschaltung zeichnet sich durch zwei besonders interessante Eigenschaften aus:

a) Sie ist polaritätsempfindlich, was in der Anwendung die Einsparung von Isolierstössen am Gleis ermöglicht.

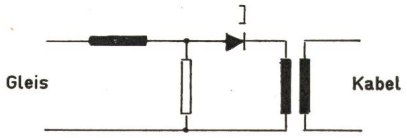


**Fig. 12 Tunneldioden-Wechselrichter als Empfangs-Umformer**

b) Der Oszillator schwingt nur, wenn der Eingangswiderstand unter einem gewissen Wert liegt, was der Schaltung zwangsläufig eine Fehlersicherheit in bezug auf Unterbruch dieses Querzweiges des Eingangsfilters verleiht.

**Literatur**


[1] *G. D. Friedlander:* A prescription for BART. IEEE Spectrum 10(1973)4, p. 40...44.

[2] *H. U. Meyer* und *W. Frank:* Der Achskurzschluss bei Gleichstromkreisen mit Wechselspannungen. Signal und Draht 64(1972)6/7, S. 90...998.

[3] *A. H. Cole, H. Roper* and *F. Whittaker:* Development of power supply and supervisory equipment for British Railways 50 Hz a. c. electrification. Proc. IEE 119(1972)2, p. 189...199.

[4] *R. Buckel:* Rückwirkungen der Thyristorsteuerung für Gleich- und Wechselstrombahnen auf Fernmelde- und Signalanlagen. Bull. SEV 62(1971)1, S. 66...75.

[5] *M. Kieffer:* Diskussionsbeitrag zu SEV-Tagung «Leistungs-Thyristoren auf Triebfahrzeugen». Bull. SEV 62(1971)3, S. 184...188.

[6] *W. Grossmann:* Die Thyristor-Stromrichter-Lokomotive Re 4/4 161 der Berner Alpenbahn-Gesellschaft Bern-Lötschberg-Simplon (BLS) Bull. SEV 64(1973)7, S. 427...435.

[7] *P. Winter:* Netzverhalten von Wechselstrom-Triebfahrzeugen mit Mehrfach-Folgesteuerungen in Stromrichtersparschaltungen. Zeitschrift für Eisenbahnwesen und Verkehrstechnik, Glasers Annalen 97(1973)2/3, S. 87...96.

[8] *R. Buckel:* Elektromagnetische Umweltbeeinflussung durch Thyristorfahrzeuge. Zeitschrift für Eisenbahnwesen und Verkehrstechnik, Glasers Annalen 97(1973)2/3, S. 97...104 + 110.



**Adresse des Autors:**

*Ernst Hofstetter,* dipl. Ing. ETH, Integra AG, 8304 Wallisellen.


## Ignaz Moscicki 1867–1946

Wegen der Beteiligung an Aufständen von 1831 und 1863 war die zum polnischen Adel gehörende Familie Moscicki verarmt. Der am 1. Dezember 1867 auf dem Gut Mierzanow bei Warschau zur Welt gekommene Ignaz Moscicki studierte am Polytechnikum in Riga Chemie, musste aber 1892 emigrieren. Nach kurzem Aufenthalt in England kam er in die Schweiz, wo er am Physik-Institut der Universität Freiburg Assistent von Professor Kowalski wurde. Er machte Forschungen auf dem Gebiet der Synthese von Salpetersäure aus Luftstickstoff. Die Aluminium Industrie AG, die im Wallis über grosse Wasserkräfte verfügte, interessierte sich für das Verfahren, um die überschüssige Sommerenergie – es gab damals im Wallis noch keine Speicherwerke – auszunutzen. Nach Überwindung grosser Schwierigkeiten gelang ihm ein industrielles Verfahren, das in Chippis eingesetzt wurde. Später ging die Salpeterfabrikation an die Lonza über.

Zu den hauptsächlichsten Schwierigkeiten zählte, anstelle von Leydnerflaschen Hochspannungskondensatoren zu finden. Moscicki entwickelte solche, bei denen Glasrohre mit erweiterten Endöffnungen zur Anwendung kamen. Er gründete 1902 mit I. de Modzelewski die «Fabrique Suisse de Condensateurs Modzelewski & Cie», die noch heute unter dem Namen «Condensateurs Fribourg SA» besteht. Solche «bouteilles Moscicki» für 100 kV wurden 1905 für den Sender auf dem Eiffelturm eingesetzt. Eine Zeitlang hatte man Kondensatoren auch für den Überspannungsschutz in Hochspannungsanlagen verwendet.

1910 verliess der erste Zisternenwagen mit konzentrierter Salpetersäure das Werk Chippis. Die in der Folge mehrmals vergrösserte Salpeterfabrik machte die Schweiz während des Ersten Weltkrieges unabhängig vom Chile-Salpeter.

1913 kehrte Moscicki, begleitet von seiner Frau, einer Tochter sowie drei Söhnen, ins besetzte Polen zurück, wo er an der Polytechnischen Schule zu Lemberg (Lwow) einen Lehrstuhl erhielt. Er durfte über 10 Tonnen Apparate und Maschinen aus den Freiburger Laboratorien mitnehmen, die es ihm erlaubten, nach dem Krieg eine polnische Salpeterfabrikation aufzuziehen.

Nach der Revolution von 1926 wurde Moscicki, als einer der Getreuen Pilsudskis, Präsident der Republik. 1939 marschierten die Deutschen in Polen ein, was Moscicki veranlasste, sich erneut in die Schweiz zu begeben. Am 1. Oktober 1946 starb er in Versoix.

*S. Szpor/H. Wüger*

Internationale Bildagentur Oberengstringen