

Möglichkeiten und Grenzen der Transferfunktion

T. Leibfried, Universität Stuttgart
Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik

Einleitung

Die Analyse der Transferfunktion kann zukünftig ein wichtiges Hilfsmittel bei der Diagnose des Isolationszustandes von Transformatoren darstellen. Dazu müssen jedoch die Leistungsfähigkeit und die Grenzen des Verfahrens der Transferfunktionsanalyse genau bekannt sein.

Bei der Bestimmung der Transferfunktion aus Spannung und Strom bei einer Stoßspannungsprüfung an Transformatoren entstehen Fehler, sowohl bei der Messung als auch bei der anschließenden Auswertung der aufgezeichneten Daten. Eine der bedeutendsten Fehlerquellen ist die zur späteren digitalen Datenverarbeitung notwendige Quantisierung der analogen Spannungswerte. Dies beinhaltet sowohl das Quantisierungsrauschen infolge der Wertdiskretisierung analoger Spannungswerte mit einem A/D-Umsetzer endlicher Auflösung als auch ein den aufgezeichneten Signalen überlagertes Rauschen beliebiger Art, z.B. Bitrauschen des A/D-Umsetzers /3/.

Im folgenden Beitrag wird der Fehler, der in der Berechnung der Transferfunktion infolge dieser Quantisierung entsteht, genauer untersucht. Es wird ein Verfahren vorgestellt, woraus sich auch jene maximale Frequenz ergibt, bis zu welcher eine Auswertung der Transferfunktion überhaupt möglich und sinnvoll ist.

1. Versuchseinrichtung zur systematischen Untersuchung der Transferfunktionsanalyse

Am Institut wurde zur Untersuchung des Verfahrens der Transferfunktionsanalyse als Hilfsmittel zur Diagnose des Isolationszustandes von Transformatoren eine

Versuchseinrichtung mit einem Verteiltransformator (30 kVA, 10 kV / 400 V) aufgebaut (Bild 1).

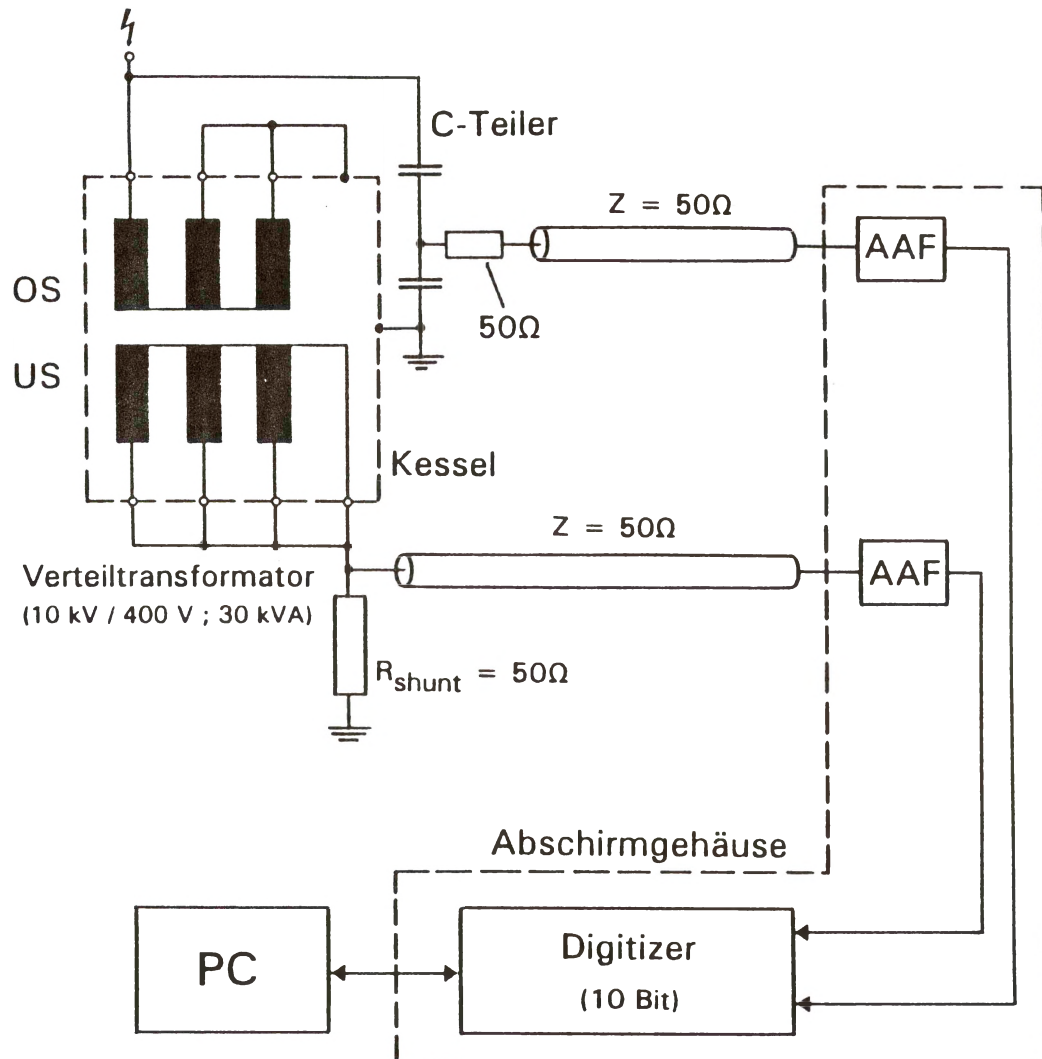


Bild 1: Prinzipschaltbild der Versuchseinrichtung

Zur Aufzeichnung der Messungen wird ein Digitizer mit einer Auflösung von 10 Bit verwendet; als Anti-Aliasing-Filter (AAF) kommen Tschebyscheff-Filter 9. Ordnung mit einer 3dB-Grenzfrequenz von ca. 1,1 MHz zum Einsatz. Die beiden Filter sind bis zu einer Frequenz von ca. 1 MHz linearphasig, d.h. Laufzeitverzerrungen durch die Filter sind für Signale bis zu dieser Frequenz ausgeschlossen.

2. Berechnung des Fehlers der Transferfunktion infolge der Quantisierung

Die Transferfunktion wird aus den komplexen Spektren von Strom und Spannung gemäß

$$\underline{TF} = \frac{\underline{I}}{\underline{U}} = \frac{(a+\Delta a) + j(b+\Delta b)}{(c+\Delta c) + j(d+\Delta d)} \quad (1)$$

berechnet. Die mit Δ bezeichneten Größen symbolisieren dabei den Fehler in Real- und Imaginärteil der Spektren von Strom und Spannung infolge der Quantisierung. Für den Betrag der Transferfunktion folgt daraus

$$|\underline{TF}| = \sqrt{\frac{a^2+b^2}{c^2+d^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + 2 \frac{a\Delta a+b\Delta b}{a^2+b^2} + \frac{\Delta a^2+\Delta b^2}{a^2+b^2}}}{\sqrt{1 + 2 \frac{c\Delta c+d\Delta d}{c^2+d^2} + \frac{\Delta c^2+\Delta d^2}{c^2+d^2}}} \quad (2)$$

Der erste Term von Gl. (2) stellt den korrekten Betrag der Transferfunktion dar, während der zweite Term den Fehler in der Transferfunktion \underline{TF} beinhaltet. Zähler und Nenner dieses zweiten Terms können in eine Taylorreihe entwickelt werden, so daß für den Störabstand zwischen den Spektren von Spannung und Strom und den entsprechenden Rauschspektren gilt:

$$S_I = 20 \log \left| \frac{I_{\text{Nutz}}}{I_{\text{Stör}}} \right| = 20 \log \left| \frac{1 + (1/2)\alpha - (1/8)\alpha^2}{(1/2)\alpha - (1/8)\alpha^2} \right| \quad (3)$$

$$S_U = 20 \log \left| \frac{U_{\text{Nutz}}}{U_{\text{Stör}}} \right| = 20 \log \left| \frac{1 + (1/2)\beta - (1/8)\beta^2}{(1/2)\beta - (1/8)\beta^2} \right| \quad (4)$$

mit

$$\alpha = 2 \frac{a\Delta a+b\Delta b}{a^2+b^2} + \frac{\Delta a^2+\Delta b^2}{a^2+b^2} \quad (5)$$

$$\beta = 2 \frac{c\Delta c+d\Delta d}{c^2+d^2} + \frac{\Delta c^2+\Delta d^2}{c^2+d^2} \quad (6)$$

Die Parameter α und β können sowohl negativ als auch positiv sein.

Für den Betrag der Transferfunktion erhält man damit

$$|\underline{TF}| = \sqrt{\frac{a^2+b^2}{c^2+d^2}} \cdot \sqrt{\frac{1+\alpha}{1+\beta}} = |\underline{TF}'|(1+\delta) \quad (7)$$

wobei $|\underline{TF}'|$ den Betrag der Transferfunktion ohne Quantisierungsfehler darstellt. Bei bekannten Störabständen S_I und S_{II} kann damit neben dem Fehler δ des Betrages der Transferfunktion ein Toleranzband, in dem sich der Betrag der korrekt berechneten Transferfunktion bewegt, aus dem Betrag der aus Messungen ermittelten Transferfunktion wie folgt definiert werden:

$$TF_{\max} = \frac{TF}{1+\delta_{\min}} \quad (8)$$

$$TF_{\min} = \frac{TF}{1+\delta_{\max}} \quad (9)$$

Für $\delta = \delta_{\min}$ ist α negativ und β positiv, für $\delta = \delta_{\max}$ ist es genau umgekehrt. Die obere und die untere Fehlergrenze (δ_{\max} bzw. δ_{\min}) können wie folgt berechnet werden

$$\delta_{\min} = \sqrt{\frac{1+\alpha_{II}}{1+\beta_I}} - 1 \quad (10)$$

$$\delta_{\max} = \sqrt{\frac{1+\alpha_I}{1+\beta_{II}}} - 1 \quad (11)$$

Aus (3) und (4) können die Parameter α_I , α_{II} , β_I und β_{II} durch Lösen einer quadratischen Gleichung unter Hinzunahme einer Fallunterscheidung für den Nenner der Beziehungen (3) und (4) berechnet werden:

$$\alpha_I = 2\left(1 - \sqrt{\frac{\eta - 3}{\eta - 1}}\right) \quad (12)$$

$$\alpha_{II} = 2\left(1 - \sqrt{\frac{\eta + 3}{\eta + 1}}\right) \quad (13)$$

$$\beta_I = 2\left(1 - \sqrt{\frac{\mu - 3}{\mu - 1}}\right) \quad (14)$$

$$\beta_{II} = 2 \left(1 - \sqrt{\frac{\mu + 3}{\mu + 1}} \right) \quad (15)$$

mit

$$\eta = 10^{\frac{S_I}{20}} = \left| \frac{I_{\text{Nutz}}}{I_{\text{Stör}}} \right| \quad (16)$$

$$\mu = 10^{\frac{S_U}{20}} = \left| \frac{U_{\text{Nutz}}}{U_{\text{Stör}}} \right| \quad (17)$$

Damit kann zu jeder durch Messung ermittelten Transferfunktion ein maximaler Fehler infolge der Quantisierung und damit ein Toleranzband, in dem sich der Betrag der korrekt berechneten Transferfunktion bewegt, angegeben werden. Außerdem kann der Fehler des Betrages eines jeden Teilspektrums berechnet werden.

3. Messungen an dem 30 kVA-Verteiltransformator

3.1 Bestimmung der Störabstände S_I und S_U

Im Gegensatz zu einer Rechnersimulation kann bei einer Messung weder der zeitliche Verlauf des Quantisierungsrauschens noch dessen Spektrum im interessierenden Frequenzbereich (hier bis ca. 1 MHz) exakt ermittelt werden.

Für Frequenzen über ca. 2 MHz (abhängig vom Anti-Aliasing-Filter) gehen die Spektren von Spannung und Strom infolge der Filterung in die Spektren des Quantisierungsrauschens über. Dieses Quantisierungsrauschen enthält neben dem eigentlichen Quantisierungsrauschen infolge endlicher Auflösung des A/D-Umsetzers auch jegliche den aufgezeichneten Signalen überlagerte Rauschsignale, z. B. Bitklappern des A/D-Umsetzers [3]. Der Verlauf dieses Rauschspektrums über der Frequenz ist jedoch zufällig und nicht reproduzierbar. Deshalb werden zur Bestimmung der Störabstände S_I und S_U konstante obere Grenzwerte so festgelegt, daß das Spektrum des Quantisierungsrauschens stets unter diesen Grenzwerten liegt (Bild 2). Damit ist sichergestellt, daß die berechneten Werte für S_I und S_U stets kleiner als die tatsächlichen Werte sind, was zur Folge hat, daß letztlich ein maximaler Fehler der Transferfunktion infolge der Quantisierung berechnet wird.

3.2 Untersuchung des Verfahrens anhand zweier Vollstöße

Zunächst werden die Transferfunktionen zweier nacheinander aufgezeichneter Vollstöße untersucht. Die Aufzeichnungsdauer der Signale betrug $204,8 \mu\text{s}$ bei einer Abtastfrequenz von 10 MHz. Bild 2 zeigt die Spektren von Stoßspannung und Stoßstrom sowie die festgelegten Grenzwerte für das Quantisierungsrauschen (QR) und die sich daraus im interessierenden Frequenzbereich (bis 1 MHz) ergebenden Störabstände für Spannung und Strom.

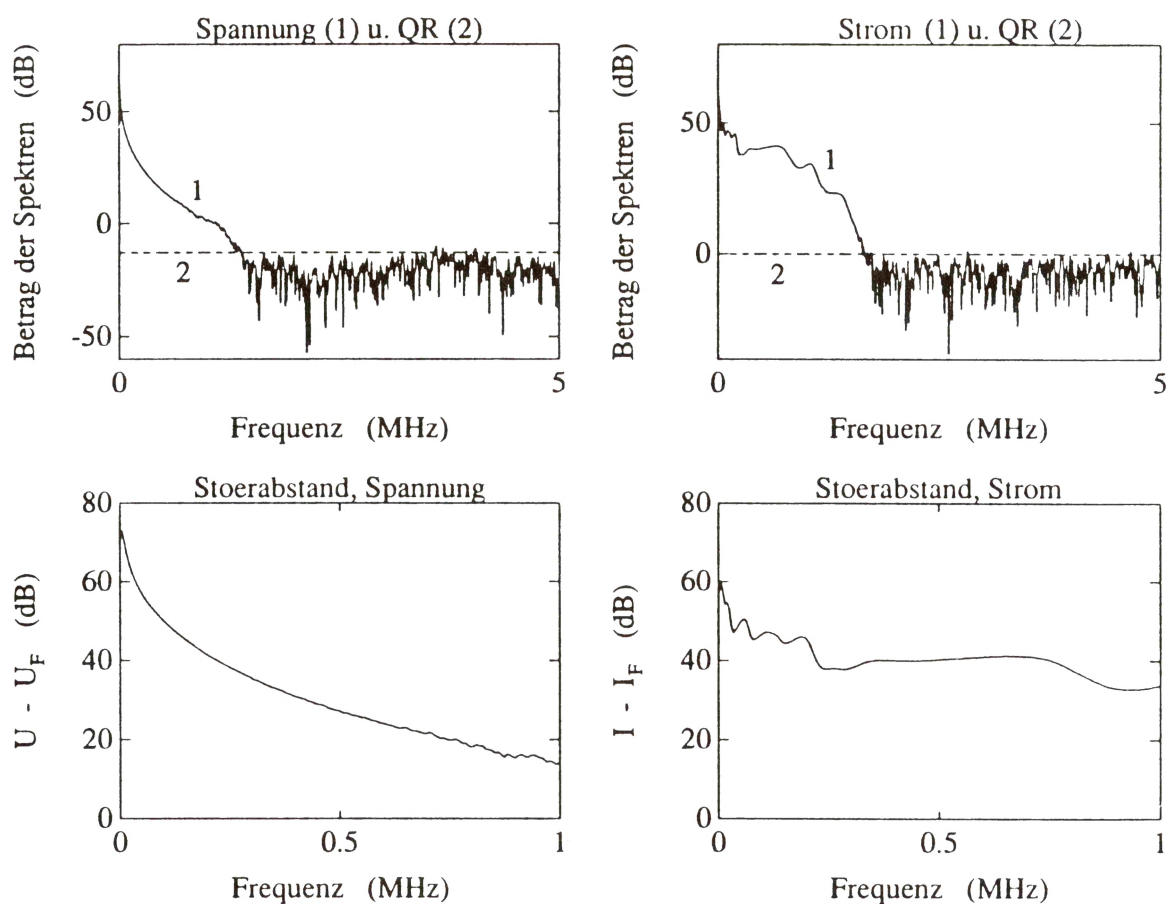


Bild 2: Spektren von Spannung und Strom sowie der festgelegten Grenzwerte für das Quantisierungsrauschen (QR)

Der Störabstand der Spannung liegt ab ca. 720 kHz unter 20 dB, während der Störabstand des Stoßstromes im Bereich bis 1 MHz über 30 dB liegt. Fehler in der Transferfunktion - insbesondere im Frequenzbereich über ca. 700 kHz - haben also ihre Ursache in der Annäherung des Nutzspektrums der Stoßspannung an das Rauschspektrum.

In Bild 3 sind Betrag und Phase der Transferfunktion des Verteiltransformators aus den beiden Vollstößen dargestellt.

Aufgrund der in Bild 2 dargestellten Spektren von Spannung und Strom und der definierten oberen Grenzwerte für das Quantisierungsrauschen kann ein maximaler Fehler und damit ein Toleranzband für jede der beiden Transferfunktionen des Verteiltransformators berechnet werden (Bild 4).

Da bei der Berechnung der Parameter α und β aus den entsprechenden Störabständen S_I und S_U eine Näherung vorgenommen werden muß (Taylorreihe bis zum quadratischen Glied), ist die Berechnung der Fehler und der Toleranzbänder nur für Frequenzen dargestellt, für die gilt:

$$\begin{aligned} 0 &\leq \alpha_I, \beta_I \leq 0,2 \\ -0,2 &\leq \alpha_{II}, \beta_{II} \leq 0 \end{aligned} \quad (18)$$

Die Betrags- und Phasengänge der beiden Transferfunktionen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung bis ca. 300 kHz. Der Fehler δ_{\max} der Beträge der beiden Transferfunktionen liegt bis zu dieser Frequenz unter 3 % und steigt mit zunehmender Frequenz kontinuierlich auf einen Wert von ca. 10 % bei 700 kHz an.

Die Frequenz, bis zu welcher der Betrag der Transferfunktion sinnvoll ausgewertet werden kann, ist durch den geforderten oberen Grenzwert für den maximalen Fehler δ_{\max} gegeben.

Dieser Fehler ist abhängig vom Abstand der Spektren der gemessenen Signale zum Quantisierungsrauschen. Eine steilere Flanke der Stoßspannung, und damit eine stärkere Anregung des Transformators bei hohen Frequenzen, hat größere Störabstände S_I und S_U und deshalb letztlich eine bessere Übereinstimmung der Transferfunktionen unterschiedlicher Stöße im oberen Frequenzbereich (> 400 kHz) zur Folge.

Unter der Annahme, daß ein Fehler von ca. 6 % toleriert werden kann, ist es möglich, die Transferfunktionen bis zu einer Frequenz von ca. 500 kHz auszuwerten.

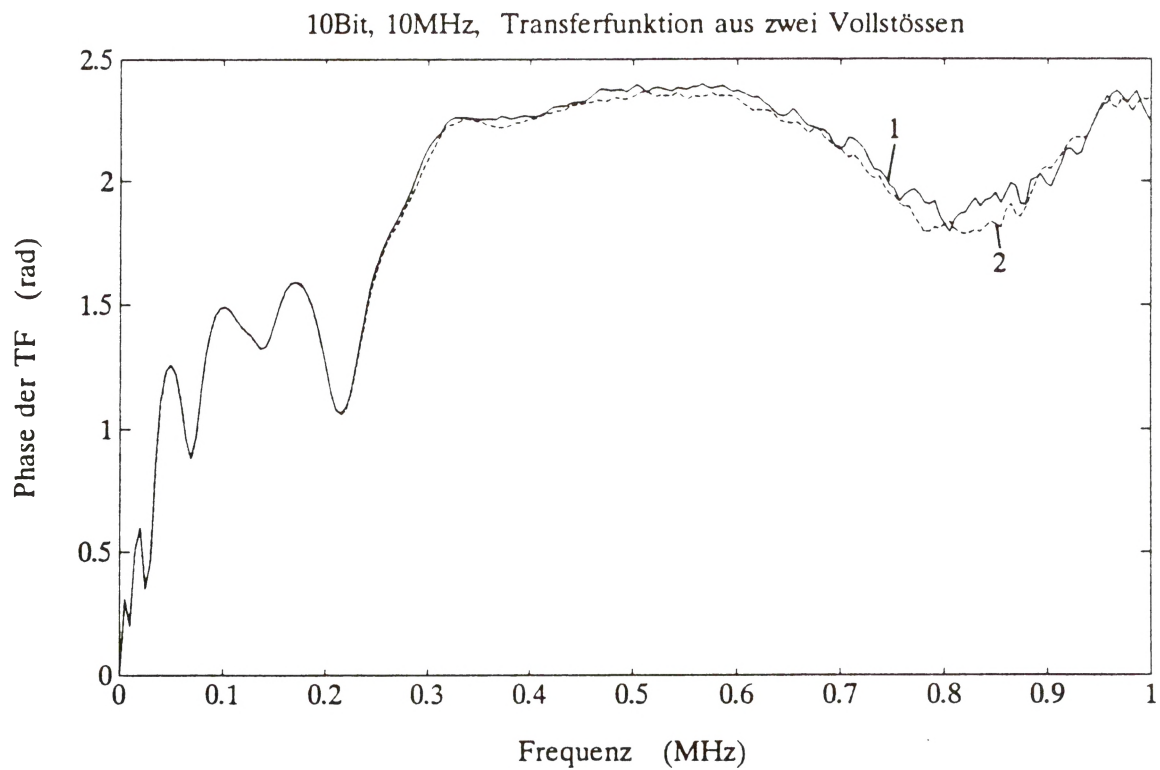
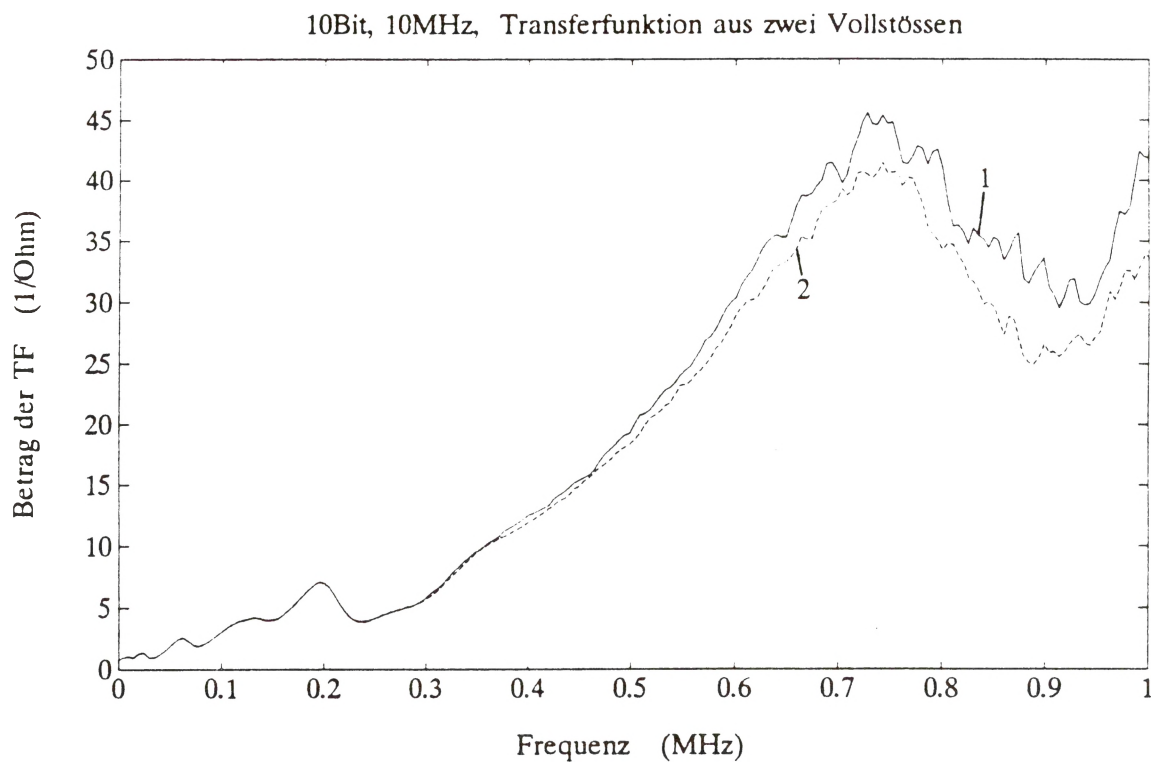


Bild 3: Betrag und Phase der Transferfunktionen (1, 2) des 30 kVA-Verteiltransformators bei zwei nacheinander durchgeführten Vollstößen (Stoßpegel ca. 10 kV)

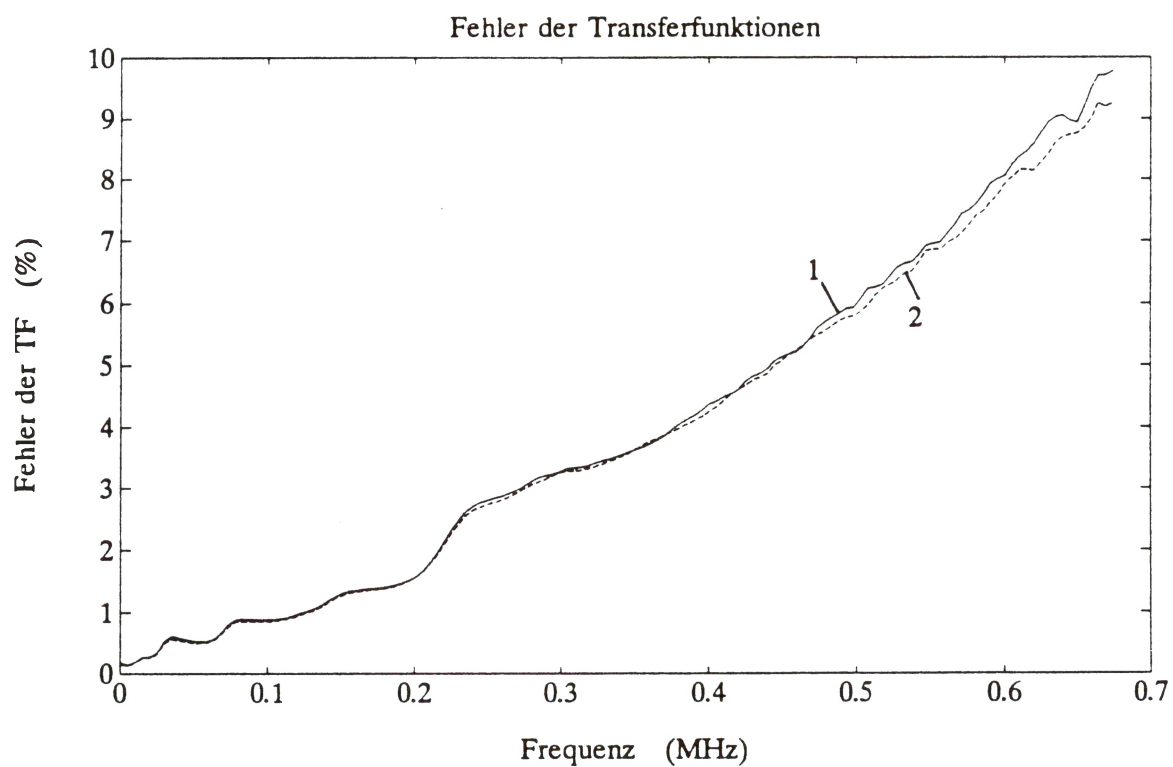
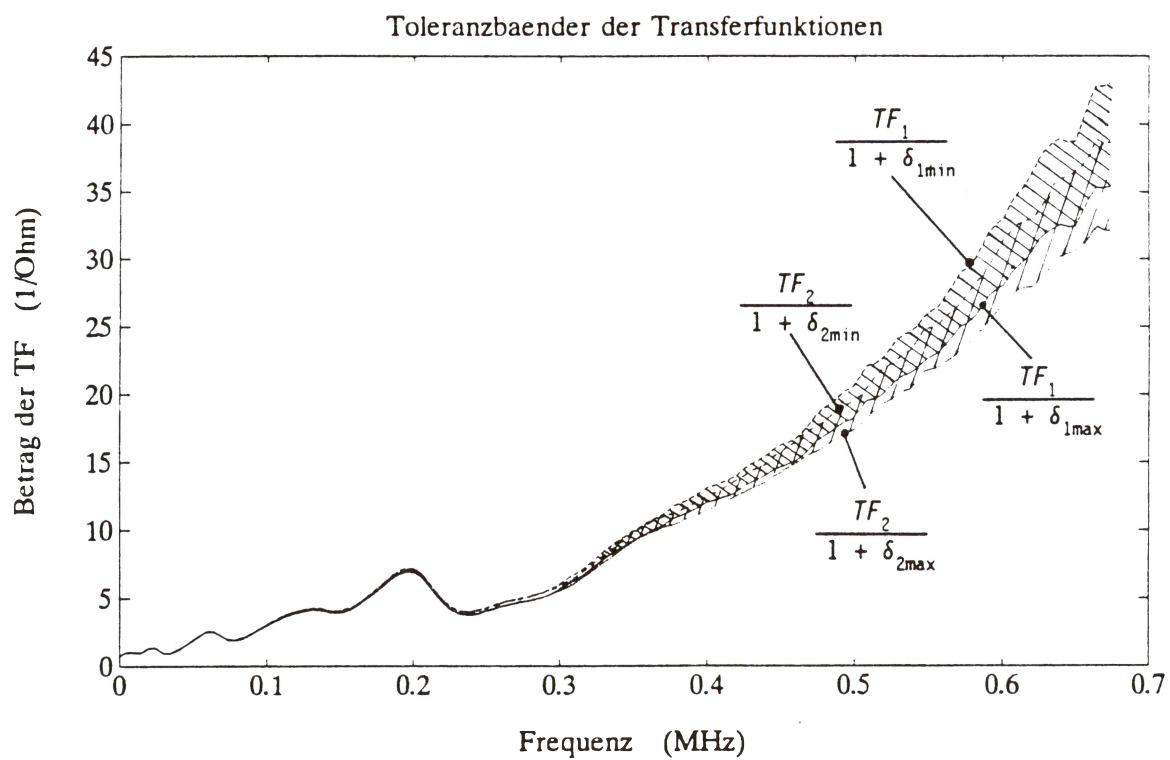


Bild 4: Toleranzbänder und Fehler δ_{\max} der Beträge der Transferfunktionen aus den beiden Vollstößen (Bild 3)

3.3 Untersuchung der besonderen Verhältnisse beim abgeschnittenen Stoß

Bild 5 zeigt Betrag und Phase der Transferfunktion eines Vollstoßes und eines abgeschnittenen Stoßes, dessen Abschneidezeit ca. $6,6 \mu\text{s}$ beträgt. Die Datensätze für Spannung und Strom wurden auch in diesem Fall $204,8 \mu\text{s}$ lang mit einer Abtastfrequenz von 10 MHz aufgezeichnet.

Deutlich erkennbar sind die mit einer Frequenz von ca. 155 kHz periodisch auftretenden Störungen der Transferfunktion des abgeschnittenen Stoßes. Diese Störungen haben ihre Ursache in den Einbrüchen des Spektrums der Stoßspannung (Bild 6). Ein sehr großer Fehler δ_{max} , für dessen Berechnung in diesem Fall die durch (18) gesetzten Grenzen allerdings höher gewählt wurden, tritt genau bei jenen Frequenzen auf, bei denen der Störabstand des Spektrums der Stoßspannung vom Rauschen sehr gering ist. Exakt bei diesen Frequenzen ist aber auch die Anregung des Transformators schwach, so daß auch das Spektrum des Stoßstromes dort Einbrüche zeigt.

Die Frequenzen, bei der diese Einbrüche auftreten können, näherungsweise in Abhängigkeit der Abschneidezeit T_c berechnet werden. Dazu wird der abgeschnittene Stoß als Rechteckimpuls der Dauer T_c betrachtet:

$$u(nT) = \begin{cases} u_0 & 0 \leq n \leq n_0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (19)$$

mit
$$T_c = n_0 T \quad (20)$$

Mit Hilfe der Fourier-Transformation diskreter Signale kann das Spektrum des Rechteckimpulses berechnet werden:

$$\begin{aligned} \underline{U}(e^{j\omega T}) &= \sum_{n=0}^{n_0} u(nT) e^{-j\omega nT} \\ &= u_0 \frac{e^{-j\omega(n_0+1)T} - 1}{e^{-j\omega T} - 1} \end{aligned} \quad (21)$$

Die Nullstellen dieses Spektrums liegen bei den folgenden Frequenzen:

$$f_i = \frac{i}{T + T_c} \quad i=1, 2, 3, \dots \quad (22)$$

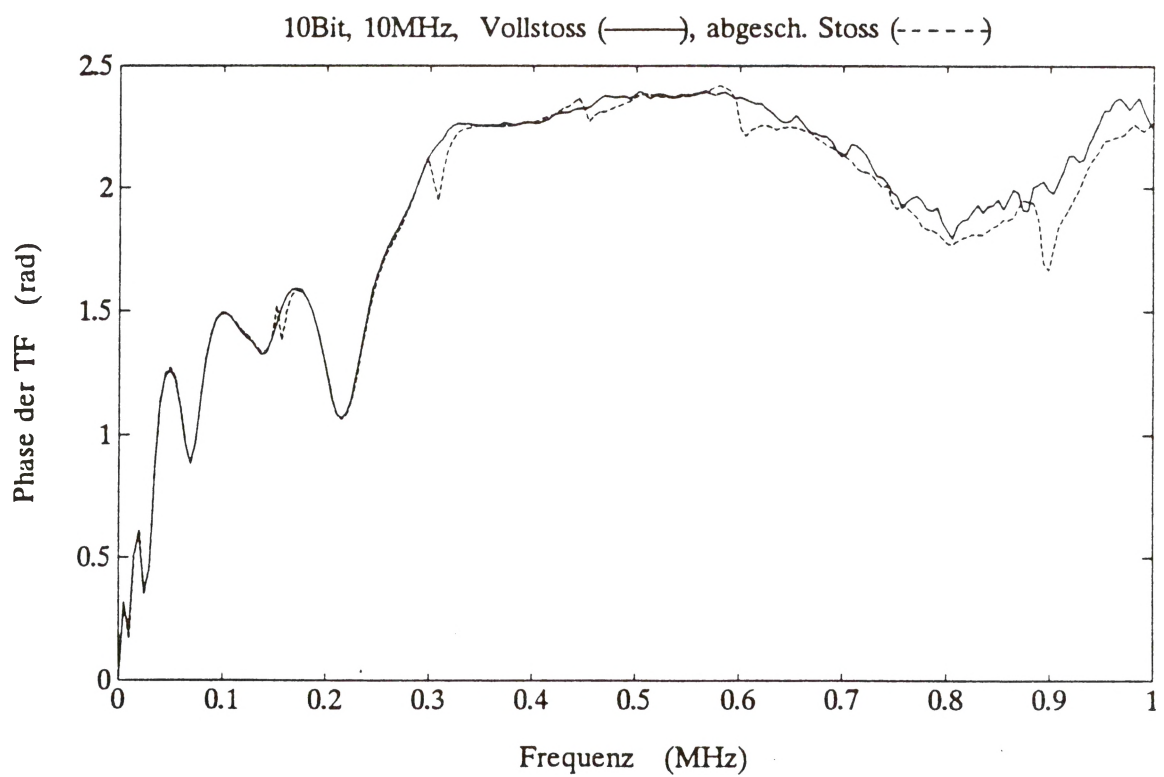
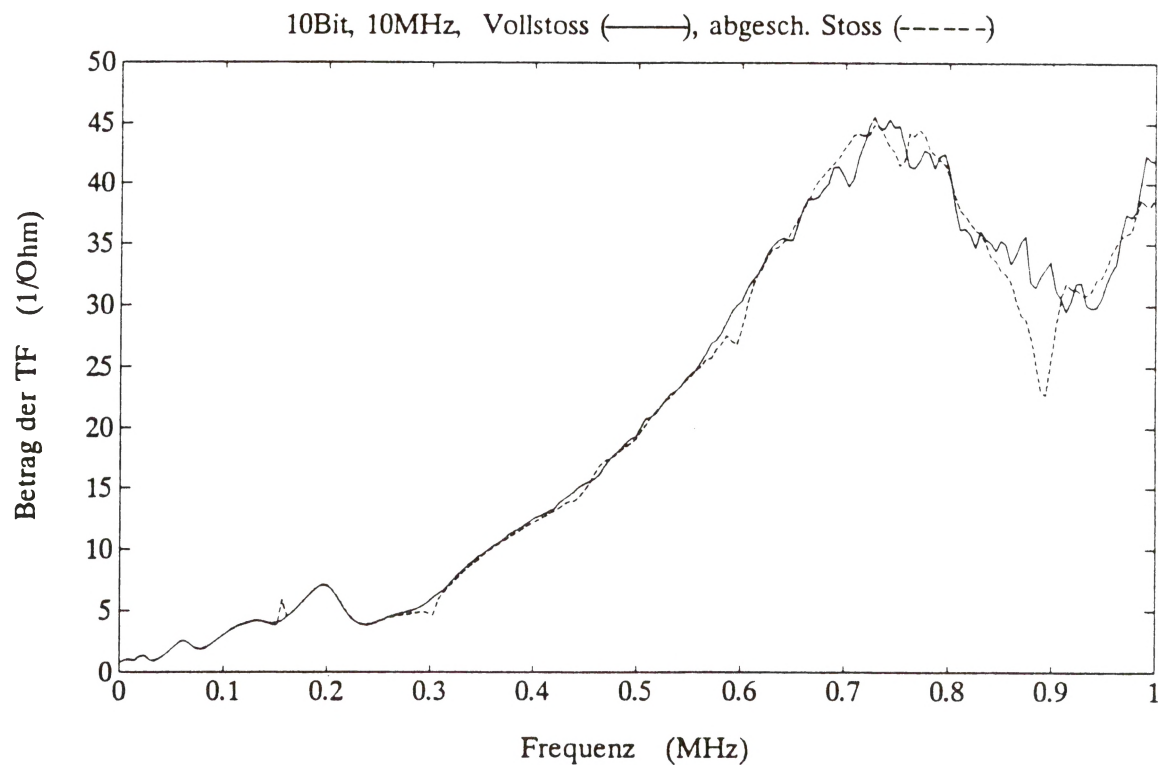


Bild 5: Betrag und Phase der Transferfunktionen aus Vollstoß und abgeschnittenem Stoß $T_c = 6,6 \mu s$

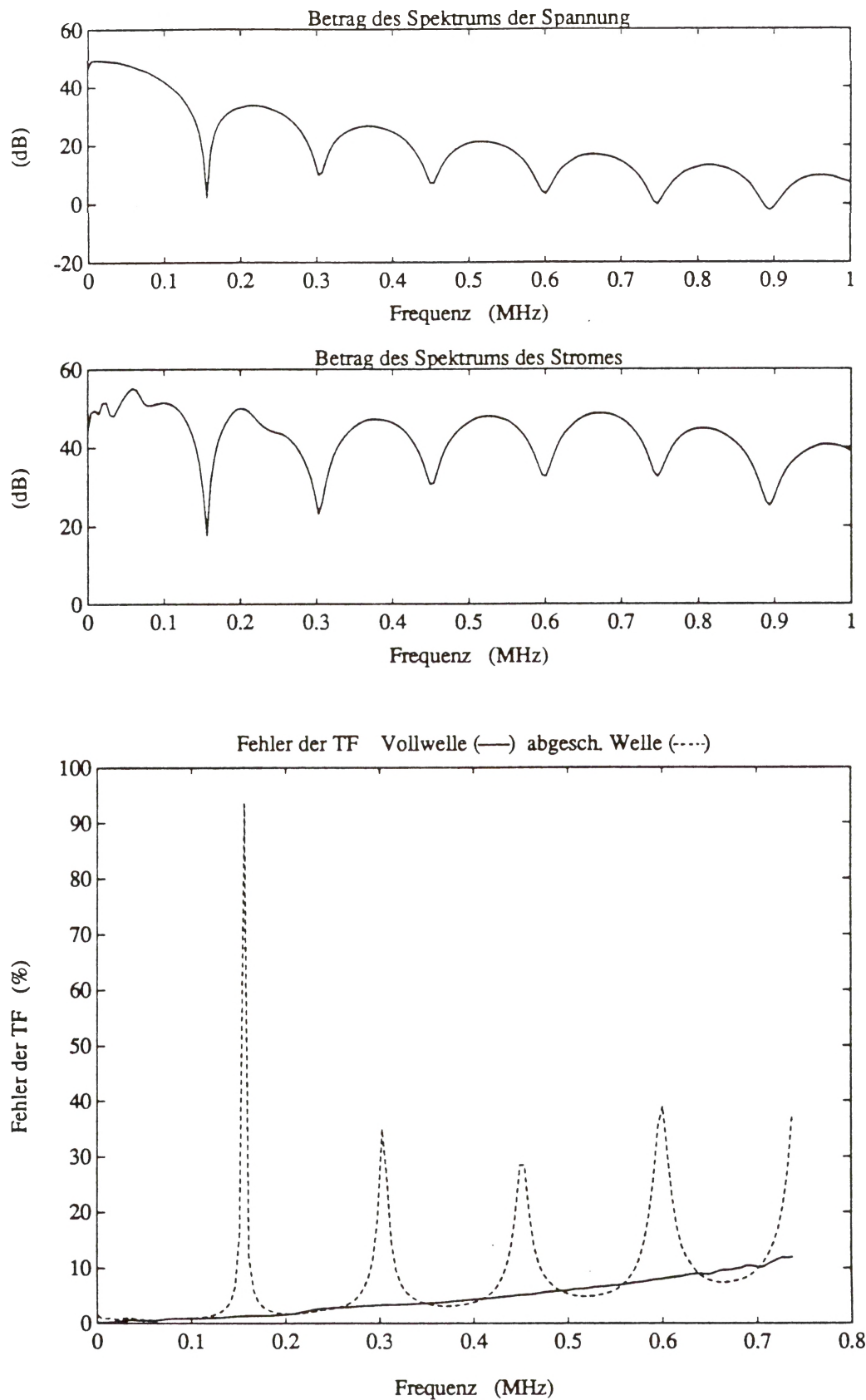


Bild 6: Spektren von Stoßspannung und Stoßstrom des abgeschnittenen Stosses und Fehler δ_{\max} der Beträge der beiden Transferfunktionen (Bild 5)

Je größer die Abschneidezeit T_c ist, um so geringer ist also die Frequenz, mit der sich die Einbrüche im Spektrum der Stoßspannung periodisch wiederholen. Im vorliegenden Fall ergibt sich aus (22) mit der Abtastzeit $T = 0,1 \mu\text{s}$ und der Abschneidezeit $T_c = 6,6 \mu\text{s}$ diese Frequenz zu $f_1 = 149 \text{ kHz}$ (vgl. Bild 6: $f_1 = 155 \text{ kHz}$).

Bild 7 zeigt neben diesem Zusammenhang auch, daß die Einbrüche bei großer Abschneidezeit deutlich schärfer ausgeprägt sind. Eine korrekte Berechnung der Transferfunktion aus einem abgeschnittenen Stoß mit Abschneidezeiten $T_c > 4 \dots 5 \mu\text{s}$ ist also infolge der scharfen Einbrüche des Spektrums der abgeschnittenen Stoßspannung und damit auch des Stoßstromes sehr kritisch.

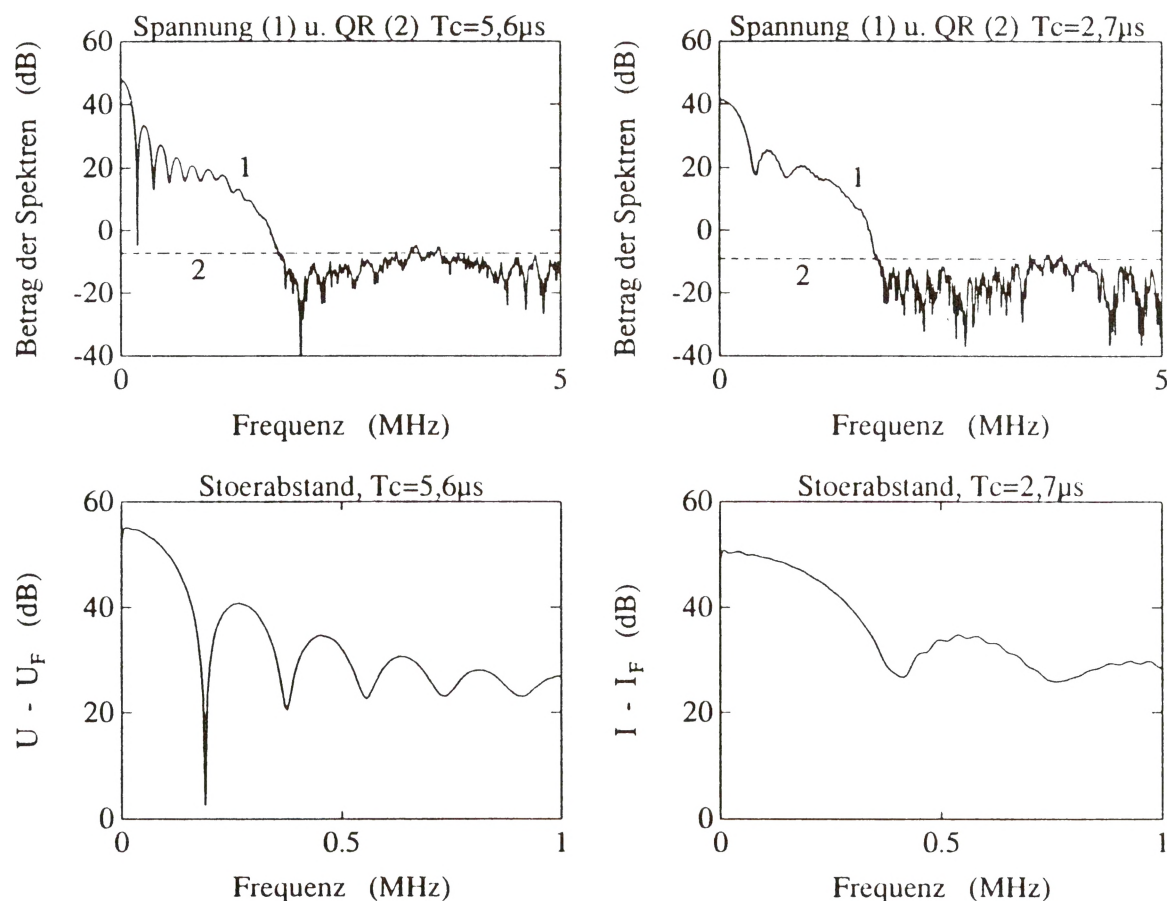


Bild 7: Betrag der Spektren abgeschnittener Stoßspannungen unterschiedlicher Abschneidezeiten und die sich aus dem Rauschen (QR) ergebenden Störabstände

3.4 Wahl der geeigneten Aufzeichnungsdauer

Die geeignete Aufzeichnungsdauer der Signale, aus denen die Transferfunktion ermittelt werden soll, ist stark vom Resonanzverhalten des Prüfobjektes abhängig. Bei dem untersuchten Verteiltransformator ist der Stoßstrom bei Vollstoß und abgeschnittenem Stoß bereits nach $100\ \mu\text{s}$ weitgehend abgeklungen. Die bei der Auswertung der Transferfunktion wesentlichen hochfrequenten Anteile des Stoßstromes treten nahezu zeitgleich mit den steilen Flanken der Stoßspannung auf und klingen sehr schnell ab (Bild 8). Im vorliegenden Fall wäre also eine Aufzeichnungsdauer von ca. $100\ \mu\text{s}$ ausreichend.

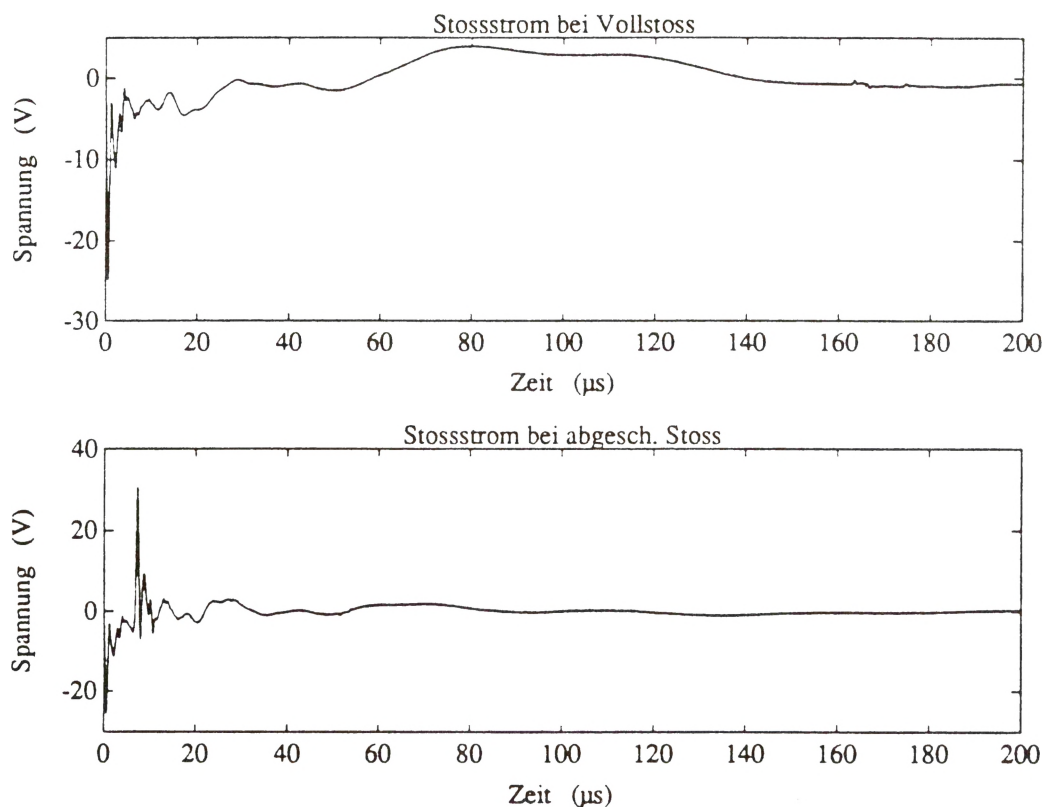


Bild 8: a. Stoßstrom aus Vollstoß
b. Stoßstrom aus abgeschnittenem Stoß

3.5 Obere Grenzfrequenz eines Stoßes in Abhängigkeit seiner Anstiegszeit

Mit Hilfe des in Abschnitt 2 beschriebenen Verfahrens kann eine Frequenz f_{max} in Abhängigkeit der Anstiegszeit T_1 (30% -90%) der Stoßspannung (Vollstoß) ermittelt

werden, bei der ein bestimmter maximaler Fehler $\beta_{\max} = \beta_1$ des Betrages des Spektrums der Stoßspannung erreicht wird (Bild 9). Dabei wurde ein idealer A/D-Umsetzer mit einer Auflösung von 10 Bit und Vollaussteuerung zugrundegelegt.

In der Praxis ergeben sich aufgrund von Störsignalen, die in den Meßaufbau eingekoppelt werden, sowie realer Meßbedingungen (Bitrauschen des A/D-Umsetzers und nur teilweise Nutzung des Aussteuerbereichs) stets ungünstigere Werte. Die angegebenen Kurven stellen daher obere Grenzwerte für jene Frequenz f_{\max} dar, bei welcher ein bestimmter Fehler β_{\max} des Spektrums der Stoßspannung für eine bestimmte Anstiegszeit T_1 dieser Spannung erreicht wird. Die Frage, bei welchem maximalen Fehler β_{\max} des Spektrums der Spannung eine Fehlererkennung mit Hilfe der Transferfunktion noch möglich ist, muß in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

Die Auswirkungen von Störeinkopplungen in den Meßaufbau zeigen sich am Vergleich von Transferfunktionen bei unterschiedlichen Stoßpegeln (vgl. Bild 3, Stoßpegel 10 kV und Bild 10, Stoßpegel 300 V).

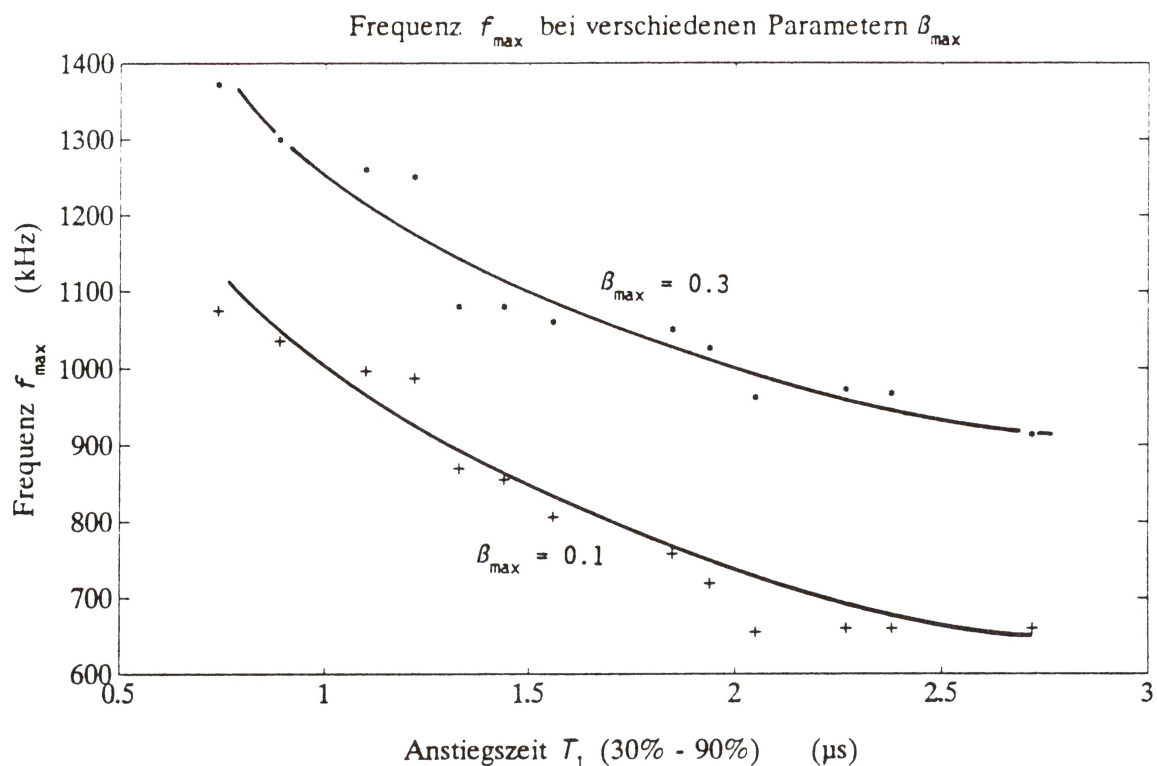


Bild 9: Frequenz f_{\max} , in Abhängigkeit der Anstiegszeit T_1 des Vollstoßes für verschiedene Parameter β_{\max}

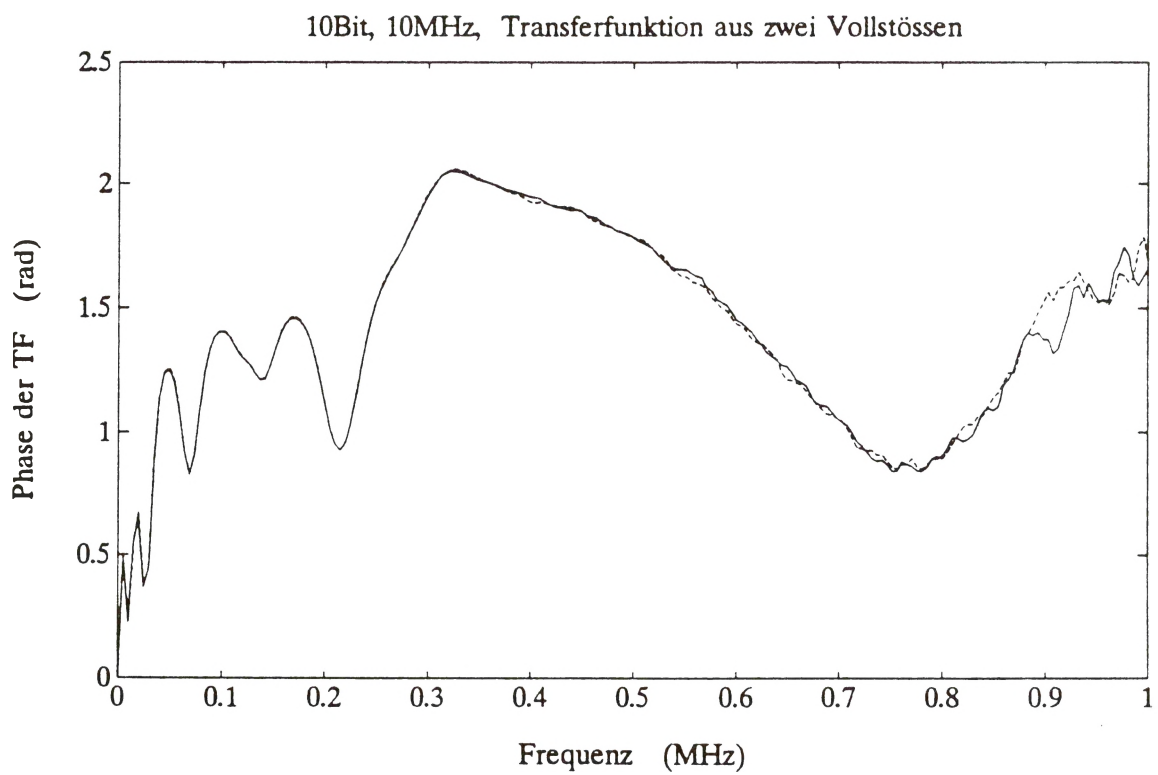
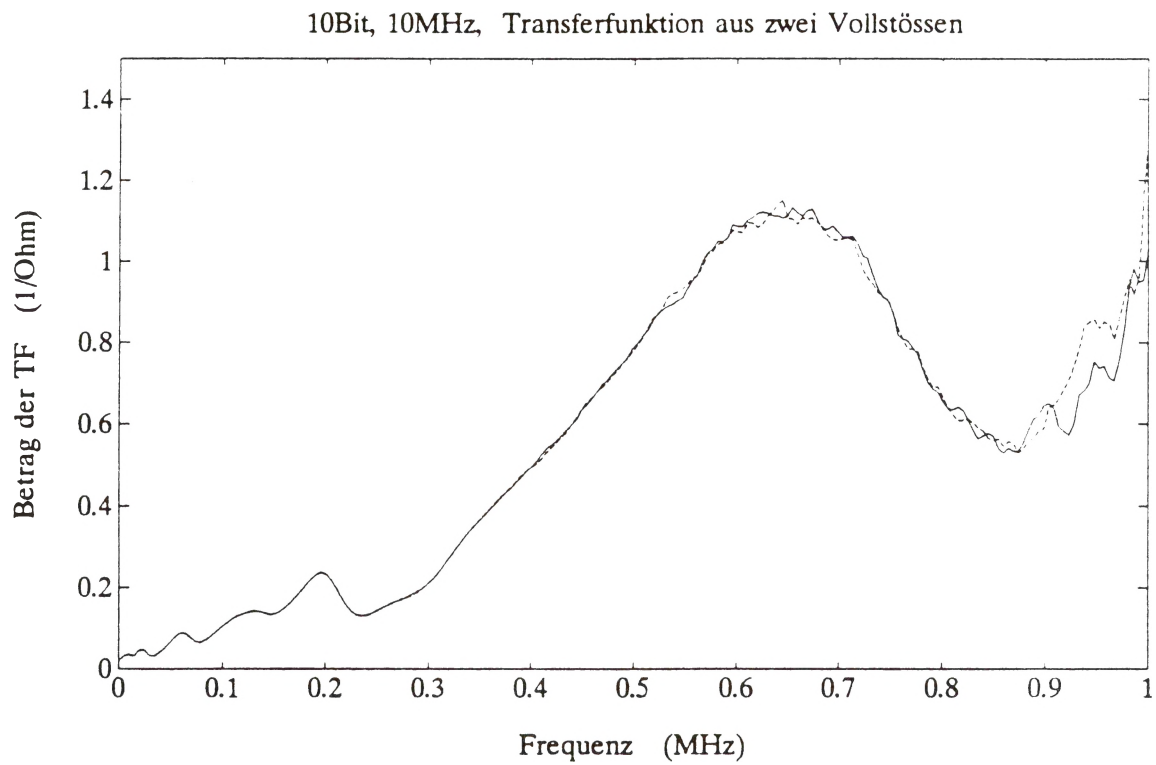


Bild 10: Betrag und Phase der Transferfunktion des 30 kVA-Verteiltransformators bei zwei nacheinander durchgeführten Vollstößen (Stoßpegel ca. 300 V)

4. Verfahren zur Verringerung des Quantisierungsrauschens

4.1 Untersuchung des Verfahrens anhand simulierter Daten

Die Auswirkungen des Quantisierungsrauschens auf die Transferfunktion können durch Überabtastung der Meßsignale (Spannung und Strom) und Filterung mit anschließender Datenreduktion verringert werden.

Um dies zu demonstrieren, wird der zeitliche Verlauf und das Spektrum des Quantisierungsrauschens eines (berechneten) Stoßspannungsimpulses mit und ohne Filterung verglichen (Bild 11).

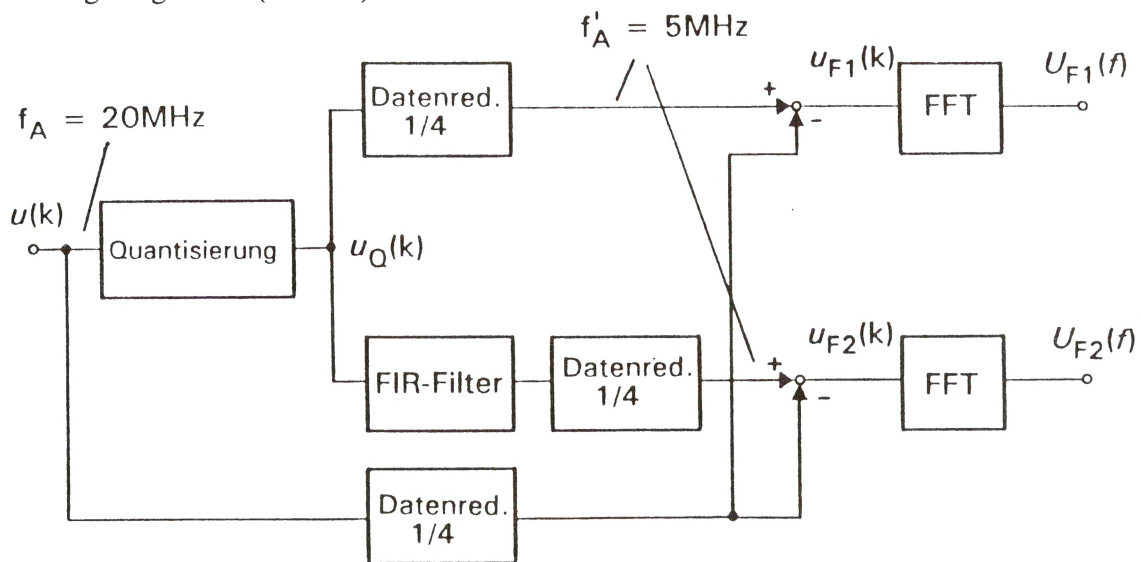


Bild 11: Untersuchung der Wirkung der Überabtastung mit anschließender Filterung

Der mit 20 MHz abgetastete Datensatz wird nach der Quantisierung (hier 10 Bit) mit einem FIR-Filter der Grenzfrequenz 1 MHz gefiltert. Die anschließende Datenreduktion erlaubt einen Vergleich des berechneten Quantisierungsrauschsignals $u_{F2}(k)$ mit dem Rauschsignal, das aus dem nicht gefilterten Datensatz berechnet wird. In Bild 12 ist der Frequenzgang des FIR-Filters, dessen Phasenverlauf über der Frequenz linear und dessen Gruppenlaufzeit somit konstant ist, dargestellt.

Bild 13 zeigt das Spektrum des Quantisierungsrauschens mit und ohne Filterung. Bis auf einzelne Frequenzen liegt das Spektrum des Signals $u_{F2}(k)$ unter jenem des Signals $u_{F1}(k)$, d. h. es wurde nahezu über den gesamten Frequenzbereich eine Verringerung des Rauschspektrums um ca. 5 - 10 dB erzielt.

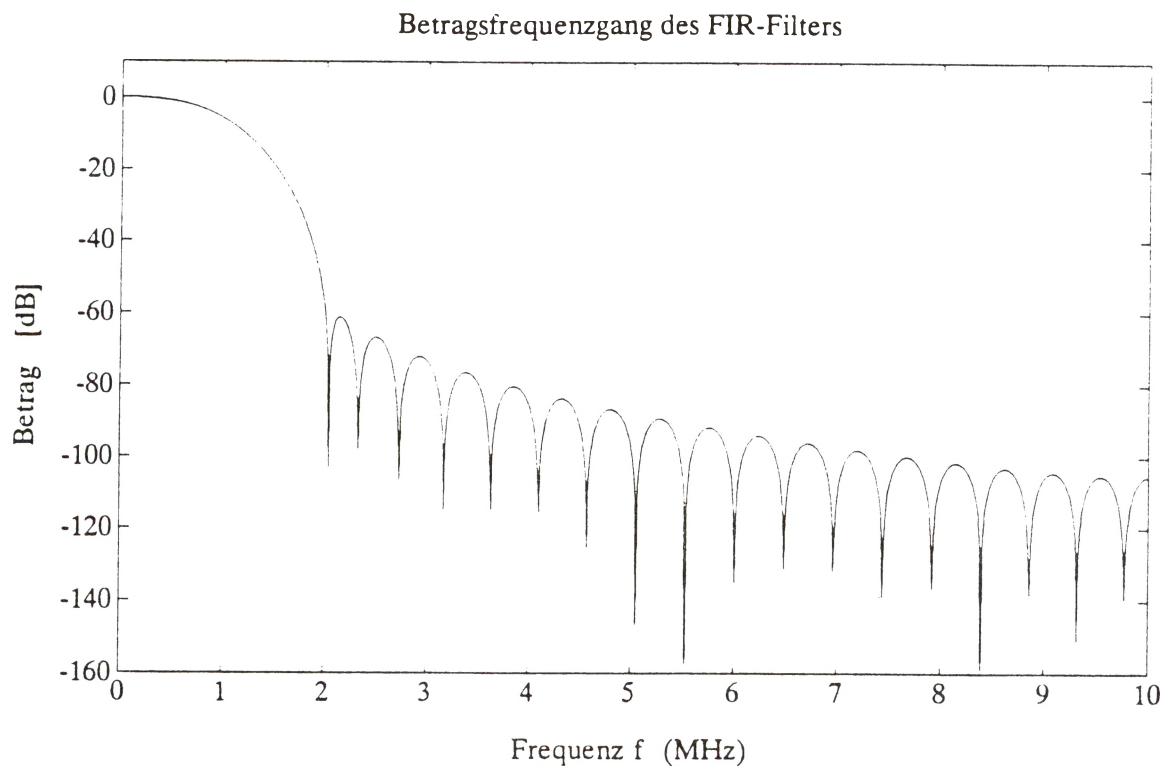


Bild 12: Frequenzgang des FIR-Filters

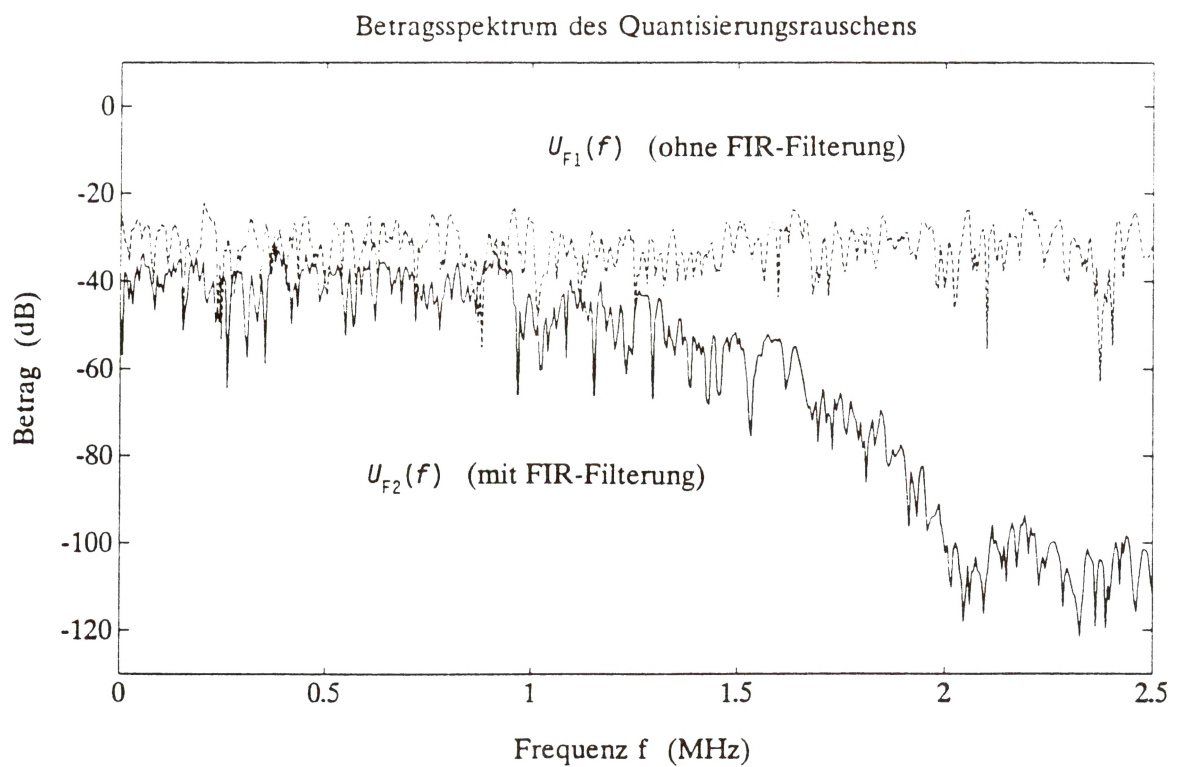


Bild 13: Spektrum des Quantisierungsrauschsignals mit und ohne Filterung

Die Erklärung für diesen Effekt liegt in der Mittelwertbildung durch das Filter. Die scharfen Kanten, die im Signal durch die Quantisierung entstehen, werden verschliffen (Bild 14). Dadurch ergibt sich eine Amplitudenverringering des Quantisierungsrauschens im Zeitbereich; dies hat auch eine Verringerung des Betragsspektrums des Rauschsignals zur Folge.

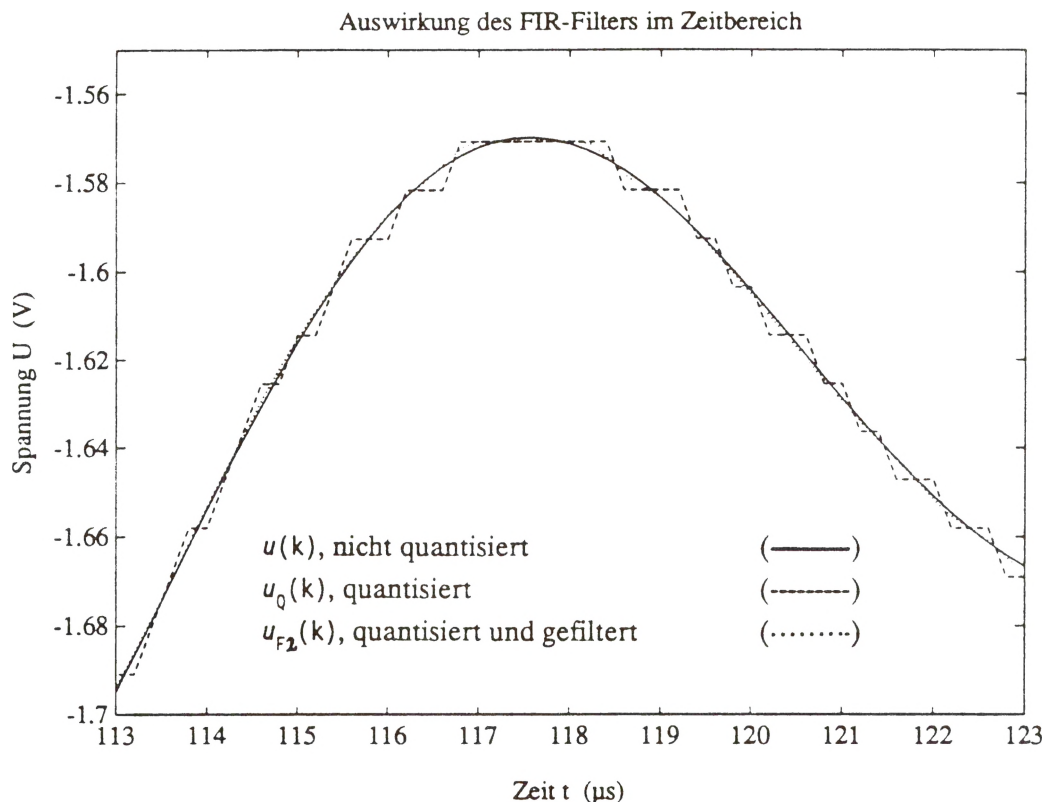


Bild 14: Auswirkungen der Filterung auf das quantisierte Signal

4.2 Anwendung des Filterverfahrens auf Meßdaten

Bild 15 zeigt den Betrag der Transferfunktion für zwei nacheinander aufgezeichnete Vollstöße mit und ohne Filterung bei einer Abtastfrequenz von 20 MHz und einer Datenreduktion im Verhältnis 1:4 (d. h. $f_A = 5$ MHz).

Im unteren Frequenzbereich ist eine deutliche Verbesserung der Übereinstimmung der Transferfunktionen feststellbar (Bild 15). Bei höheren Frequenzen (> 400 kHz) ergibt sich jedoch lediglich eine Glättung der Transferfunktionen.

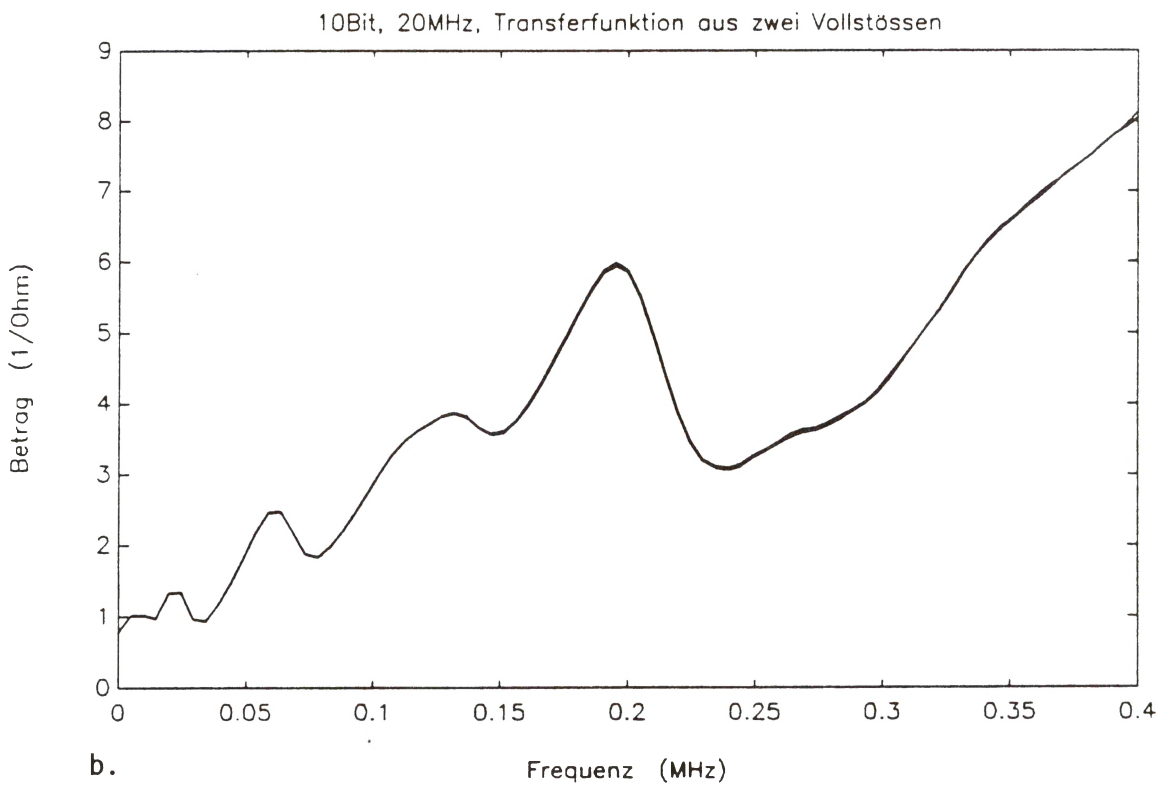
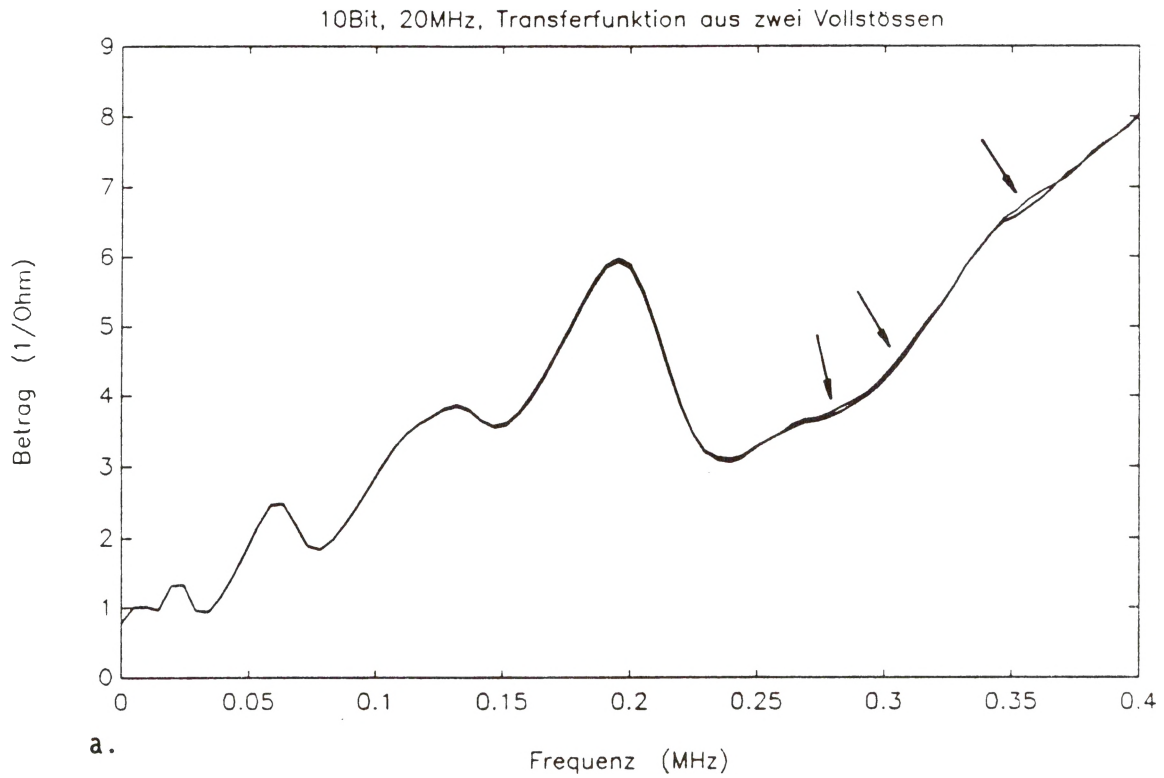


Bild 15: Transferfunktionen zweier nacheinander aufgezeichneter Vollstöße
 a. ohne Filterung
 b. mit Filterung

4.3 Diskussion des Filterverfahrens

Durch Anwendung des Filterverfahrens (Überabtastung und anschließende Softwarefilterung) sind neben einem Datenerfassungsgrät keine zusätzlichen Hardwarekomponenten wie beispielsweise Anti-Aliasing-Filter erforderlich. Die Abtastfrequenz muß dazu so groß gewählt werden, daß das Spektrum der gemessenen Signale bis zur halben Abtastfrequenz vollständig verschwunden ist. Da die Softwarefilter als FIR-Filter mit linearer Phase ausgeführt werden können, werden alle Signalanteile um dieselbe konstante Laufzeit verzögert. Dies bereitet bei Hardware-Filtern Schwierigkeiten, da sie nur in einem bestimmten Frequenzbereich einen linearen Phasengang haben. Abgesehen davon sind die Filtereigenschaften bei Hardware-Filtern aufgrund von Bauteiltoleranzen von Filter zu Filter unterschiedlich.

5. Zusammenfassung

Die Analyse der Transferfunktion kann zukünftig ein wichtiges Hilfsmittel zur Diagnose der Qualität von Transformatoren bei einer Stoßspannungsprüfung darstellen. Dazu müssen jedoch die Leistungsmerkmale des Verfahrens und deren Grenzen genau bekannt sein.

Aufgrund der bei der Signalaufzeichnung erfolgenden Quantisierung entstehen Fehler in der aus diesen Signalen berechneten Transferfunktion des Transformators. In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem ein maximaler Fehler der Spektren der beim Stoßvorgang aufgezeichneten Signale Strom und Spannung und damit auch ein maximaler Fehler der Transferfunktion berechnet werden kann.

Schließlich wird gezeigt, mit welchen Methoden sich die Auswirkungen der Quantisierung auf die Transferfunktion verringern lassen. Dazu wird ein Verfahren vorgestellt, das auf der Überabtastung und anschließenden Filterung mit Datenreduktion basiert.

6. Literatur

- /1/ R. Malewski and B. Poulin, "Impulse Testing of Power Transformers using the Transfer Function Method", IEEE TPD-3, no. 2, pp.476-489, April 1988

- /2/ T. Leibfried, K. Feser, "Some Aspects using the Transfer Function Concept in High Voltage Impulse Testing of Transformers", 1st Int. Symp. on Digital Techniques in High-Voltage Measurements, Toronto 1991
- /3/ T. Leibfried, K. Feser, "Anforderungen an das Meßsystem zur Bestimmung der Transferfunktion", HTS Symposium 1992