

Forschungsinstitut der Forschungs-
gemeinschaft für Elektrische
Anlagen und Stromwirtschaft e.V
Name der Forschungsstelle(n)

11359 N / III

AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

1.1.1998 bis 31.12.1999
Bewilligungszeitraum

Schlussbericht für den Zeitraum : 01.01.1998 bis 31.12.1999

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten Forschungsvorhaben

Forschungsthema :

**Übertragungsverhalten von Hochstrom-Messeinrichtungen
für transiente Ströme**

Forschungsinstitut der Forschungs-
gemeinschaft für Elektrische Anlagen
und Stromwirtschaft e.V.
Hallenweg 40
68219 Mannheim

Mannheim, 20.4.00

Ort, Datum

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'O. Pöhl', written over a horizontal line.

Unterschrift der/des Projektleiter(s)

Inhaltsverzeichnis:

	Seite	
1	Forschungsthema	4
2	Zusammenfassung	4
3	Forschungsinhalt	5
3.1	Wissenschaftliche Problemstellung.....	5
3.2	Forschungsziel und Lösungsweg.....	5
4	Vorbereitung und Entwurf des Stromsprung-Generators	6
4.1	Vorbereitende Arbeiten.....	6
4.1.1	Auswertung der vorangegangenen Studie.....	6
4.1.2	Werkzeuge zur Ermittlung der Übertragungsfunktion.....	7
4.2	Entwurf des Stromsprung-Generators.....	8
4.2.1	Beschreibung der Bauelemente.....	8
4.2.2	Mechanischer Aufbau.....	9
4.2.3	Elektrischer Aufbau.....	10
5	Erprobung und Korrektur des Stromsprung-Generators	11
5.1	Inbetriebnahme.....	11
5.2	Korrekturen.....	11
5.2.1	Steuerung des Stromsprung-Generators.....	11
5.2.2	Schaltung der IGBT-Module.....	12
5.3	Messung des Eingangssignals mit einem Messnormal.....	16
5.4	Ermittlung der Sprungparameter.....	17
5.4.1	Einfluss von Stromhöhe und Zuleitungslänge.....	17
5.4.2	Welligkeit des Stromsprungs.....	18
6	Durchgeführte Untersuchungen an Hochstrom-Messeinrichtungen	20
6.1	Messungen an Shunts.....	20
6.2	Messungen an Stromwandlern.....	22
6.3	Messungen an Rogowski-Stromwandlern.....	24
7	Schlussfolgerungen und Ausblick	28
8	Literatur	29
9	Anhang: Messergebnisse	30
9.1	Messungen am Shunt L144101.....	30
9.1.1	Messungen am Shunt L144101 bei 200 A Stromsprung.....	30
9.1.2	Messungen am Shunt L144101 bei 400 A Stromsprung.....	33
9.1.3	Messungen am Shunt L144101 bei 600 A Stromsprung.....	36
9.1.4	Messungen am Shunt L144101 bei 800 A Stromsprung.....	38
9.2	Messungen am Shunt L144103.....	40
9.3	Messungen am Stromwandler L143603.....	43
9.3.1	Messungen am Messkern des Stromwandlers L143603.....	43
9.3.2	Messungen am Schutzkern des Stromwandlers L143603.....	46

9.4	Messungen am Stromwandler L143128	49
9.4.1	Messung bei 50-A-Schaltung des Stromwandlers L143128	49
9.4.2	Messungen bei 100-A-Schaltung des Stromwandlers L143128	52
9.4.3	Messungen bei 200-A-Schaltung des Stromwandlers L143128	55
9.4.4	Messungen bei 400-A-Schaltung des Stromwandlers L143128	58
9.5	Messungen am Rogowski-Stromwandler L143617	61
9.5.1	Messungen am Rogowski-Stromwandler L143617 bei normaler Anstiegszeit....	61
9.5.2	Messungen am Rogowski-Stromwandler L143617 bei langer Anstiegszeit.....	64
9.6	Messungen am Rogowski-Stromwandler L143624	67
9.6.1	Messungen am Rogowski-Stromwandler L143624 bei normaler Anstiegszeit....	67
9.6.2	Messungen am Rogowski-Stromwandler L143624 bei langer Anstiegszeit.....	70

1 Forschungsthema

Übertragungsverhalten von Hochstrom-Messeinrichtungen für transiente Ströme

2 Zusammenfassung

Im Rahmen des AiF-Forschungsvorhaben Nr. 11359, gefördert aus Haushaltsmitteln des Bundesministerium für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) wurde von der FGH ein Rechteck-Stromsprung-Generator für die Untersuchung des Übertragungsverhaltens von Strommessgeräten entwickelt. Der Generator kann im Kurzzeitbetrieb Stromsprünge von bis zu 1000 A erzeugen, wobei die Anstiegszeit des Stromsprunges bei rein ohmscher Last unter $1\mu\text{s}$ liegt.

Der Stromsprung-Generator besteht aus einer geregelten Gleichstromerzeugung mit einer Glättungsdrossel sowie einem Kurzschlusskreis und einem Prüfkreis, die beide mit jeweils einem voneinander unabhängig arbeitenden IGBT-Modul zu- und abgeschaltet werden können. Zur Sprungerzeugung wird zunächst der Kurzschlusskreis eingeschaltet und der Strom mit der Drehstrombrücke auf die gewünschte Höhe geregelt. Dann wird mittels der IGBT-Module zur gleichen Zeit der Kurzschlusskreis aufgetrennt und der Prüfkreis geschlossen. In dieser Phase speist die Glättungsdrossel aufgrund ihrer hohen Induktivität den in der Höhe weitgehend unveränderten Gleichstrom in das System. Spannungsspitzen, die entstehen, wenn die Auftrennung des Kurzschlusskreises vor der völligen Leitfähigkeit des Prüfkreises eintritt, werden durch eine Kommutierungskapazität und Varistoren begrenzt. Durch die schnelle Kommutierung des Stromes vom Kurzschlusskreis in den Prüfkreis entsteht dort nahezu ein Rechtecksprung (Einheitssprung), der gleichzeitig von dem untersuchten Strommessgerät sowie dem in Reihe geschalteten Referenz-Shunt gemessen wird. Nach erfolgter Messung werden dann wiederum gleichzeitig der Prüfkreis aufgetrennt und der Kurzschlusskreis geschlossen, so dass auch die abfallende Flanke des Stromsprungs sehr steil wird. Zum Abschalten des Generators kann der Strom heruntergeregelt und der Kurzschlusskreis aufgetrennt werden.

Die Form des so erzeugten Stromsprungs ist recht gut reproduzierbar, wird aber dennoch von der angeschlossenen Last beeinflusst, weswegen immer der Referenz-Shunt zur Messung der tatsächlichen Form des Stromsprungs eingesetzt wurde.

Zur Beurteilung des untersuchten Strommessgerätes werden nun die beiden mit einem Transienten-Rekorder aufgezeichneten Messsignale einer Fourier-Analyse unterzogen. Die Übertragungsfunktion des Prüflings wird berechnet, indem dessen Ausgangssignal im Frequenzbereich durch das ebenfalls transformierte Messsignal des Referenz-Shunts geteilt wird. Mit Hilfe der Übertragungsfunktion ist es möglich, Aussagen über den Maßstabsfaktor und Winkelfehler des Messgerätes im untersuchten Frequenzbereich zu treffen und so seine Eignung für Messungen in diesem Bereich festzustellen.

Im Verlauf dieses Projektes wurden Messungen mit mehreren Shunts, Stromwandlern und Rogowski-Stromwandlern durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen an Shunts und Stromwandlern können in allen Belangen als gut und reproduzierbar bezeichnet werden, Messungen an Rogowski-Stromwandlern erwiesen sich als problematisch. Dies ist nicht in der Messtechnik begründet, sondern in der Tatsache, dass Rogowski-Stromwandler den Rechteck-Stromsprung bei der Messung differenzieren – was zu sehr kurzen relevanten Messsignalen führt - und dieses Messsignal anschließend integriert werden muss. Eine Beurteilung von Rogowski-Stromwandlern ist deshalb nur sinnvoll, wenn die standardmäßig mit dem Wandler benutzten Integratoren oder die standardmäßig benutzte Auswerte-Software mit in die Messung einbezogen wird.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

3 Forschungsinhalt

3.1 Wissenschaftliche Problemstellung

Die in Normen und internationalen Vorschriften für elektrische Betriebsmittel vorgesehenen Prüfungen fordern zum Teil den Einsatz sehr hoher Ströme. Solche Prüfungen werden deshalb in eigens hierfür ausgestatteten Hochleistungsversuchsfeldern durchgeführt.

Um den praktischen Beanspruchungen zu entsprechen, müssen in Hochleistungsversuchsfeldern häufig Ströme erzeugt werden, die neben der Betriebsfrequenz auch abweichende Frequenzanteile aufweisen. Hierbei handelt es sich um Frequenzen von wenigen Hertz (Gleichstromanteile mit großen Zeitkonstanten) bis zu 10 Kilohertz (kapazitives oder induktives Schalten). An die Genauigkeit der Strommessung sind dabei hohe Anforderungen zu stellen, da zu prüfende Betriebsmittel und Anlagen einerseits den vorgeschriebenen Belastungen tatsächlich auszusetzen sind, andererseits zu hohe Beanspruchungen vermieden werden müssen [1].

Aus diesem Grund ist für Hochstrom-Messeinrichtungen eine regelmäßige Kalibrierung vorgesehen. Diese Kalibrierungen sind zur Zeit für Ströme mit Betriebsfrequenz (50 Hz) bis zu einem Effektivwert von 50 kA spezifiziert [2]. Verfahren und Anordnungen zur Kalibrierung des Übertragungsverhaltens bei von der Betriebsfrequenz (50 Hz) abweichenden Strömen fehlen in den Kalibriervorschriften für Hochstrom-Messmittel gänzlich. Diese sind darum für eine ordnungsgemäße Kalibrierung noch zu erarbeiten.

Zur Beurteilung des Übertragungsverhaltens über einen weiten Frequenzbereich ist es sinnvoll, ein Eingangssignal zu erzeugen, welches Anteile aller interessierenden Frequenzen enthält. Ein idealer Einheitssprung würde Anteile aller Frequenzen enthalten [3]. Da ein idealer Stromsprung aber nicht erzeugt werden kann, ist es notwendig die Parameter Steilheit und Dauer so festzulegen, dass einerseits alle zu untersuchenden Frequenzen enthalten sind und andererseits der Stromsprung mit einer transportablen, d.h. vor Ort einsetzbaren Einheit, mit vertretbarem Aufwand erzeugt werden kann. Die Größe der Amplituden der enthaltenen Frequenzanteile lässt sich durch eine Fourier-Analyse ermitteln. An Hand der Sprungantwort bzw. deren Fourier-Analyse lässt sich dann die Übertragungsfunktion der Messeinrichtung über den untersuchten Frequenzbereich ermitteln.

Da die gelieferte Antwort des Messsystems in starkem Maße von der Art des benutzten Stromsprung-Generators beeinflusst wird, ist eine verlässliche, vergleichbare Kalibrierung bei von 50 Hz abweichenden Frequenzen derzeit nicht möglich. Es fehlen Angaben zur Übertragbarkeit der mit Betriebsfrequenz durchgeführten Kalibrierung ebenso wie Kenntnisse über die zu fordernden Genauigkeiten. Dies begründet den Forschungsbedarf.

3.2 Forschungsziel und Lösungsweg

Forschungsziel war die Entwicklung eines transportablen Stromsprung-Generators zur Untersuchung des Übertragungsverhaltens von Hochstrom-Messeinrichtungen für transiente Ströme. Dieser Generator soll zur Kalibrierung von Hochstrom-Messeinrichtungen in Leistungsversuchsfeldern vor Ort eingesetzt werden können.

Der eingeschlagene Lösungsweg beinhaltete folgende Schritte:

a) Vorbereitung und Entwurf des Stromsprung-Generators

Hierzu gehören die Sichtung und Auswertung vorliegender Ergebnisse der Untersuchung „Traceability of High-current Measuring Systems in High-power Laboratories to Standards of Measurement“ [4], darauf aufbauend die Festlegungen zum zu untersuchenden Frequenz-

band und die daraus resultierenden Überlegungen zu den Parametern des Stromsprungs. Der Entwurf der Schaltung schließt die Auswahl geeigneter Komponenten und den Aufbau als transportable Einheit mit ein.

b) Erprobung und Korrektur des Stromsprung-Generators

Zu diesem Arbeitsschritt gehört die Inbetriebnahme des Generators mit den zugehörigen Steuerelementen. Es wird die korrekte Funktion der aufgebauten Schaltung erprobt und die Parameter des entstehenden Stromsprungs werden überprüft. Anhand einiger Messungen des Übertragungsverhaltens verschiedener Hochstrom-Messeinrichtungen wird die Tauglichkeit der verwendeten Schaltung nachgewiesen. Aufgrund erster Auswertungen der Sprungantworten werden Aussagen zum Frequenzband getroffen, für das verlässliche Aussagen möglich sind. Aus den Erfahrungen dieser Versuche werden notwendige Korrekturen am Stromsprung-Generator abgeleitet.

c) Untersuchungen zum Übertragungsverhalten von Messeinrichtungen

Umfangreiche Untersuchungen an den in den Labors der FGH e.V. in Mannheim vorhandenen Hochstrom-Messeinrichtungen verschiedenen Wirkprinzips schließen das Projekt ab. Eine Auswertung und Diskussion der Ergebnisse ist in diesem Bericht enthalten.

Auf eine Festlegung der Parameter des Stromsprungs in Rücksprache mit den betroffenen Gremien und der PTB wurde verzichtet, da einerseits die Umsetzung der Zielvorgaben für die wesentlichen Parameter, wie z.B. Steilheit der Flanken und Welligkeit des Gleichstromes, erheblich besser als zu Beginn angenommen realisiert werden konnte, andererseits diese Parameter durch Eigenschaften der zu prüfenden Messgeräte wesentlich beeinflusst werden. Die Vorgabe, ein einheitliches, für alle Messeinrichtungen identisches Eingangssignal zu erzeugen, wurde deshalb im Laufe des Vorhabens fallen gelassen. Durch Transformation des jeweiligen Aus- und Eingangssignals in den Frequenzbereich und Quotientenbildung war jedoch die Auswertbarkeit im interessierenden Frequenzband jederzeit möglich, so dass diesem Verfahren Vorzug gegeben wurde.

4 Vorbereitung und Entwurf des Stromsprung-Generators

4.1 Vorbereitende Arbeiten

4.1.1 Auswertung der vorangegangenen Studie

Im Gegensatz zu Hochspannungs-Messeinrichtungen, die in Laboratorien eingesetzt werden und nach IEC 60060-2 spezifiziert sind, gibt es für Hochstrom-Messeinrichtungen bei Hochleistungsprüfungen keine festgelegten Anforderungen zur Rückführbarkeit auf nationale Messnormale. Wegen dieses Mangels haben sieben namhafte europäische Leistungsprüffelder an einem Ringvergleich teilgenommen, mit dem Ziel die notwendigen Parameter, geeignete Verfahren und erreichbare Messgenauigkeiten für solche Messeinrichtungen zu ermitteln.

Die Vergleichsmessungen wurden anhand zweier mobiler Messeinrichtungen inklusive der optischen Datenübertragungstrecken durchgeführt, um äußere Beeinflussungen weitestgehend zu vermeiden. Die Untersuchungen beinhalteten Messungen an betriebsfrequenten Strömen mit und ohne abklingenden Gleichstromanteil mit Stoßströmen bis zu 350 kA wie auch Messungen einiger hochfrequenter Ströme mit Frequenzen von einigen Kilohertz.

Die Ergebnisse zeigten, dass eine Kalibrierung bei Betriebsfrequenz und eine Untersuchung des Verhaltens bei davon abweichenden Frequenzen notwendig sind. Die Rückführbarkeit der Messungen für Betriebsfrequenz konnte nachgewiesen werden. Für höhere Frequenzen

fehlt diese weiterhin. Ähnlich wie für Hochspannungs-Messeinrichtungen konnte für Hochstrom-Messeinrichtungen in Laboratorien eine Messunsicherheit von 3 bis 5 % über den gesamten Bereich bei Betriebsfrequenz ermittelt werden sowie eine Messunsicherheit von 1 % für Referenzsysteme. Für höherfrequente Ströme lagen die ermittelten Messunsicherheiten bis zu einem Faktor drei höher.

Ausgehend von diesen Ergebnissen und den Anforderungen in Hochleistungsprüffeldern wurde ein Frequenzband von wenigen Hertz (abklingender Gleichanteil) bis zu etwa 10 kHz (subtransiente Vorgänge) als für die anstehenden Untersuchungen relevant ermittelt. Daraus ergab sich die Notwendigkeit, die Anstiegszeiten der Flanken auf maximal 10 μ s zu beschränken, was wie bereits oben beschrieben, sogar unterschritten werden konnte. Die Dauer des Stromsprungs sollte für Untersuchung der Übertragungsfunktion im unteren Frequenzbereich möglichst eine Sekunde oder länger betragen.

4.1.2 Werkzeuge zur Ermittlung der Übertragungsfunktion

Die Übertragungsfunktion definiert den Zusammenhang zwischen dem Eingangssignal eines Systems und dessen Ausgangssignal im Frequenzbereich. Für die Berechnung der Übertragungsfunktion transformiert man zunächst das Eingangs- ($f(t)$) und Ausgangssignal ($g(t)$) des Systems in den Frequenzbereich und erhält so $F(j\omega)$ und $G(j\omega)$:

$$F(j\omega) = \int_0^T f(t) \cdot e^{j\omega t} dt$$

$$G(j\omega) = \int_0^T g(t) \cdot e^{j\omega t} dt$$

Die Übertragungsfunktion $H(j\omega)$ berechnet man jetzt, indem man $G(j\omega)$ durch $F(j\omega)$ teilt:

$$H(j\omega) = \frac{G(j\omega)}{F(j\omega)}$$

Da es sich bei den hier betrachteten Signalen nicht um stetige Signale handelt, muss man sie für eine korrekte Fourier-Analyse vorher noch aufbereiten. Dazu verdoppelt man durch Anfügen eines zweiten Datenfeldes gleicher Dimension die Länge des ursprünglichen Signals. Die Werte für das neue Datenfeld gewinnt man, indem man das Originalsignal an der Zeitachse spiegelt und dann mit einem Offset derart versieht, dass der erste Punkt des neuen Feldes den gleichen Wert hat wie der letzte Punkt des ursprünglichen Feldes. Das führt zu einem periodischen Signal mit einer Symmetrie dritter Art, was bedeutet, dass alle geraden Koeffizienten bei der Fourier-Analyse Null werden. Gleichzeitig wird durch die Verdoppelung der Länge des ursprünglichen Signals die Grundfrequenz halbiert. Beides zusammen führt dazu, dass die Frequenzen, die die Fourier-Analyse des aufbereiteten Signals enthält, nicht mit den Frequenzen einer Fourier-Analyse des Signals mit Originallänge übereinstimmen. Alle Frequenzen der Analyse des aufbereiteten Signals sind wegen der doppelten Signallänge um die halbe Grundfrequenz des ursprünglichen Signals nach unten verschoben. Für die Ermittlung der Übertragungsfunktion ist dies aber ohne Bedeutung.

Ein Werkzeug zur Ermittlung der Übertragungsfunktion nach dem oben beschriebenen Verfahren aus dem gemessenen Verlauf des Eingangs- und des Ausgangssignal wurde für dieses Vorhaben erstellt. Mit Hilfe dieses Werkzeuges ist es möglich, Aussagen über den Maßstabsfaktor und den Winkelfehler des untersuchten Messwertempfängers in einem bestimmten Frequenzbereich zu machen und so seine Eignung für Messungen in diesem Bereich festzustellen.

Die Übertragungsfunktion eines untersuchten Strommessgerätes wurde im allgemeinen über zwei Messungen bestimmt, einer Messung mit einer Abtastzeit von 100 ns und einer zweiten mit einer Abtastzeit von 10 µs. Bei 200.000 ausgewerteten Punkten ergeben sich dann bei der Fourier-Analyse unter Berücksichtigung der erwähnten Signalverdoppelung Grundfrequenzen von 25 und 0,25 Hz bei Frequenzrastern von 50 und 0,5 Hz. In den Bildern des Anhangs wurden der Übersichtlichkeit wegen nur die ausgewerteten Frequenzen bis 25 kHz und 250 Hz dargestellt. Bei Bedarf lassen sich diese Frequenzbereiche natürlich noch vergrößern.

4.2 Entwurf des Stromsprung-Generators

4.2.1 Beschreibung der Bauelemente

Zum Entwurf der Schaltung wurden zunächst verschiedene Schaltungsvarianten miteinander verglichen und mittels der digitalen Berechnungsprogramme EMTP/EMTDC auf ihre Tauglichkeit bezüglich der Umsetzung der angestrebten Stromsprung-Parameter hin untersucht. Schließlich wurde eine Schaltung unter Benutzung fabrikfertiger Schaltelemente bevorzugt. Nachfolgende Elemente wurden ausgewählt:

Netztransformator:

Hersteller:	ismet Transformatoren GmbH
Typ:	Dreiphasen- Tranformator DAWTG 38,5
Frequenz:	50 / 60 Hz
Schaltgruppe:	Yy0
Nennleistung:	38,5 kVA
Uprimär:	3 x 400V
Usekundär:	3 x 16 – 18 – 20 – 22 V, primärseitige Umschaltung
Isekundär:	1010 A
Prüfspannung:	3 kV
Gewicht:	200 kg

Gleichrichterbrücke:

Hersteller:	Setzermann-Elektronik
Typ der Brücke:	Vollgesteuerte Sechspuls-Brückenschaltung mit Freilaufdiode B6CF 125/165-400/1490 GTA1 mit Schutzplatine
Typenanschlussspannung (Ueff):	125 V
Typengleichspannung:	165 V
Dauergrenzeffektivstrom:	1220 A bei verstärkter Kühlung (3 m/s)

Brückensteuerung:

Hersteller:	REO Elektronik GmbH
Typ:	REOTRON MDZ 594.18
Anschlussspannung:	3 x 400 V, 50 / 60 Hz
Istwerteingang Spannung:	0..40 V
Istwerteingang Strom:	0..75 mV

Glättungsdrossel:

Hersteller:	ismet Transformatoren GmbH
Typ:	GD
Induktivität:	1,59 mH
Widerstand:	13,4 mΩ
Strom:	1010 A
Prüfspannung:	1,5 kV
Spieldauer:	15 s Last, 120 s Pause
Gewicht:	340 kg

IGBT-Module:

Hersteller:	Semikron International
Typ:	SkiIP 1442 GAL120-413CTV (Kurzschlusskreis) und SkiIP 1442 GAR120-414CTV (Prüfkreis) auf Kühler P16/360 F mit Lüfter
IC:	1400 A
VCE:	1200 V
VISOL (AC):	3000 V, 1 min

Varistoren:

Hersteller:	Siemens Matsushita Components
Typ:	SIOV-B80K385
Max. Schutzpegel:	1025 V bei 800 A
Max. Energieabsorption:	2000 Ws

4.2.2 Mechanischer Aufbau

Der Stromsprung-Generator (SSG) sollte trotz dem hohen Gewicht der einzelnen Bauteile kompakt und transportabel sein. Aus diesem Grund wurden der Netztransformator, die Drosselspule für die Glättung des Gleichstromes und ein Schaltkasten für den Netzan- schluss in ein tischhohes Stahlgestell eingebaut, das noch mit einem Hubwagen verfahren werden kann. Auf dieses Gestell wurde eine Pertinaxplatte geschraubt, auf der die Gleich- richterbrücke, die IGBT-Module und die Schaltungssteuerung montiert wurden. Der SSG hat eine Grundfläche von 1,0 x 1,2 m² bei eine Höhe von 1,1 m und einem Gewicht von ca. 320 kg. Der Netzanschluss erfolgt über einen 50-A-CEE-Stecker. Bild 4.1 zeigt den Aufbau des SSG in betriebsfertigem Zustand.

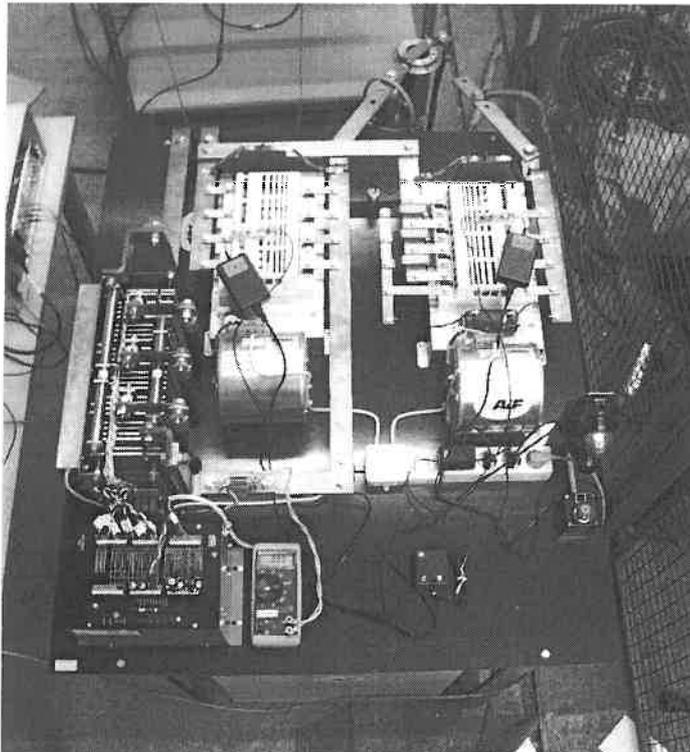


Bild 4.1 Aufbau des 1000-A-Stromsprung-Generators.

4.2.3 Elektrischer Aufbau

Gleichstromerzeugung (Bild 4.2):

Mittels des 35-kVA-Netztransformators Tr wird die 400-V-Netzspannung auf einen Wert zwischen 16 V und 22 V herunter transformiert und anschließend mit der 6-pulsigen Gleichrichterbrücke $T_1 - T_6$ gleichgerichtet. Die 1,59-mH-Glättungsdrossel L_g sorgt für eine geringe Welligkeit des Gleichstromes. Die in der Brücke eingebaute Freilaufdiode D_b dient zum Schutz der Gleichrichterbrücke.

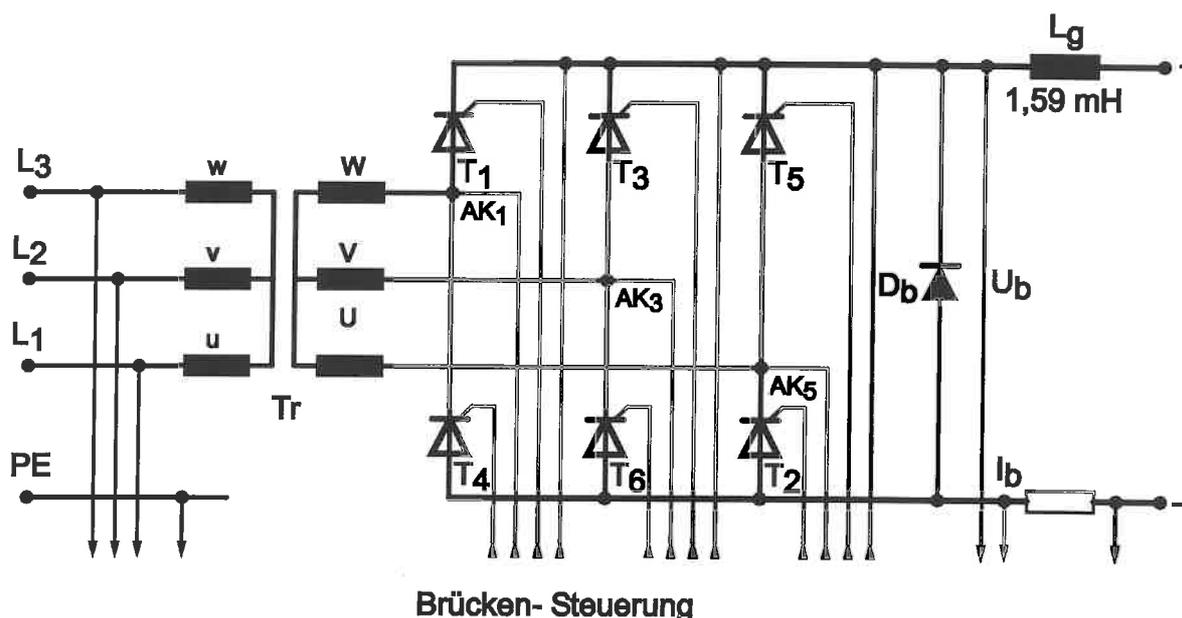


Bild 4.2 Schaltbild der Gleichstromerzeugung

Die Netzspannung dient zur Synchronisation der Brückensteuerung. Die Sollwerte für die Ausgangsspannung der Brücke und den Brückenstrom können an der Brückensteuerung vorgegeben werden. Die Istwerte der Spannung U_b und des mit einem Shunt gemessenen Stroms I_b werden von der Brückensteuerung verarbeitet und über die Ansteuerung der Thyristoren der Gleichrichterbrücke entsprechend den Sollwerten geregelt.

Schaltung zur Sprungerzeugung (Bild 4.3):

Bei der Sprungerzeugung werden in der ursprünglichen Variante zunächst beide IGBT-Module M_1 und M_2 durchgeschaltet. Danach wird die Gleichrichterbrücke eingeschaltet und der gewünschte Strom I_b wird eingestellt. Dieser Strom verteilt sich jetzt auf Kurzschluss- und Prüfkreis. Da der Strom I_p im Prüfkreis im Gegensatz zum Strom I_k im Kurzschlusskreis noch die Diode D_1 mit einer Schwellspannung von ca. 1,2 V überwinden muss, fließen jetzt im Prüfkreis ca. 15 % des Brückenstromes, die restlichen 85 % fließen im Kurzschluss durch den Schalter S_1 . Um einen Stromsprung im Prüfkreis zu erhalten, wird einfach der Schalter S_1 geöffnet. Der gesamte Brückenstrom wird jetzt automatisch durch den bereits geschlossenen Schalter S_2 und den Prüfling R_p/L_p getrieben. Wird der Schalter S_1 wieder geschlossen, so kommutiert der Hauptteil des Stromes wegen des Spannungsfalls an D_1 wieder in den Kurzschlusskreis zurück und die Gleichrichterbrücke kann heruntergefahren werden. Danach werden M_1 und M_2 wieder abgeschaltet.

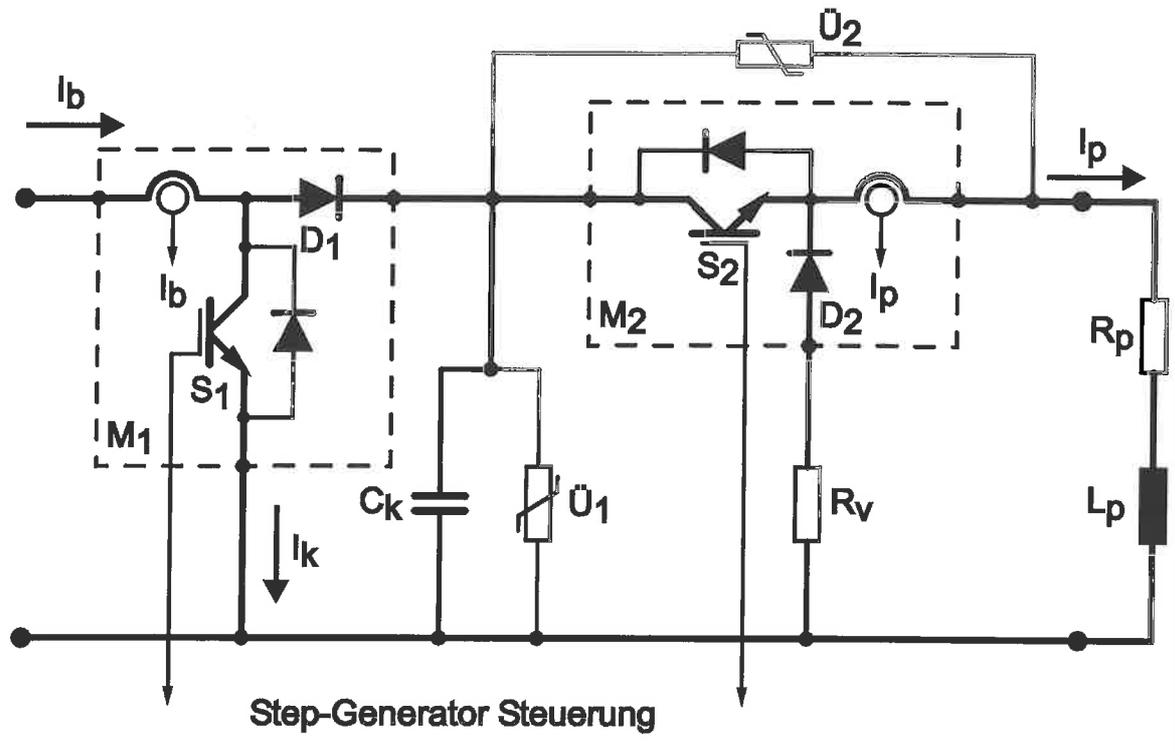


Bild 4.3 Schaltung zur Sprungerzeugung (ursprüngliche Variante)

5 Erprobung und Korrektur des Stromsprung-Generators

5.1 Inbetriebnahme

Da die Kommutierung des von der Glättungsdrossel getriebenen Gleichstromes vom Kurzschlusszweig der Schaltung auf den Prüfkreis nicht unproblematisch ist, wurde für die Inbetriebnahme die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene „sichere“ Schaltung entwickelt. Dabei wurde, wie oben beschrieben, der Umstand genutzt, dass in den eingesetzten IGBT-Bausteinen außer dem eigentlichen Schalter eine zusätzliche Diode eingebaut ist.

Da der Schalter S_2 bei dieser Variante der Sprungerzeugung während des gesamten Vorgangs eingeschaltet ist, ergeben sich bei den Stromkommutierungen nur minimale Spannungsspitzen und die Gefahr von Überspannungen in der Schaltung wird effektiv verhindert. Der Nachteil dieser Schaltung ist, dass durch den vor dem Sprung im Prüfkreis fließenden Strom eine Vorbelastung des Prüflings gegeben ist, so dass Stromwandler mit dieser Schaltung nicht untersucht werden können. Die Schaltung konnte jedoch genutzt werden, um die Steuerung der gesamten Anlage gefahrlos testen zu können.

Die erste Steuerung des SSG war in einem kleinen Steuerpult untergebracht. Von diesem Pult aus erhielten die IGBT-Module ihre Versorgungsspannungen und – über prellfreie Schalter – ihre Steuersignale. Auch die Strom- und Spannungsvorgaben für die Brückensteuerung konnten vom Steuerpult aus eingestellt werden.

5.2 Korrekturen

5.2.1 Steuerung des Stromsprung-Generators

Das Konzept einer zentralen Steuerung der Anlage erwies sich schon bei den ersten Versuchen als nicht haltbar. Während der Kommutierungsvorgänge wurden hochfrequente Schwingungen im Megahertzbereich in die Flachbandkabel zwischen dem Steuerpult und

den IGBTs eingekoppelt (siehe Bild 5.1) und störten damit die gesamte Steuerung des SSG. Diesem Problem konnte nach einigen Versuchen dadurch abgeholfen werden, dass die Strom- und Spannungsvorgabe für die Brücke unmittelbar an die Brückensteuerung verlegt wurde und die IGBT-Module erdfrei mit getrennten Schaltnetzteilen versorgt wurden, die auf dem IGBT befestigt waren. Auch die prellfreien Schalter für die Ansteuerung der Schalter wurden auf die einzelnen IGBTs verlagert.

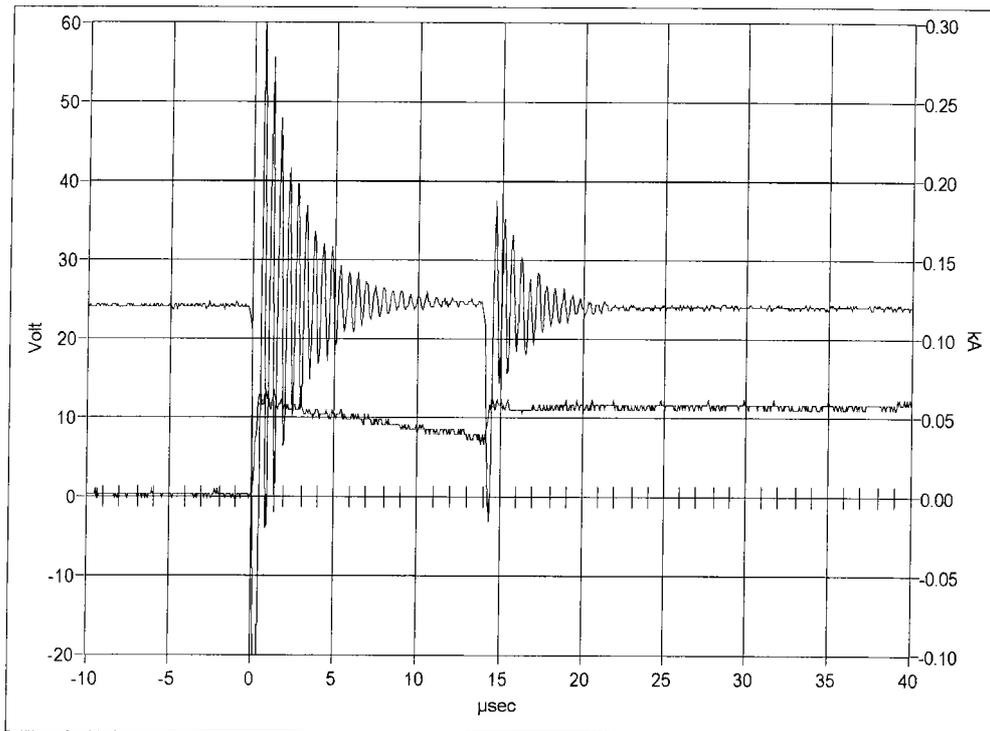


Bild 5.1 24-V-Versorgungsspannung der IGBTs und 60-A-Stromsprung bei zentraler Spannungsversorgung der IGBT-Module.

Zusätzlich wurden die Erdverbindungen der Hilfseinrichtungen wie Lüfter und Kühlkörper optimiert. Der SSG ist auf der Niederspannungsseite des Netztransformators zunächst erdfrei und wird aus Sicherheitsgründen an der Stoßerde des Labors geerdet. Die Lüftergehäuse und die damit verbundenen Kühlkörper der Gleichstrombrücke und der IGBT-Module können jetzt entweder – wie der SSG selbst – an der Laborerde oder am PE der Lüfterversorgung angeschlossen werden. Eine Untersuchung der verschiedenen Erdmöglichkeiten ergab, dass der beste Rechtecksprung des Stromes erzielt wurde, wenn alle Lüfter und Kühlkörper mit dem PE des versorgenden Netzes verbunden wurden (siehe Bild 5.2).

5.2.2 Schaltung der IGBT-Module

Obwohl in der ursprünglichen Schaltung des SSG das Kommutierungsverhalten als problemlos und schnell betrachtet werden kann, so hat diese Schaltung außer der bereits erwähnten Vorbelastung des Prüflings noch einen weiteren Nachteil, der sich besonders deutlich zeigt, wenn man die den Gleichstrom erzeugende Gleichrichterbrücke ohne Stromregelung betreibt. Am Anfang des Stromsprungs wird der Strom praktisch alleine aus dem Energiespeicher der Glättungsdrossel gespeist und ist somit eingepreßt. Wenn sich dieser Energiespeicher dann entleert, wird der Strom mehr und mehr durch die Spannung der Gleichrichterbrücke getrieben. Da die Impedanz des Prüfzweiges der Schaltung durch die Impedanz des Prüflings und insbesondere durch die zusätzliche Diode D_1 jedoch größer ist als die Impedanz des Kurzschlusszweiges, sinkt der Strom bei längeren Zeiten deutlich unter seinen Anfangswert ab und erreicht einen Endwert von ca. 80 % des Ausgangswertes (siehe Bild 5.3).

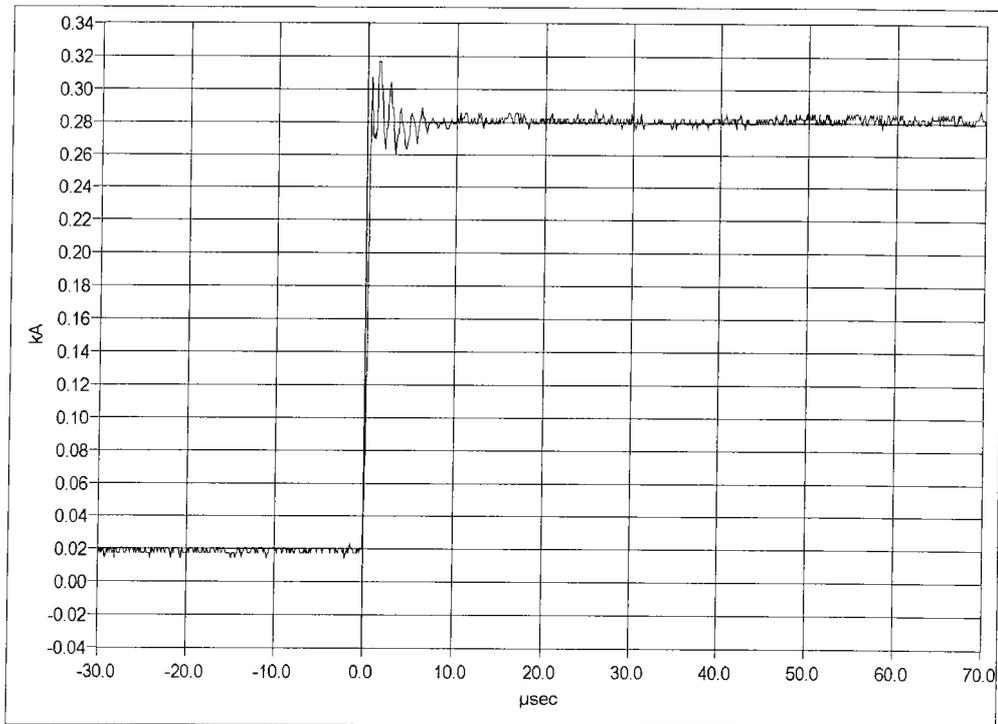


Bild 5.2 300-A-Stromsprung bei optimalen Erdverhältnissen.

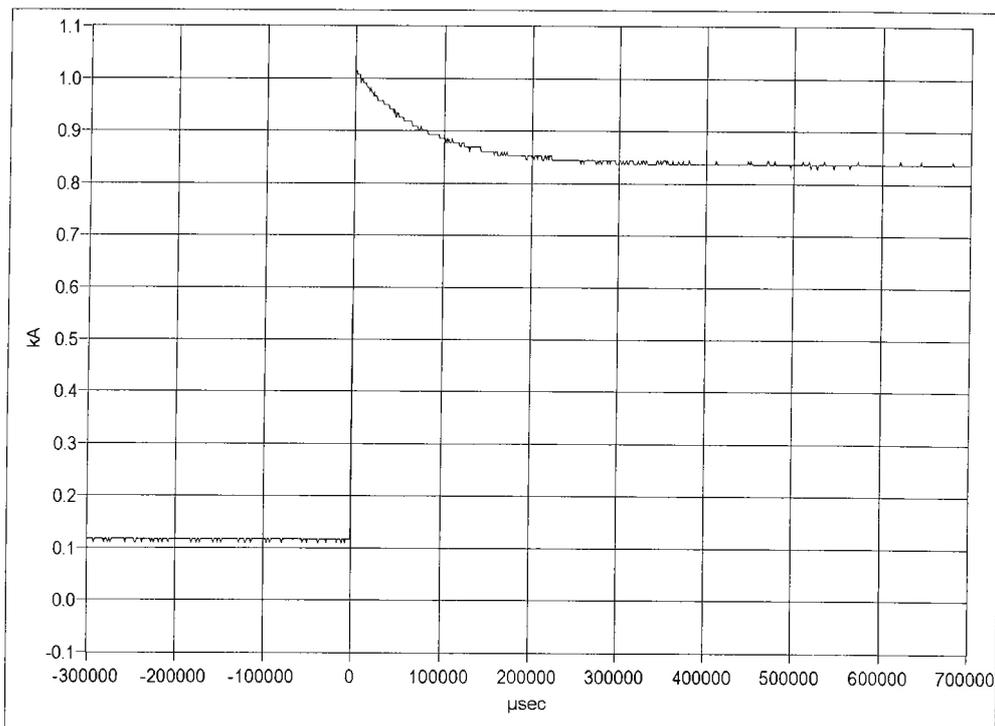


Bild 5.3 1000-A-Stromsprung bei längerer Aufzeichnungdauer.

Eine Fourier-Analyse dieses Signals und ein Vergleich mit einem Rechtecksprung gleicher Größe ohne Stromrückgang zeigte, dass sich der Stromrückgang im Übertragungsverhalten besonders im interessierenden Frequenzbereich unter 100 Hz bemerkbar macht. Die Schaltung des SSG wurde daraufhin korrigiert.

In der weiterentwickelten Schaltung des SSG (siehe Bild 5.4) sind beide IGBT-Module direkt an die Glättungsdrossel angeschlossen. Für die Erzeugung des Stromsprungs wird zunächst der Schalter S_1 im Kurzschlusszweig geschlossen und über die Brückensteuerung der gewünschte Strom eingestellt. Dann wird der Schalter S_1 geöffnet und gleichzeitig der Schalter S_2 geschlossen. Die Kommutierungskapazität C_k dient während der Umschaltung als Energiespeicher für den Strom, der fließt, solange S_1 schon geöffnet, der Strom aber noch nicht vollständig in den Prüfzweig kommutiert ist. Sollte die Kommutierung zu lange dauern und dadurch die Spannung an C_k zu groß werden, übernehmen die Varistoren \ddot{U}_1 und gegebenenfalls \ddot{U}_2 den Strom und begrenzen damit die Spannung an den IGBT-Modulen. Am Ende des Stromsprunges wird S_1 wieder geschlossen und dann S_2 geöffnet. Im Prüfling gespeicherte Energie wird dabei über die Kurzschlussdiode D_2 und den Widerstand R_v verbrannt.

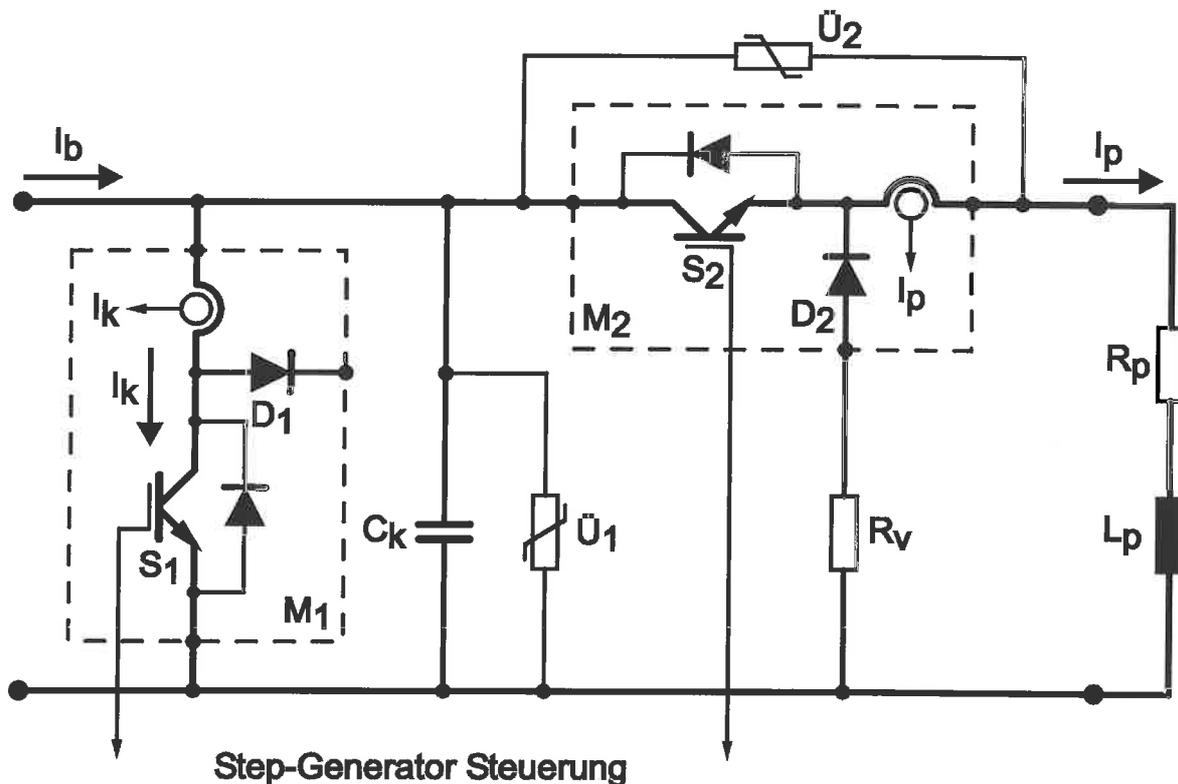


Bild 5.4 Korrigierte Schaltung der IGBT-Module

Da die beiden IGBT-Module zumindest beim Kommutieren des Stromes in den Prüfkreis gleichzeitig schalten müssen, musste im Gegensatz zur vorherigen Schaltung wieder eine zentrale IGBT-Steuerung benutzt werden. Die Spannungsversorgungen der beiden Module und die prellfreien Schalter verblieben wie zuvor an den Modulen, diese Schalter wurden jetzt aber über Optokoppler von der Zentralsteuerung angesteuert. Auf diese Weise konnten EMV-Probleme vermieden werden. Bild 5.5 zeigt einen mit dieser Schaltung erzeugten Stromsprung. Zu erkennen ist ein Überschwingen von ca. 10 % mit einer Dauer von ca. 8 μ s. Dieses Überschwingen wird durch die Kommutierungskapazität C_k und die Kapazitäten der eingesetzten Varistoren hervorgerufen. Diese Kapazitäten werden durch die bei der Kommutierung auftretende Überspannung aufgeladen und entladen sich, wenn der Schalter S_2 geschlossen wird.

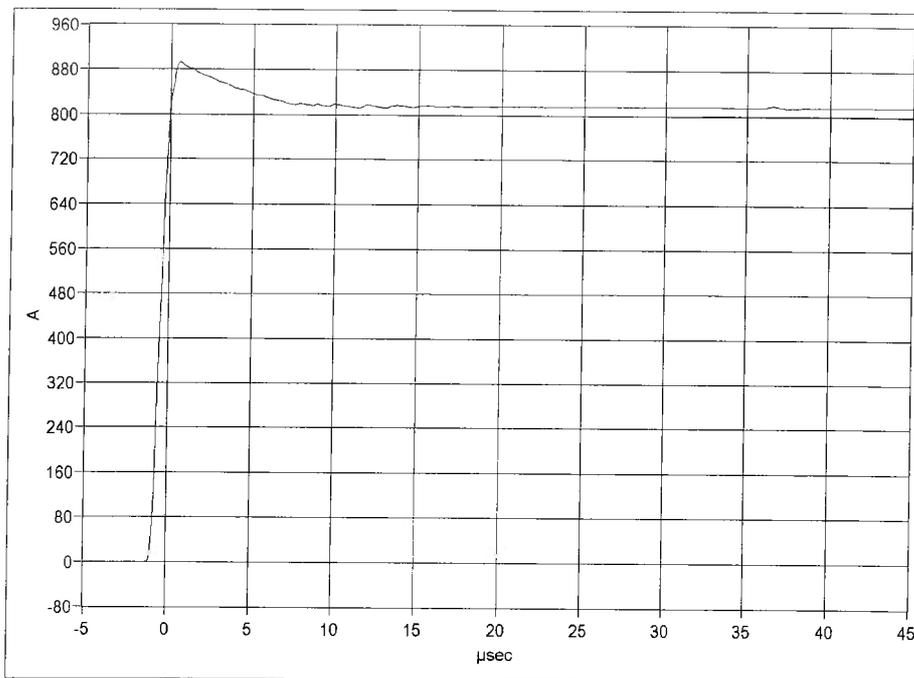


Bild 5.5 800-A-Stromsprung in der endgültigen Schaltung des SSG.

Der oben erwähnte Rückgang des Stromes durch die höhere Impedanz des Prüfkreis im Vergleich zum Kurzschlusskreis konnte durch den direkten Anschluss des Schalters S_2 an die Drosselspule zwar reduziert werden, ist aber immer noch vorhanden. Bild 5.6 zeigt einen Kommutierungsvorgang mit langer Zeitablenkung bei eingeschalteter Stromregelung der Gleichstrombrücke. Der im Prüfkreis eingebaute Shunt mit einem Widerstand von $2,54 \text{ m}\Omega$ bewirkt nach der Kommutierung einen Stromeinbruch von ca. 5 % bevor der Strom von der Brückensteuerung wieder hochgeregelt wird, wobei es zu einem leichten Überschwingen kommt.

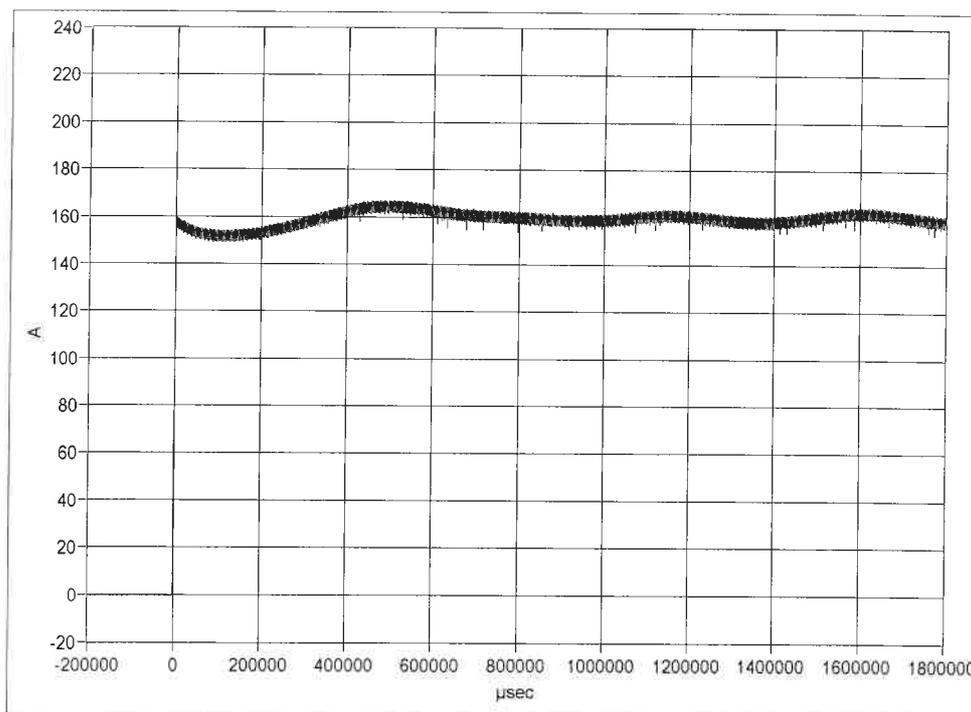


Bild 5.6 Stromeinbruch im Rechtecksprung durch höheren Widerstand im Prüfkreis gegenüber dem Kurzschlusskreis.

5.3 Messung des Eingangssignals mit einem Messnormal

Für die Berechnung der Übertragungsfunktion müssen sowohl das Eingangs- als auch das Ausgangssignal des untersuchten Messwertempfängers bekannt sein. Das Eingangssignal wäre im Idealfall ein Rechtecksprung bekannter Größe, der sich nicht von äußeren Parametern beeinflussen lässt und somit ohne weitere Messung mathematisch darstellbar ist. In Wirklichkeit ist dieser konstante Rechtecksprung nicht erzeugbar, da – wie oben beschrieben – schon der Widerstand des angeschlossenen Prüflings oder die Induktivität der Zuleitungen die Sprungerzeugung beeinflusst. Also musste neben dem Ausgangssignal auch das Eingangssignal messtechnisch erfasst werden.

Zunächst wurde der Stromsprung ausschließlich mit einem Reusenshunt mit einem ohmschen Widerstand von $2,54\text{m}\Omega$ gemessen. Dieser von der FGH gebaute kleine und induktivitätsarme Reusenshunt mit koaxialem Aufbau ist rückführbar kalibriert. Er wurde schon als FGH-Referenz im Rahmen des EU-Projektes über die Rückführbarkeit von Strommessgeräten [4] eingesetzt und hat dort seine Tauglichkeit für die Beurteilung der Messgenauigkeit anderer Hochstrom-Messgeräte bewiesen. Der Nachteil dieses Shunts liegt in seiner verhältnismäßig geringen thermischen Belastbarkeit: bei einer Stromflussdauer von $0,5\text{ s}$ kann er mit bis zu 1000 A belastet werden, bei einer Stromflussdauer von $2,5\text{ s}$ ist er noch mit 450 A belastbar und bei 10 s Stromfluss darf die Höhe des Stroms nur noch 250 A betragen. Deshalb muss für die Messung höherer Ströme bei längerer Stromflussdauer ein (räumlich) größerer $1\text{-m}\Omega$ -Shunt mit einer Dauerbelastbarkeit von ca. 2000 A eingesetzt werden. Ein Vergleich von zwei frühen Messungen mit dem kleinen Reusen-Shunt und dem großen Shunt in Bild 5.7 zeigt die möglichen Auswirkungen dieses Schrittes. Im Gegensatz zu späteren Aufnahmen mit einem Transienten-Rekorder (siehe Abschnitt 6) wurden diese Aufzeichnungen mit einem Oszilloskop mit 20 MHz Bandbreitenbegrenzung erstellt, daher auch die von späteren Ergebnissen abweichenden Anstiegszeiten.

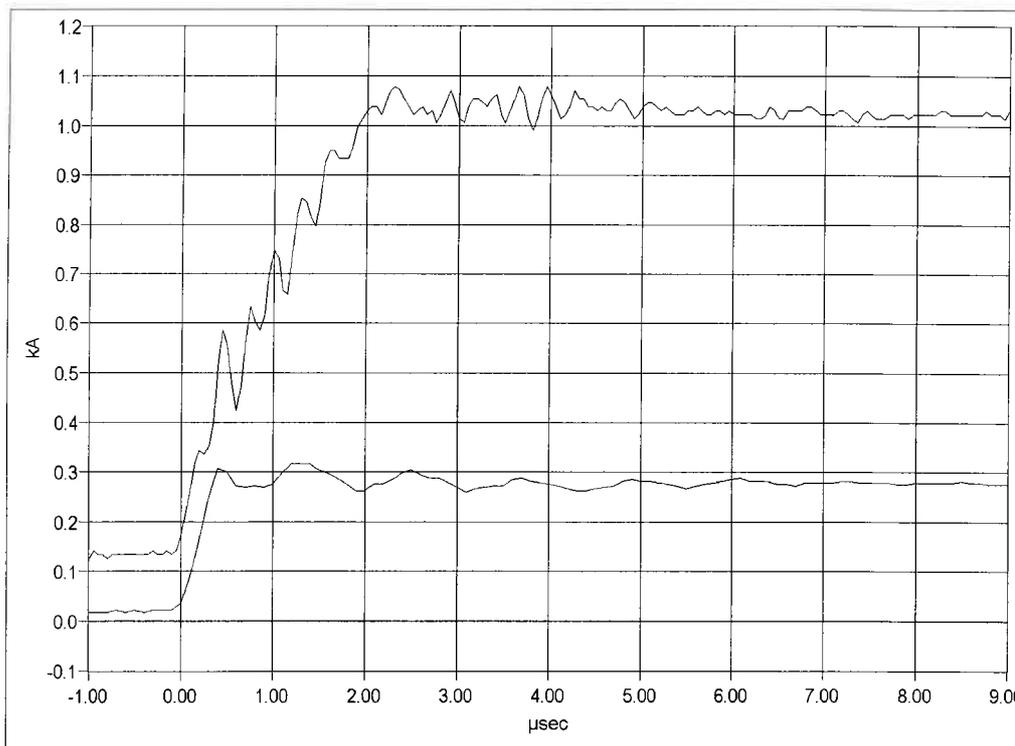


Bild 5.7 Vergleich zwischen 1000-A-Stromsprung gemessen mit großem $1\text{-m}\Omega$ -Shunt und 300-A-Stromsprung gemessen mit kleinem $2,54\text{-m}\Omega$ -Shunt.

Während der kleine Shunt mit ca. 0,2 m langen Zuleitungen praktisch direkt an den Ausgang des SSG angeschlossen werden konnte, waren die Zuleitungen für den großen Shunt in diesem Aufbau schon je 1,2 m lang. Der Shunt selber hat noch eine Länge von ca. 0,5 m zwischen den Stromanschlüssen. Diese zusätzlichen Induktivitäten bewirken, dass sich die Anstiegszeit des Stromsprunges von 300 ns beim kleinen Shunt auf 2 μ s beim großen Shunt vergrößert, ein Ergebnis, dass bei späteren Messungen mit minimalen Zuleitungslängen verbessert werden konnte. Offensichtlich wird durch die zusätzliche Induktivität die Stromsteilheit begrenzt. Außerdem zeigt das Signal des großen Shunts ein ausgeprägteres Schwingungsverhalten. Wegen der höheren Güte des (räumlich) kleineren Shunts wurde daher der Nachteil begrenzter Ströme in Kauf genommen und dieser Shunt bei allen im folgenden dargestellten Messungen als Messnormal eingesetzt.

5.4 Ermittlung der Sprungparameter

Wie bereits im Abschnitt 3.2 erläutert, werden die Sprungparameter durch die spezifischen Eigenschaften der zu prüfenden Messgeräte beeinflusst. Es ist deshalb nicht möglich, ein einheitliches, für alle Messeinrichtungen identisches Eingangssignal zu erzeugen. Stattdessen wird das Eingangssignal durch einen Shunt gemessen und aufgezeichnet. Durch Transformation des jeweiligen Eingangssignals in den Frequenzbereich liegt für jedes Messmittel eine verlässliche Beschreibung der enthaltenen Frequenzanteile vor.

5.4.1 Einfluss von Stromhöhe und Zuleitungslänge

Wie Bild 5.8 zeigt, ist der Einfluss der Stromhöhe auf die Anstiegszeit des Stromsprunges relativ klein. Vergrößert man die Stromhöhe von 200 A auf 800 A (jeweils ohne Überschwüngen), so wird der Scheitel statt nach 1 μ s nach 1,5 μ s erreicht. Das Überschwüngen durch die Aufladung der Kapazitäten in der Schaltung wird mit zunehmender Stromhöhe kürzer. Das liegt daran, dass die bei der Kommutierung erzeugten Überspannungen hoch genug werden, um die Varistoren ansprechen zu lassen, die dann der Schaltung Energie entziehen.

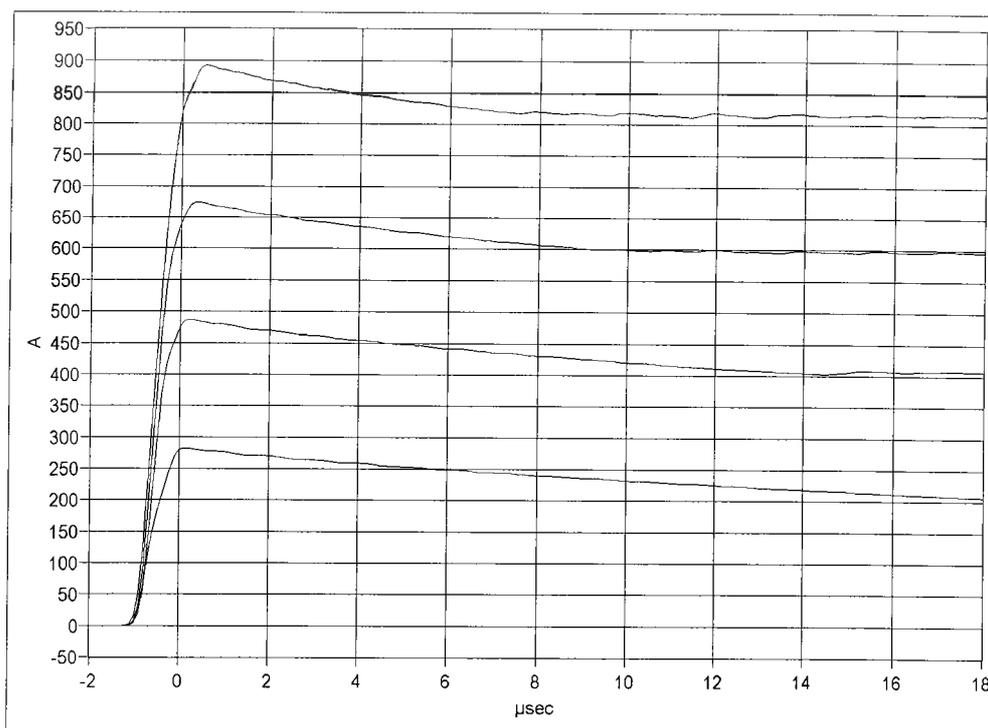


Bild 5.8 Einfluss der Stromhöhe auf die Anstiegszeit des Stromsprunges

Bild 5.9 zeigt diese Überspannungen. Deutlich ist zu sehen, dass sich die Überspannung bei einer Verdoppelung des Stromes von 200 A auf 400 A ebenfalls fast verdoppelt, während die weiteren Stromsteigerungen nur noch einen relativ kleinen Zuwachs an Überspannungen bewirken.

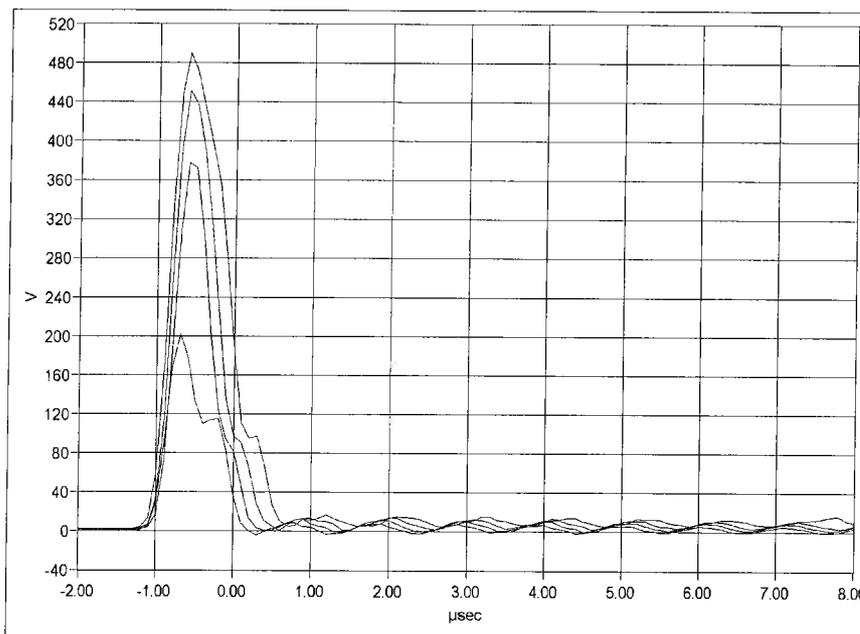


Bild 5.9 Überspannungen an C_k bei den in Bild 5.8 dargestellten Kommutierungen.

Wird der Shunt im Prüfkreis über eine längere Zuleitung angeschlossen, so wird durch deren zusätzliche Induktivität die Kommutierungsdauer vergrößert (siehe Bild 5.10). Der durch die Zuleitung erhöhte Widerstand im Prüfkreis vergrößert gleichzeitig die Entladezeitkonstante der Kommutierungskapazität C_k , wodurch das Überspringen prinzipiell etwas verlängert wird.

Bei gleichen Zuleitungslängen bewirkt eine Verringerung des Querschnittes der Zuleitung und damit eine Vergrößerung des Widerstandes keine merkbare Änderung der Anstiegszeit, bedingt durch den höheren Widerstand sinkt allerdings der Scheitelwert des Stromes etwas ab (Kurven b und c in Bild 5.10).

Durch die längere Kommutierungsdauer steigen auch Dauer und Höhe der dabei entstehenden Überspannungen (Bild 5.11), die zum Teil schon durch die Varistoren begrenzt werden. Das Ansprechen der Varistoren bewirkt, wie schon oben erwähnt, durch den damit verbundenen Energieentzug eine Verkürzung des Überspringens des Stroms.

Die Vergrößerung der Anstiegszeit von ca. 1 µs bei direktem Anschluss des Shunts auf ca. 3,5 µs bei 11 m Zuleitung ist für den bei den Messungen interessierenden Frequenzbereich unkritisch, bei Messungen an Rogowski-Stromwandlern kann sie sogar zu einer Verbesserung der Messergebnisse führen (siehe Abschnitt 6.3).

5.4.2 Welligkeit des Stromsprungs

Mit dem großen 1-mΩ-Shunt wurde die Welligkeit des Dauerstromes bei einer Stromstärke von ca. 750 A überprüft. Bei einer Aufzeichnungsdauer von 2 Sekunden lagen Maximum und Minimum des Stromes 7.4 A auseinander, d.h. der Strom lag in einem Toleranzband von $\pm 0.5\%$.

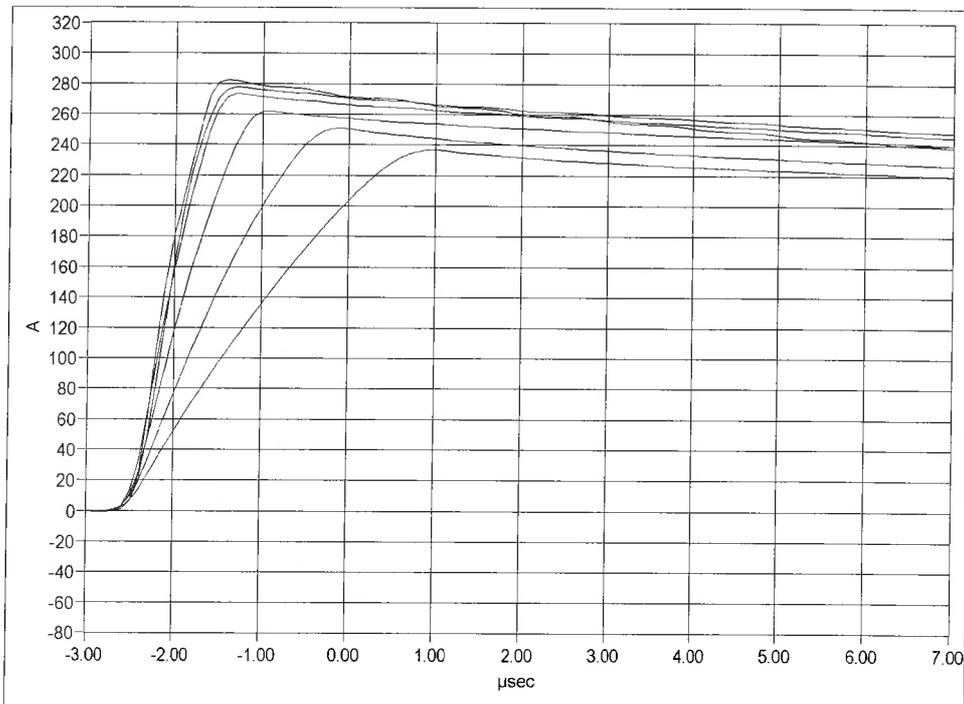


Bild 5.10 Einfluss der Zuleitungslänge auf die Anstiegszeit des Stromsprunges. Die Stromsprünge wurden mit folgenden Zuleitungen gemessen (in der Reihenfolge der Höhe des Scheitelwertes):

- a: direkter Anschluss des Shunts ohne Zuleitung,
- b: 1 m Zuleitung, 120 mm²,
- c: 1 m Zuleitung, 50 mm²,
- d: 2,5 m Zuleitung, 70 mm²,
- e: 7,2 m Zuleitung, 70 mm²,
- f: 11,3 m Zuleitung, 60 mm².

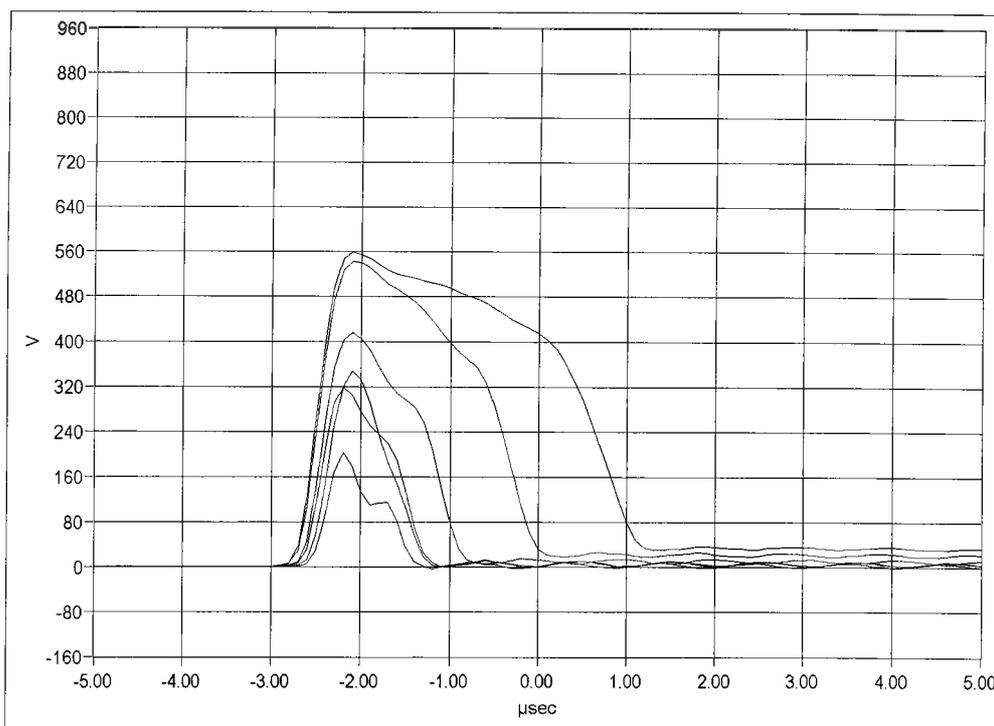


Bild 5.11 Überspannungen bei den Kommutierungsvorgängen in Bild 5.10

6 Durchgeführte Untersuchungen an Hochstrom-Messeinrichtungen

Im Rahmen dieses Projektes wurden mehrere Shunts, Stromwandler und Rogowski-Stromwandler untersucht. Um die Übersichtlichkeit dieses Berichtes zu gewährleisten, wurden die Oszillogramme aller Messungen in einem Anhang (Abschnitt 9) zusammengefasst. In diesem Abschnitt werden nur die Oszillogramme gezeigt, die zur Erläuterung des Textes notwendig sind.

Als Messgerät für die von den Shunts und Wandlern erzeugten Spannungen wurde ein Transienten-Rekorder der Firma Nicolet benutzt. Dieser Transienten-Rekorder zeichnet sich dadurch aus, daß seine A/D-Wandler durch eine digitale Lichtleiterstrecke von seinem Speicher und der zugehörigen Steuereinheit getrennt und jeweils in einem eigenen Gehäuse mit Batterieversorgung untergebracht sind. Auf diese Weise sind potentialfreie Messungen mit hoher Genauigkeit möglich. Der Transienten-Rekorder hat eine schnellste Abtastzeit von 100 ns und eine maximale Speichertiefe von 256 kSamples bei einer Auflösung von 12 bit. Bei allen Messungen wurden Antialiasing-Filter mit einer Eckfrequenz von 1,3 MHz eingesetzt.

Um den Einfluss von Zuleitungen zu minimieren wurden die untersuchten Strom-Messgeräte bis auf Ausnahmefälle (Anhang, Abschnitt 9.5.2 und 9.6.2) mit möglichst kurzen Zuleitungen (Gesamtlänge unter 0,6 m) an den Stromsprung-Generator angeschlossen.

6.1 Messungen an Shunts

Es wurden Messungen mit zwei verschiedenen Shunts durchgeführt. Der eine war ein gekapselter Hochstrom-Shunt (L 144101, Abschnitt 9.1) und ein normaler Stäbchen-Shunt (L 144103, Abschnitt 9.2) für Ströme bis 1 kA. Beide Shunts reagieren auf einen positiven Stromsprung mit dem gleichen Verhalten, sie messen zunächst einmal eine negative Stromspitze (Bild 6.1).

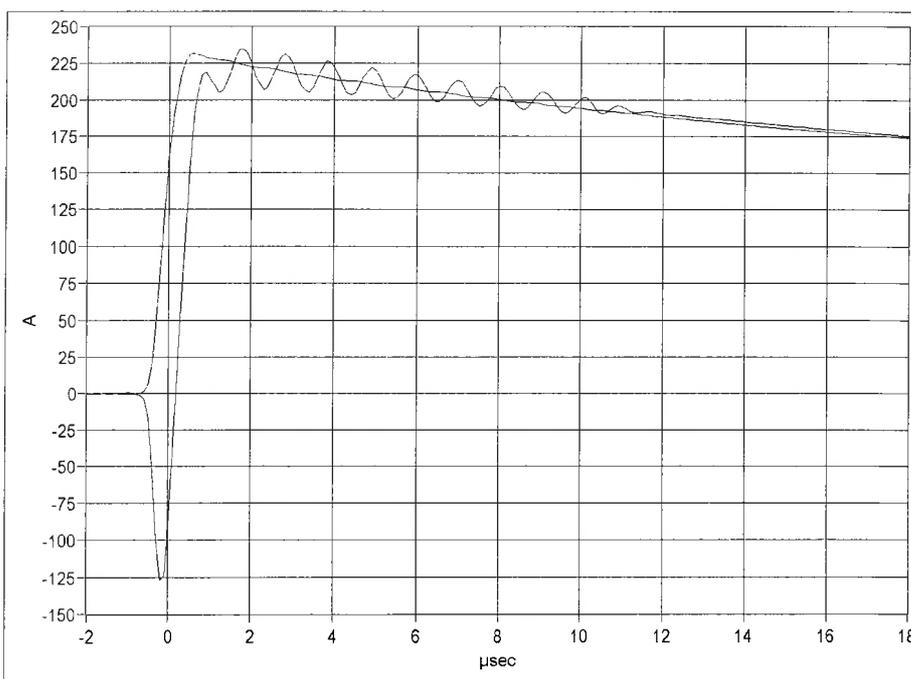


Bild 6.1 Anstieg des Stromsprungs, Signal ohne Schwingungen: Messung mit dem Messnormal, Signal mit Schwingungen: Messung mit dem Hochstrom-Shunt

Beim Hochstrom-Shunt wurde dieses Verhalten näher untersucht. Dazu wurde der Shunt „falsch herum“ in den Messkreis eingebaut, so dass ein positiver Stromsprung ein negatives Messsignal erzeugte. Die anfängliche Spitze blieb jedoch auch in dieser Schaltung negativ und wurde auf die Strommessung aufgesetzt. Das lässt darauf schließen, dass es sich bei der negativen Spannungsspitze um eine Einkopplung in den Spannungsmesszweig des Shunts handelt.

Ein Blick auf den Verlauf der Übertragungsfunktion des Shunts bis hin zu hohen, hier nicht mehr interessierenden Frequenzen zeigt die Auswirkungen dieser Einkopplung (Bild 6.2). Die Messspannung am Hochstrom-Shunt hat einen negativen Phasenwinkel und eilt somit bedingt durch die Zeitverzögerung im Einschwingvorgang ständig der Messspannung des Messnormals nach. Im Bereich bis 50 kHz liegt der Betrag der Übertragungsfunktion geringfügig unter 1, während er zu den hohen Frequenzen hin stark ansteigt. Dies liegt daran, dass das Signal des Hochstrom-Shunts Schwingungen und somit Frequenzanteile aufweist, die im Signal des Messnormals in dieser Form nicht vorhanden sind.

Ein Blick in den Anhang zeigt, dass die Messabweichung dieses Shunts bei Frequenzen bis 25 kHz deutlich unter 1 % liegt, bei einem Phasenwinkel von weniger als 7° . Das Verhalten des Shunts ist somit als gut zu betrachten.

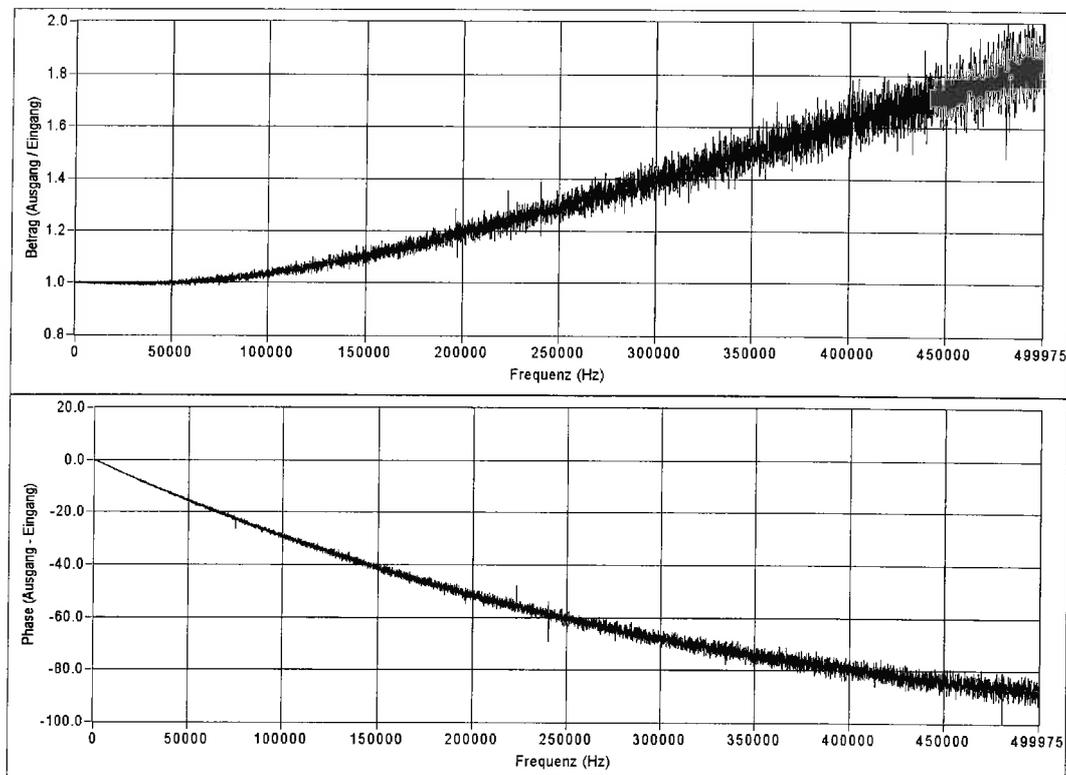


Bild 6.2 Übertragungsfunktion des Hochstromshunts bis 500 kHz.

Anders sieht es bei dem Stäbchen-Shunt aus, der aufgrund seiner hohen parasitären Induktivitäten das eben beschriebene Verhalten in sehr viel deutlicherem Maße aufweist und deshalb nur bei niedrigen Frequenzen sinnvoll eingesetzt werden kann. Beim Stäbchen-Shunt macht sich auch die fehlende Schirmung bemerkbar, es werden deutlich mehr Störungen in die Messsignale eingekoppelt als beim Hochstrom-Shunt. Diese Einkopplungen führen dazu, dass die berechneten Übertragungsfunktionen des Stäbchen-Shunts deutlich verrauschter sind als die des Hochstrom-Shunts.

Da das verwendete Messnormal nur eine begrenzte Stromtragfähigkeit hat, wurde am Hochstrom-Shunt untersucht, inwiefern er sich unter Berücksichtigung seiner Übertragungsfunktion als zweites Messnormal für höhere Ströme einsetzen lässt. Dazu wurden bei schnellen Ablenkzeiten Stromsprünge mit 200, 400, 600 und 800 A Stromhöhe aufgezeichnet. Die aus diesen Messungen gewonnenen Übertragungsfunktionen sind praktisch identisch, so dass nichts gegen einen derartigen Einsatz spricht, und somit auch ein Einsatz des SSG bei höheren Strömen und langen Ablenkzeiten möglich ist.

6.2 Messungen an Stromwandlern

Zwei verschiedene Stromwandlertypen wurden untersucht: zum einen ein Durchsteck-Stromwandler mit einem Nennstrom von 3500 A und einem Mess- und einem Schutzkern (L 143603, Anhang 9.3.1 und 9.3.2), zum anderen ein umschaltbarer 30-kV-Stromwandler mit einem maximalen Nennstrom von 400 A (L 143128, Anhang 9.4.1 bis 9.4.4). Die Stromwandler hatten ohmsche Bürden, an denen die Spannung gemessen wurde.

Während der Messkern des Durchsteck-Stromwandlers auf den positiven Stromsprung in der Front mit einer positiven Spannungsspitze antwortet, zeigen die Messungen am Schutzkern dieses Wandlers sowie alle Messungen am 30-kV-Stromwandler zunächst – wie auch die Shunts – eine negative Spitze. Danach schwingen sich die Wandler auf den mit dem Referenz-Shunt gemessenen Strom ein.

Betrachtet man das Verhalten der Wandler im Frequenzbereich bis 500 kHz, so zeigt sich beim Messkern des Durchsteck-Stromwandlers am Phasenwinkel der Übertragungsfunktion ein Voreilen der Messspannung des Wandlers bei hohen Frequenzen (Bild 6.3), so wie auch seine Messspannung der Messspannung des Messnormals vorauseilt. Auch hier bewirken Einstreuungen im Spannungsmesszweig des Wandlers ein Ansteigen des Betrages der Übertragungsfunktion bei hohen Frequenzen.

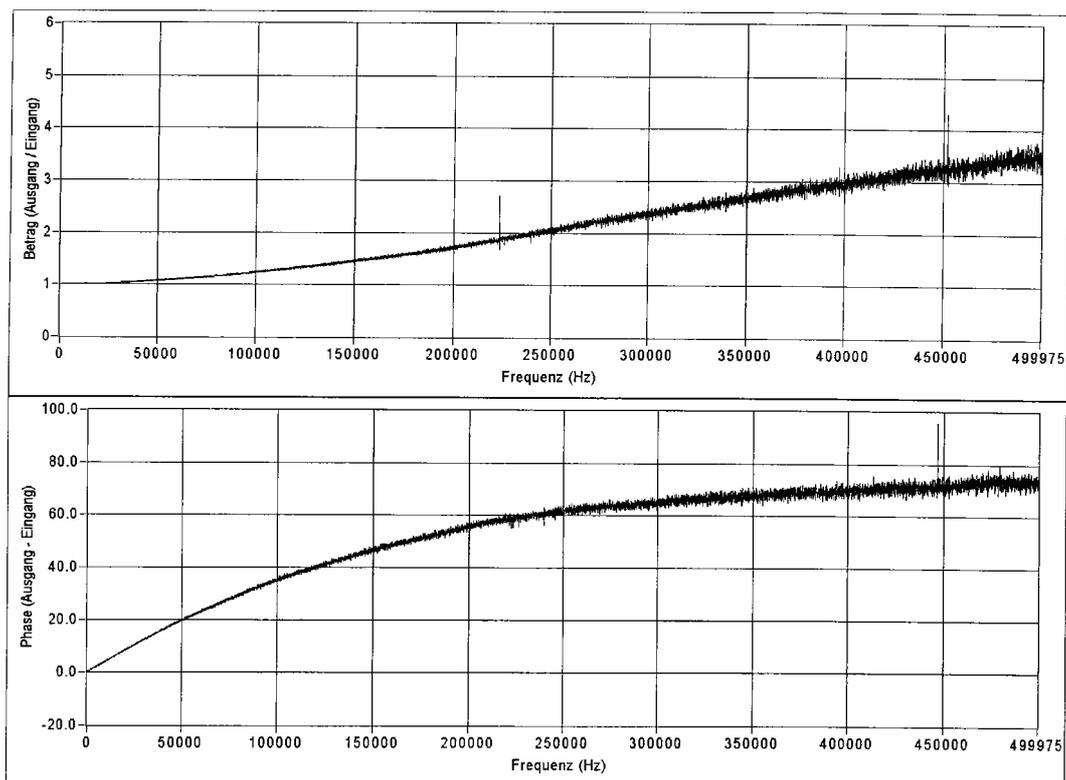


Bild 6.3 Übertragungsfunktion des Messkerns des Durchsteck-Stromwandlers bis 500 kHz

Der 30-kV-Stromwandler zeigt im Frequenzbereich bis 70 kHz ein ähnliches Übertragungsverhalten wie der Durchsteck-Stromwandler, danach macht sich das Nacheilen seiner Messspannung aufgrund der negativen Spannungsspitze im Einschwingvorgang bemerkbar, wobei ein Blick auf den unregelmäßigen Verlauf des Betrags der Übertragungsfunktion zeigt, dass hier sicher auch noch andere Vorgänge eine Rolle spielen (Bild 6.4).

Im Zeitbereich zeigen beide Wandler bei den Messungen mit den langsamen Abtastzeiten ähnliches Verhalten (Anhang, Bild 9.3.1-4 und 9.4.1-4). Nach ca. 300 bis 400 ms ist die Sprungantwort auf Null abgesunken, die zugehörigen Übertragungsfunktionen (Anhang, Bild 9.3.1-5 und Bild 9.4.1-5) lassen erkennen, dass unterhalb von ca. 10 Hz mit diesen Wandlern keine sinnvollen Messungen mehr möglich sind.

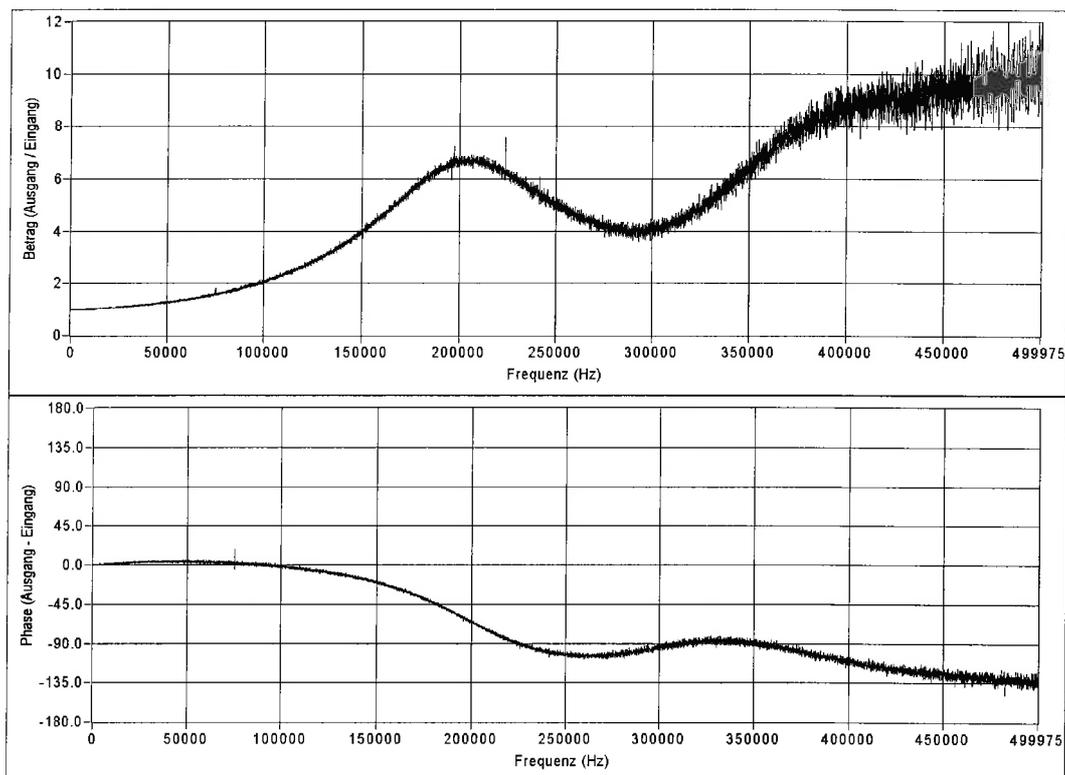


Bild 6.4 Übertragungsfunktion des 30-kV-Stromwandlers (400-A-Schaltung) bis 500 kHz.

Anders sieht es beim Schutzkern des Durchsteck-Stromwandlers aus (Bild 9.3.2-4). Sein Messwert ist auch nach ca. 2 s erst auf 85 % des Referenz-Messwertes abgesunken, und der Übertragungsfunktion kann man entnehmen, dass bei diesem Wandler bis unter 5 Hz mit relativ guten Messergebnissen zu rechnen ist.

Dieses gute Übertragungsverhalten bei tiefen Frequenzen geht auf Kosten des Übertragungsverhaltens bei höheren Frequenzen. Ab ca. 9 kHz misst der Wandler 3 % weniger als der Referenz-Shunt (Anhang, Bild 9.3.2-3), während der Messkern dieses Wandlers bei einer Frequenz von 25 kHz noch unter dieser Fehlergrenze liegt (Anhang, Bild 9.3.1-3).

Bei dem 30-kV-Stromwandler sind die Frequenzen, für die der Betragsfehler größer als 3 % wird, von der verwendeten Schaltung abhängig. Im unteren Frequenzbereich wartet dieser Wandler ab ca. 15 bis 20 Hz mit guten Messergebnissen auf, im hohen Frequenzbereich weicht er bei Frequenzen von ca. 6 bis 14 kHz um mehr als 3 % vom Messnormal ab.

Die Qualität der berechneten Übertragungsfunktionen ist wie bei den Shunts abhängig von den Einkopplungen in die Messsignale der Prüflinge. Diese Einkopplungen scheinen zum

Die Qualität der berechneten Übertragungsfunktionen ist wie bei den Shunts abhängig von den Einkopplungen in die Messsignale der Prüflinge. Diese Einkopplungen scheinen zum einen mit der Induktivität des untersuchten Wandlers anzusteigen, zum anderen machen sie sich relativ stärker bemerkbar, je kleiner der Strom ist.

6.3 Messungen an Rogowski-Stromwandlern

Die Messergebnisse für die beiden untersuchten Rogowski-Stromzangen AEG SZ 30 (L 143617) und Habemus Rocoil 500N (L 143624) sind im Anhang unter Abschnitt 9.5 und 9.6 zu finden.

Das grundsätzliche Problem der Prüfung von Rogowski-Stromwandlern mit einem Strom-Rechtecksprung lässt sich in Bild 6.5 erkennen. Da die Rogowski-Spule den zu messenden Strom differenziert, wäre die Sprungantwort einer idealen Rogowski-Spule auf einen idealen Rechtecksprung des Stromes ein einzelner Dirac-Impuls. Leider sind die Rogowski-Spulen nicht ideal, während der erzeugte Stromsprung doch sehr steil ist. So zeigt sich in Bild 6.5, dass die von der Rogowski-Spule gemessene Spannung mit dem Differential des Stromes auf den ersten Blick wenig gemeinsam hat. Im Bereich bis ca. 20 μs sieht man eine abklingende Schwingung und nach einer Zeit von ca. 40 μs ist die Rogowski-Spannung dann so klein geworden, dass sie kaum die Strichstärke des Gitters im Oszillogramm überschreitet. Integriert man jedoch die Rogowski-Spannung (Bild 6.6), so sieht man, dass trotz aller Schwingungen der so errechnete Strom nach ca. 20 μs mit dem vom Shunt gemessenen Strom dennoch gut übereinstimmt.

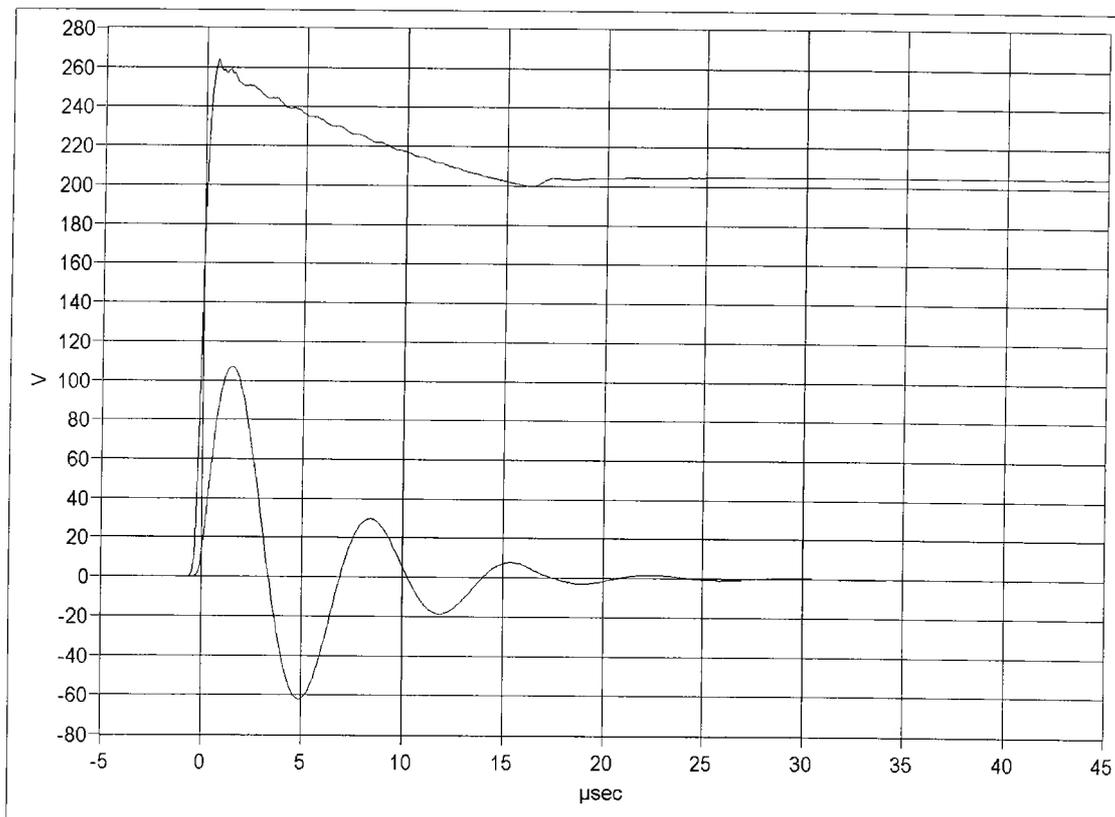


Bild 6.5 Spannung eines Rogowski-Stromwandlers bei Belastung mit einem Strom-Rechtecksprung
 Unteres Signal: Spannung des Rogowski-Stromwandlers
 Oberes Signal: Stromsprung.

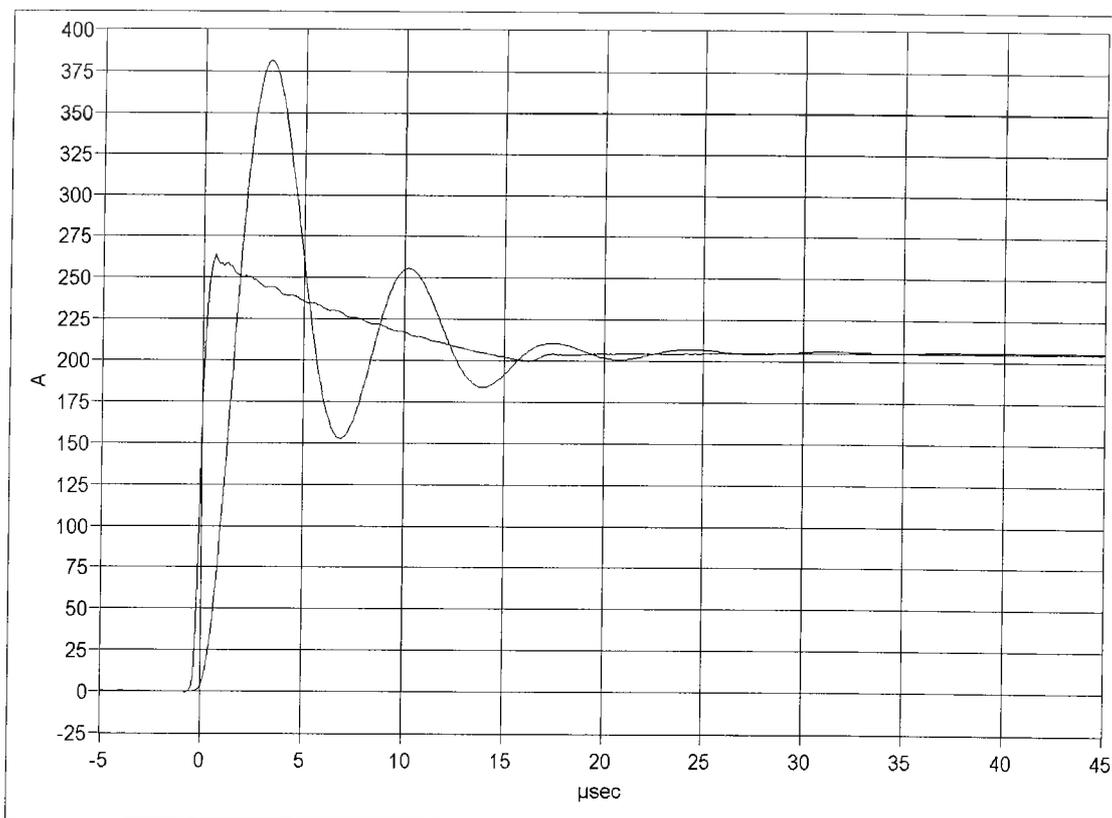


Bild 6.6 Rechtecksprung mit kleinem Überschwingen: Messnormal
Rechtecksprung mit großem Überschwingen: Rogowski-Stromzange AEG SZ 30

Mess- und auswertetechnisch ergeben sich aus diesem Verhalten mehrere Probleme. Zum einen muss die Abtastrate des verwendeten Transientenrekorders so hoch sein, dass die anfänglichen Schwingungen möglichst genau erfasst werden, zum anderen soll die Aufzeichnungsdauer so hoch sein, dass die Fourieranalyse auch noch Aussagen über das Verhalten bei niedrigen Frequenzen zulässt. Hinzu kommt, dass die numerische Integration der Spannung mit steigender Zahl der Messpunkte durch das Rauschen des vom Transientenrekorder aufgezeichneten Signals ungenau wird.

Eine Lösung, die allen drei Problemen gerecht wird, konnte leider nicht gefunden werden. Der verwendete Transientenrekorder hat eine schnellste Abtastzeit von 100 ns bei einer maximalen Speichertiefe von 256k. Die schnelle Abtastzeit ist ausreichend, um die ersten Schwingungen der Spannung genau genug aufzeichnen zu können. Beim Strom als Integral der Spannung sieht man allerdings schon in Bild 6.7, dass nach einigen Millisekunden der direkt gemessene Strom und der integrierte Strom auseinanderlaufen. Da nicht sicher bestimmt werden kann, ob diese Abweichung durch eine Ungenauigkeit beim Integrieren oder durch das Verhalten der Rogowski-Spule hervorgerufen wird, kann sie auch nicht korrigiert werden.

Theoretisch ist bei einer Aufzeichnungsdauer von 25 ms eine Auswertung der Frequenzen bis 50 Hz möglich. Bei der Berechnung der Transferfunktion für diese Rogowski-Spule (Anhang, Bild 9.5.1-3) zeigt sich dann allerdings, dass in diesem Frequenzbereich die Beträge um ca. $\pm 4\%$ um den zu erwartenden Wert von 1 schwanken und damit für eine Kalibrierung zu ungenau sind.

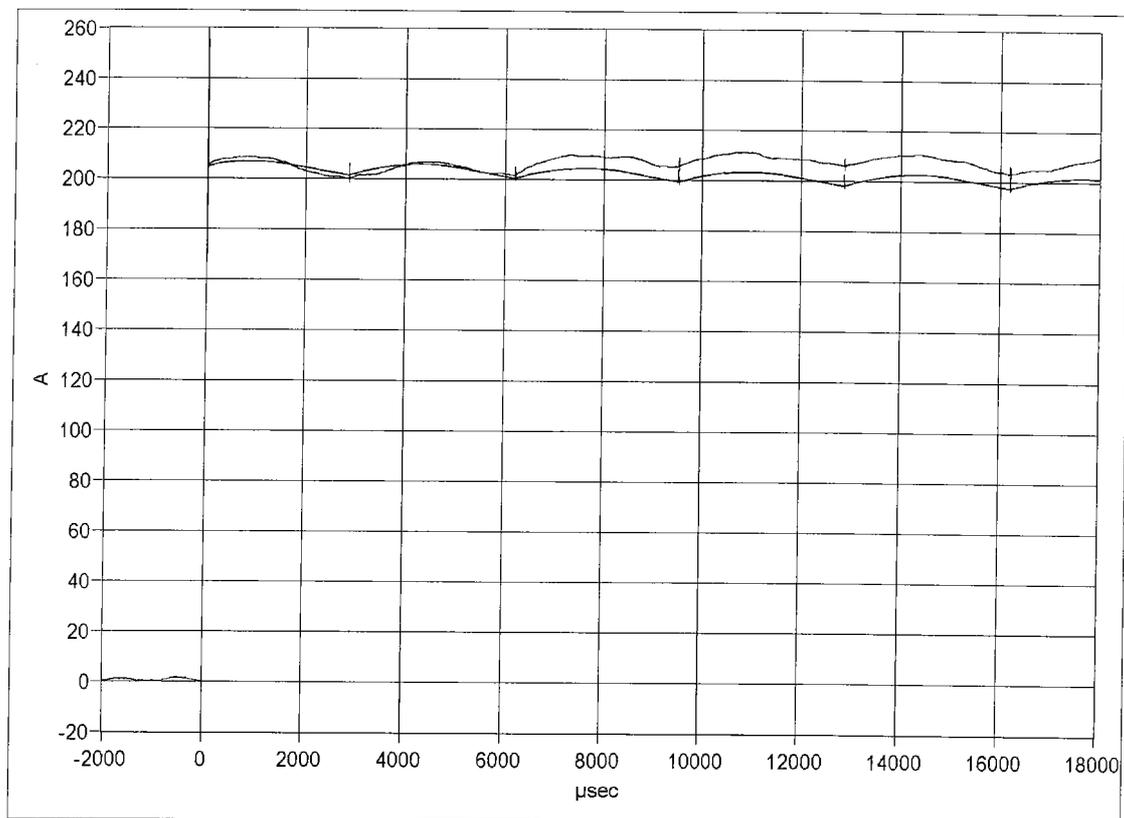


Bild 6.7 Unteres Signal: Messnormal
Oberes Signal: Rogowski-Stromzange AEG SZ 30

Im Zeitbereich ab 40 ms sind die Messwerte der Habemus-Spule den Messwerten der AEG-Spule ähnlich (Anhang, Bild 9.6.1-2), wenn auch ihr Integral dem Verlauf des direkt gemessenen Stromes besser folgt. Beim Einschwingen auf diesen Wert weist die Habemus-Spule allerdings ein völlig anderes Verhalten auf. Statt mit gedämpften Überschwingen nähert sich diese Rogowski-Spule asymptotisch ihrem zeitweiligen Endwert (Anhang, Bild 9.6.1-1). Dieses Verhalten macht sich auch in der Übertragungsfunktion bemerkbar. Schon bei 10 kHz weicht die Habemus-Spule um -10 % vom Referenzwert ab, während das Toleranzband der Beträge deutlich schmaler ausfällt als bei der AEG-Spule (Anhang, Bilder 9.5.1-3 und 9.6.1-3).

Geht man jetzt bei den Messungen auf die nächstlangsameren Abtastzeit von 1 µs über, um die niedrigen Frequenzen besser auswerten zu können, so zeigt sich in den Bildern 9.5.1-4 und 9.6.1-4 des Anhangs, dass der Anfangswert des integrierten Stroms noch gut berechnet wird. Danach weist der Strom jedoch einige Abweichungen auf, die nicht unbedingt auf das Übertragungsverhalten der Rogowski-Spulen zurückzuführen sind. Die aus dieser Messung berechnete Übertragungsfunktion zeigt sich dann auch stark verrauscht und ist wenig brauchbar.

Eine weitere Absenkung der Abtastzeit auf 10 µs hatte zur Folge, dass die Anfangsschwingerungen der Spannung der Rogowski-Spule nicht mehr vernünftig gemessen werden konnten und somit keine weitere Auswertung möglich war.

Um festzustellen, ob eine Verlangsamung des Stromanstiegs zu besseren Ergebnissen bei Messungen mit Rogowski-Spulen führt, wurde in den Messkreis eine ca. 15 m lange Zuleitung eingebaut, und somit die Anstiegszeit auf ca. 4 µs verlängert (Anhang, Bilder 9.5.2-1 und 9.6.2-1). Obwohl sich die Messwerte der Habemus-Spule etwas verbesserten, brachte diese Maßnahme nicht den gewünschten Erfolg. Im Bereich der niedrigen Frequenzen bis

250 Hz lassen sich immer noch keine Aussagen treffen, die zu einer Kalibrierung der Rogowski-Spulen führen könnten.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Belastung von Rogowski-Stromwandlern mit einem steilen Stromsprung nur Aussagen über das Verhalten des Stromwandlers bei höheren Frequenzen zulässt, im Frequenzbereich um 50 Hz ist eine Kalibrierung mit Wechselstrom vorzuziehen.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der im Rahmen dieses Projektes entwickelte Stromsprung-Generator erlaubt es, auf einfache Art und Weise das Übertragungsverhalten von Shunts und Stromwandlern in einem weiten Frequenzbereich zu bestimmen. Bei Rogowski-Stromwandlern müssen zwei Einschränkungen gemacht werden: Zum einen muss in diesem Fall das Messsignal mit sehr kurzen Abtastzeiten aufgezeichnet werden, um das doch sehr kurze Einschwingen der Messspannung sauber aufzeichnen zu können, was wiederum bedingt, dass bei der zur Verfügung stehenden Speichertiefe des Transienten-Rekorders niedrige Frequenzen nur ungenügend aufgelöst werden können. Zum anderen ist die Beurteilung eines Rogowski-Stromwandlers wegen der nötigen Integration seiner Messspannung nur unter Einbeziehung seines Integrators oder der zur Integration verwendeten Software sinnvoll.

Wenn die hier durchgeführten Messungen auch eine Beurteilung der Qualität des geprüften Strommessgerätes zulassen, so reicht eine einmalige Auswertung des Übertragungsverhaltens für eine Kalibrierung eines Shunts oder Stromwandlers jedoch nicht aus. Möglich wäre es jedoch, die bei mehreren Aufzeichnungen ermittelten Übertragungsfunktionen für jede einzelne Frequenz statistisch auszuwerten und dabei für Betrag und Phase den Mittelwert sowie die Standardabweichung zu ermitteln. Auf diese Weise ist dann auch die Ermittlung der Messunsicherheit für jede ausgewertete Frequenz möglich.

Als Beispiel wurden auf diese Weise vier Übertragungsfunktionen des Hochstrom-Shunts L 144101 ausgewertet und das Ergebnis in Bild 7.1 stark vergrößert dargestellt. Es zeigt sich, dass auf der Basis noch zu schaffender Normen dieses Verfahren durchaus für eine Kalibrierung geeignet ist.

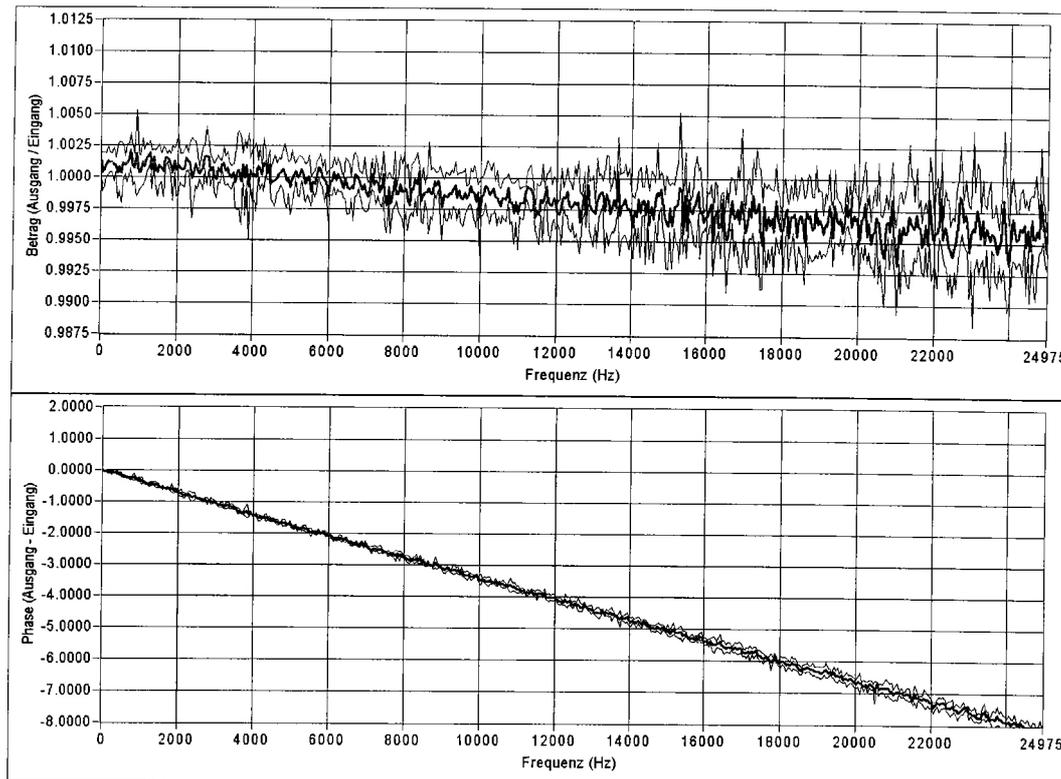


Bild 7.1 Aus vier Messungen statistisch ermittelte Übertragungsfunktion des Hochstrom-Shunts L 144101. Die dicke Linie zeigt den Mittelwert, die beiden dünnen Linien begrenzen das Band der zugehörigen Messunsicherheit.

8 Literatur

- [1] EN 45001: Allgemeine Kriterien zum Betreiben von Prüflaboratorien. 09/1989.
- [2] DIN VDE 0414 Meßwandler, Teil 1: Stromwandler. 01/1994.
- [3] Göldner, H.: Mathematische Grundlagen der Systemanalyse. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/M., 2. Auflage 1987.
- [4] European Commission Project No. MAT1-CT94-0066 – Final Report „Traceability of High-current Measuring Systems in High-power Laboratories to Standards of Measurement“. TC agenda item 20.2.1, Paper T(FTG)B 09.

9 Anhang: Messergebnisse

9.1 Messungen am Shunt L144101

9.1.1 Messungen am Shunt L144101 bei 200 A Stromsprung

Hersteller: T&M Research Products
Typ: Part HW 1.8

Nennstrom: 60 kA / 0.3 s
Nennübersetzung: 1,01041 kA / V

200 A Stromsprung

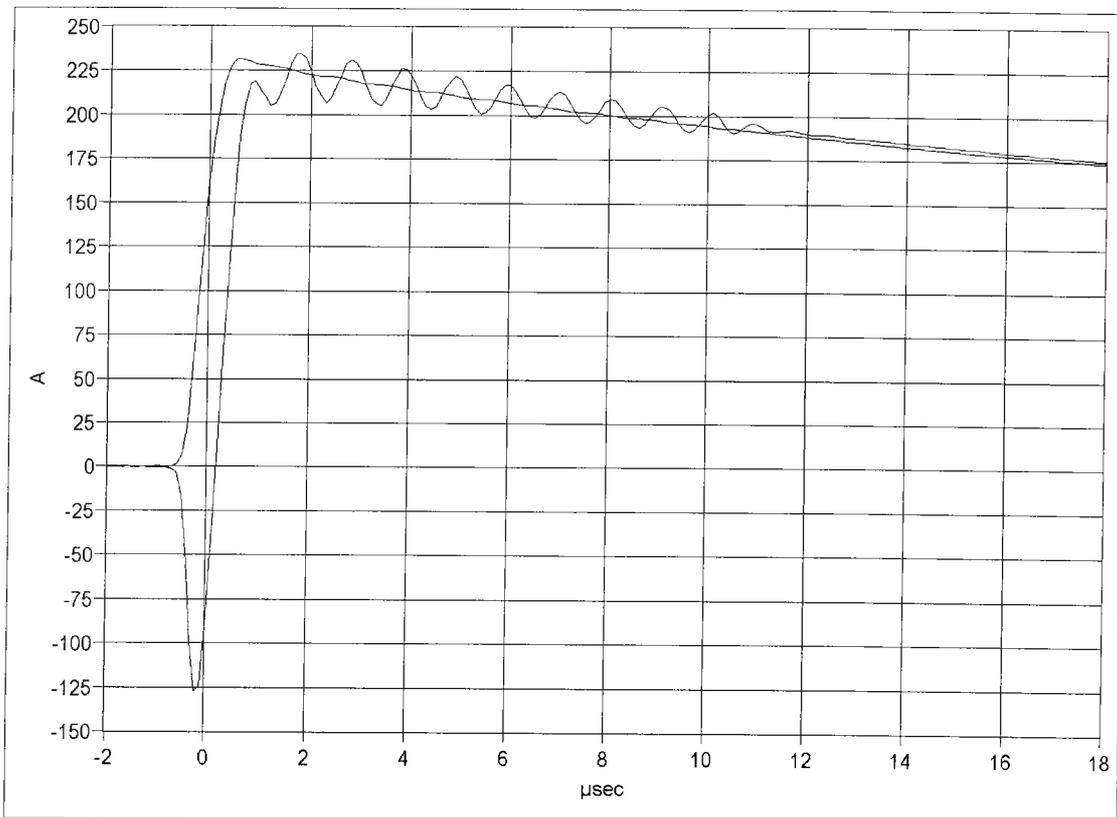


Bild 9.1.1-1 Anstieg des 200-A-Rechteck-Stromsprungs
Signal ohne Schwingungen: Messnormal
Signal mit Schwingungen: Shunt L144101

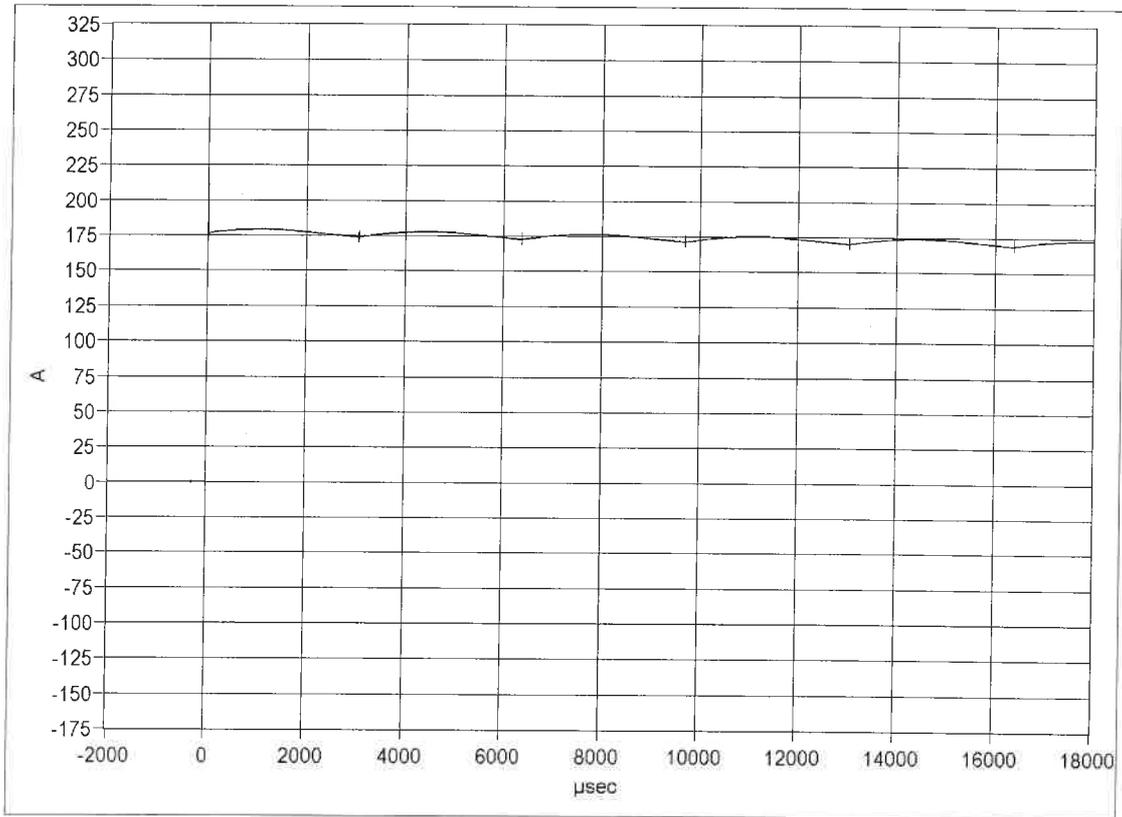


Bild 9.1.1-2 200-A-Rechteck-Stromsprung mit schneller Zeitablenkung
 oberes Signal: Messnormal,
 unteres Signal: Shunt L 144101

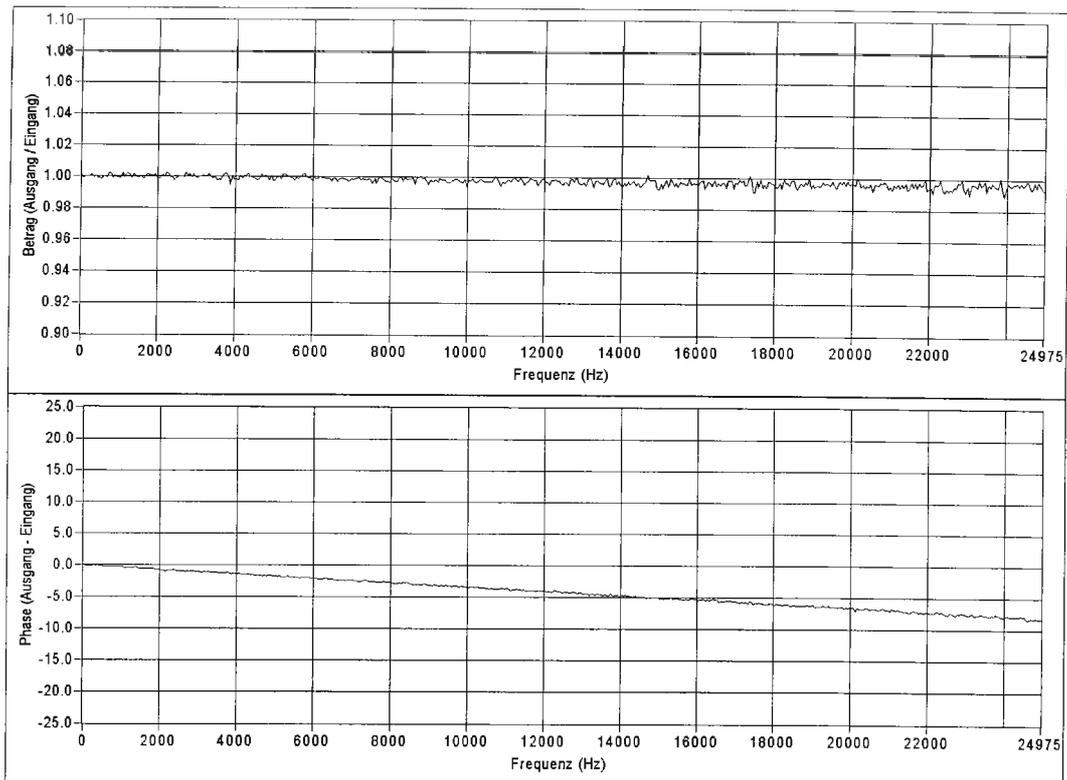


Bild 9.1.1-3 Übertragungsfunktion des Shunts L 144101, Bereich höherer Frequenzen

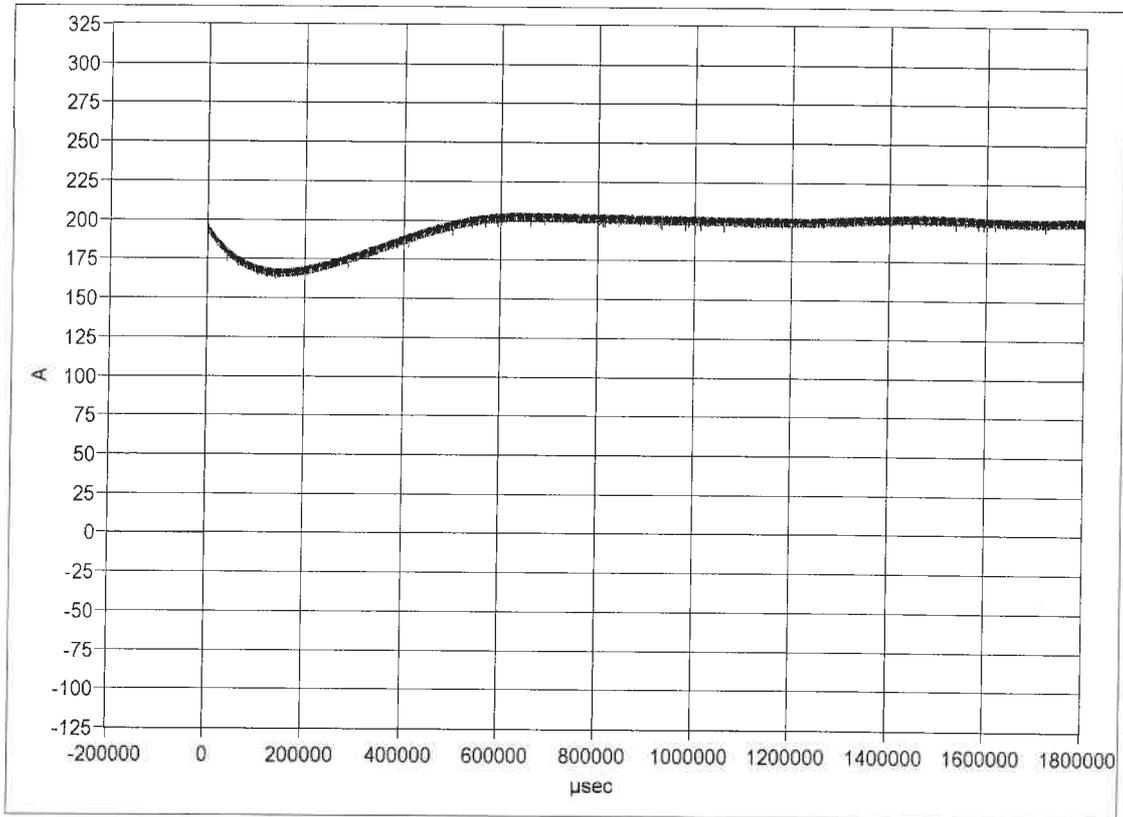


Bild 9.1.1-4 200-A-Rechteck-Stromsprung mit langsamer Zeitablenkung
 unteres Signal: Messnormal,
 oberes Signal: Shunt L 144101

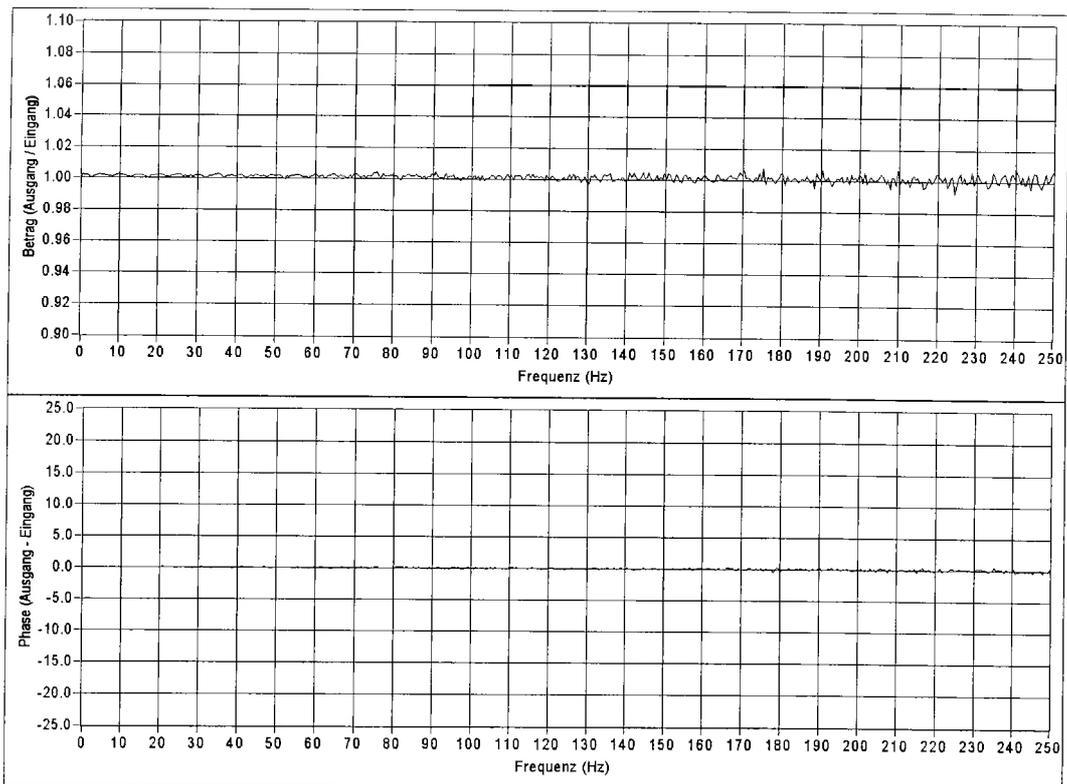


Bild 9.1.1-5 Übertragungsfunktion des Shunts L 144101, Bereich niedriger Frequenzen

9.1.2 Messungen am Shunt L144101 bei 400 A Stromsprung

Hersteller: T&M Research Products
Typ. Part HW 1.8

Nennstrom: 60 kA / 0.3 s
Nennübersetzung: 1,01041 kA / V

400 A Stromsprung

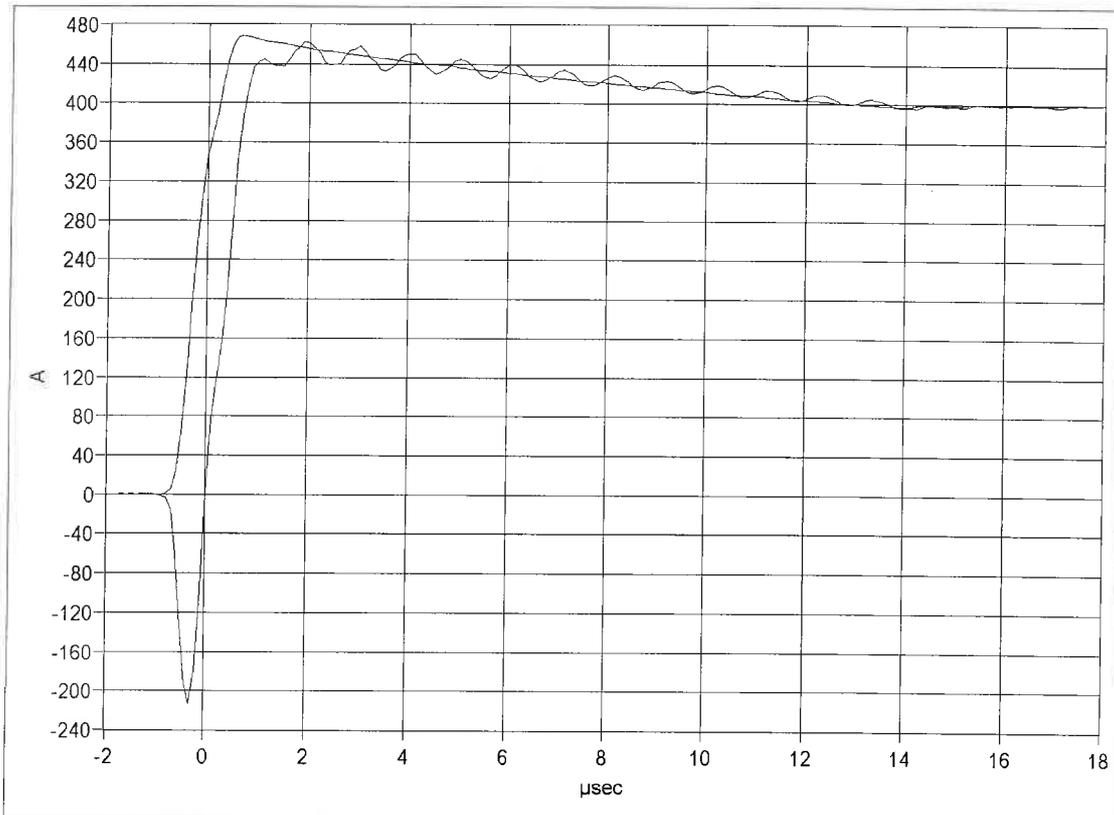


Bild 9.1.2-1 Anstieg des 400-A-Rechteck-Stromsprungs
Signal ohne Schwingungen: Messnormal
Signal mit Schwingungen: Shunt L144101

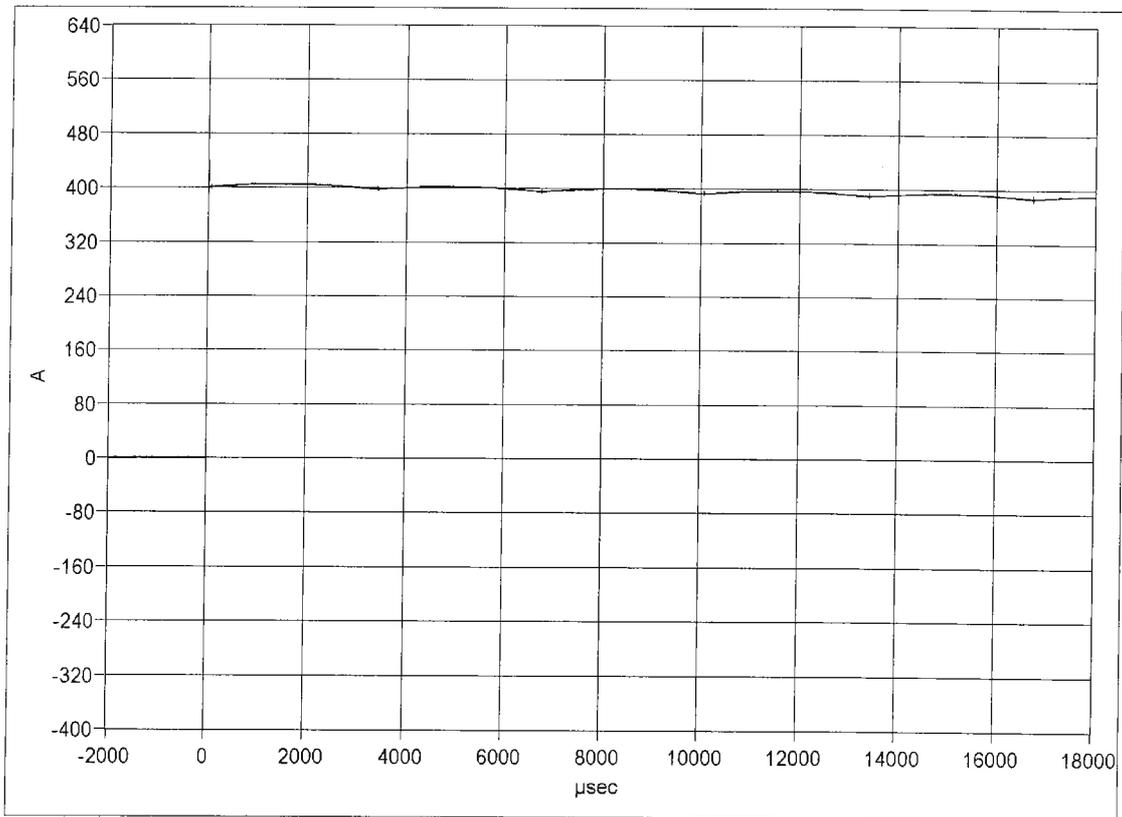


Bild 9.1.2-2 400-A-Rechteck-Stromsprung mit schneller Zeitablenkung
 oberes Signal: Messnormal,
 unteres Signal: Shunt L 144101

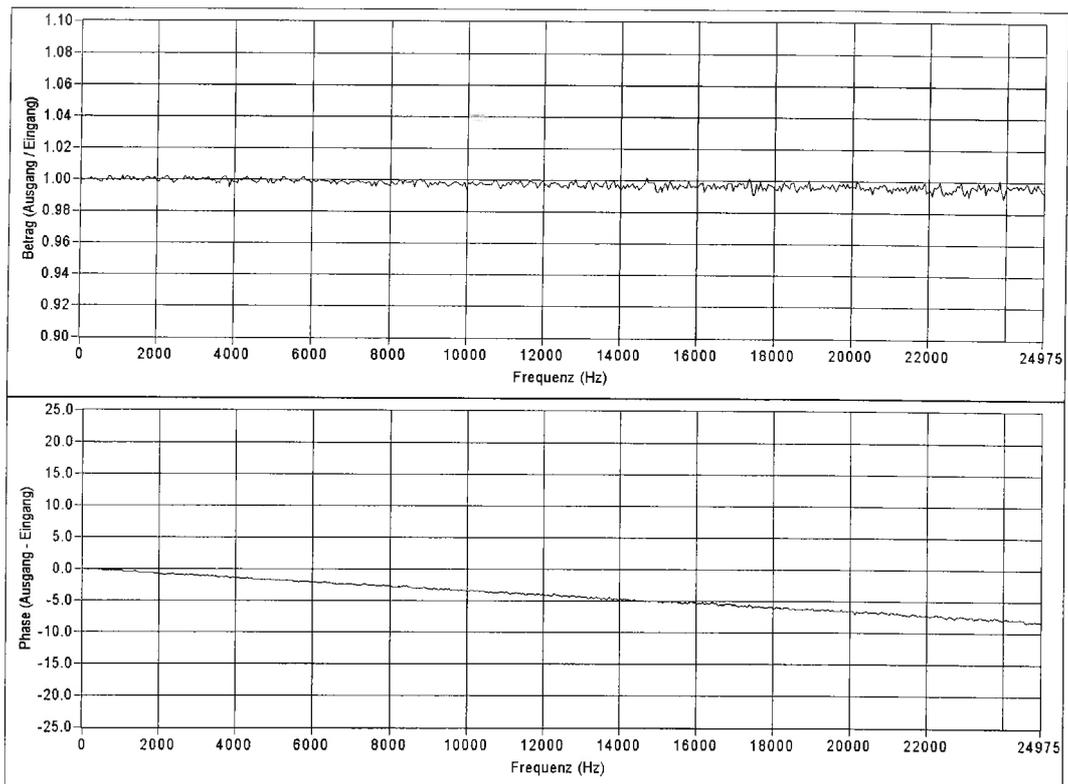


Bild 9.1.2-3 Übertragungsfunktion des Shunts L 144101, Bereich höherer Frequenzen

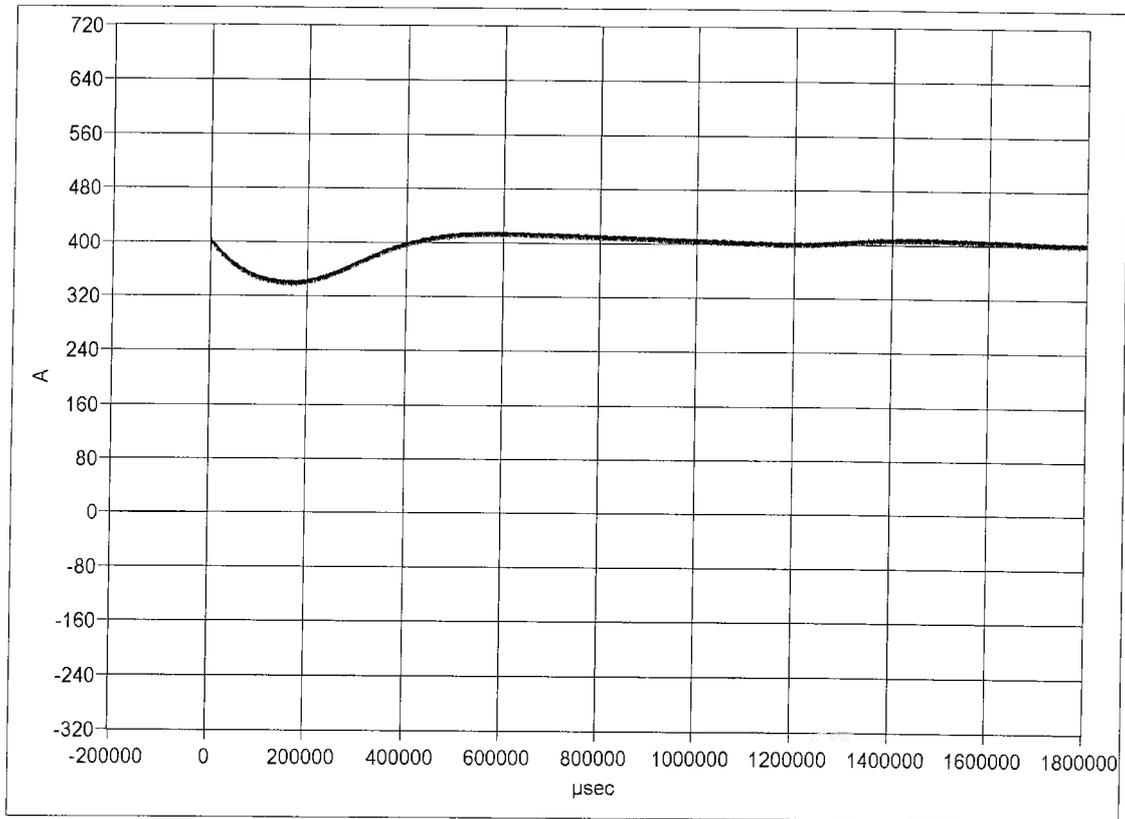


Bild 9.1.2-4 400-A-Rechteck-Stromsprung mit langsamer Zeitablenkung
 unteres Signal: Messnormal, oberes Signal: Shunt L 144101

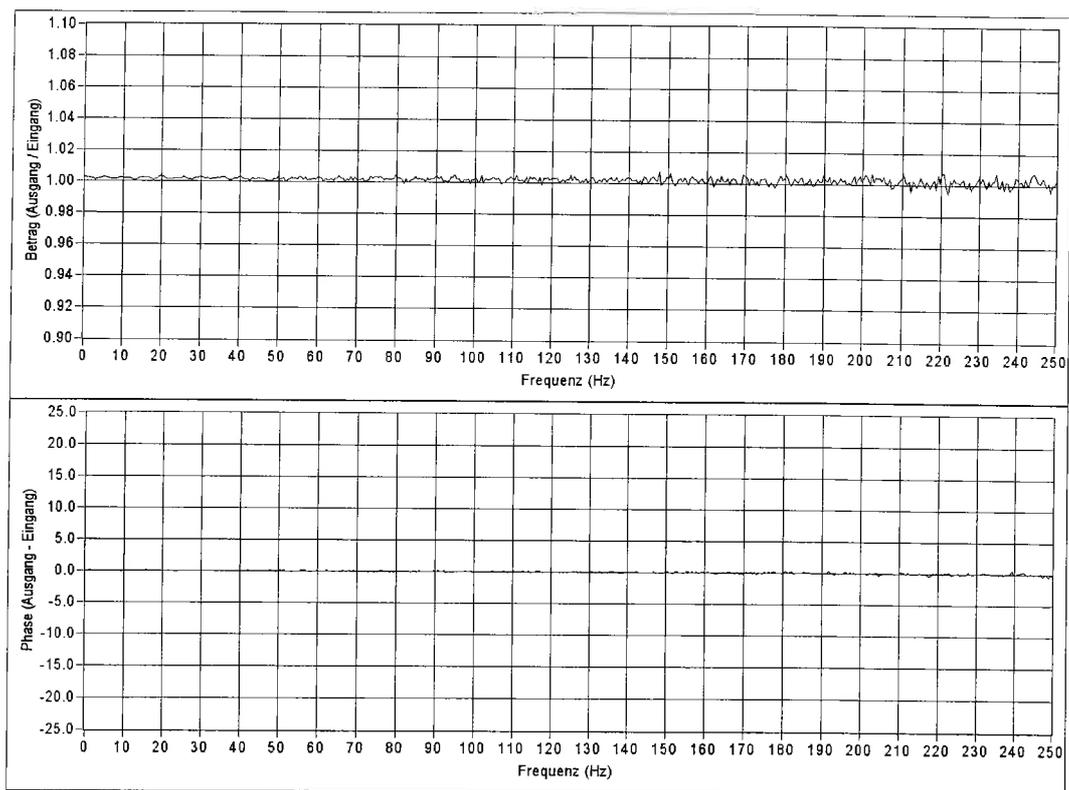


Bild 9.1.2-5 Übertragungsfunktion des Shunts L 144101, Bereich niedriger Frequenzen

9.1.3 Messungen am Shunt L144101 bei 600 A Stromsprung

Hersteller: T&M Research Products
Typ: Part HW 1.8

Nennstrom: 60 kA / 0.3 s
Nennübersetzung: 1,01041 kA / V

600 A Stromsprung

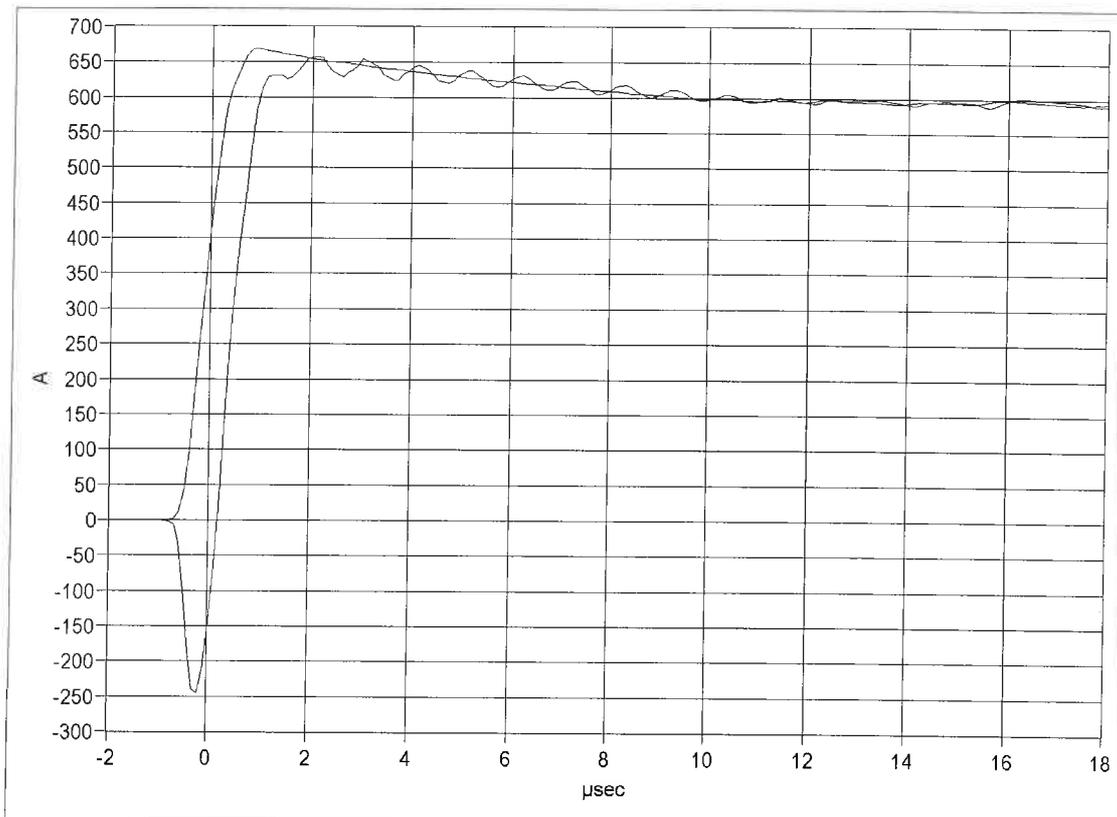


Bild 9.1.3-1 600-A-Anstieg des Rechteck-Stromsprungs
Signal ohne Schwingungen: Messnormal
Signal mit Schwingungen: Shunt L144101

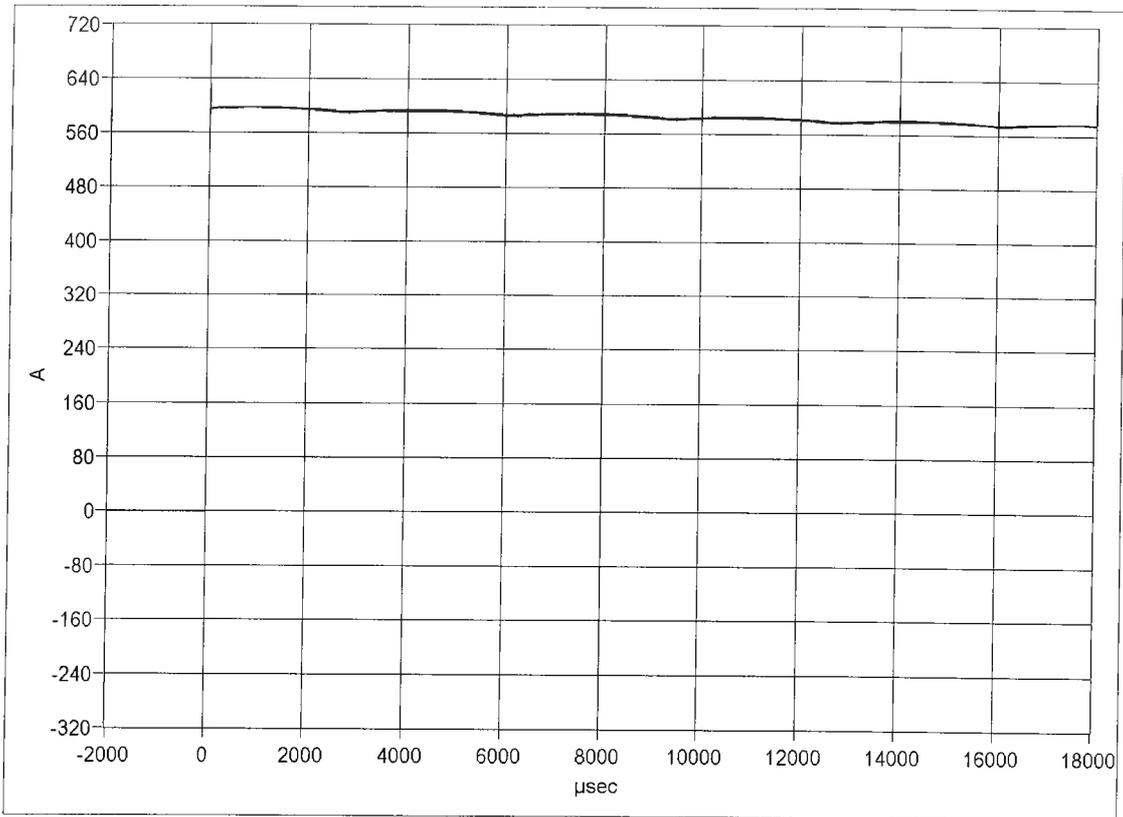


Bild 9.1.3-2 600-A-Rechteck-Stromsprung mit schneller Zeitablenkung
 oberes Signal: Messnormal,
 unteres Signal: Shunt L 144101

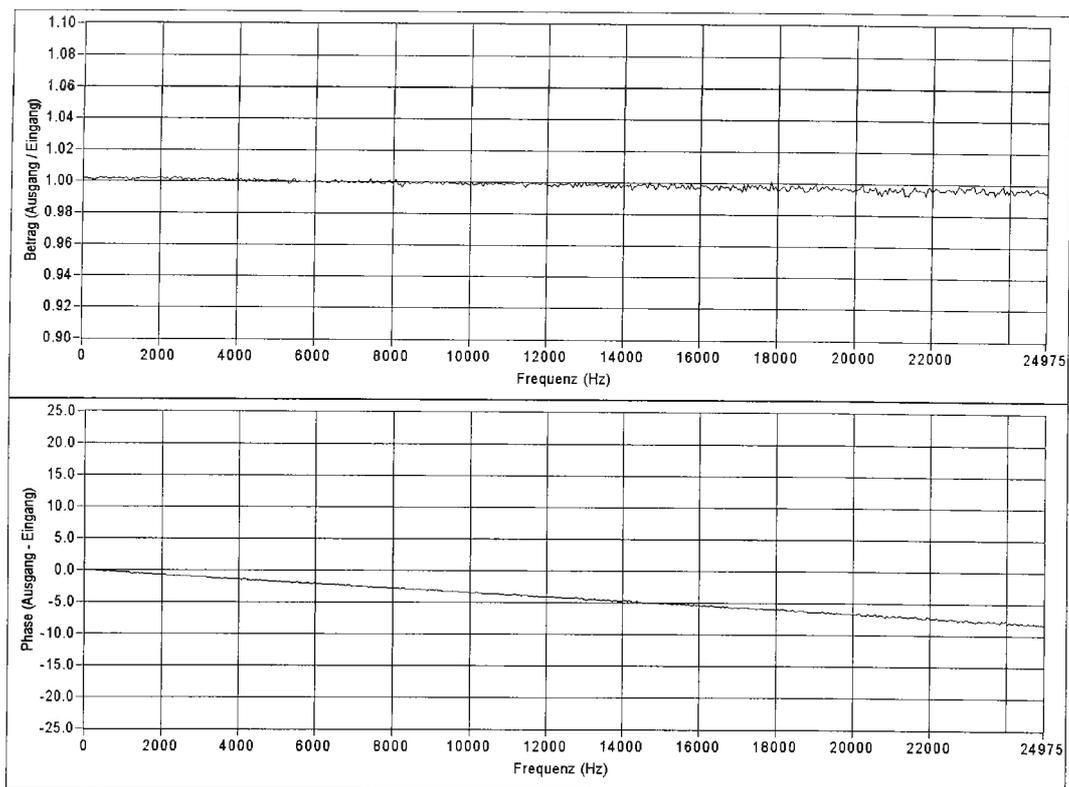


Bild 9.1.3-3 Übertragungsfunktion des Shunts L 144101, Bereich höherer Frequenzen

9.1.4 Messungen am Shunt L144101 bei 800 A Stromsprung

Hersteller: T&M Research Products
Typ: Part HW 1.8

Nennstrom: 60 kA / 0.3 s
Nennübersetzung: 1,01041 kA / V

800 A Stromsprung

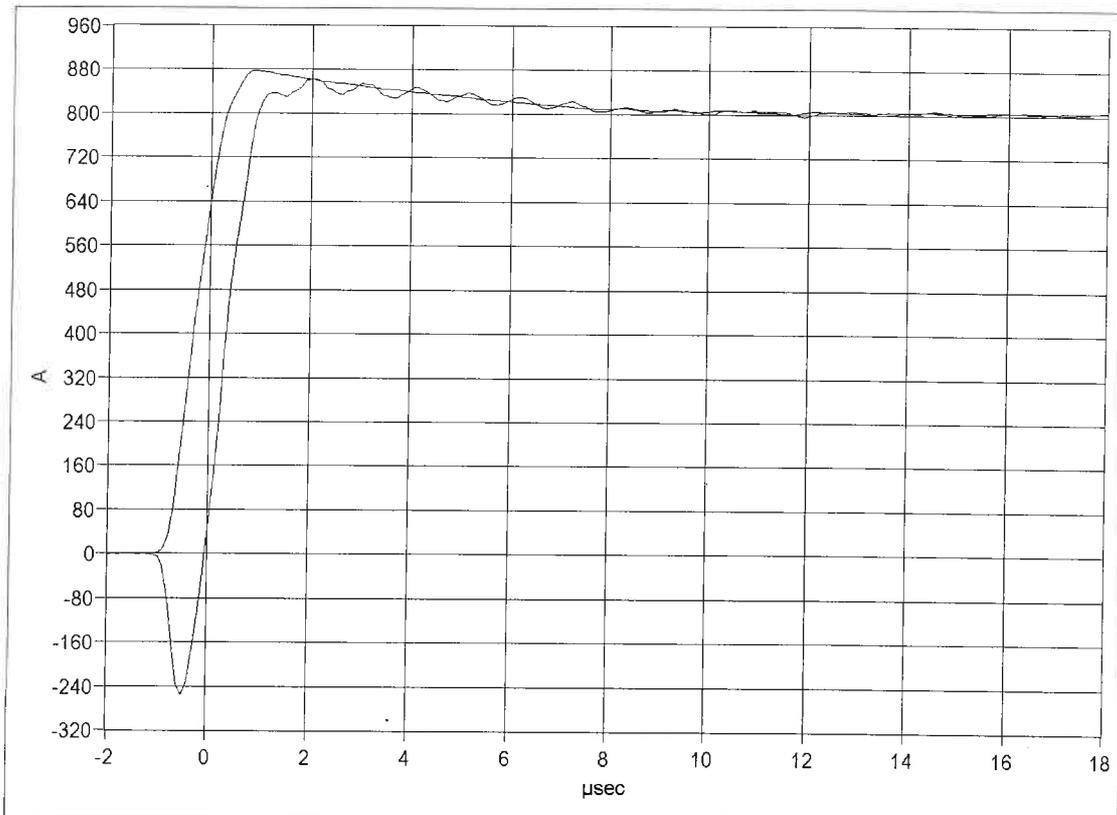


Bild 9.1.4-1 Anstieg des 800-A-Rechteck-Stromsprungs
Signal ohne Schwingungen: Messnormal
Signal mit Schwingungen: Shunt L144101

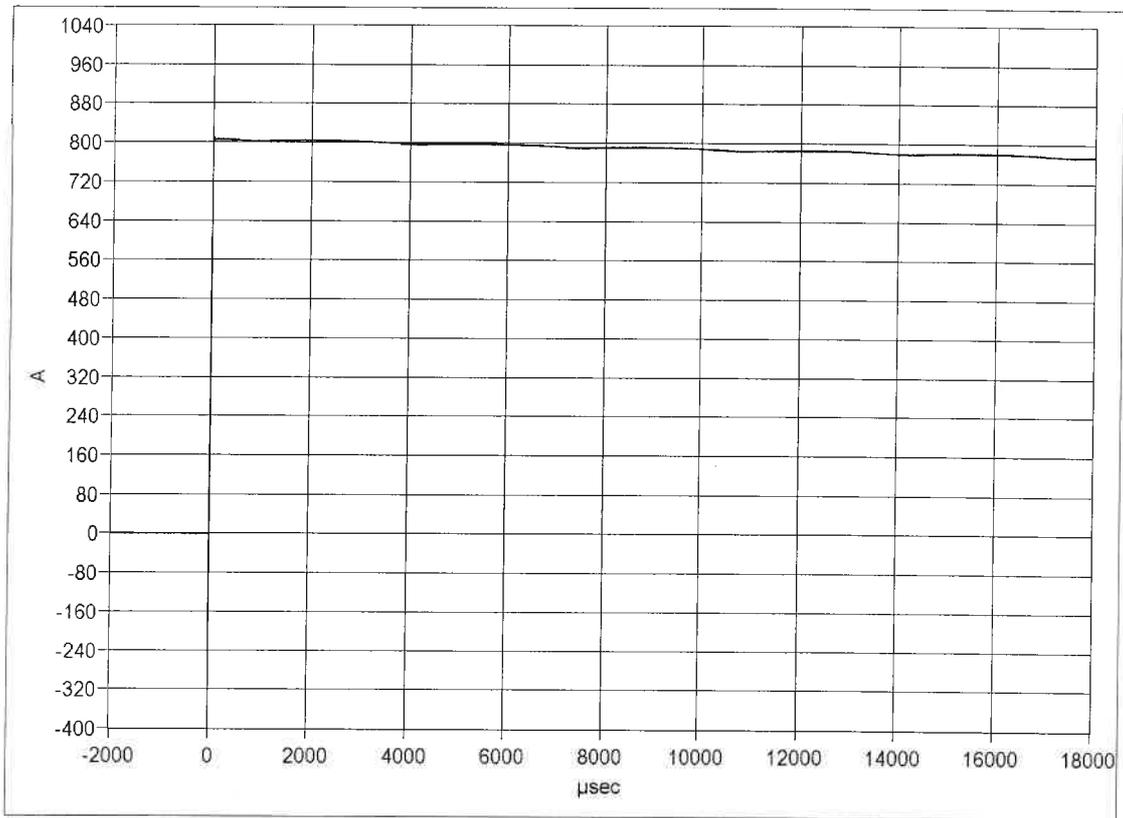


Bild 9.1.4-2 800-A-Rechteck-Stromsprung mit schneller Zeitablenkung
 oberes Signal: Messnormal,
 unteres Signal: Shunt L 144101

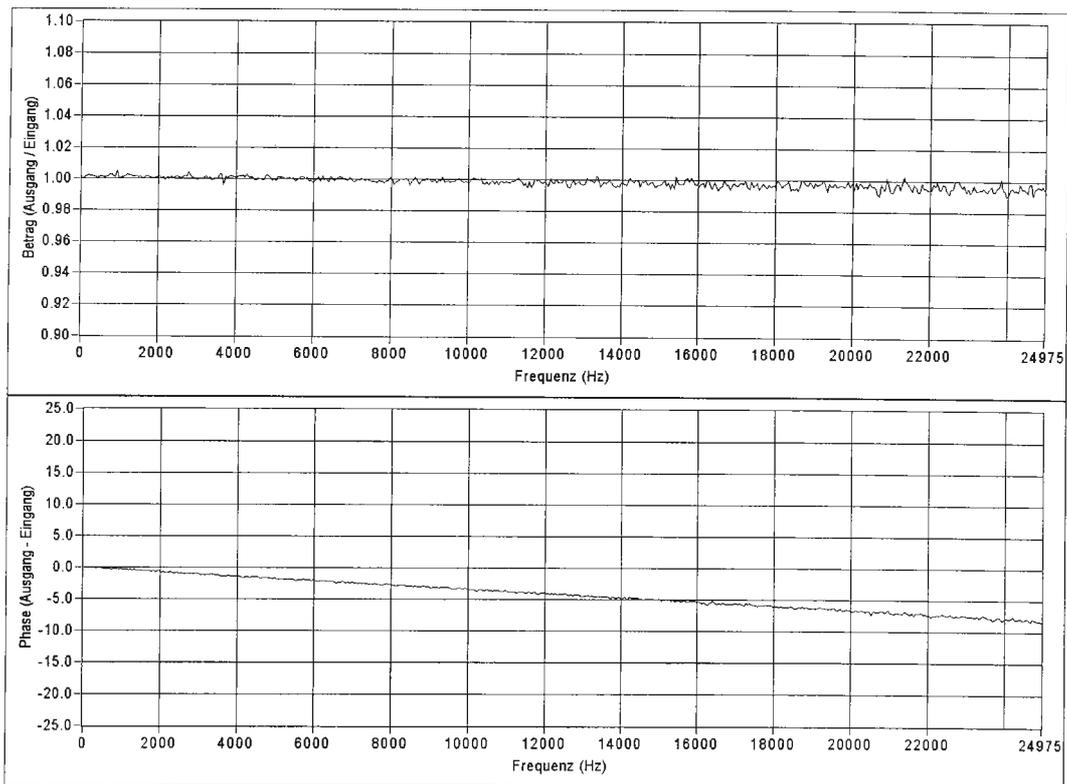


Bild 9.1.4-3 Übertragungsfunktion des Shunts L 144101, Bereich höherer Frequenzen

9.2 Messungen am Shunt L144103

Hersteller: Hartmann & Braun
Typ. Keine Angabe (Stäbchen-Shunt)

Nennstrom: 1000 A
Nennübersetzung: 6,6667 kA / V

200 A Stromsprung

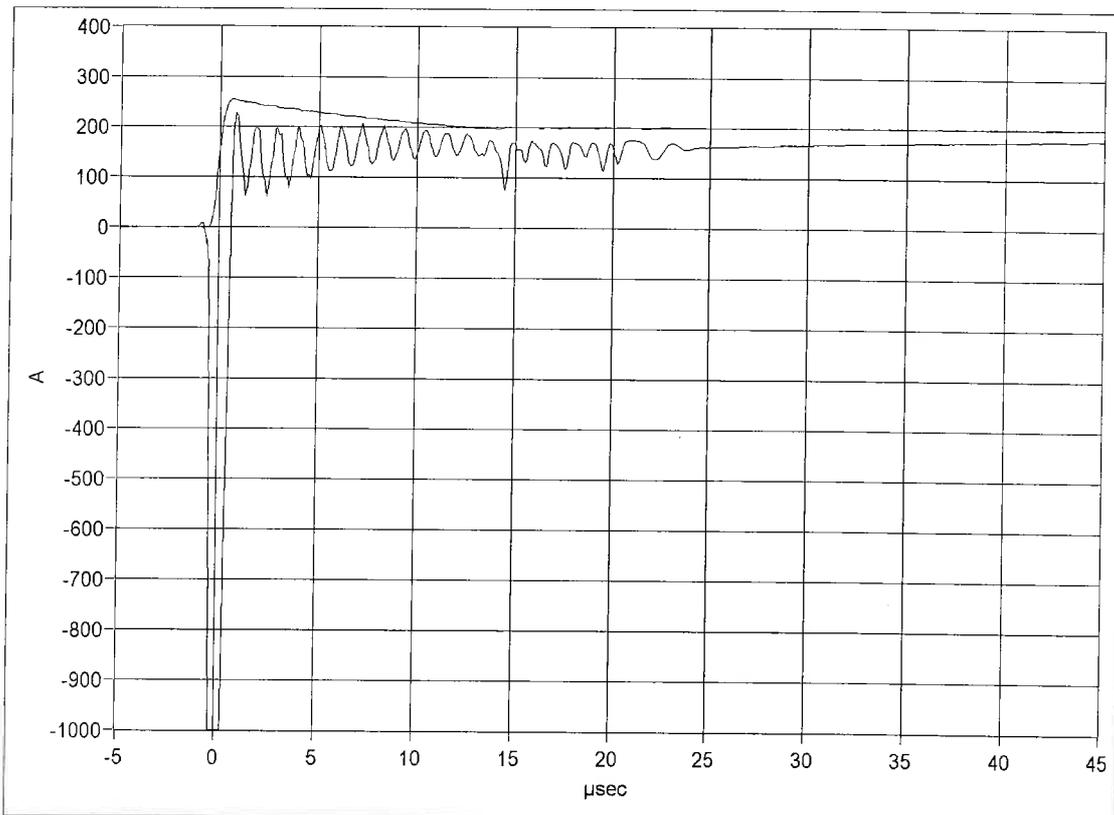


Bild 9.2-1 Anstieg des Rechteck-Stromsprungs
Signal ohne Schwingungen: Messnormal
Signal mit Schwingungen: Shunt L144103

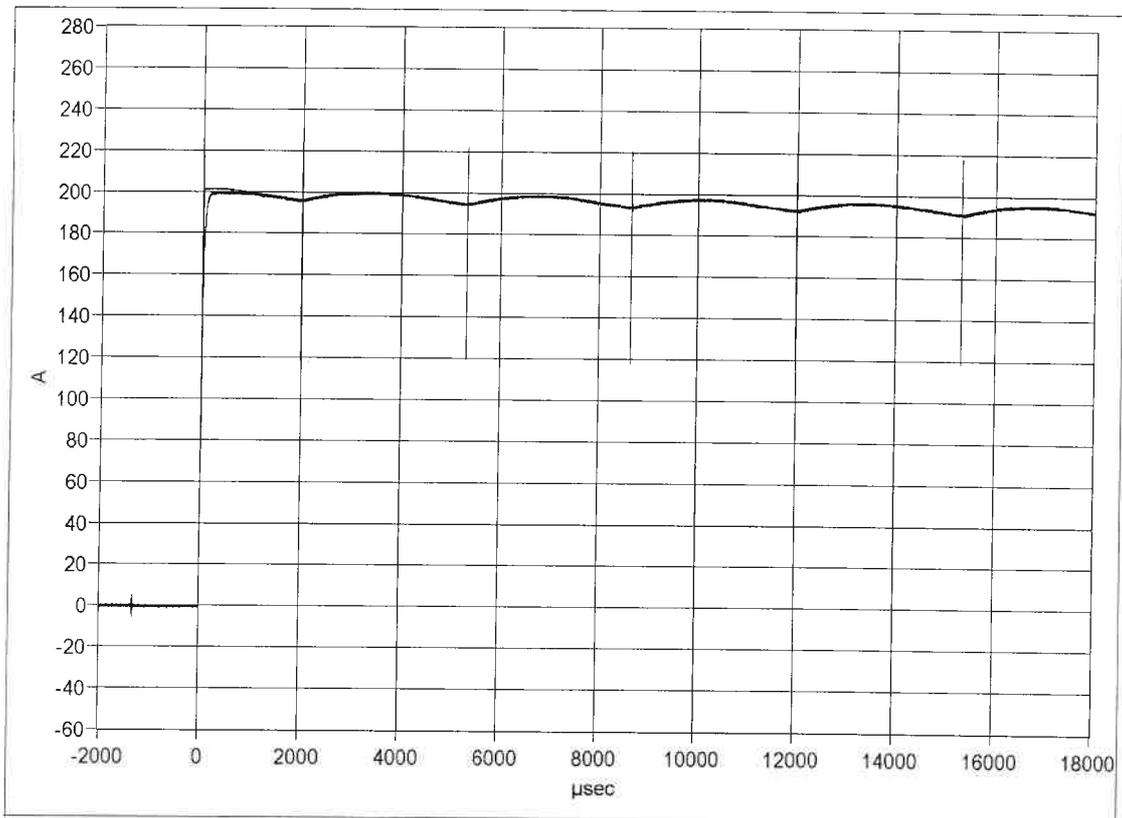


Bild 9.2-2 Rechteck-Stromsprung mit schneller Zeitablenkung
 glattes Signal: Messnormal,
 Signal mit Einstreuungen: Shunt L 144103

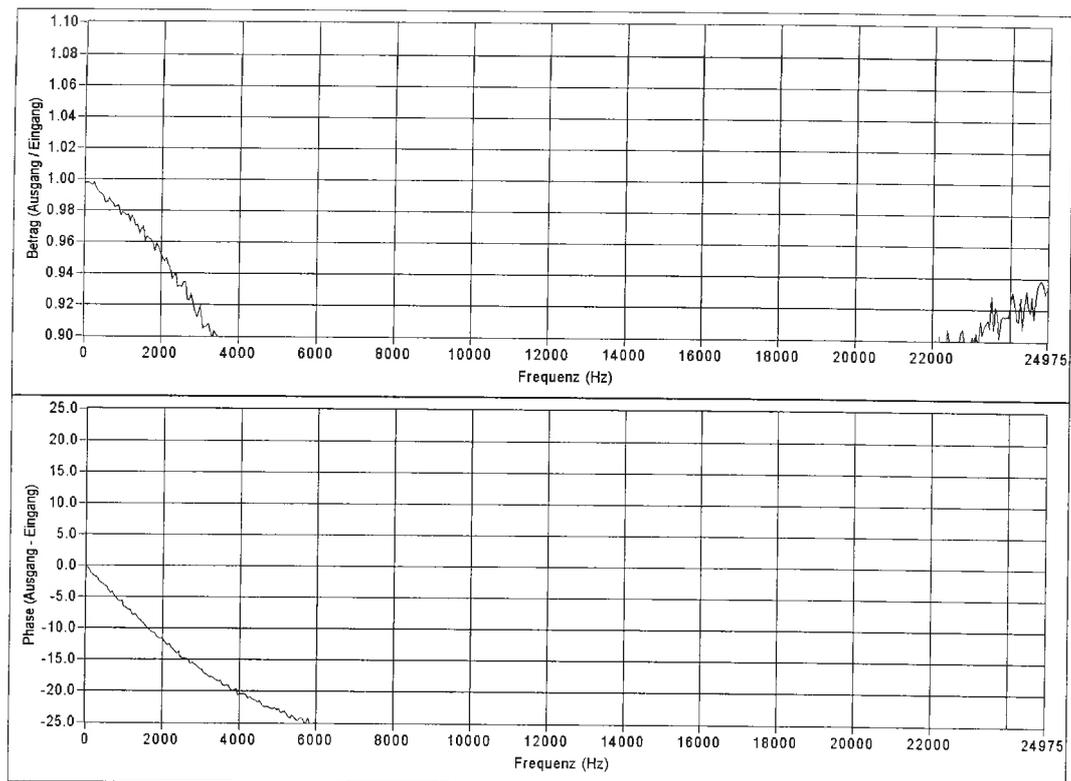


Bild 9.2-3 Übertragungsfunktion des Shunts L 144103, Bereich höherer Frequenzen

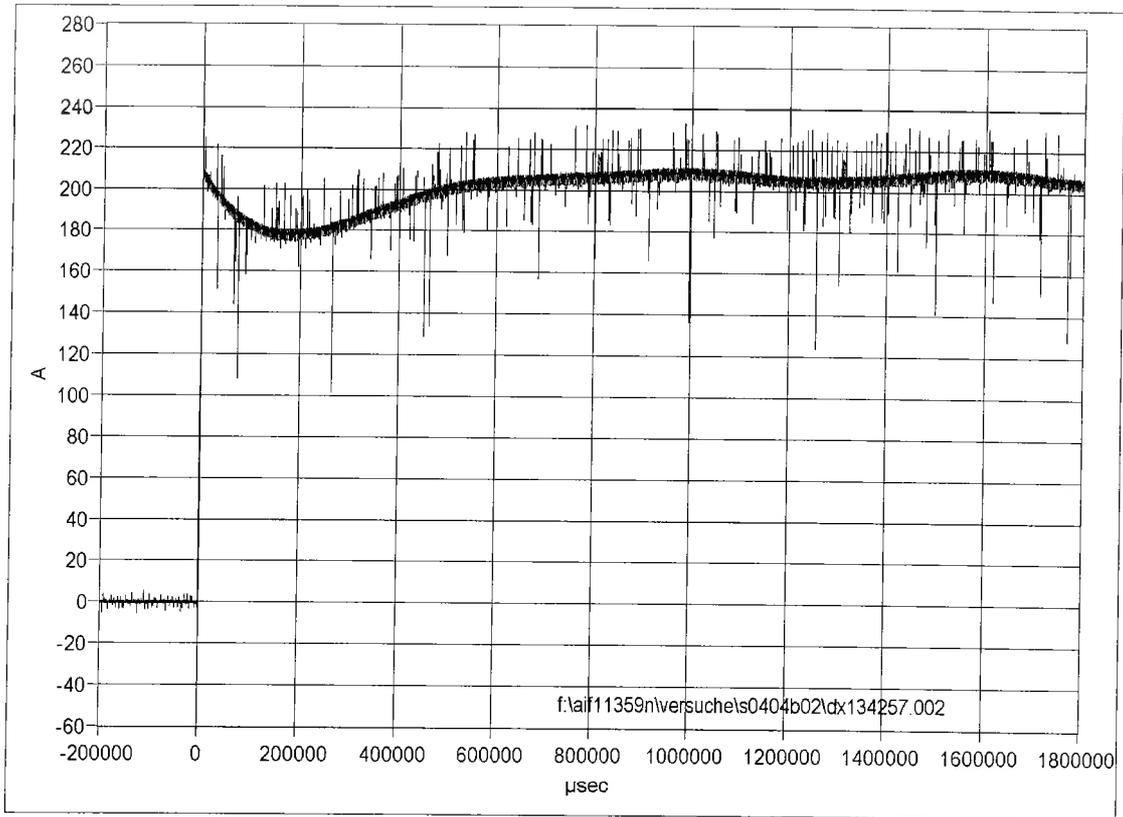


Bild 9.2-4 Rechteck-Stromsprung mit langsamer Zeitablenkung
 galttes Signal: Messnormal,
 Signal mit Einstreuungen: Shunt L 144103

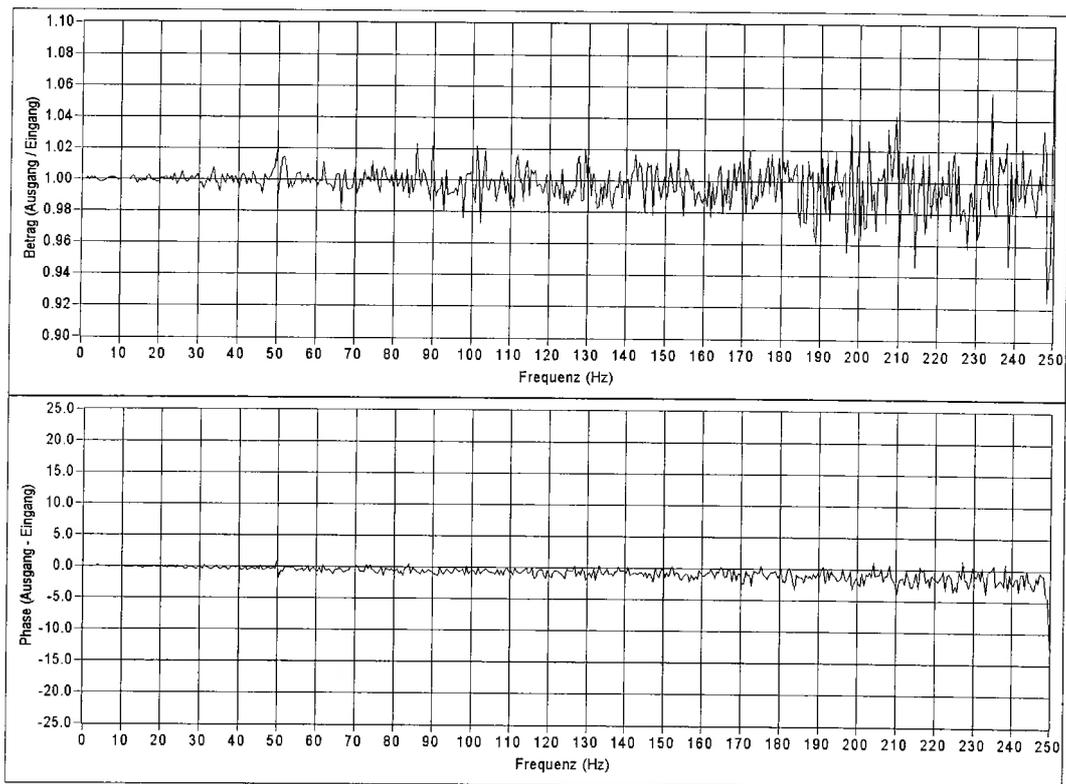


Bild 9.2-5 Übertragungsfunktion des Shunts L 144103, Bereich niedriger Frequenzen

9.3 Messungen am Stromwandler L143603

9.3.1 Messungen am Messkern des Stromwandlers L143603

Hersteller: Ritz
Typ: TSSO (Durchsteck-Stromwandler)

Nennstrom: 3500 A, $I_{th} = 350$ kA
Bürde: 0,5 Ω
Übersetzung: 1,4 kA / V

200 A Stromsprung

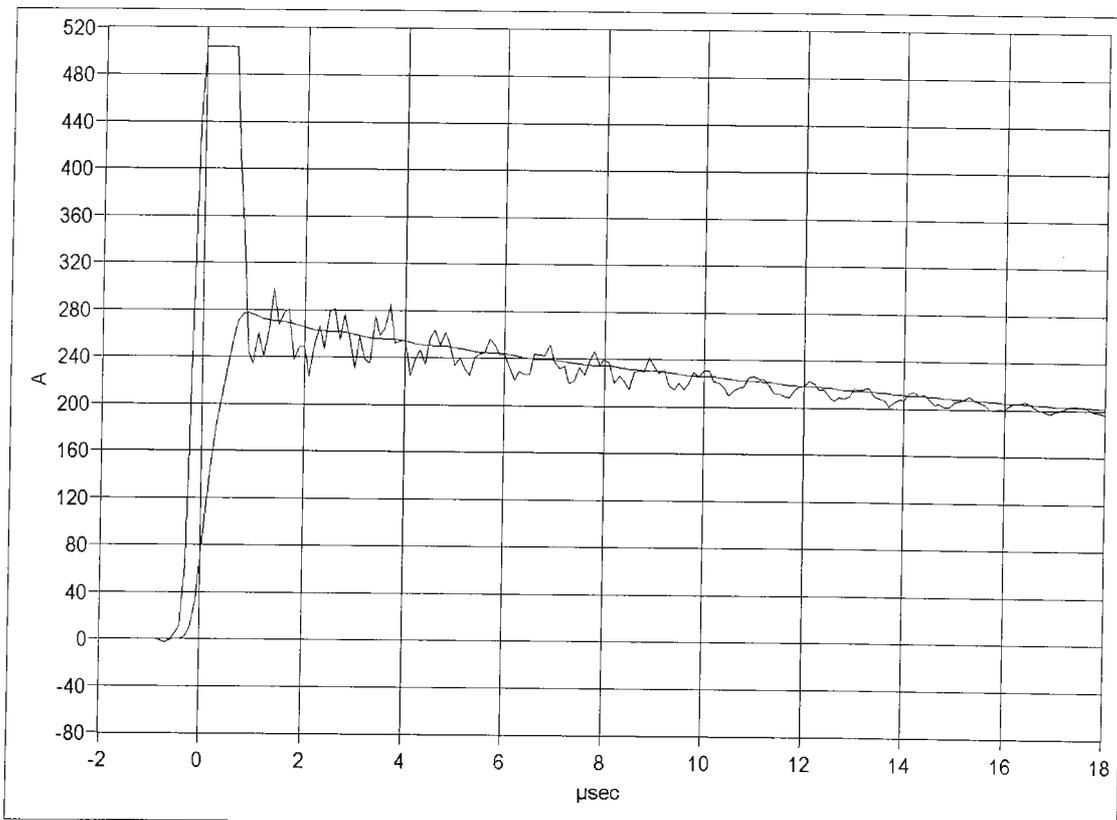


Bild 9.3.1-1 Anstieg des Rechteck-Stromsprungs
Signal ohne Schwingungen: Messnormal
Signal mit Schwingungen: Stromwandler L 143603, Messkern

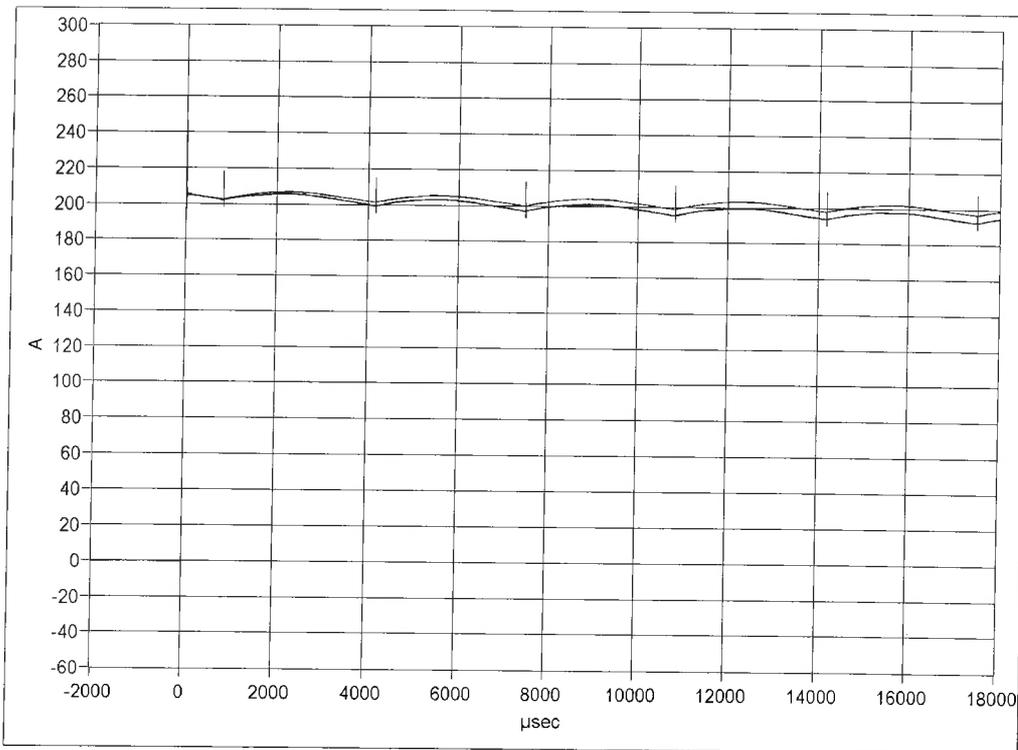


Bild 9.3.1-2 Rechteck-Stromsprung mit schneller Zeitablenkung
 oberes Signal: Messnormal,
 unteres Signal: Stromwandler L 143603, Messkern

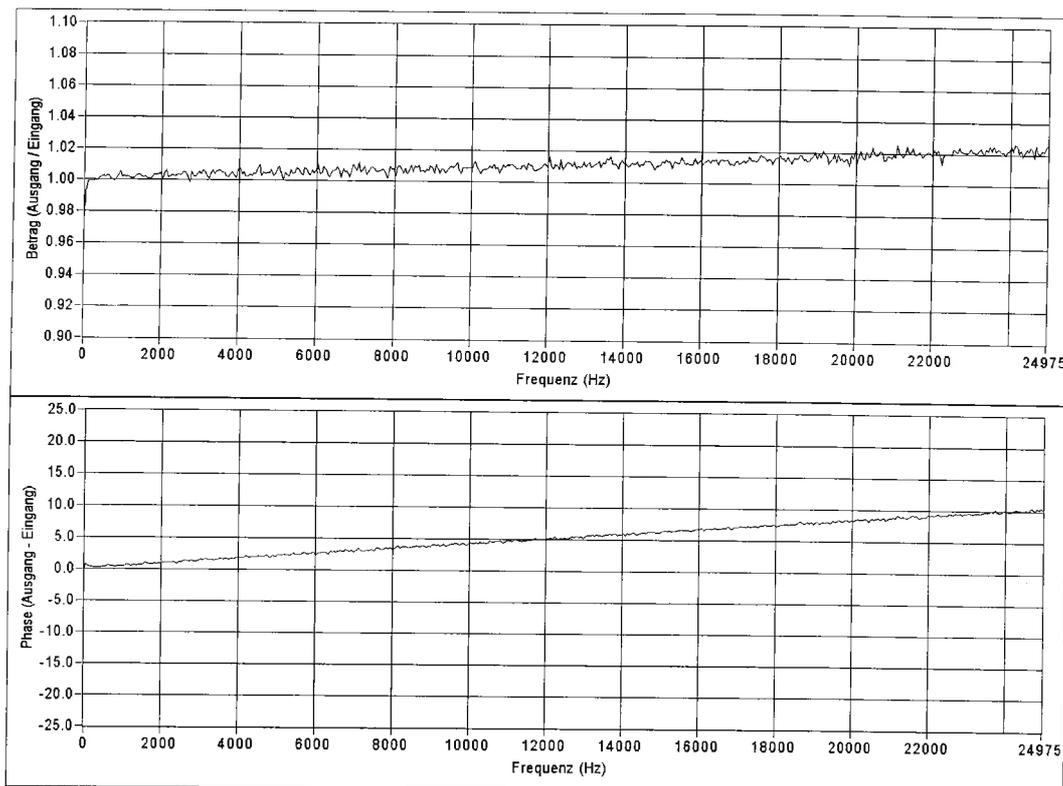


Bild 9.3.1-3 Übertragungsfunktion des Messkerns des Stromwandlers L 143603,
 Bereich höherer Frequenzen

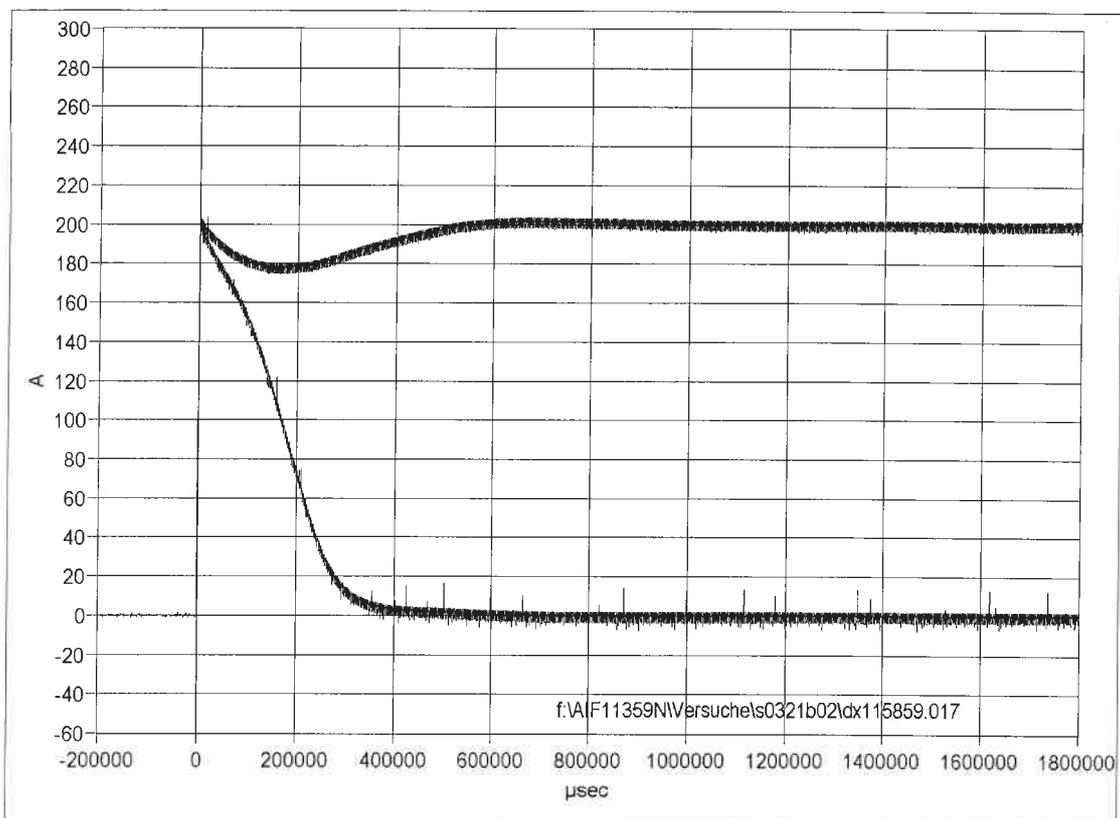


Bild 9.3.1-4 Rechteck-Stromsprung mit langsamer Zeitablenkung
 oberes Signal: Messnormal,
 unteres Signal: Stromwandler L 143603, Messkern

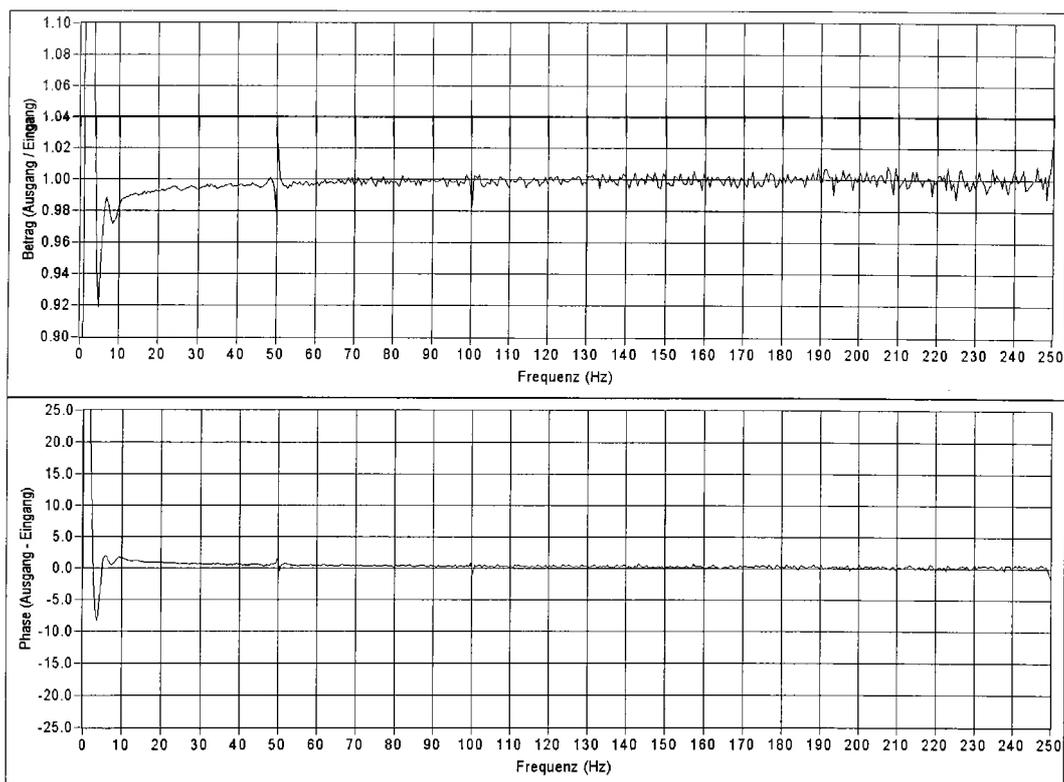


Bild 9.3.1-5 Übertragungsfunktion des Messkerns des Stromwandlers L 143603, Bereich niedriger Frequenzen

9.3.2 Messungen am Schutzkern des Stromwandlers L143603

Hersteller: Ritz
Typ: TSSO (Durchsteck-Stromwandler)

Nennstrom: 3500 A, $I_{th} = 350$ kA

Bürde: 2Ω

Übersetzung: 1,75 kA / V

200 A Stromsprung

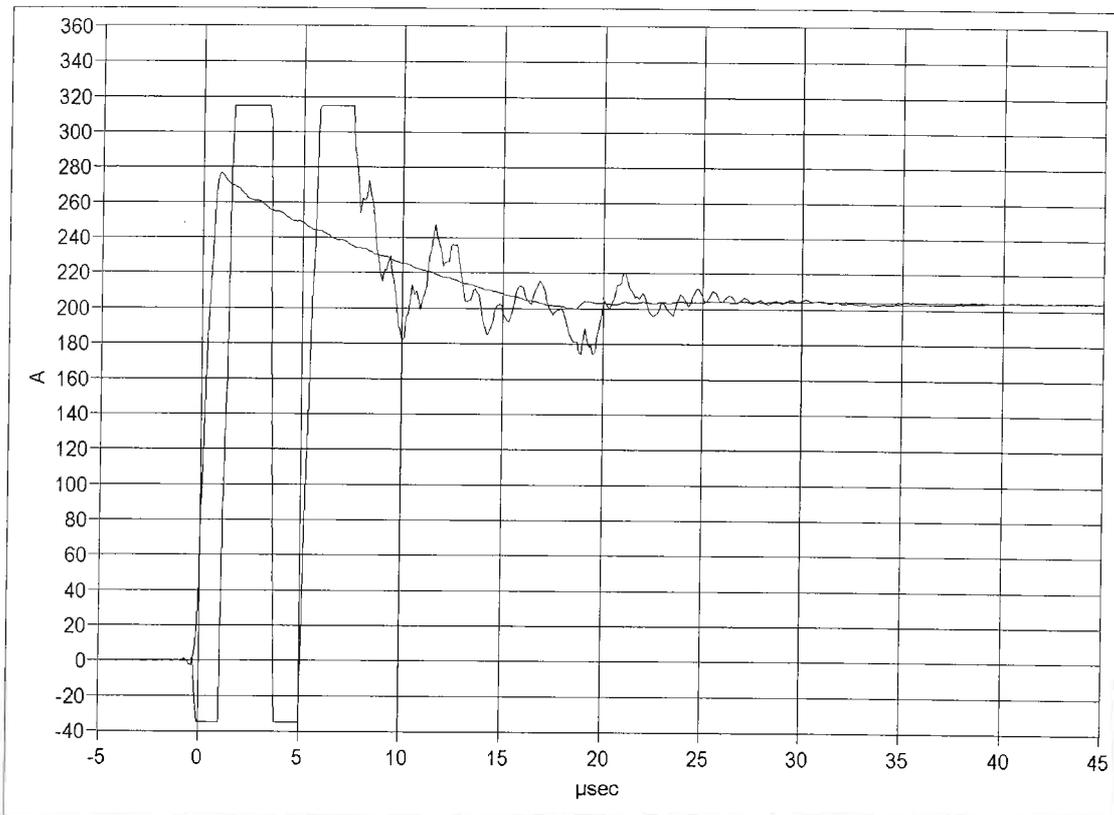


Bild 9.3.2-1 Anstieg des Rechteck-Stromsprungs
Signal ohne Schwingungen: Messnormal
Signal mit Schwingungen: Stromwandler L 143603, Schutzkern

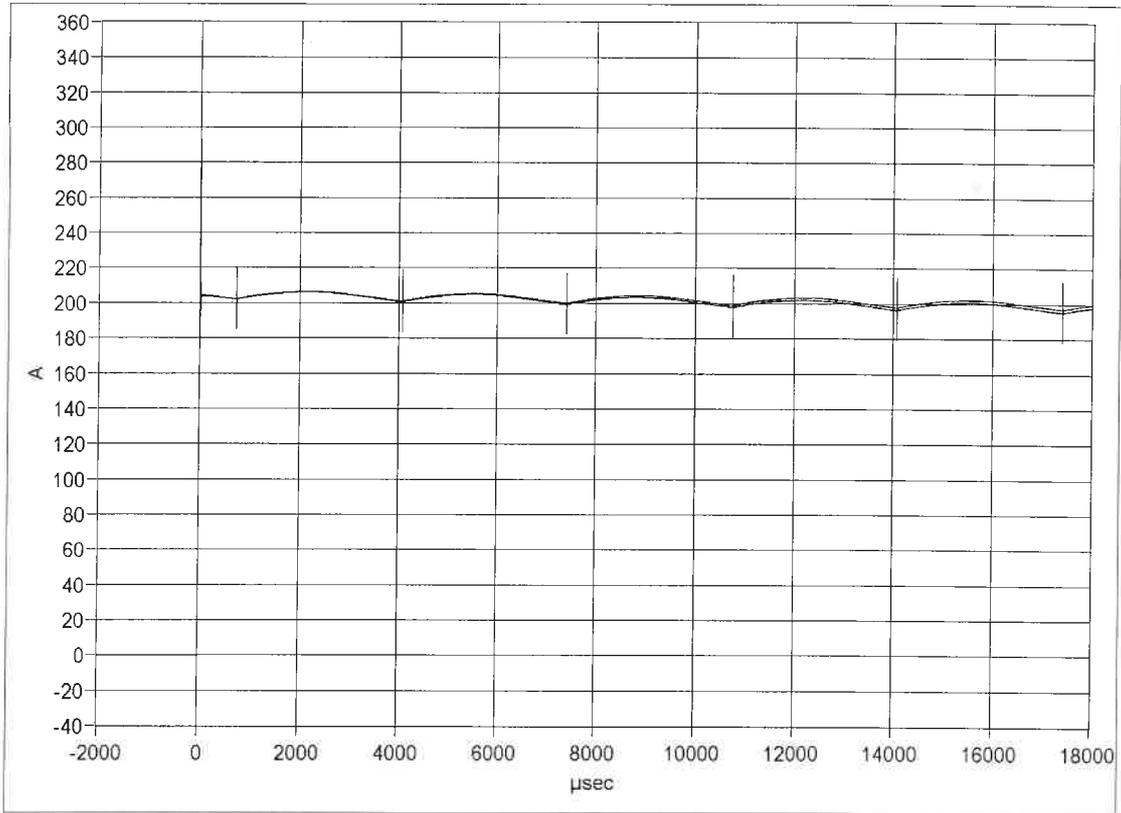


Bild 9.3.2-2 Rechteck-Stromsprung mit schneller Zeitablenkung
 oberes Signal: Messnormal,
 unteres Signal: Stromwandler L 143603, Schutzkern

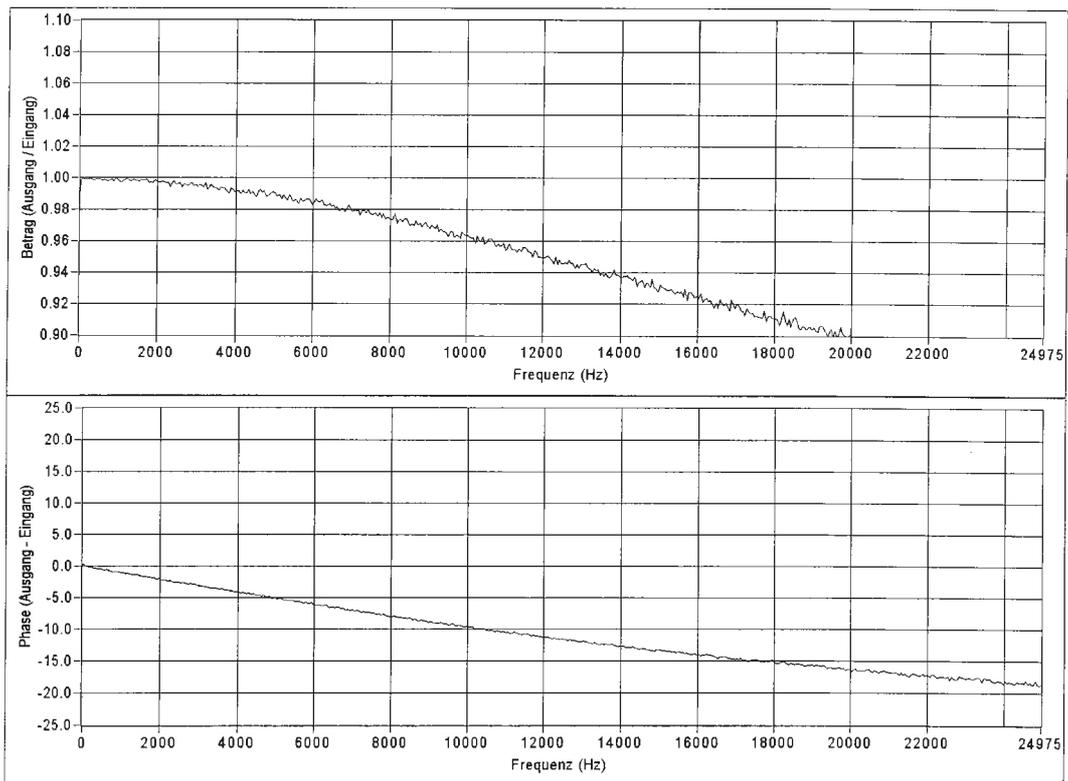


Bild 9.3.2-3 Übertragungsfunktion des Schutzkerns des Stromwandlers L 143603,
 Bereich höherer Frequenzen

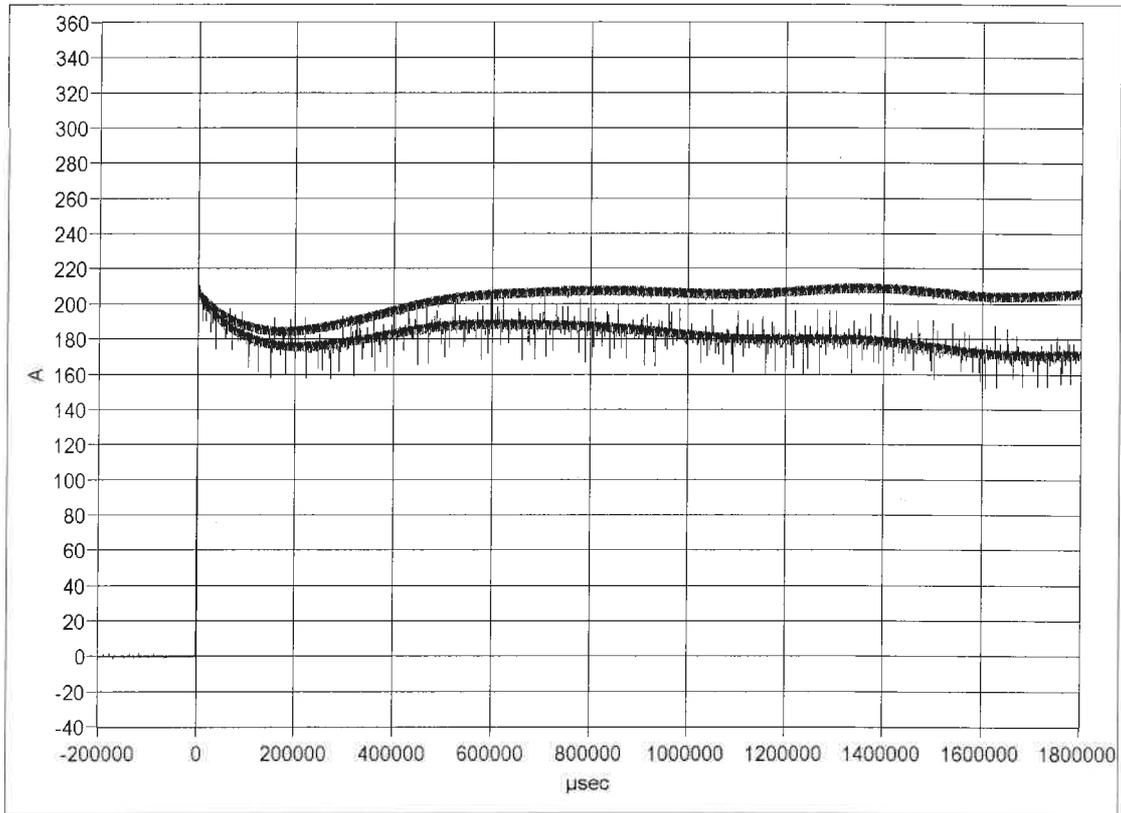


Bild 9.3.2-4 Rechteck-Stromsprung mit langsamer Zeitablenkung
 oberes Signal: Messnormal,
 unteres Signal: Stromwandler L 143603, Schutzkern

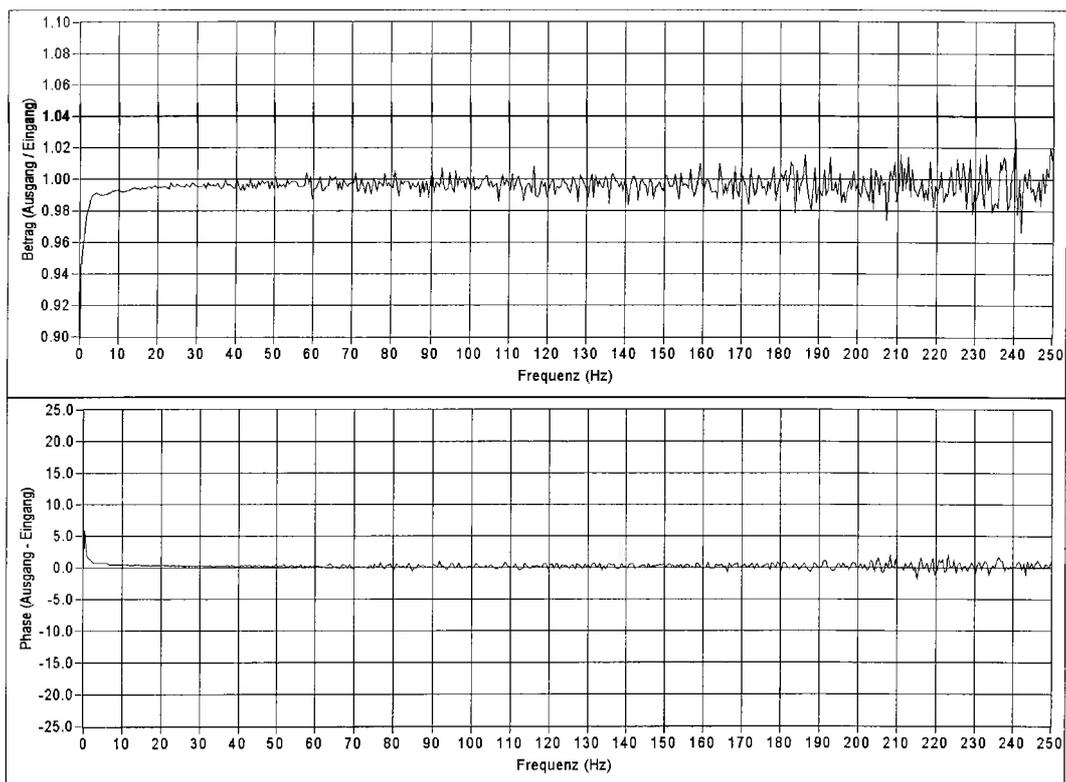


Bild 9.3.2-5 Übertragungsfunktion des Schutzkerns des Stromwandlers L 143603,
 Bereich niedriger Frequenzen

9.4 Messungen am Stromwandler L143128

9.4.1 Messung bei 50-A-Schaltung des Stromwandlers L143128

Hersteller: Ritz
Typ: GSW 30
Nennstrom: 50 A, $I_{th} = 20 \text{ kA}$
Bürde: 1Ω
Übersetzung: 50 A / V

50 A Stromsprung

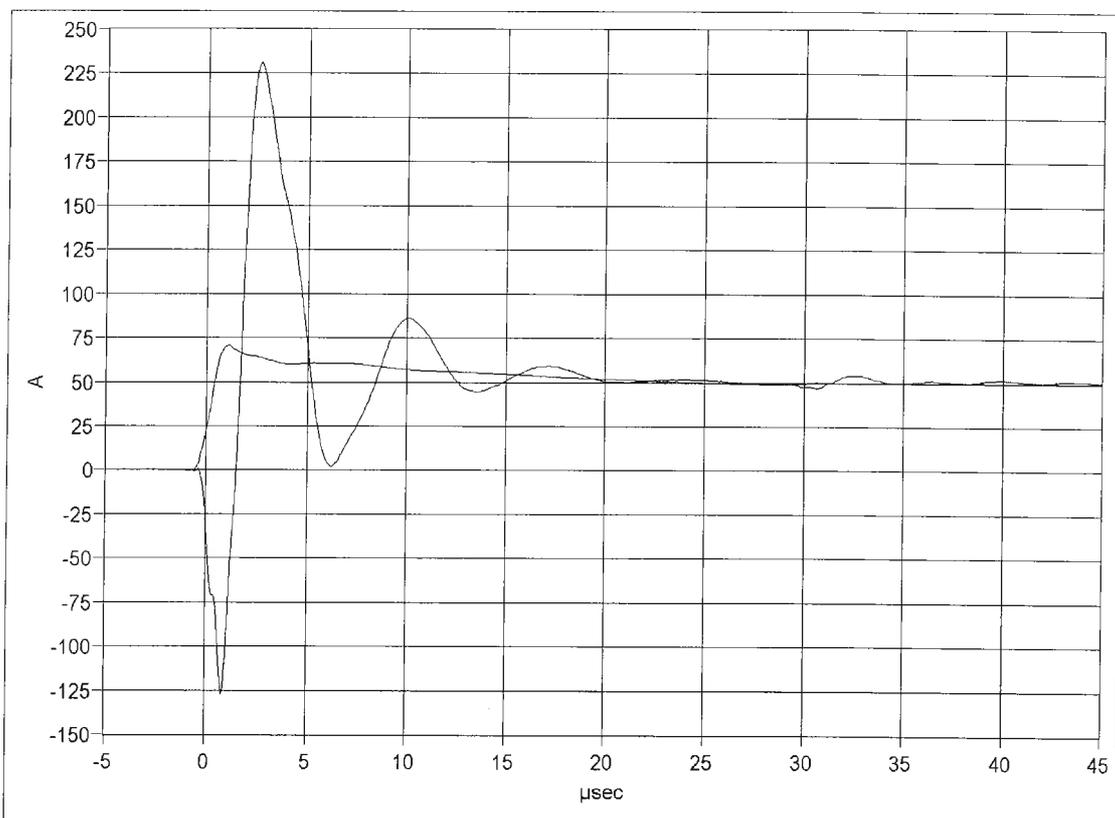


Bild 9.4.1-1 Anstieg des Rechteck-Stromsprungs
Signal ohne Schwingungen: Messnormal
Signal mit Schwingungen: Stromwandler L 143128, 50-A-Schaltung

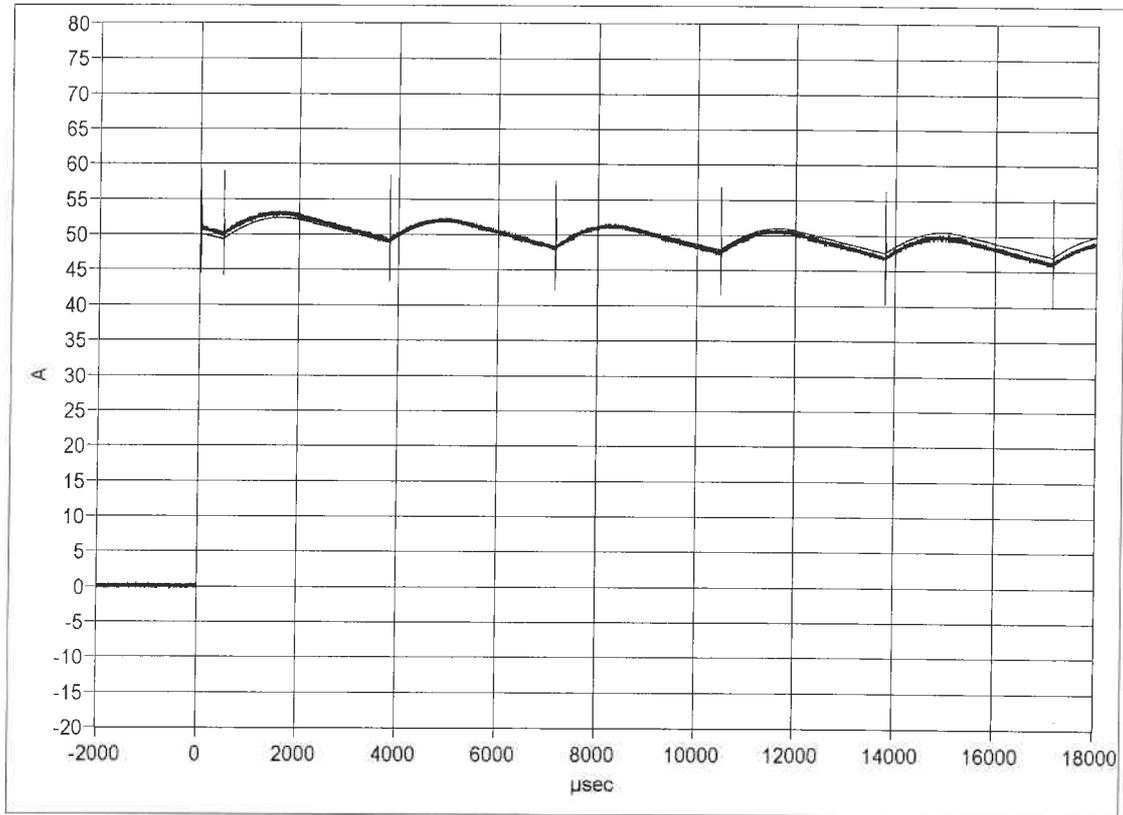


Bild 9.4.1-2 Rechteck-Stromsprung mit schneller Zeitablenkung
 feines Signal: Messnormal,
 breites Signal: Stromwandler L 143128, 50-A-Schaltung

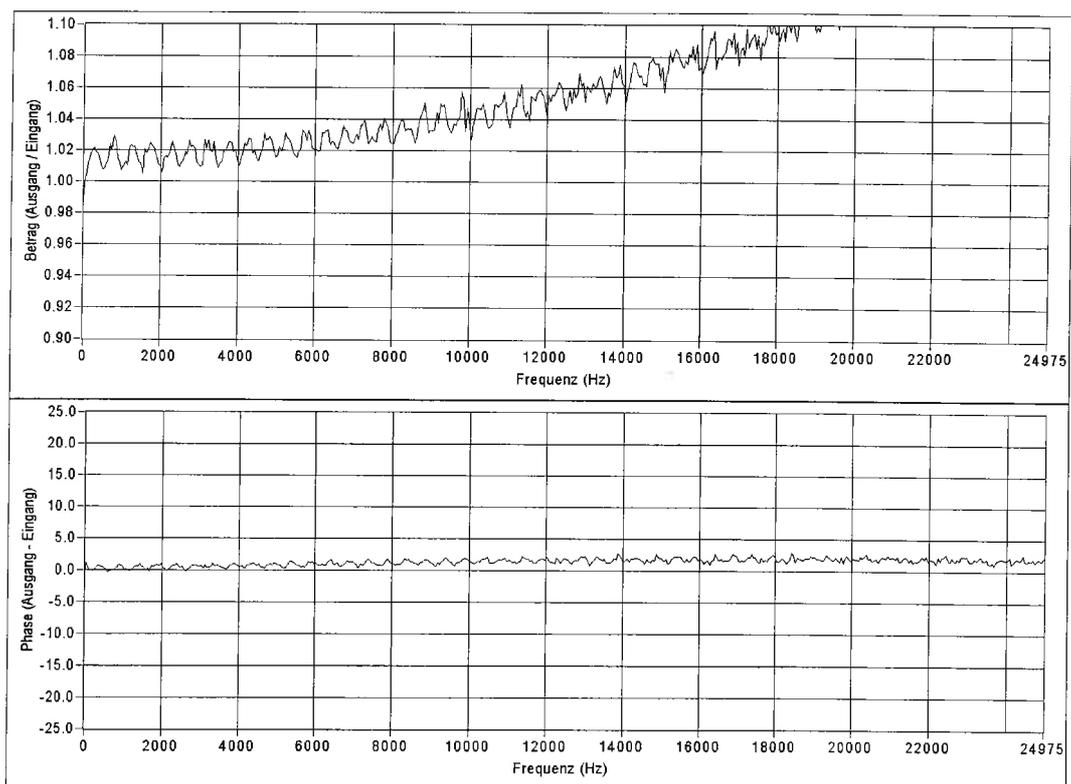


Bild 9.4.1-3 Übertragungsfunktion des Stromwandlers L 143128, 50-A-Schaltung,
 Bereich höherer Frequenzen

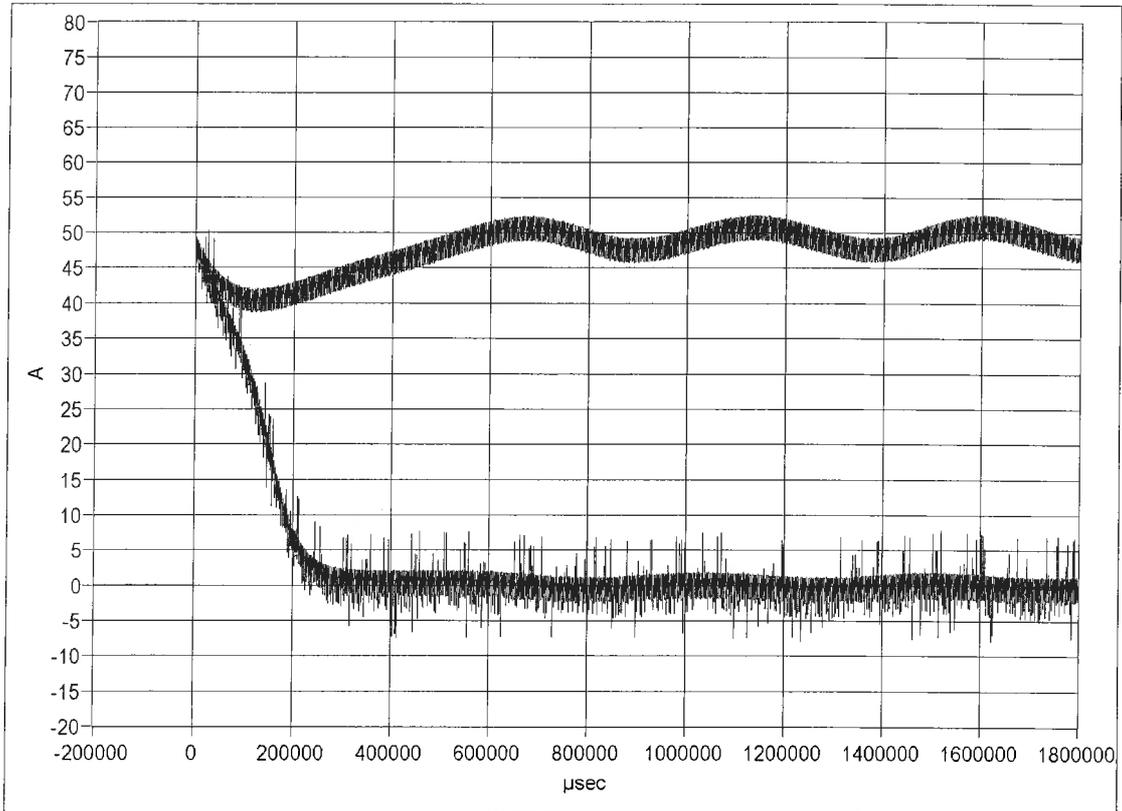


Bild 9.4.1-4 Rechteck-Stromsprung mit langsamer Zeitablenkung
 oberes Signal: Messnormal,
 unteres Signal: Stromwandler L 143128, 50-A-Schaltung

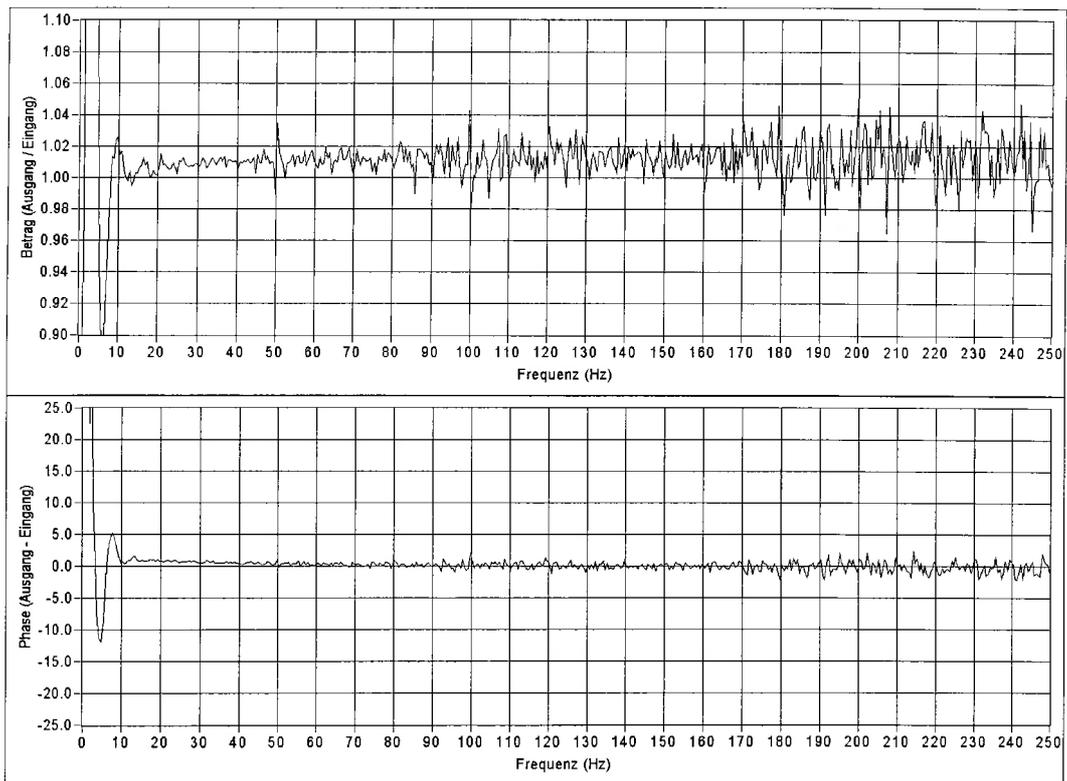


Bild 9.4.1-5 Übertragungsfunktion des Stromwandlers L 143128, 50-A-Schaltung,
 Bereich niedriger Frequenzen

9.4.2 Messungen bei 100-A-Schaltung des Stromwandlers L143128

Hersteller: Ritz
Typ. GSW 30
Nennstrom: 100 A, $I_{th} = 40 \text{ kA}$
Bürde: 1Ω
Übersetzung: 100 A / V

100 A Stromsprung

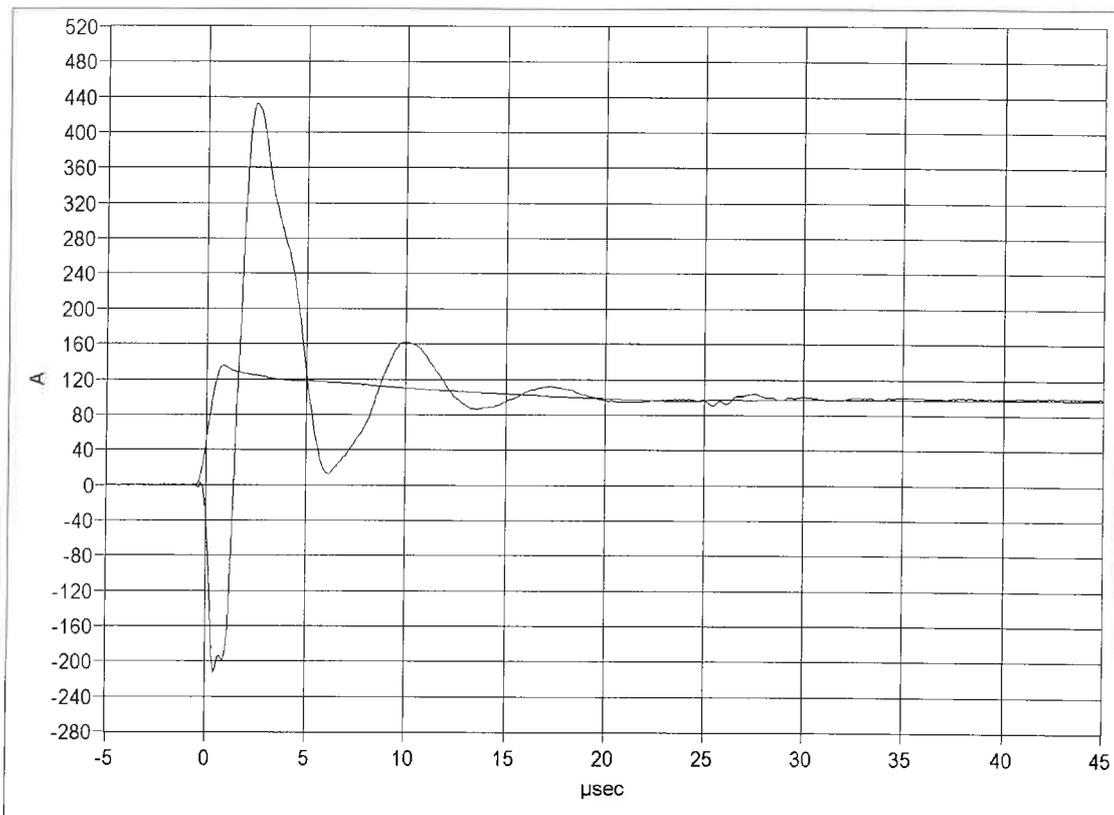


Bild 9.4.2-1 Anstieg des Rechteck-Stromsprungs
Signal ohne Schwingungen: Messnormal
Signal mit Schwingungen: Stromwandler L 143128, 100-A-Schaltung

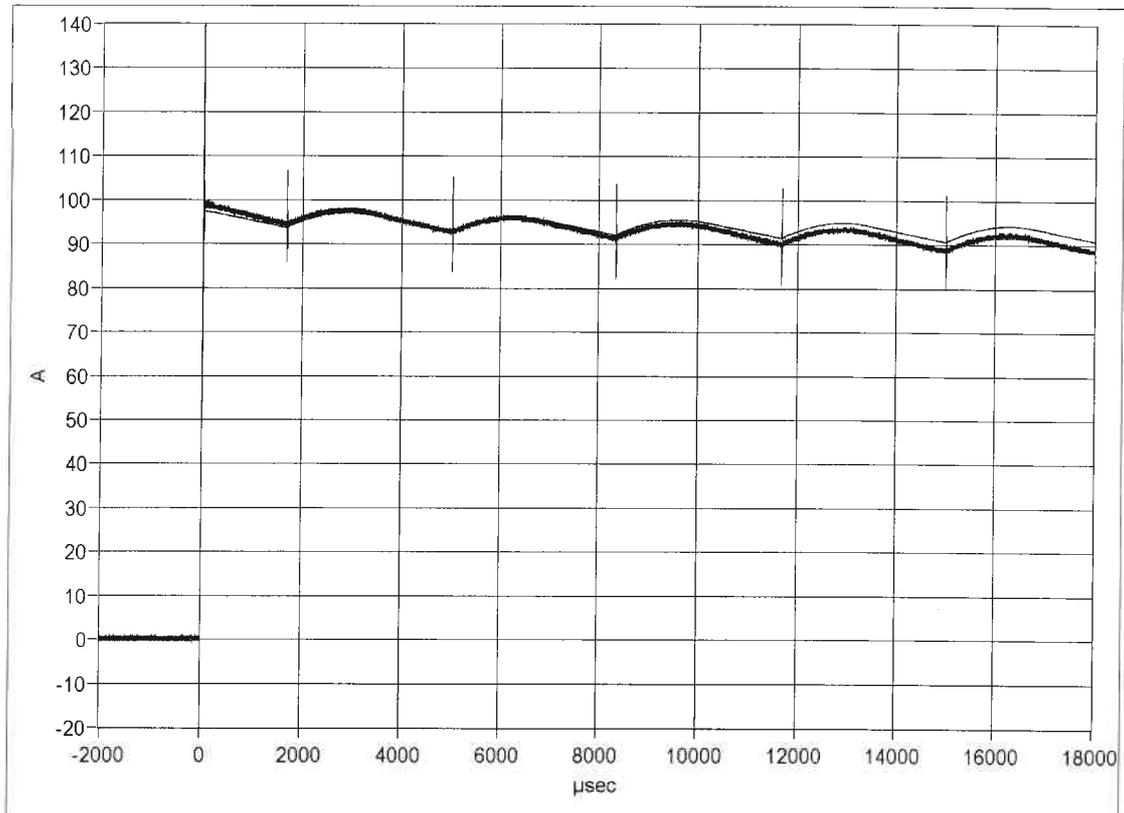


Bild 9.4.2-2 Rechteck-Stromsprung mit schneller Zeitablenkung
feines Signal: Messnormal,
breites Signal: Stromwandler L 143128, 100-A-Schaltung

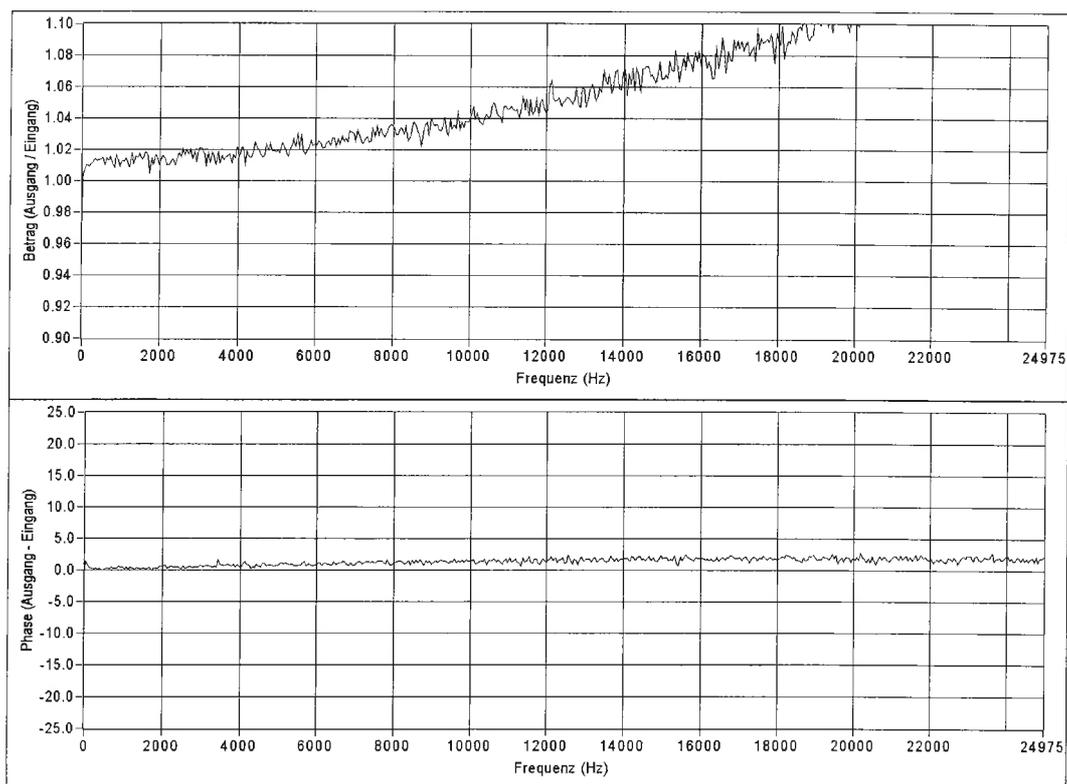


Bild 9.4.2-3 Übertragungsfunktion des Stromwandlers L 143128, 100-A-Schaltung,
Bereich höherer Frequenzen

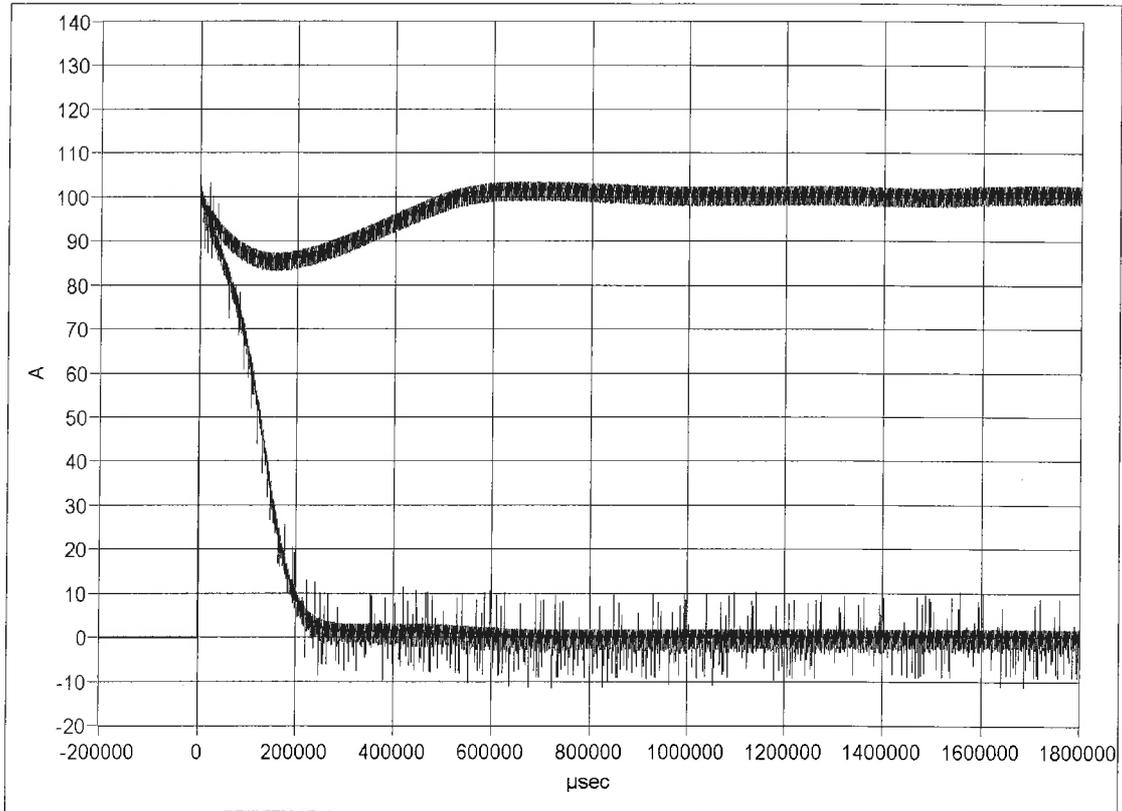


Bild 9.4.2-4 Rechteck-Stromsprung mit langsamer Zeitablenkung
 oberes Signal: Messnormal,
 unteres Signal: Stromwandler L 143128, 100-A-Schaltung

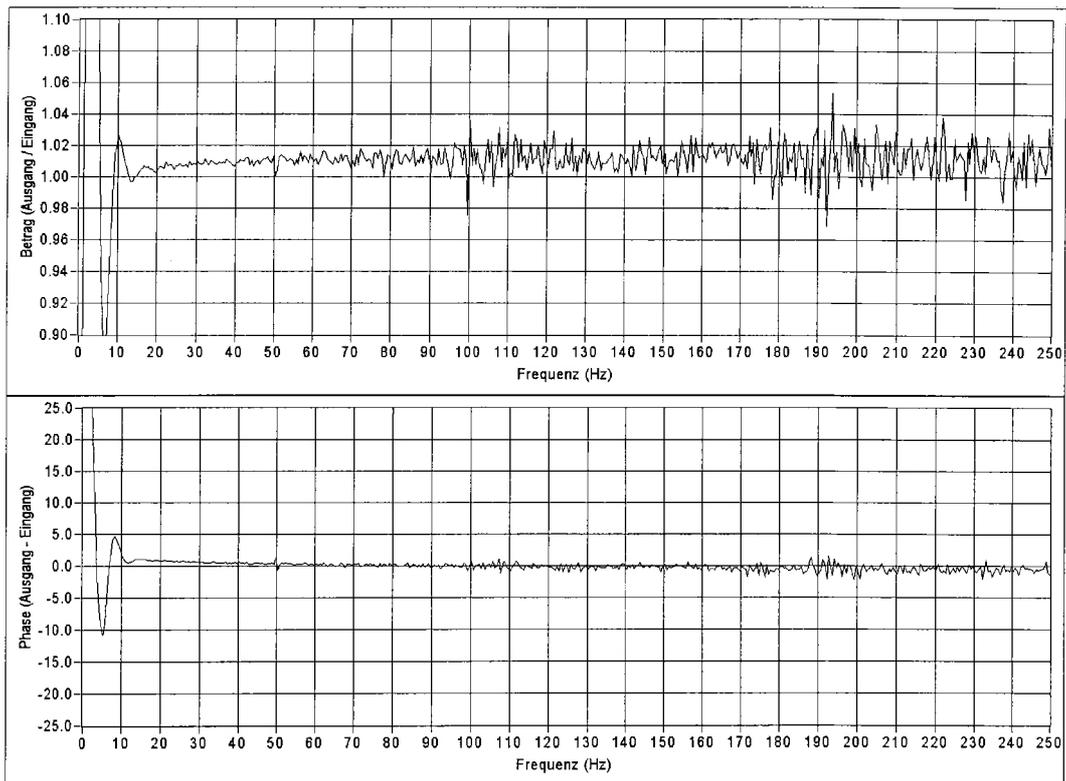


Bild 9.4.2-5 Übertragungsfunktion des Stromwandlers L 143128, 100-A-Schaltung,
 Bereich niedriger Frequenzen

9.4.3 Messungen bei 200-A-Schaltung des Stromwandlers L143128

Hersteller: Ritz
Typ: GSW 30
Nennstrom: 200 A, $I_{th} = 20 \text{ kA}$
Bürde: 1Ω
Übersetzung: 200 A / V

200 A Stromsprung

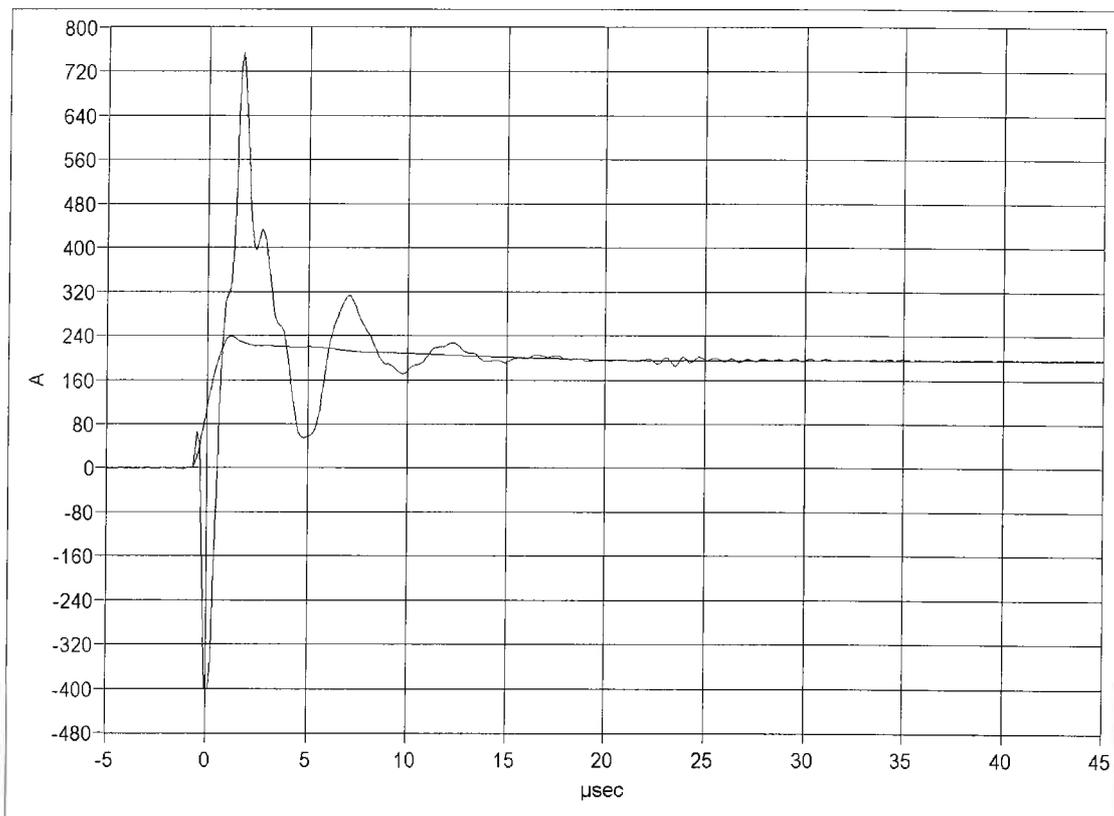


Bild 9.4.3-1 Anstieg des Rechteck-Stromsprungs
Signal ohne Schwingungen: Messnormal
Signal mit Schwingungen: Stromwandler L 143128, 200-A-Schaltung

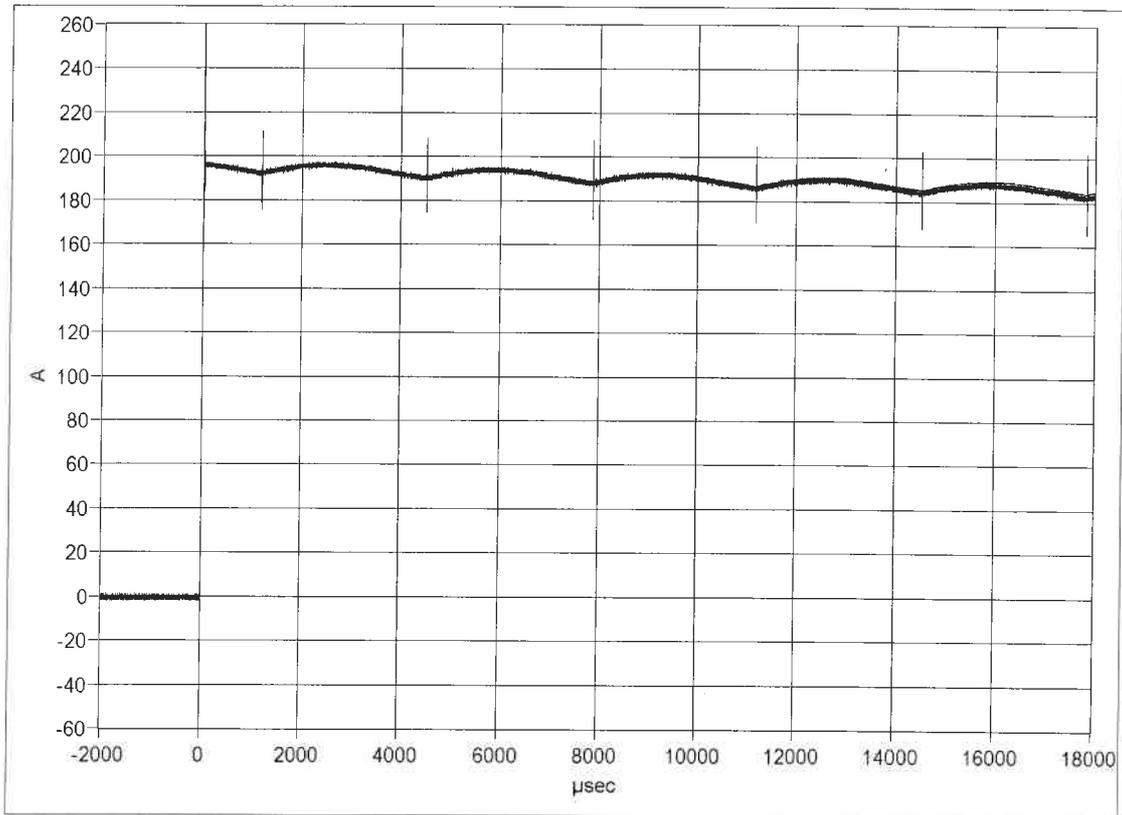


Bild 9.4.3-2 Rechteck-Stromsprung mit schneller Zeitablenkung
 feines Signal: Messnormal,
 breites Signal: Stromwandler L 143128, 200-A-Schaltung

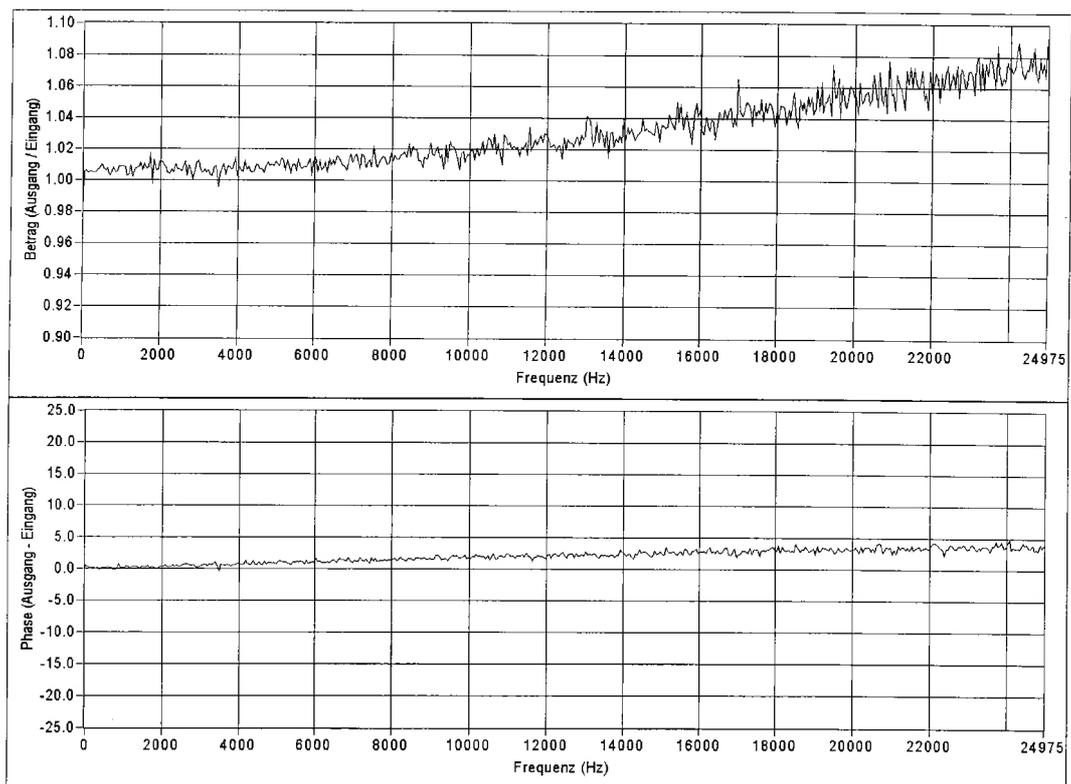


Bild 9.4.3-3 Übertragungsfunktion des Stromwandlers L 143128, 200-A-Schaltung, Bereich höherer Frequenzen

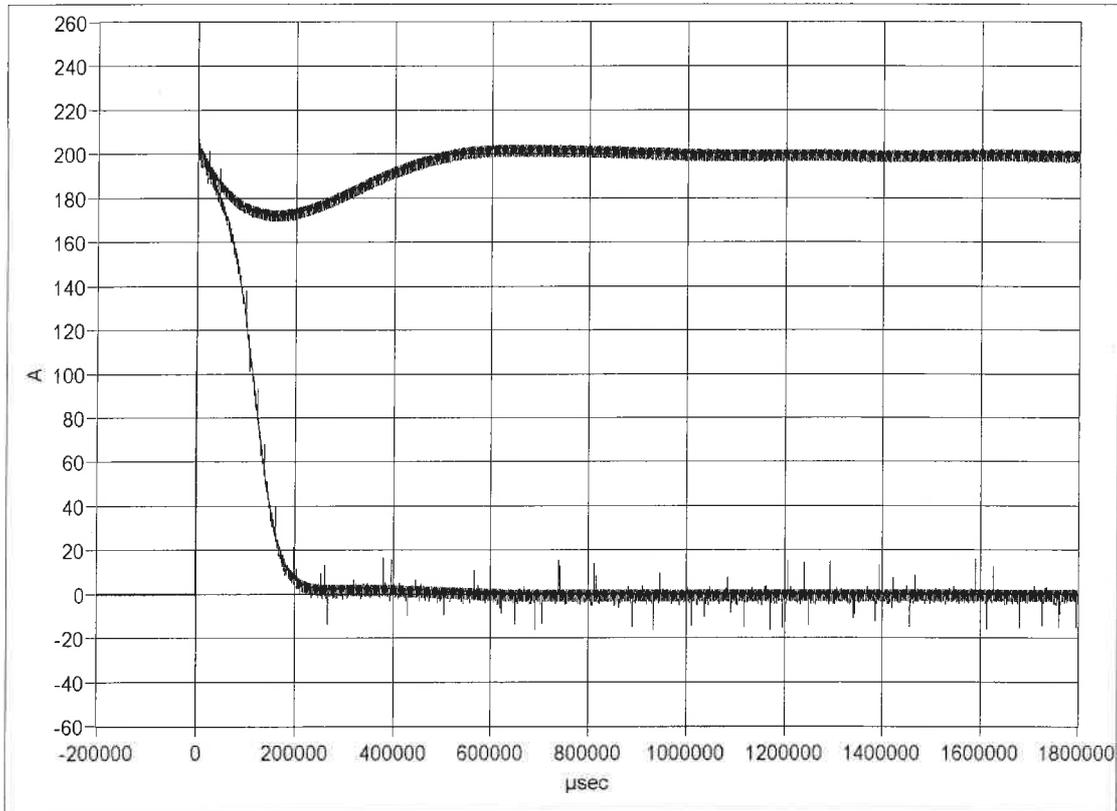


Bild 9.4.3-4 Rechteck-Stromsprung mit langsamer Zeitablenkung
 oberes Signal: Messnormal,
 unteres Signal: Stromwandler L 143128, 200-A-Schaltung

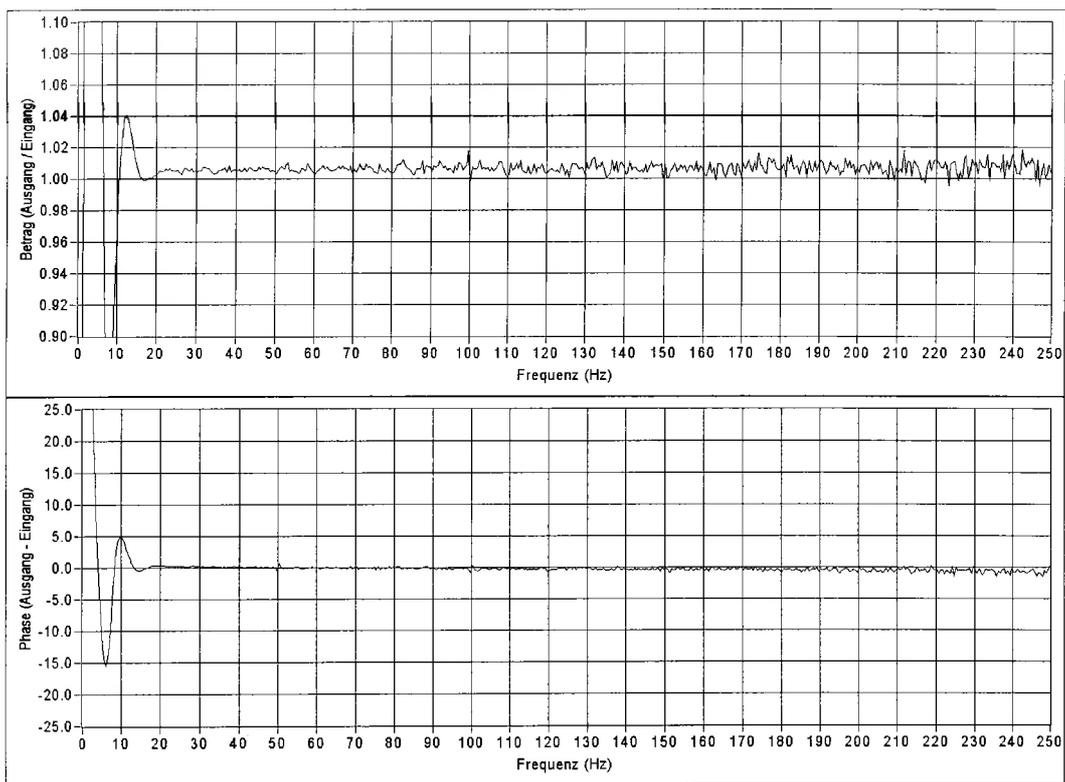


Bild 9.4.3-5 Übertragungsfunktion des Stromwandlers L 143128, 200-A-Schaltung,
 Bereich niedriger Frequenzen

9.4.4 Messungen bei 400-A-Schaltung des Stromwandlers L143128

Hersteller: Ritz
Typ: GSW 30
Nennstrom: 400 A, $I_{th} = 40 \text{ kA}$
Bürde: 1Ω
Übersetzung: 400 A / V

400 A Stromsprung

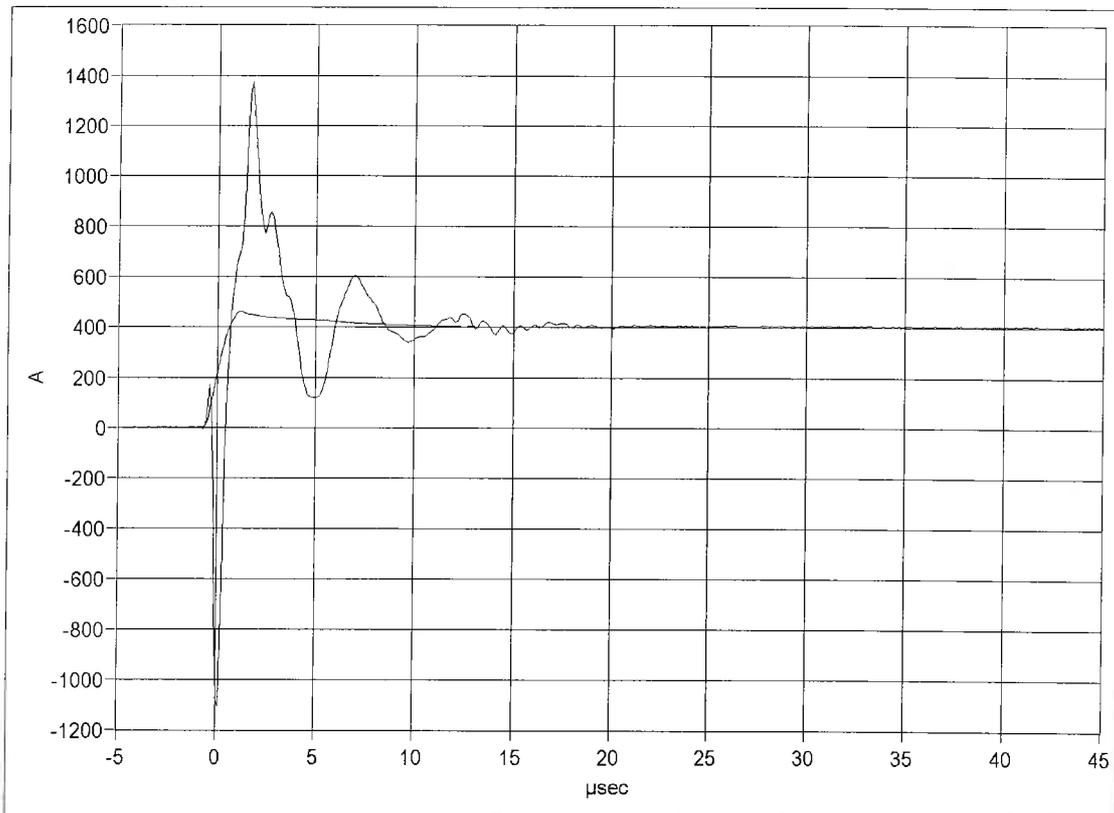


Bild 9.4.4-1 Anstieg des Rechteck-Stromsprungs
Signal ohne Schwingungen: Messnormal
Signal mit Schwingungen: Stromwandler L 143128, 400-A-Schaltung

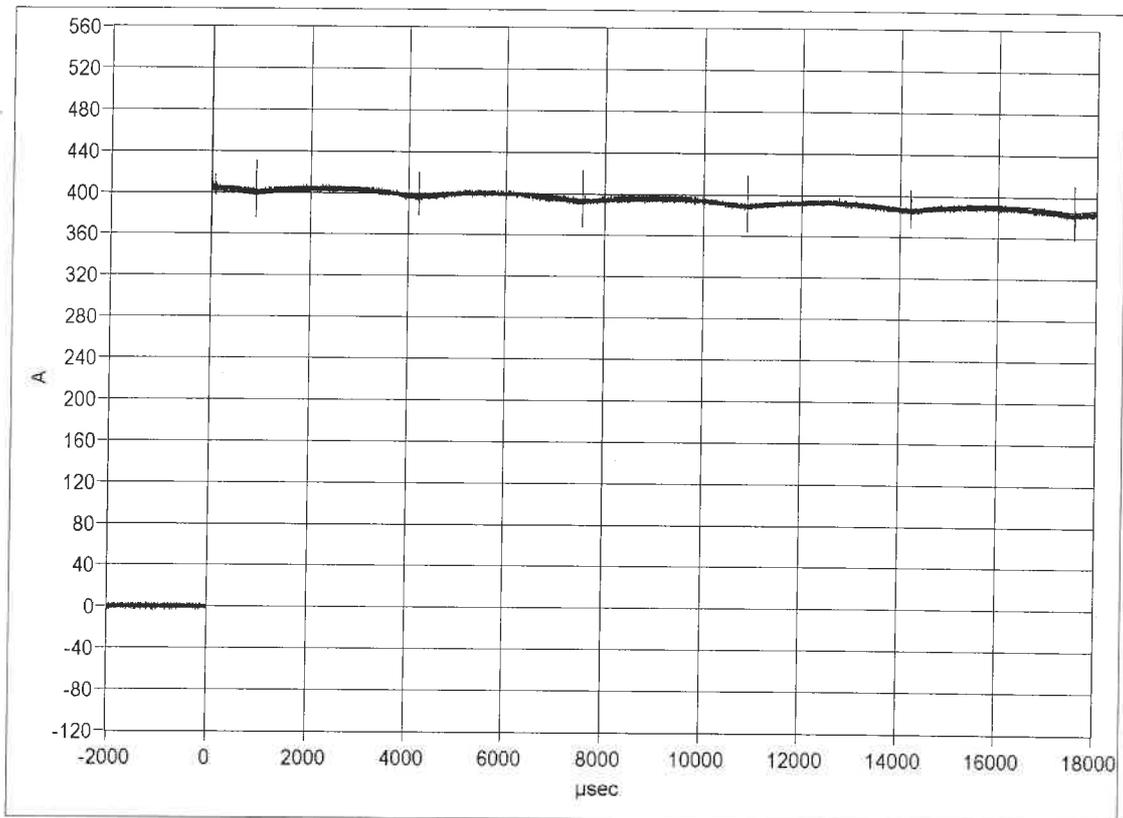


Bild 9.4.4-2 Rechteck-Stromsprung mit schneller Zeitablenkung
 feines Signal: Messnormal,
 breites Signal: Stromwandler L 143128, 400-A-Schaltung

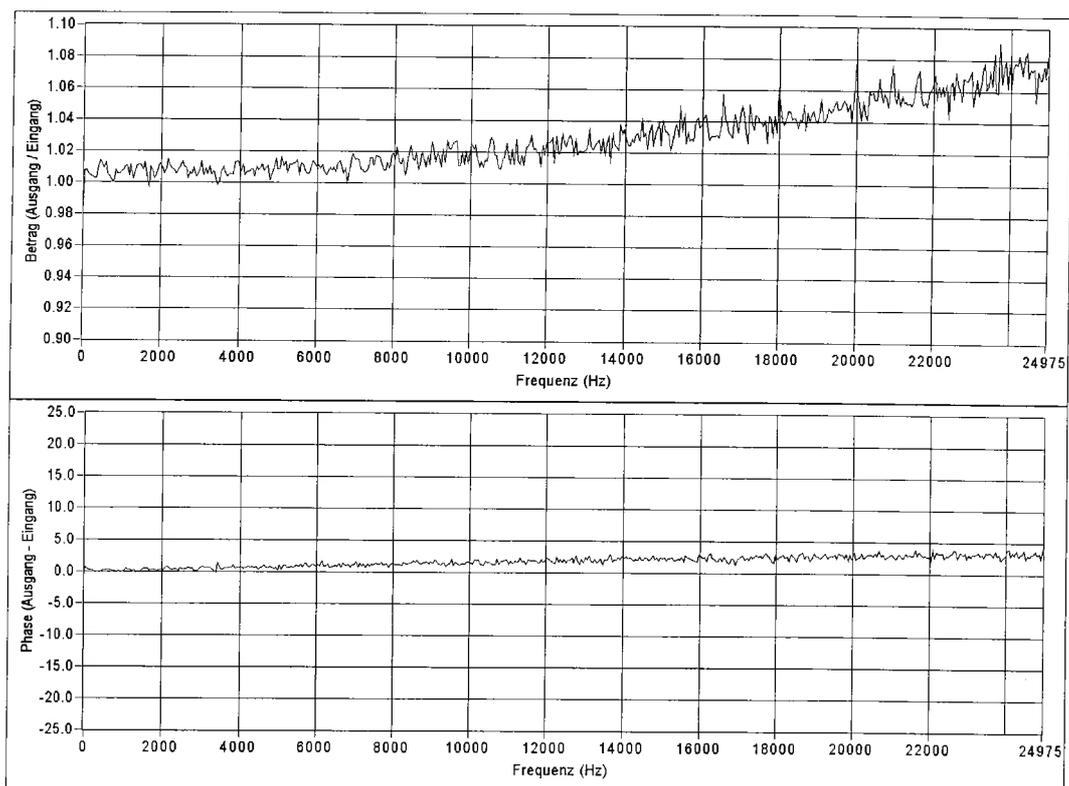


Bild 9.4.4-3 Übertragungsfunktion des Stromwandlers L 143128, 400-A-Schaltung,
 Bereich höherer Frequenzen

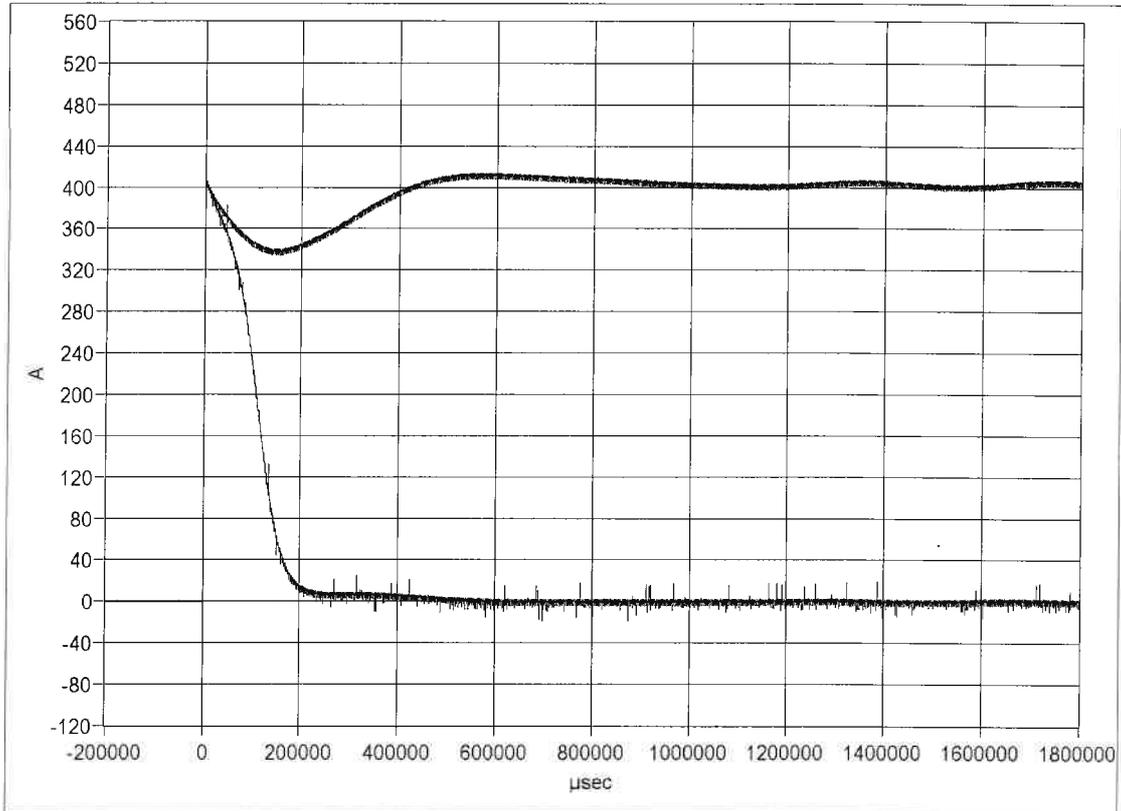


Bild 9.4.4-4 Rechteck-Stromsprung mit langsamer Zeitablenkung
 oberes Signal: Messnormal,
 unteres Signal: Stromwandler L 143128, 400-A-Schaltung

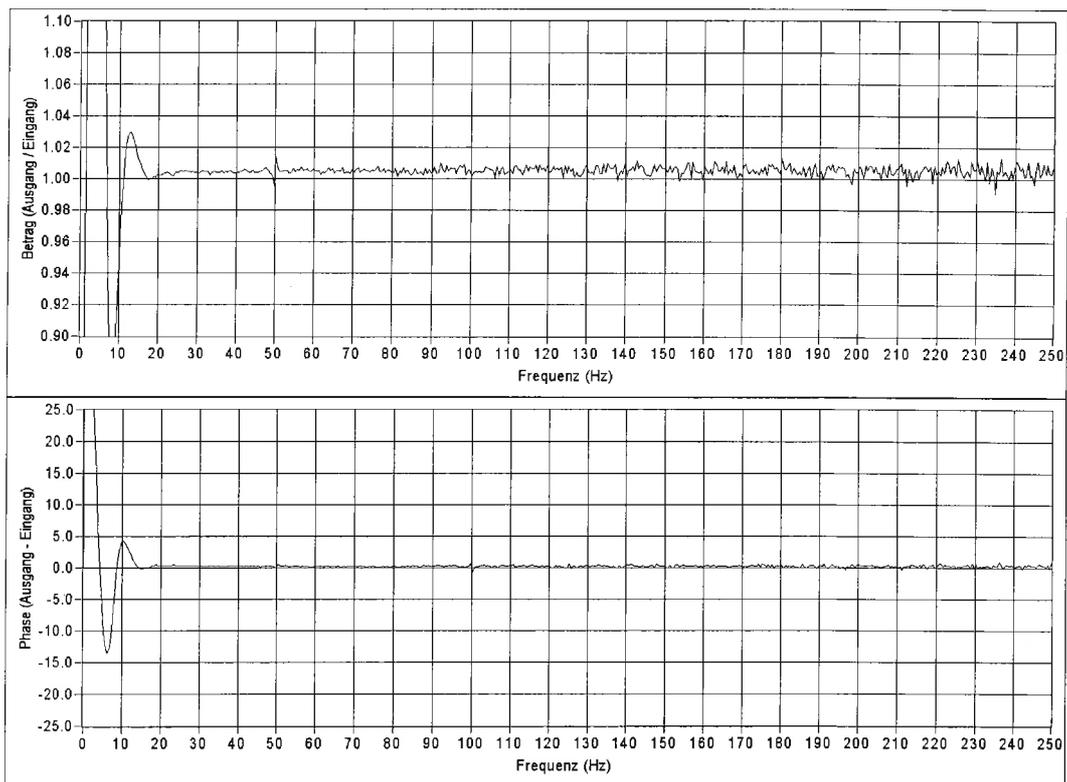


Bild 9.4.4-5 Übertragungsfunktion des Stromwandlers L 143128, 400-A-Schaltung,
 Bereich niedriger Frequenzen

9.5 Messungen am Rogowski-Stromwandler L143617

9.5.1 Messungen am Rogowski-Stromwandler L143617 bei normaler Anstiegszeit

Hersteller: AEG
Typ: SZ 30
Nennstrom: keine Angabe
Übersetzung: 1646,195 kA / Vs

200 A Stromsprung

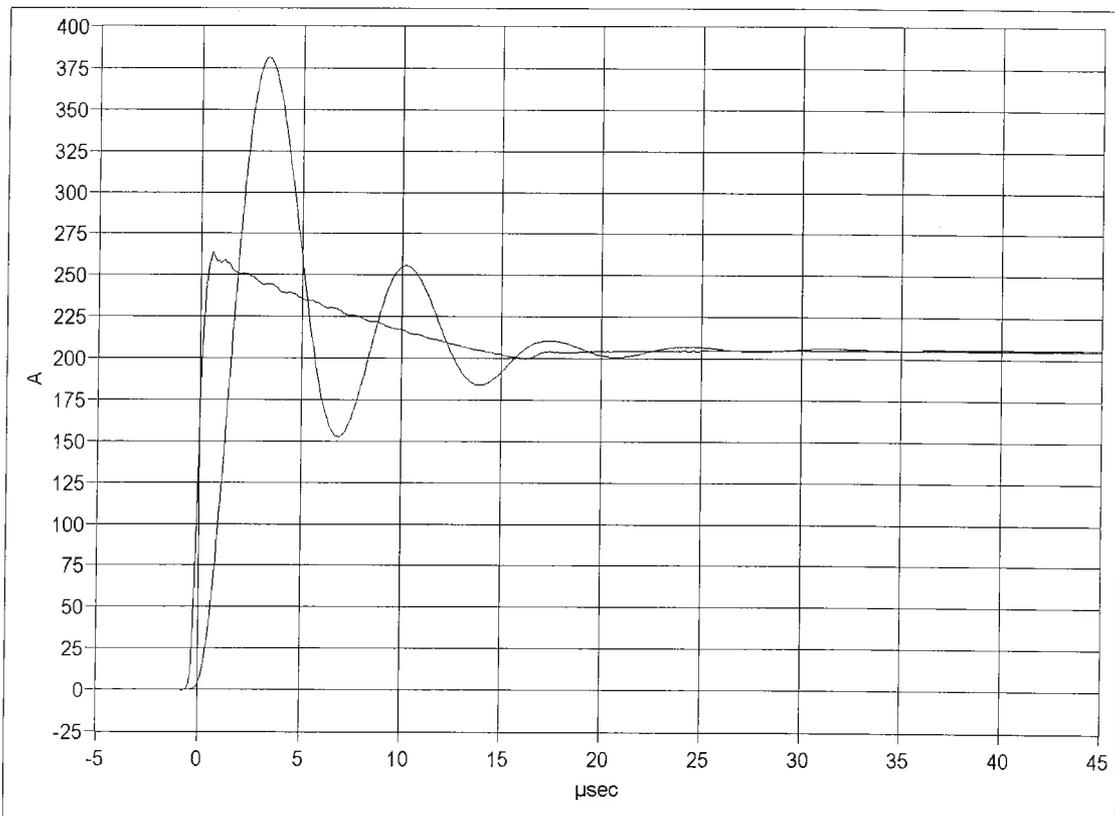


Bild 9.5.1-1 Anstieg des Rechteck-Stromsprungs
Signal ohne Schwingungen: Messnormal
Signal mit Schwingungen: Rogowski-Stromwandler L 143617

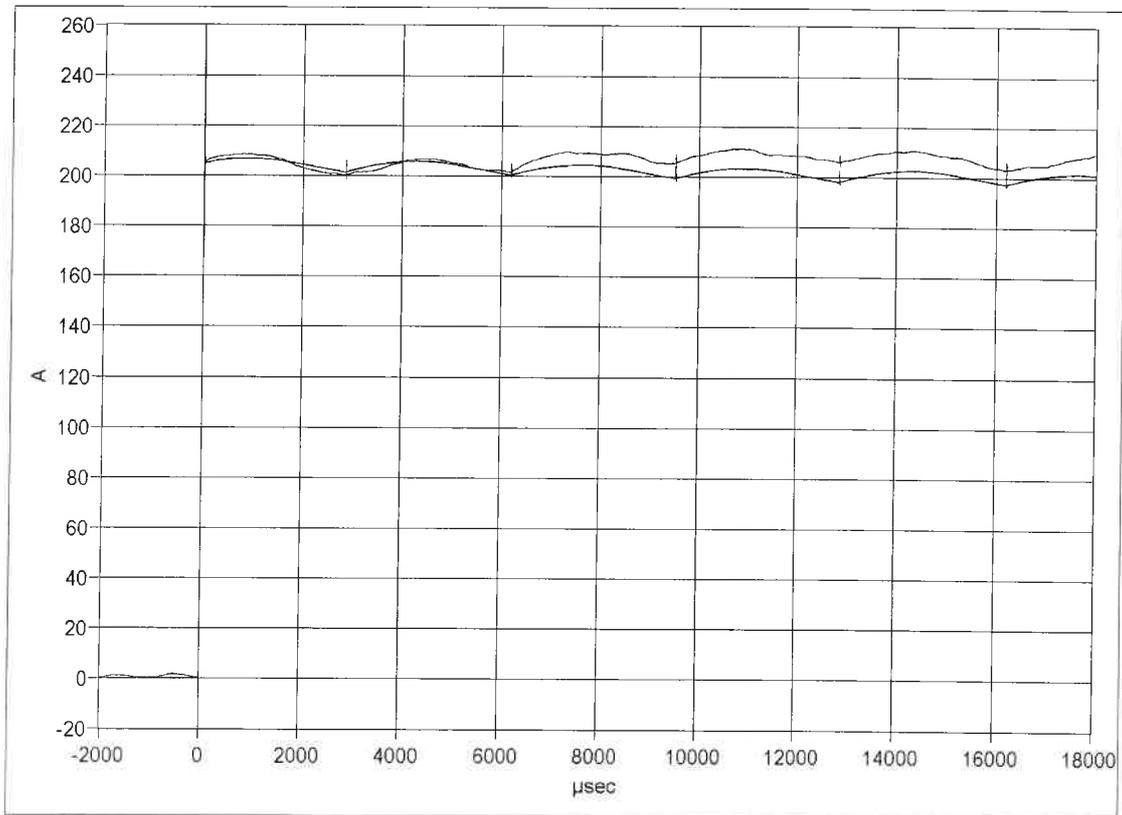


Bild 9.5.1-2 Rechteck-Stromsprung mit schneller Zeitablenkung
 unteres Signal: Messnormal,
 oberes Signal: Rogowski-Stromwandler L 143617

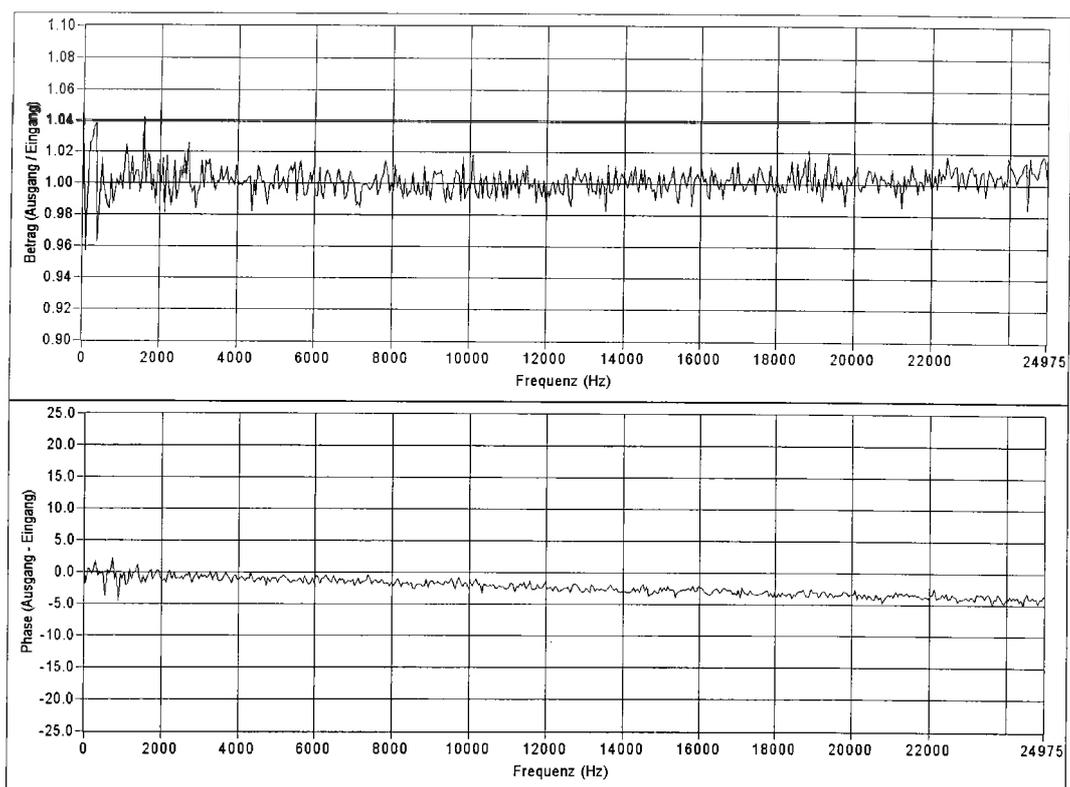


Bild 9.5.1-3 Übertragungsfunktion des Rogowski-Stromwandlers L 143617,
 Bereich höherer Frequenzen

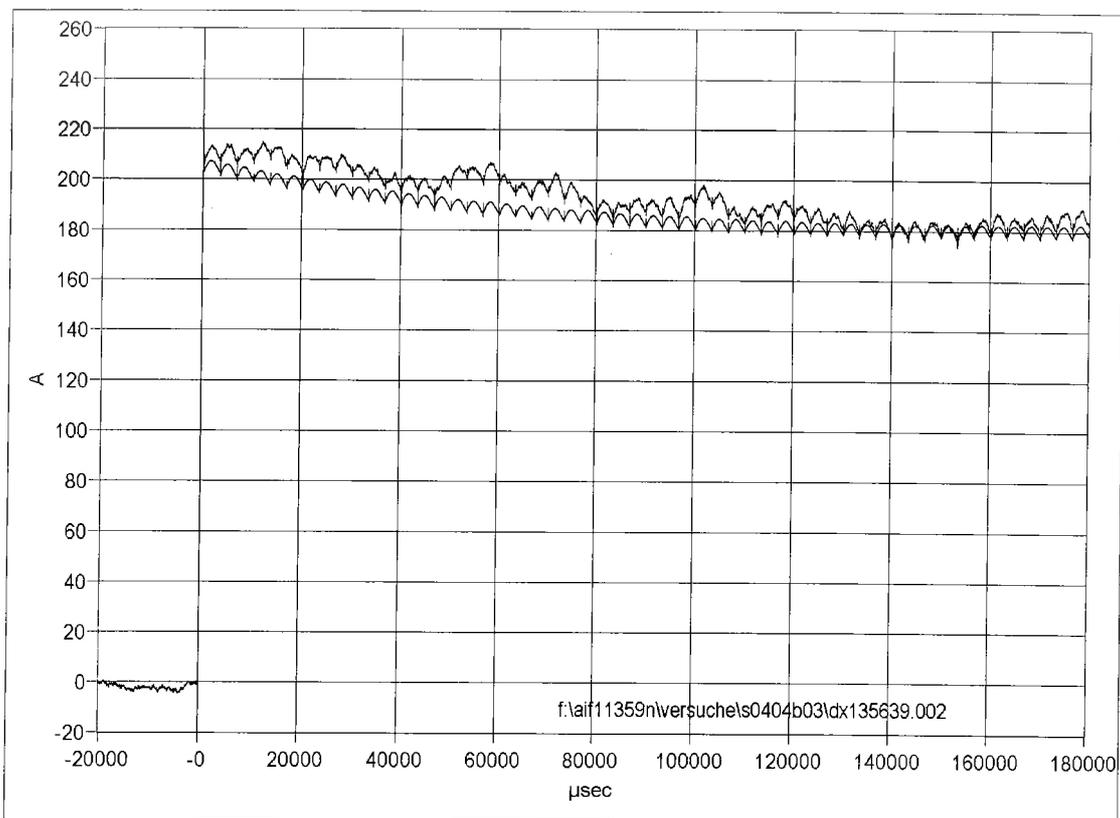


Bild 9.5.1-4 Rechteck-Stromsprung mit langsamer Zeitableitung
 unteres Signal: Messnormal,
 oberes Signal: Rogowski-Stromwandler L 143617

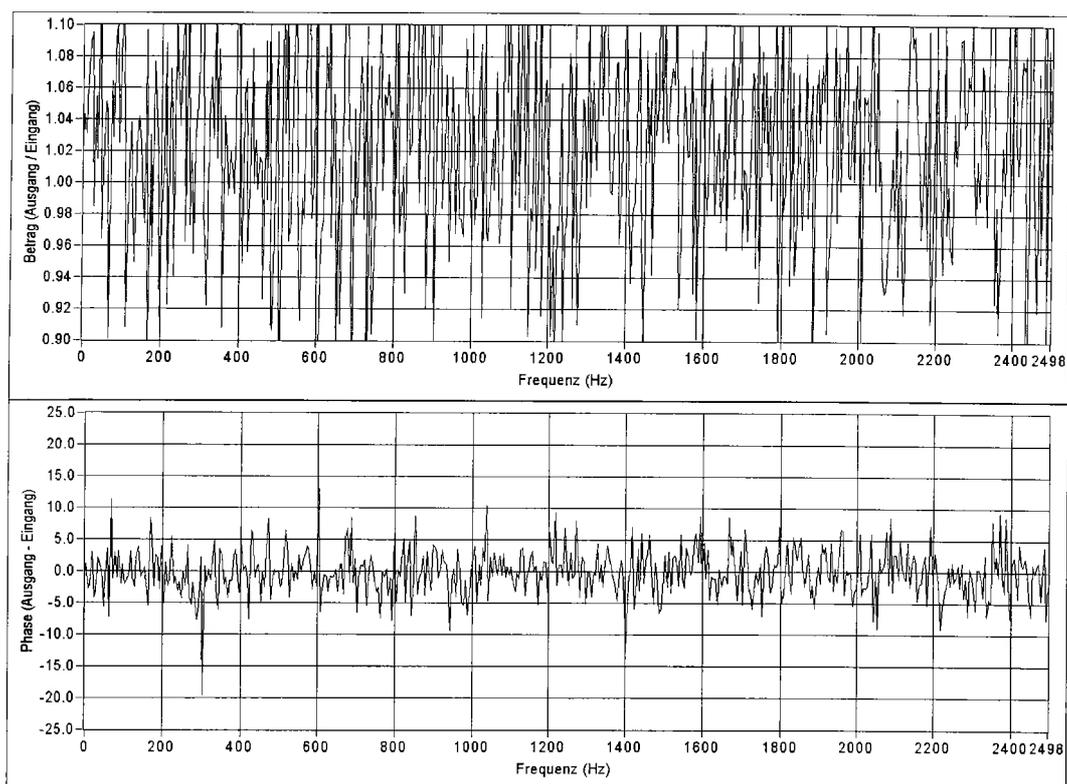


Bild 9.5.1-5 Übertragungsfunktion des Rogowski-Stromwandlers L 143617,
 Bereich niedriger Frequenzen

9.5.2 Messungen am Rogowski-Stromwandler L143617 bei langer Anstiegszeit

Hersteller: AEG
Typ: SZ 30
Nennstrom: keine Angabe
Übersetzung: 1646,195 kA / Vs

200 A Stromsprung

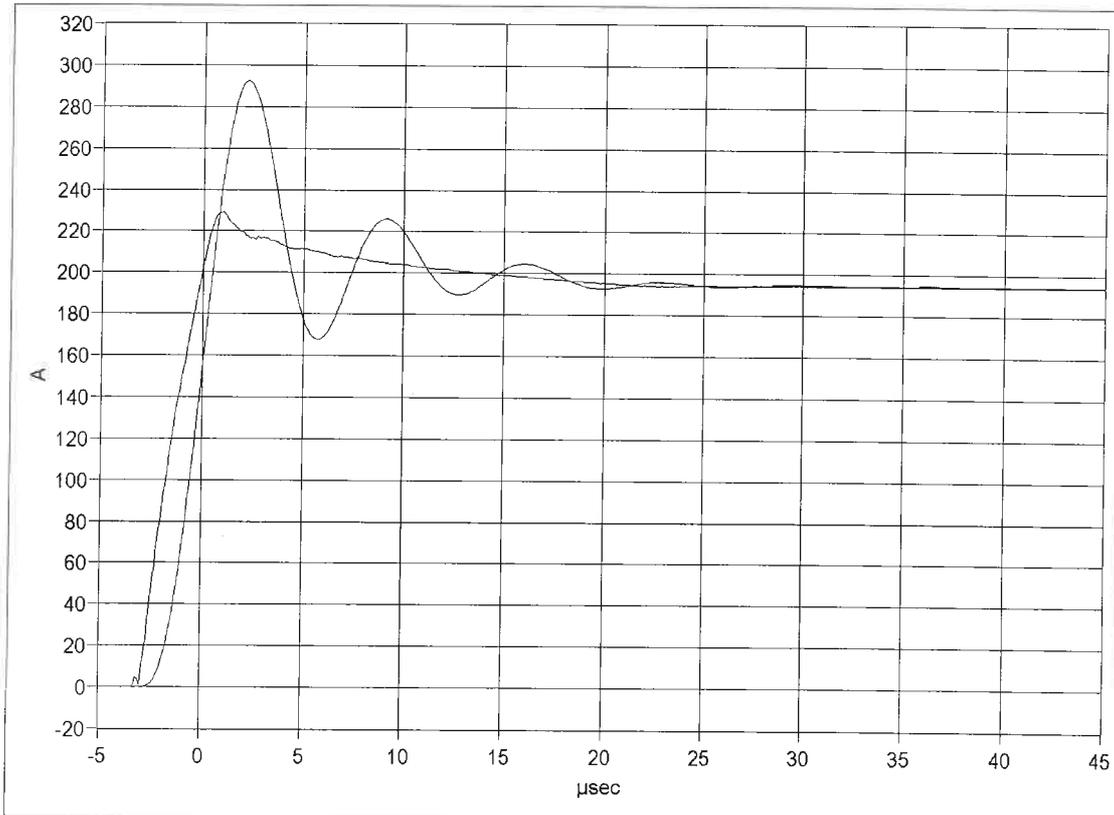


Bild 9.5.2-1: Anstieg des Rechteck-Stromsprungs mit verlängerter Anstiegszeit
Signal ohne Schwingungen: Messnormal
Signal mit Schwingungen: Rogowski-Stromwandler L 143617

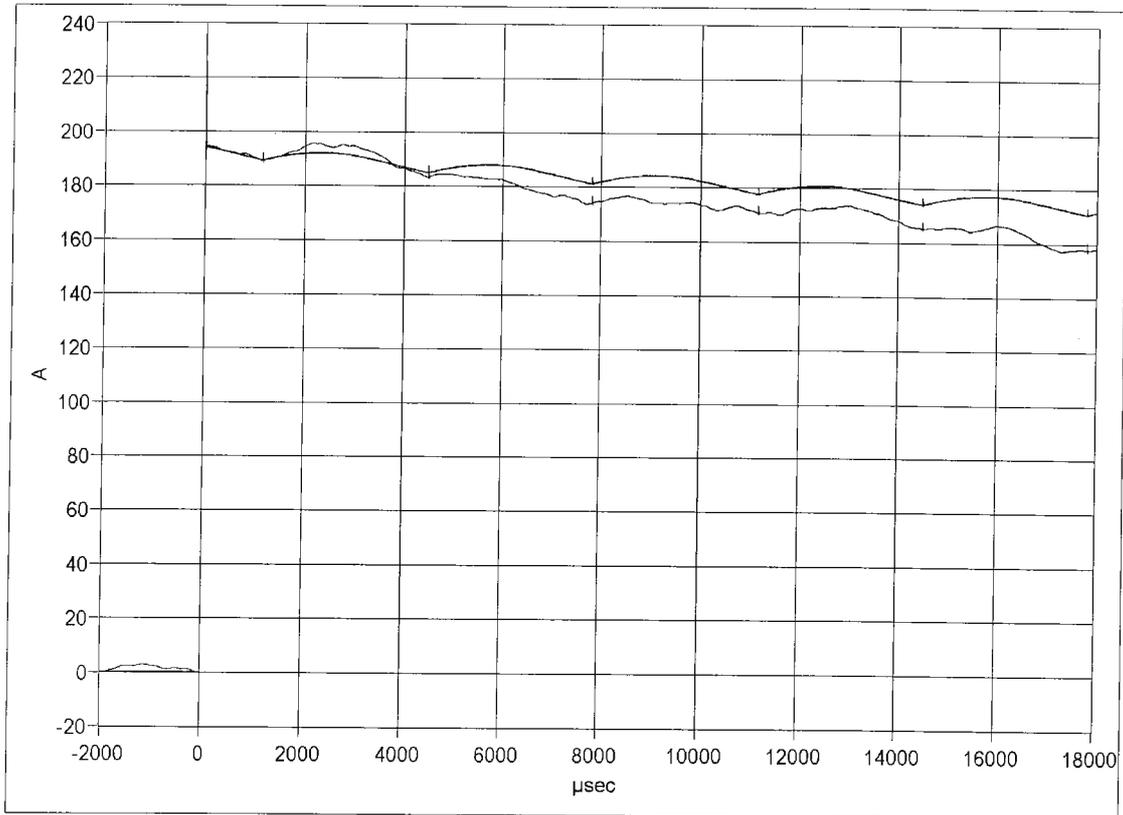


Bild 9.5.2-2 Stromsprung mit verlängerter Anstiegszeit und schneller Zeitablenkung
 oberes Signal: Messnormal,
 unteres Signal: Rogowski-Stromwandler L 143617

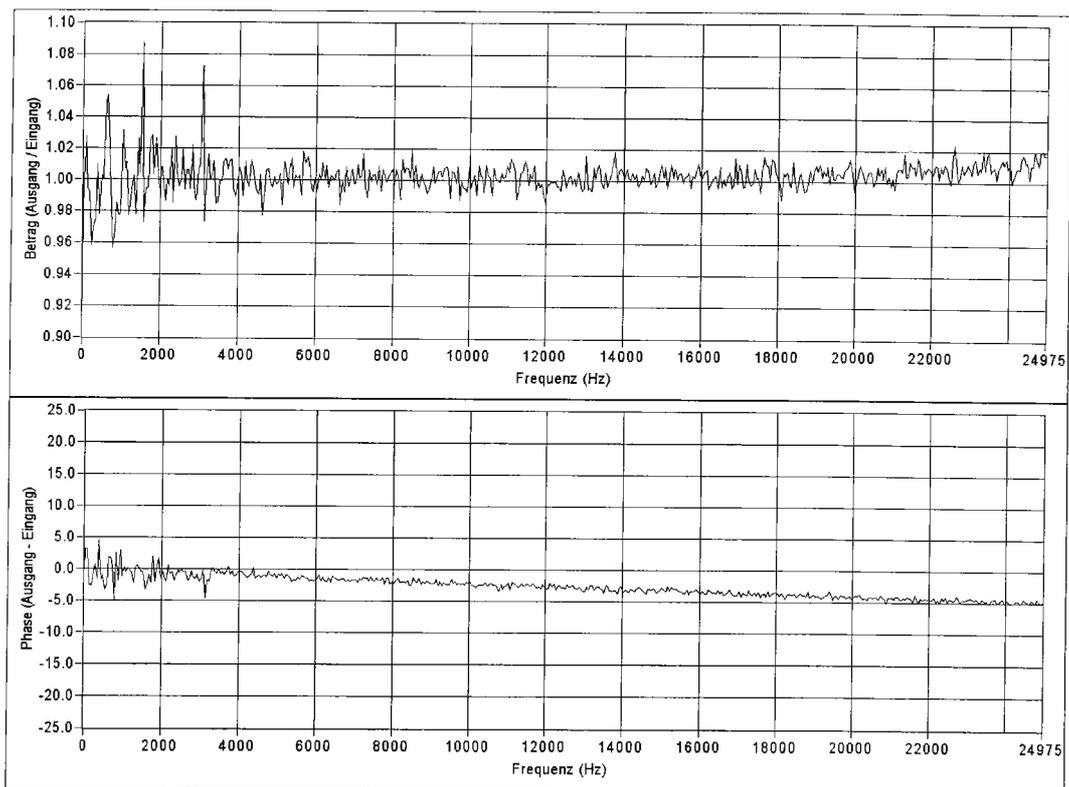


Bild 9.5.2-3 Übertragungsfunktion des Rogowski-Stromwandlers L 143617
 bei verlängerter Anstiegszeit, Bereich höherer Frequenzen

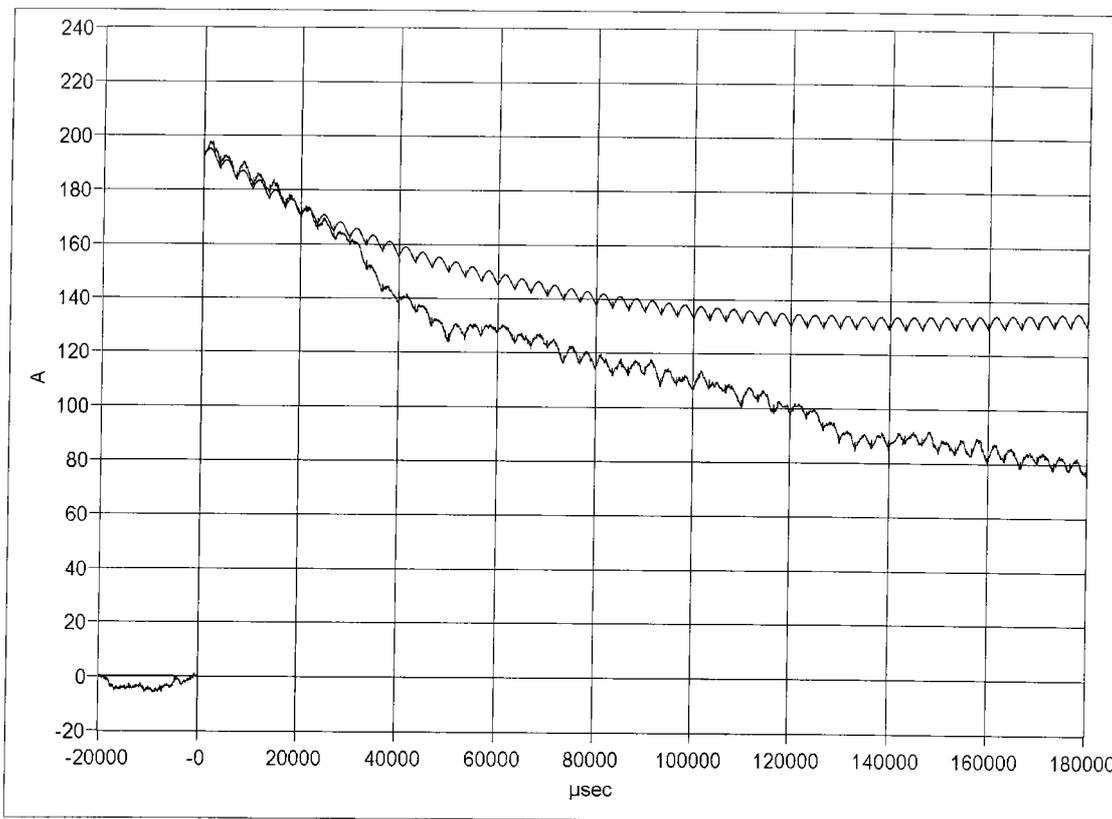


Bild 9.5.2-4 Stromsprung mit verlängerter Anstiegszeit und langsamer Zeitablenkung
 oberes Signal: Messnormal,
 unteres Signal: Rogowski-Stromwandler L 143617

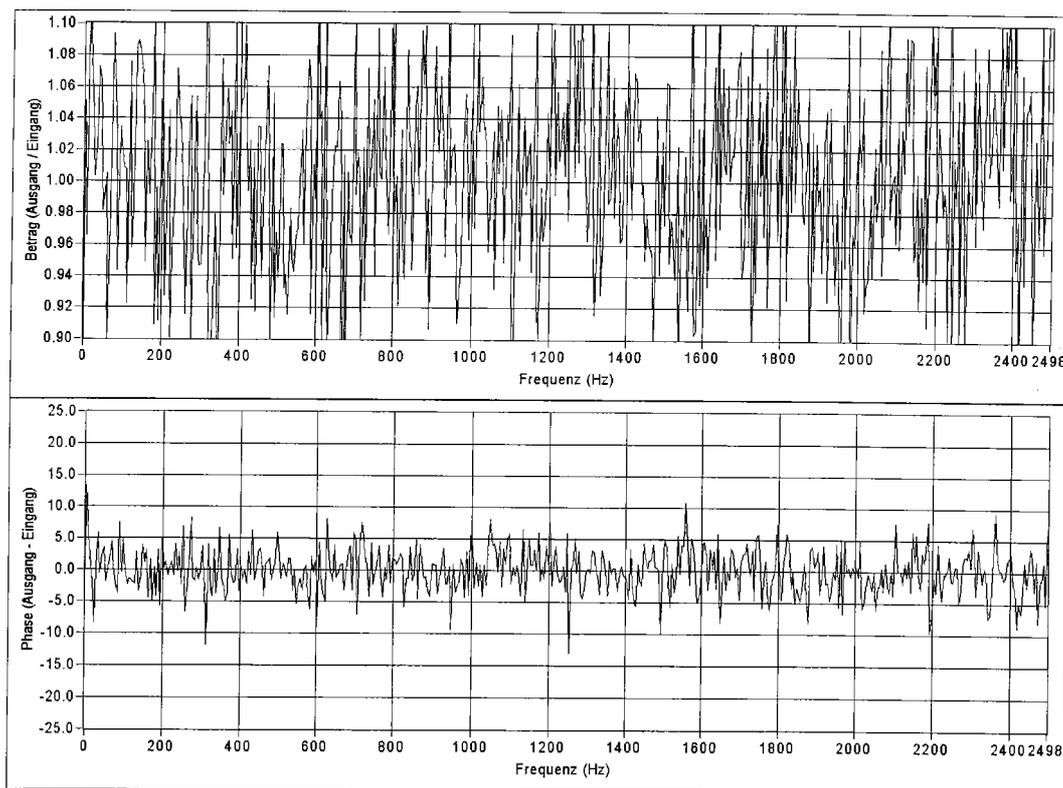


Bild 9.5.2-5 Übertragungsfunktion des Rogowski-Stromwandlers L 143617
 bei verlängerter Anstiegszeit, Bereich niedriger Frequenzen

9.6 Messungen am Rogowski-Stromwandler L143624

9.6.1 Messungen am Rogowski-Stromwandler L143624 bei normaler Anstiegszeit

Hersteller: Habemus
Typ: Rocoil 500N
Nennstrom: keine Angabe
Übersetzung: 4146.902 kA / Vs

200 A Stromsprung

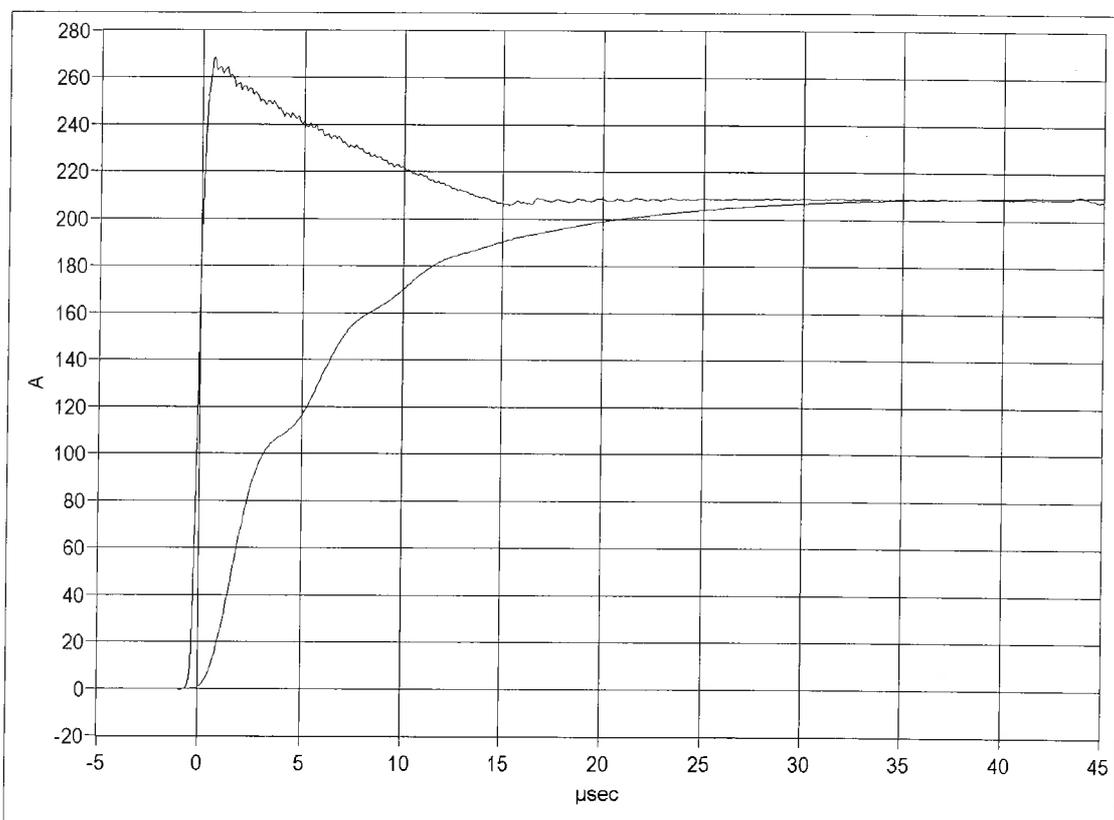


Bild 9.6.1-1 Anstieg des Rechteck-Stromsprungs
schnelles Signal: Messnormal
langsame Signal: Rogowski-Stromwandler L 143624

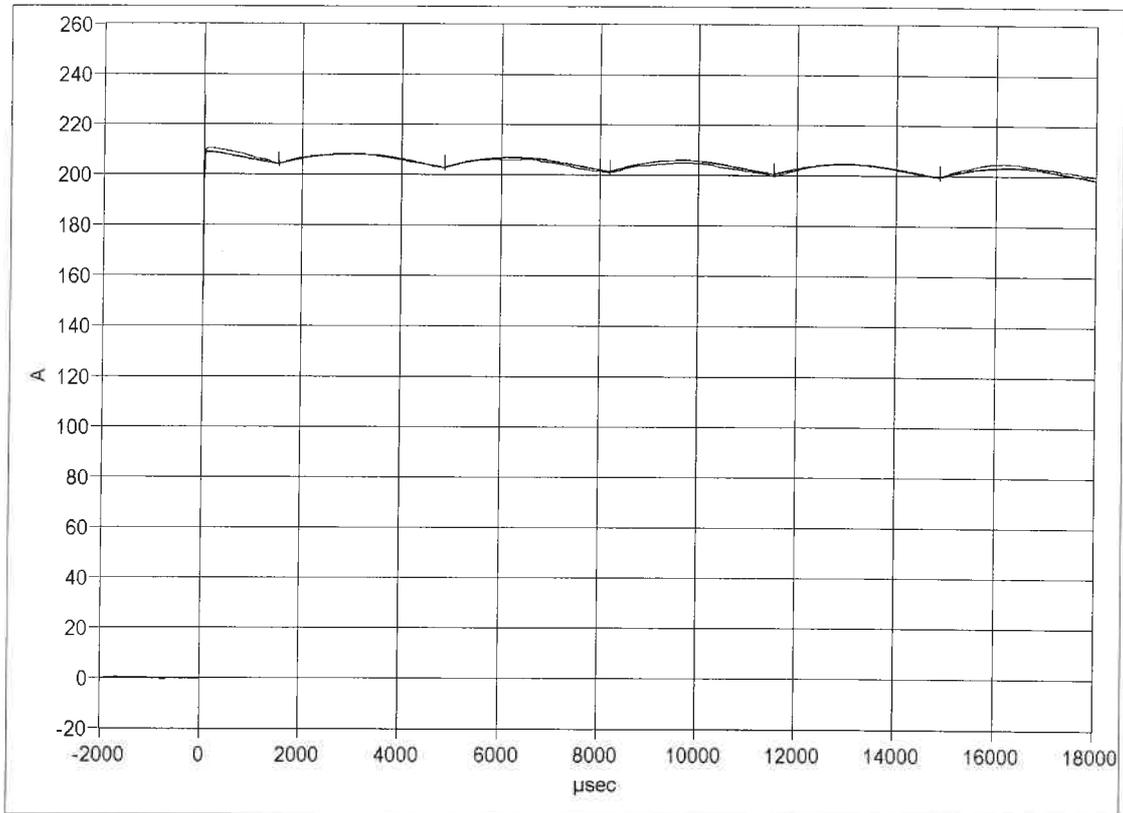


Bild 9.6.1-2 Rechteck-Stromsprung mit schneller Zeitablenkung
 oberes Signal: Messnormal,
 unteres Signal: Rogowski-Stromwandler L 143624

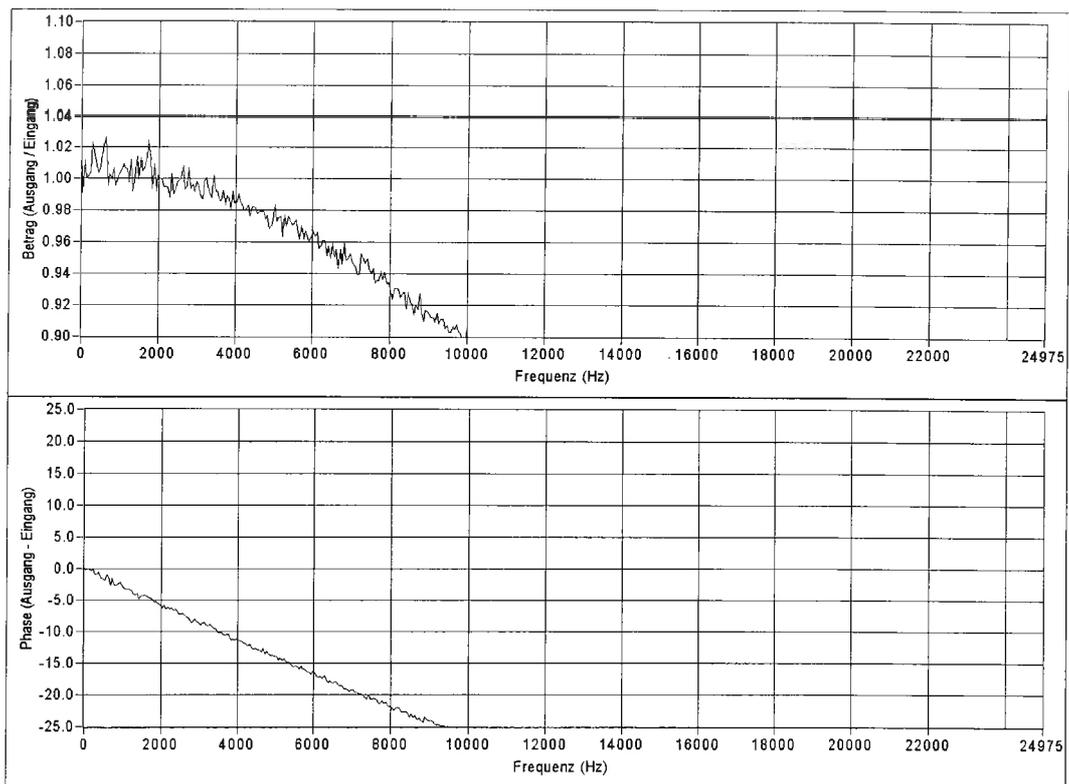


Bild 9.6.1-3 Übertragungsfunktion des Rogowski-Stromwandlers L 143624,
 Bereich höherer Frequenzen

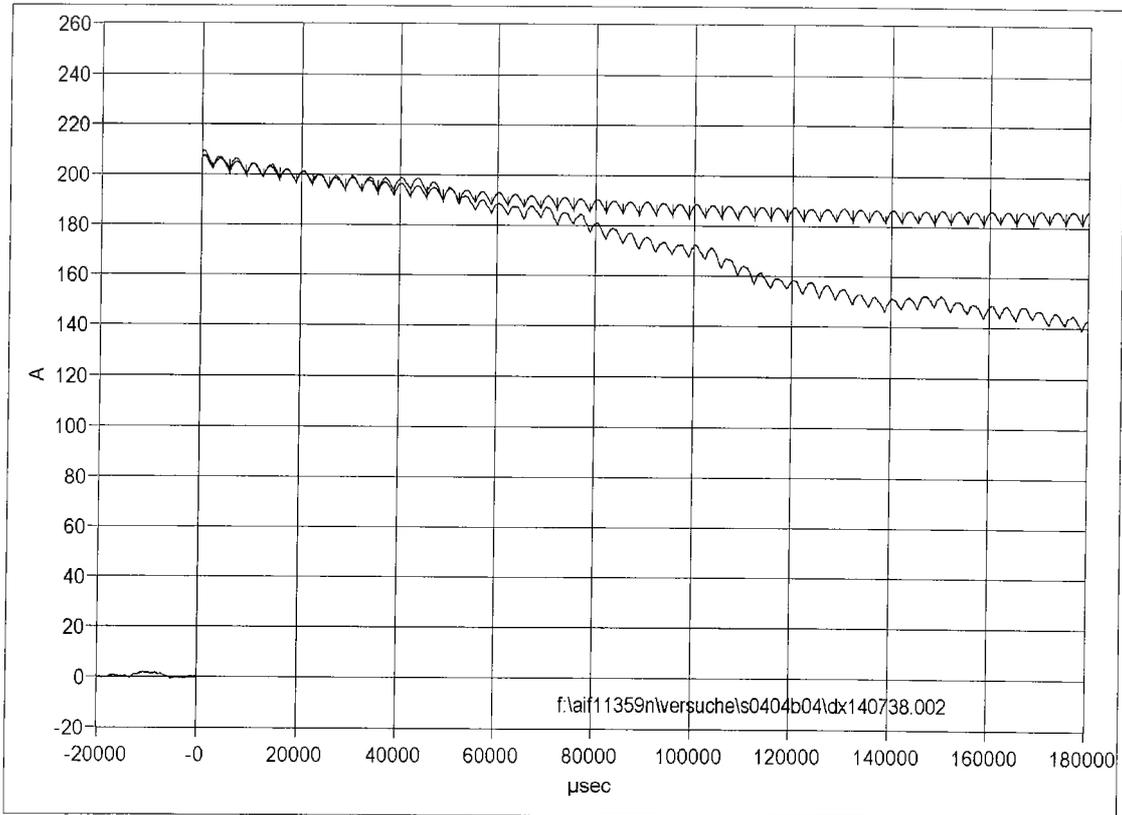


Bild 9.6.1-4 Rechteck-Stromsprung mit schneller Zeitablenkung
 oberes Signal: Messnormal,
 unteres Signal: Rogowski-Stromwandler L 143624

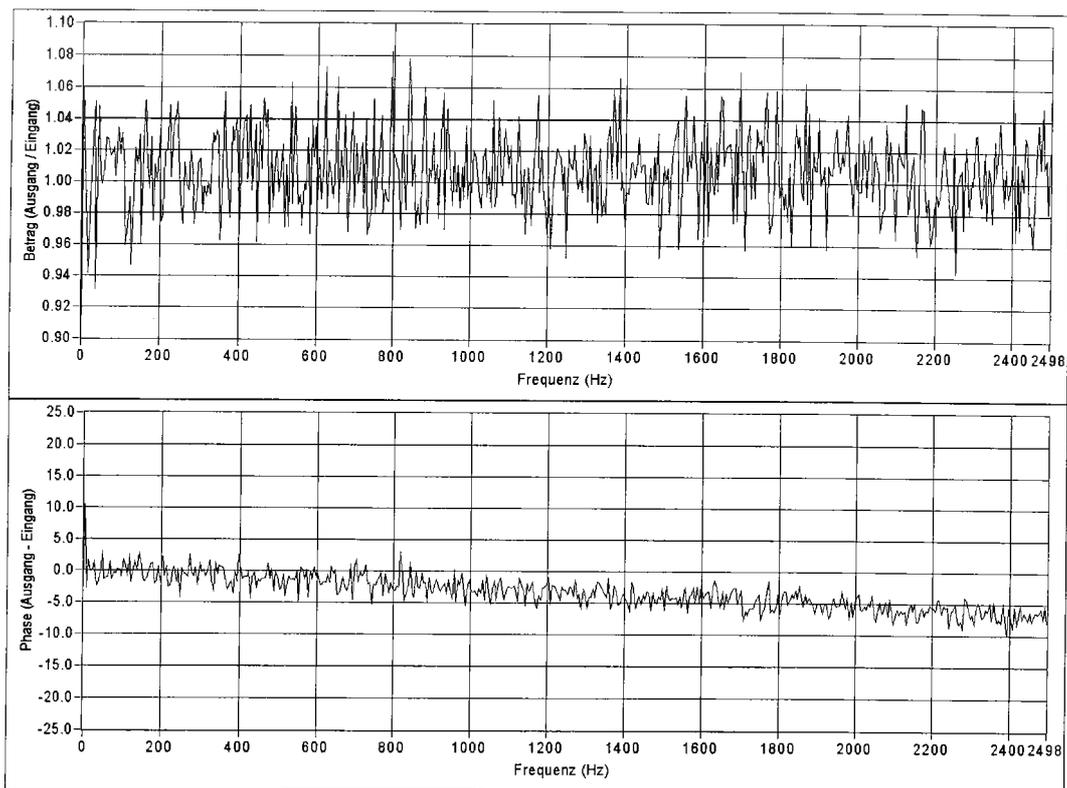


Bild 9.6.1-5 Übertragungsfunktion des Rogowski-Stromwandlers L 143624,
 Bereich niedriger Frequenzen

9.6.2 Messungen am Rogowski-Stromwandler L143624 bei langer Anstiegszeit

Hersteller: Habemus
Typ. Rocoil 500N
Nennstrom: keine Angabe
Übersetzung: 4146.902 kA / Vs

200 A Stromsprung

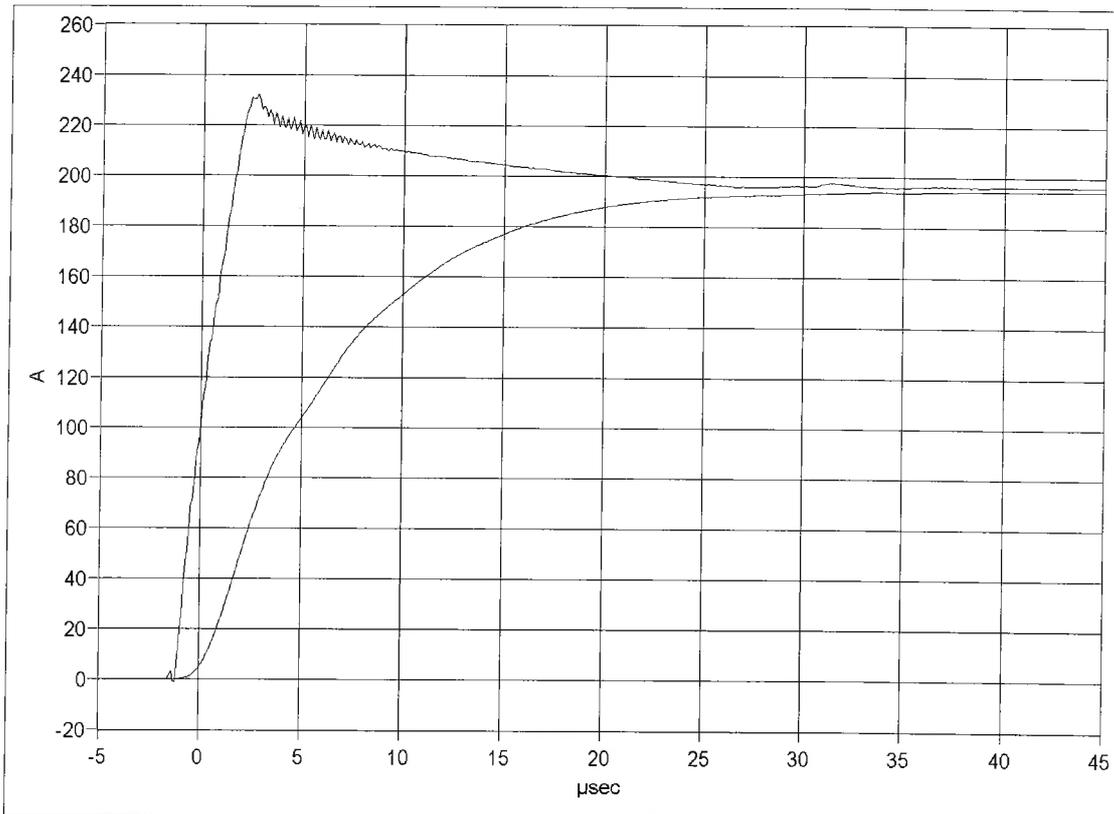


Bild 9.6.2-1 Anstieg des Rechteck-Stromsprungs mit verlängerter Anstiegszeit
schnelles Signal: Messnormal
langsameres Signal: Rogowski-Stromwandler L 143624

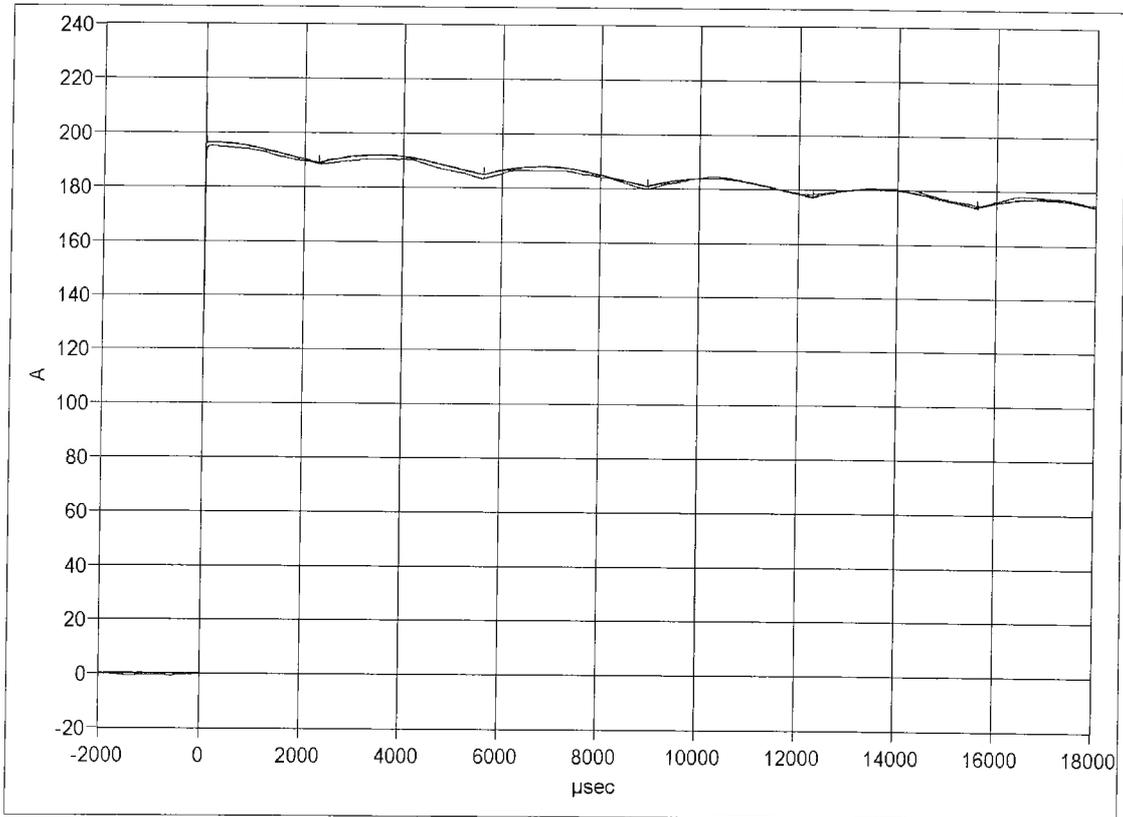


Bild 9.6.2-2 Rechteck-Stromsprung verlängerter Anstiegszeit und schneller Zeitablenkung
 oberes Signal: Messnormal,
 unteres Signal: Rogowski-Stromwandler L 143624

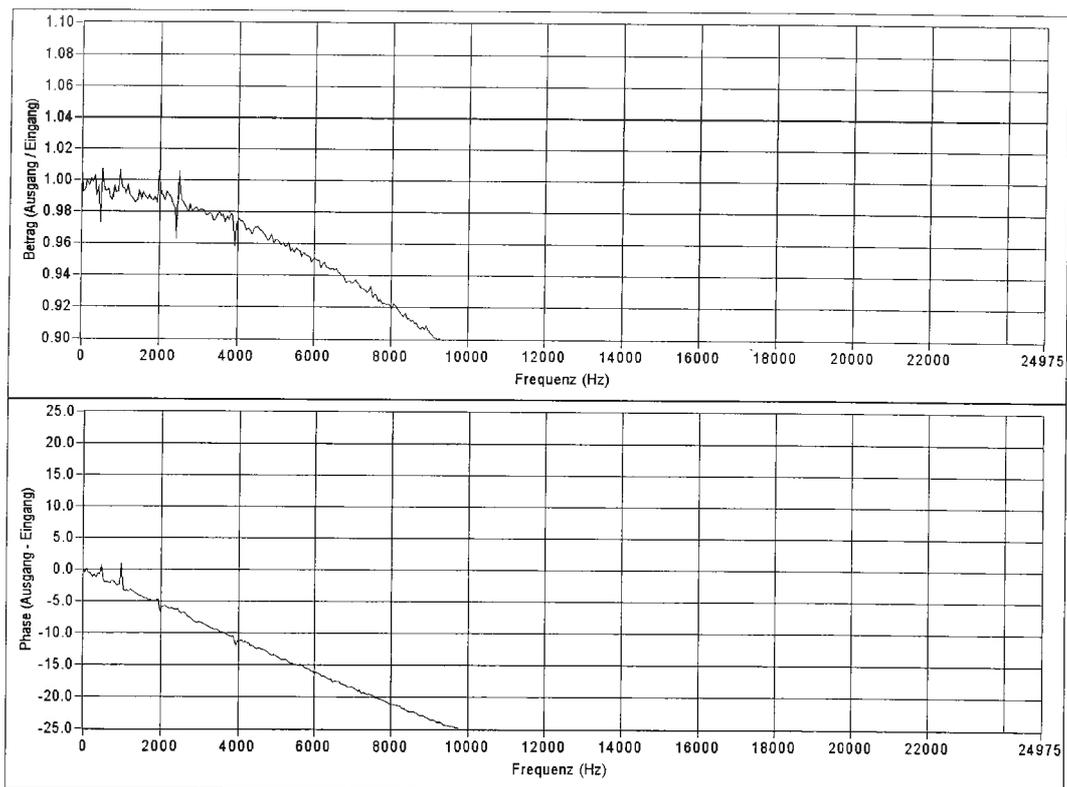


Bild 9.6.2-3 Übertragungsfunktion des Rogowski-Stromwandlers L 143624
 bei verlängerter Anstiegszeit, Bereich höherer Frequenzen

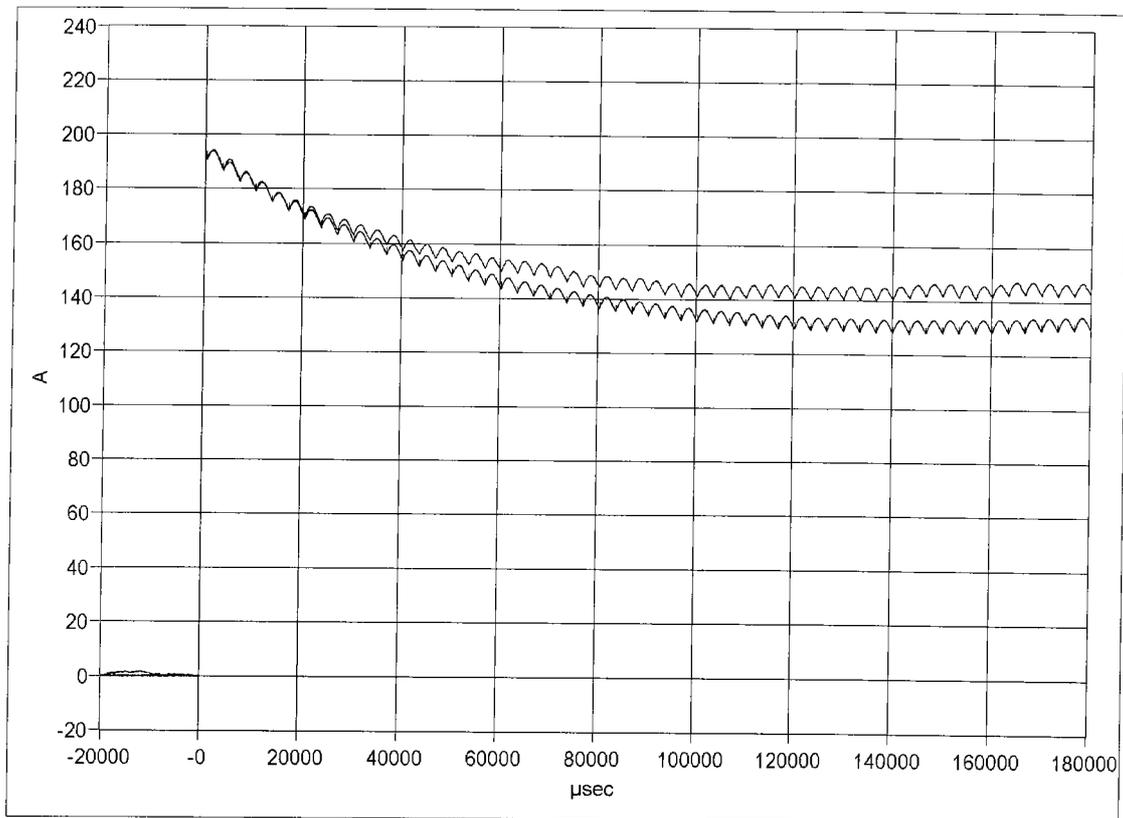


Bild 9.6.2-4 Stromsprung verlängerter Anstiegszeit und langsamer Zeitablenkung
 unteres Signal: Messnormal,
 oberes Signal: Rogowski-Stromwandler L 143624

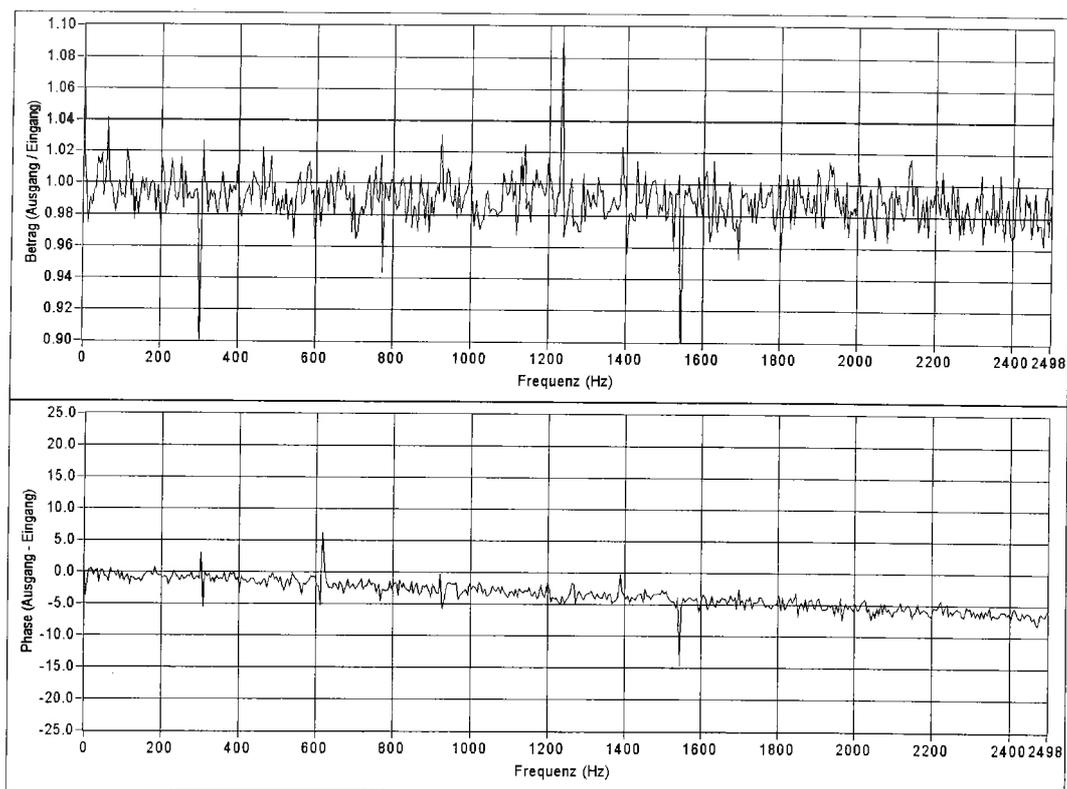


Bild 9.6.2-5 Übertragungsfunktion des Rogowski-Stromwandlers L 143624 bei verlängerter Anstiegszeit, Bereich niedriger Frequenzen