

Forschungsinstitut der Forschungsgemeinschaft für  
Hochspannungs- und Hochstromtechnik e.V.

Name der Forschungsstelle(n)

11358N / III

AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.01.1998 bis 31.12.1998

Bewilligungszeitraum

**Schlußbericht für den Zeitraum : 01.01.1998 bis 31.12.1998**

Forschungsthema :

Kalibrierung von Hochspannungsmeßeinrichtungen  
nach der EN 60060-2

Mannheim, 29. April 1999

Ort, Datum



Unterschrift der/des Projektleiter(s)

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b>		<b>Seite</b>
	Zusammenfassung	3
1	Einführung	4
2	Wissenschaftliche Problemstellung	4
3	Zielsetzung	7
4	Mittel und Wege	8
5	Geräte-Einsatz	9
6	Erstellung des als Entladewiderstand benutzten ohmschen Teilers	10
7	Erzeugung der Blitzstoßspannung	13
8	Versuchsaufbau	14
9	Versuchsdurchführung	16
9.1	Durchführung der Hochspannungsversuche	16
9.2	Durchführung der Beeinflussungsmessungen	20
10	Versuchsergebnisse	22
10.1	Niederspannungs-Impuls-Kalibrierung der Meßsysteme	22
10.2	Stabilität der Blitzstoßspannung	24
10.3	Einfluß des parallelgeschalteten zweiten Teilers	26
10.4	Einfluß der Zuleitungslänge	30
10.5	Maßstabsfaktoren der Hochspannungs-Kalibrierung	36
10.6	Beeinflussungsmessungen	39
11	Empfehlungen	42
	Förderhinweis	42
	Schrifttum	42
	Veröffentlichungen	42

## Zusammenfassung

Im Rahmen eines von der AiF geförderten Forschungsprojektes wurden bei der FGH grundsätzliche Einflußfaktoren untersucht, die sich auf das Ergebnis einer Kalibrierung von Hochspannungsteilern mit Blitzstoßspannung nach der in der EN 60060-2 bevorzugten Referenzmethode auswirken können.

Diese Untersuchung ist wichtig hinsichtlich der Rückführbarkeit von Meßsystemen auf das nationale Meßnormal der PTB nach der für Qualitätsmanagementsysteme geltenden Europanorm EN 29000 Serie. Mit aufsteigender Position in der Kalibrier-Hierarchie werden die höchstzulässigen Meßunsicherheiten immer kleiner und die Anforderungen an die verwendeten Meßsysteme immer größer. Selbst bei der Benutzung eines geeigneten Meßsystemes bietet der verwendete Versuchsaufbau noch genügend Freiheiten, um das Ergebnis einer Kalibrierung positiv oder negativ beeinflussen zu können.

Die Einflußparameter, die in dieser Untersuchung betrachtet wurden, sind:

- Einfluß des Typs des zu kalibrierenden Teilers, gedämpft-kapazitiv oder ohmsch.
- Einfluß der Länge der Zuleitung von der Spannungserzeugung zum gemeinsamen Anschlußpunkt der bei der Kalibrierung verwendeten Teiler.
- Einfluß des Winkels zwischen den individuellen Zuleitungen vom gemeinsamen Anschlußpunkt zu den Teilern.
- Einfluß der Erdung der Schirme der Meßkabel zwischen den Teilern und den Meßsystemen.

Die Untersuchungen führten zu folgenden Ergebnissen:

- Der Typ des zu kalibrierenden Teilers beeinflusst die Kalibrierung nicht.
- Bei sorgfältigem Versuchsaufbau hat die Länge der Zuleitung keinen wesentlichen Einfluß auf die Meßergebnisse.
- Bei sorgfältigem Versuchsaufbau hat der Winkel zwischen den Zuleitungen zu den Teilern keinen wesentlichen Einfluß auf die Meßergebnisse.
- Für einen sorgfältigen Versuchsaufbau ist insbesondere bei großen Teilern wegen des Einflusses des Proximity-Effektes besonders auf ausreichende Abstände der Teiler zu geerdeten und spannungsführenden Teilen zu achten.
- Der Erdung der Meßkabelschirme ist besondere Aufmerksamkeit zu schenken, wobei eine zusätzliche Erdung der Schirme am Erdungssystem des Labors mittels einer Ausgleichsplatte vor dem Anschluß an die Meßsysteme dem direkten Anschluß der Meßkabel am Meßsystem vorzuziehen ist.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

## 1 Einführung

Die für Qualitätsmanagementsysteme geltende Europanorm EN 29000 Serie – identisch mit der weltweit geltenden ISO 9000 – schreibt für alle in der Qualitätssicherung verwendeten Meßeinrichtungen die Rückführung auf nationale Meßnormale vor, sofern solche Normale vorhanden sind. Hierfür sind die Verfahren und Anforderungen anzuwenden, die in weltweit oder im europäischen Bereich gültigen Normen festgelegt sind. Für Hochspannungsmeßeinrichtungen ist dies die EN 60060-2 (IEC 60-2) [1], in der sowohl die Anforderungen an die Meßeinrichtungen als auch die bei der Rückführung anzuwendenden Verfahren vorgegeben sind.

Die FGH ist von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) als Kalibrierlabor im Deutschen Kalibrierdienst (DKD) für Hochspannungsmeßeinrichtungen akkreditiert und hat in den vergangenen beiden Jahren eine Anzahl von Kalibrierungen für die deutsche Industrie durchgeführt. Die FGH nahm ebenfalls an zwei international durchgeführten Vergleichsversuchen teil, an denen mehrere europäische Labors beteiligt waren.

Die Erfahrungen mit den Kalibrierungen in den Prüffeldern der Industrie haben gezeigt, daß die Kalibrierung der Meßeinrichtungen für Gleich- oder Wechselspannung ohne wesentliche Schwierigkeiten durchgeführt werden kann. Für diese Spannungsformen ist die Rückführbarkeit auf das nationale Meßnormal der PTB ohne weiteres möglich. Für die Stoßspannungen und hier insbesondere für die Blitzstoßspannungen wurden jedoch Probleme aufgedeckt, die einmal in den hohen Anforderungen der Meßsysteme selbst lagen, zum anderen aber auch in bisher nicht ausreichend bekannten und daher nicht untersuchten Einflußfaktoren gesehen werden müssen. Eine einwandfreie Rückführung auf das nationale Meßnormal ist hier nicht ohne weiteres gegeben.

## 2 Wissenschaftliche Problemstellung

Die EN 60060-2 bevorzugt die Kalibrierung eines anerkannten Meßsystems mit der sogenannten Referenzmethode, d. h. die Bestimmung des Maßstabsfaktors des Systems durch Vergleich mit einem Referenzmeßsystem. An dieses Referenzsystem sind erhöhte Anforderungen an die Meßunsicherheit gestellt, um somit bei der Rückführungskette ansteigende Genauigkeiten der Systeme zu erhalten. Für die in der Praxis interessierenden Prüfspannungsformen sind die höchstzulässigen Meßunsicherheiten:

- Anerkannte Meßsysteme des Labors: 3 %
- Referenzmeßsysteme (Gebrauchsnormal): 1 %
- Bezugsnormale der DKD: 0,5 %

Für Blitzstoßspannungen sind die Anforderungen äußerst schwer zu erfüllen. Dies liegt einmal in den Schwierigkeiten, für diese Spannung geeignete Systeme zu erstellen, aber auch in Einflußfaktoren, die noch nicht genügend untersucht wurden. Ein Referenzmeßsystem für Blitzstoßspannung ist heute nur unter Verwendung der folgenden Elemente realisierbar:

- Hochspannungsteiler.

Hier kommen gedämpft ohmsch-kapazitive oder rein ohmsche Teiler zum Einsatz. Das Referenzsystem der FGH ist ein gedämpft kapazitiver Teiler mit

- Kapazität : 500 pF
- Reihenwiderstand : 400  $\Omega$
- Externer Reihenwiderstand : 287  $\Omega$

Ohmsche Teiler haben Widerstandswerte um 10 k $\Omega$ .

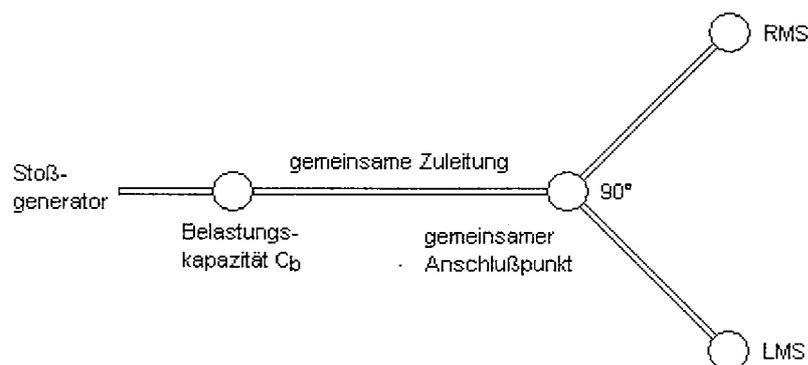
- Verbindungskabel.

- Stoßspannungsmeßgerät.

Transienten-Rekorder mit 8 bit oder 10 bit Auflösung, mit Rechner und speziell für die Auswertung entwickelter Software. Das System der FGH verwendet einen 10-bit-Transienten-Rekorder Tektronix RTD 710 A. Die Software wurde von der FGH entwickelt.

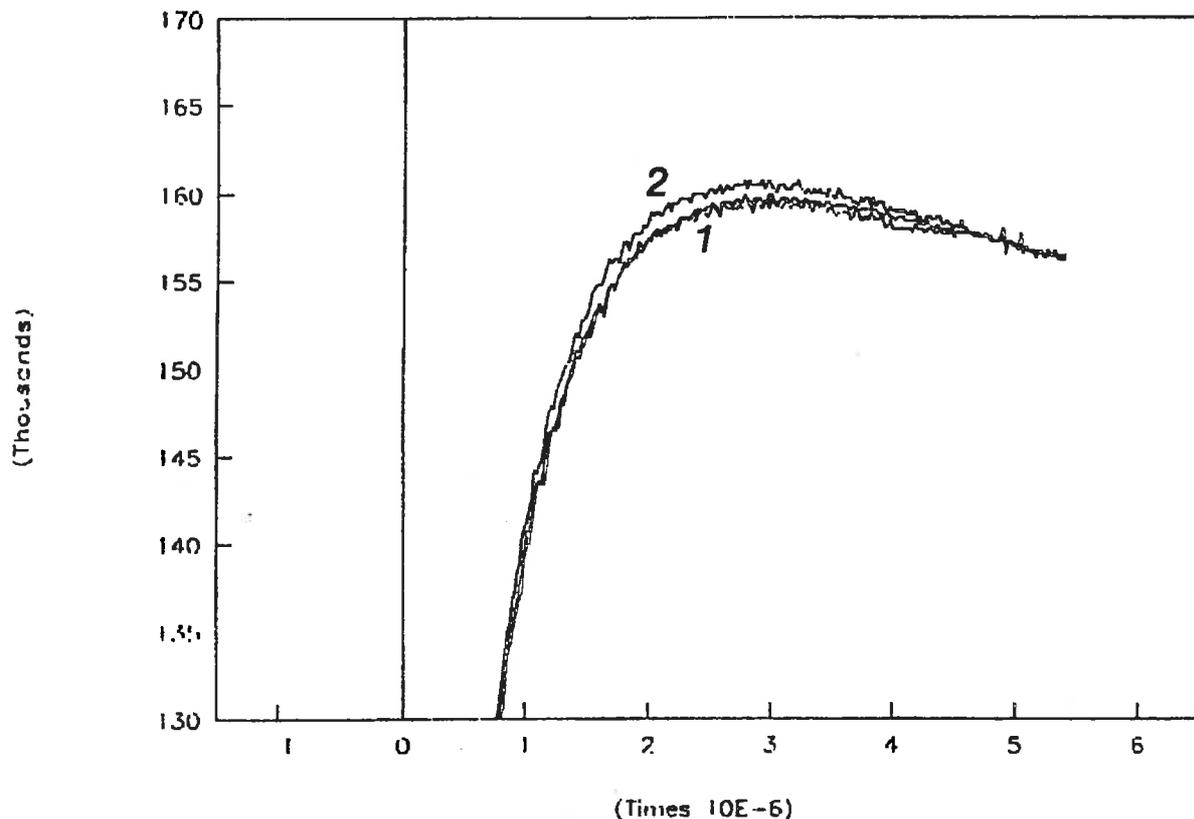
Das Referenzmeßsystem der FGH ist auf das nationale Normal der PTB zurückgeführt und erfüllt die Anforderungen der EN 60060-2.

Bei der Referenzmethode werden das zu kalibrierende Meßsystem (LMS) und das Referenzmeßsystem (RMS) an einem gemeinsamen Punkt angeschlossen. Die Anordnung entspricht der in **Bild 1**, wobei aber die Leitungslänge zwischen der Belastungskapazität des Stoßgenerators und dem gemeinsamen Anschlußpunkt stark von den räumlichen Gegebenheiten des Labors abhängen. Sie kann u. U. ganz entfallen, wenn die beiden Systeme direkt an die Belastungskapazität angeschlossen werden müssen. Als Winkel zwischen den beiden Zuleitungen ist ein Wert von 90° empfohlen. In der praktischen Anwendung ist insbesondere diese Empfehlung oft schwer erfüllbar, da das zu kalibrierende System und das Referenzsystem sehr unterschiedliche Abmessungen des Hochspannungsteilers haben können.



**Bild 1:** Schematische Darstellung der bei der Kalibrierung mit der Referenzmethode nach EN 60060-2 verwendeten Anordnung

Im Grundsatz müßten die beiden Meßsysteme bei richtiger Auslegung in einer solchen Anordnung richtig messen. Voraussetzung hierfür ist, daß die Übertragung der Spannung ausschließlich über die Zuleitungen erfolgt und induktive oder kapazitive Kopplungen zwischen den Kreisen vernachlässigt werden können. Erste Hinweise darauf, daß dies nicht unbedingt der Fall sein muß, wurden in einer Vergleichsmessung mit zwei Meßsystemen erhalten, die beide ohmsche Hochspannungsteiler verwendeten. **Bild 2** zeigt die zeitlichen Verläufe der



**Bild 2:** Zeitliche Verläufe einer Blitzstoßspannung, gemessen mit zwei ohmschen (1) und einem ohmsch-kapazitiven (2) Meßteiler.

Meßsignale der drei Meßsysteme im Vergleich. Es ist klar ersichtlich, daß das Meßsystem der FGH (Kurve 2) im ersten Teil des Zeitverlaufs höher liegt als die beiden anderen Systeme. Die Systeme nähern sich aber nach etwa  $5 \mu\text{s}$  an, d. h. das statische Übersetzungsverhältnis der drei Teiler ist unverändert. Durch Austauschen der Stoßspannungsmessgeräte wurde nachgewiesen, daß die beobachteten Unterschiede auf den Hochspannungsteilerkreis zurückzuführen sind.

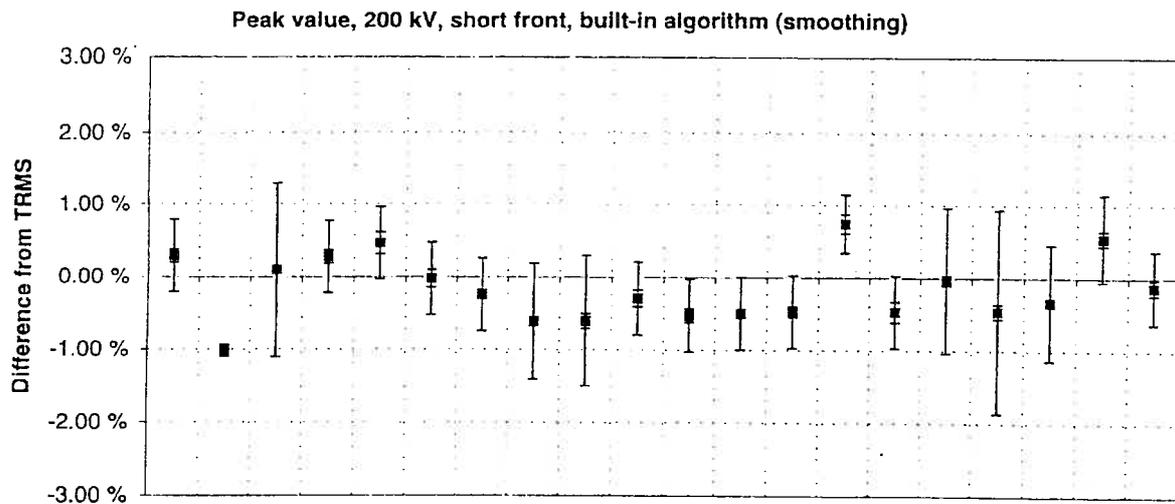
In der Tendenz wurden diese Ergebnisse in einem groß angelegten Vergleichsversuch bestätigt. **Bild 3** zeigt als Beispiel eines der Ergebnisse für die gemessene Scheitelspannung als Abweichung von einem im Rundversuch verschickten Meßsystem [2]. Die beiden höchsten Werte gehören zu den beiden gemischt ohmsch-kapazitiven Teilern. Alle anderen Hochspannungsteiler waren ohmsch.

Der Vergleich der beiden gemischt ohmsch-kapazitiven Hochspannungsteiler untereinander erbrachte sowohl zu diesem Zeitpunkt als auch in anderen – zu einem späteren Zeitpunkt wiederholten – Vergleichen keine ähnlichen Abweichungen. Die Einheits sprungantwort des FGH-Teilers war unverändert, d. h. der Hochspannungsmesskreis entspricht weiterhin dem Zustand, für den er ausgelegt und von der PTB kalibriert wurde.

Es wird vermutet, daß das dynamische Verhalten eines der Meßkreise während der Vergleichsversuche verändert wurde. Möglichkeiten hierzu könnten sein:

- Eine induktive oder kapazitive Kopplung zwischen den beiden Kreisen;

- Kopplungen zwischen Stoßspannungserzeuger und den Meßkreisen, wobei die Auswirkungen auf die Kreise unterschiedlich sein müßten;
- Kopplungen zwischen Hochspannungskreis und Meßkabeln.



**Bild 3:** Abweichungen von Meßeinrichtungen von der Messung eines Vergleichssystems in internationalen Vergleichsversuchen [2].

Eine Aufklärung der Einflüsse ist unerlässlich, da diese bei den in Industrieprüffeldern weit extremeren Größenverhältnissen zu wesentlich größeren Fehlern führen könnten, als in den betrachteten Vergleichsversuchen zwischen Referenzmeßsystemen. Die für diese Systeme geforderten Meßunsicherheiten von maximal 1 % im Scheitelwert und 5 % in den Zeitparametern der Blitzstoßspannung wären dann evtl. nicht einhaltbar und die Rückführung der Meßsysteme somit nicht einwandfrei.

### 3 Zielsetzung

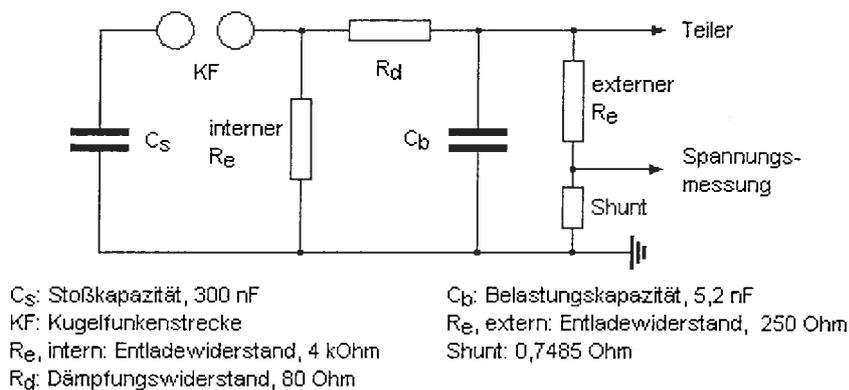
Die Zielsetzung des Forschungsvorhabens ist, die wichtigsten Einflußparameter zu ermitteln, die die Genauigkeit von Hochspannungsmesssystemen bei paralleler Messung mit zwei Systemen beeinflussen. Dabei sind die parallele Messung mit zwei ohmsch-kapazitiven Teilern und einem ohmschen mit einem ohmsch-kapazitiven Teiler zu berücksichtigen. Die Wirkungen dieser Parameter auf die Meßgenauigkeit der Meßsysteme sind zu quantifizieren.

Aus den ermittelten Einflüssen sollen die folgenden Ergebnisse erhalten werden:

- Richtlinien für die geometrische Anordnung des gemeinsamen Anschlußpunktes der Teilermeßkreise in Bezug auf den Blitzstoßspannungsgenerator.
- Empfehlungen für den Anschluß der Teilermeßkreise an den gemeinsamen Anschlußpunkt.
- Anforderungen an die Behandlung der Anschlußkabel und der Erdung ihrer Schirme am meßgeräteseitigen Ende.

#### 4 Mittel und Wege

Grundvoraussetzung war die Erzeugung einer Blitzstoßspannung mit hoher Reproduzierbarkeit. Dies verlangt eine Spannungsquelle mit niedrigem Innenwiderstand. Die Standardschaltung des FGH-Stoßgenerators wurde entsprechend modifiziert: Der interne Entladewiderstand  $R_e$  – normalerweise  $210 \Omega$  – wurde durch einen hochohmigen Widerstand ersetzt, mit dem nur noch die Feineinstellung der Spannungsform vorgenommen wurde. Der eigentliche Entladewiderstand bestand aus einem ohmschen Teiler mit niedrigem Widerstand, der extern parallel zur Stoßkapazität geschaltet wurde. Für den Stoßgenerator im einstufigen Betrieb, Ladespannung maximal  $250 \text{ kV}$ , ergab sich ein Wert von ca.  $250 \Omega$ . **Bild 4** zeigt die Schaltung des Stoßgenerators, wie sie bei allen Versuchen verwendet wurde.



**Bild 4:** Sonderschaltung des Stoßspannungsgenerators zur Erzeugung stabiler Stoßspannungen

Nach der Erstellung des als Entladewiderstand benutzten ohmschen Teilers wurde folgendes Versuchsprogramm durchgeführt:

1. Stoßspannungsmessungen mit Anschluß der Hochspannungsmesssysteme direkt an den externen Entladewiderstand.
  - Messung der Stoßspannung mit jedem Meßsystem getrennt.
  - Messung der Stoßspannung mit parallel angeschlossenen Meßkreisen. Der Winkel zwischen den Meßkreisen wird auf  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  und  $90^\circ$  eingestellt.

Dieser Versuch sollte Aufschluß über die gegenseitige induktive bzw. kapazitive Kopplung zwischen den zur Kalibrierung parallel betriebenen Meßsystemen geben. Er diene auch für Angaben zur räumlichen Nutzbarkeit labormäßiger Gegebenheiten.

2. Anschluß der Hochspannungsmesssysteme über eine Zuleitung an den externen Entladewiderstand.

Als Zuleitungslänge werden ca.  $3 \text{ m}$  und ca.  $9 \text{ m}$  verwendet. Die Versuchsvarianten entsprechen denen unter Punkt 1.

Die Entfernung vom Stoßgenerator sollte Auskunft über dessen Einflußmöglichkeit geben.

### 3. Einfluß der Kabelschirmerdung.

Im Versuchsaufbau nach Punkt 1 wurden die Kabelschirme entsprechend den in der Praxis vorkommenden Varianten geerdet:

- Anschluß der Kabel an die beiden getrennten Meßgeräte und Erdung der Meßgeräte am Erdsystem der Hochspannungshalle.
- Anschluß der Kabel an einer gemeinsamen Erdungsschiene, die induktivitätsarm am Erdungssystem der Hochspannungshalle angeschlossen ist, und Anschluß der Meßgeräte an die Erdungsschiene.
- gemischter Anschluß der Kabel, bei dem das Referenzmeßsystem direkt an das Meßgerät angeschlossen wurde, während alle anderen Messungen über die oben erwähnte gemeinsame Erdungsschiene geführt wurden.

Für alle Varianten wurde eine Beeinflussungsprüfung nach EN 60060-2, jedoch mit voller Blitzstoßspannung durchgeführt.

Potentialanhebungen und vagabundierende Ströme über den Meßkabelschirm können Fehlerursachen bei der Messung sein. Geeignete Erdungsempfehlungen sind besonders hinsichtlich der Erfassung steiler transienter Vorgänge von Bedeutung.

## 5 Geräte-Einsatz

Bei den Versuchen wurden folgende Geräte eingesetzt:

### Hochspannungsteiler:

- Bezugsnorm der FGH (im folgenden mit „PTB“ bezeichnet):
  - ohmsch-kapazitiver Teiler,
  - Typ: Heafely RCR 500 REF,
  - Nennspannung: 500 kV,
  - Nennkapazität: 500 pF,
  - Teilverhältnis:  $\ddot{u} = 389:1$ ,
  - Externer Dämpfungswiderstand: 287  $\Omega$ ,
  - Länge der Teilerzuleitung incl. Dämpfungswiderstand: 4,4 m,
  - Länge der Meßleitung: 20 m,
  - Transienten-Rekorder-Kanal: DKD, Kanal 2.
- Ohmscher Teiler der FGH (im folgendem mit „OHM“ bezeichnet):
  - Typ: Eigenbau,
  - Nennspannung: 300 kV,
  - Nennwiderstand: 15 k $\Omega$ ,
  - Teilverhältnis:  $\ddot{u} = 400:1$ ,
  - Externer Dämpfungswiderstand: 265  $\Omega$ ,
  - Länge der Teilerzuleitung incl. Dämpfungswiderstand: 4,5 m,
  - Länge der Meßleitung: 20 m,
  - Transienten-Rekorder-Kanal: HV, Kanal 2.

- Ohmsch-kapazitiver Teiler der FGH (im folgenden mit „MWB“ bezeichnet):
  - Typ: MWB RCT 2000,
  - Nennspannung: 2000 kV, 500-kV-Meßbereich,
  - Nennkapazität: 290 pF,
  - Teilverhältnis:  $\ddot{u} = 1333:1$ ,
  - Externer Dämpfungswiderstand: 148  $\Omega$ ,
  - Länge der Teilerzuleitung incl. Dämpfungswiderstand: 5,4 m,
  - Länge der Meßleitung: 20 m.
  - Transienten-Rekorder-Kanal: HV, Kanal 1.

#### Meßgeräte:

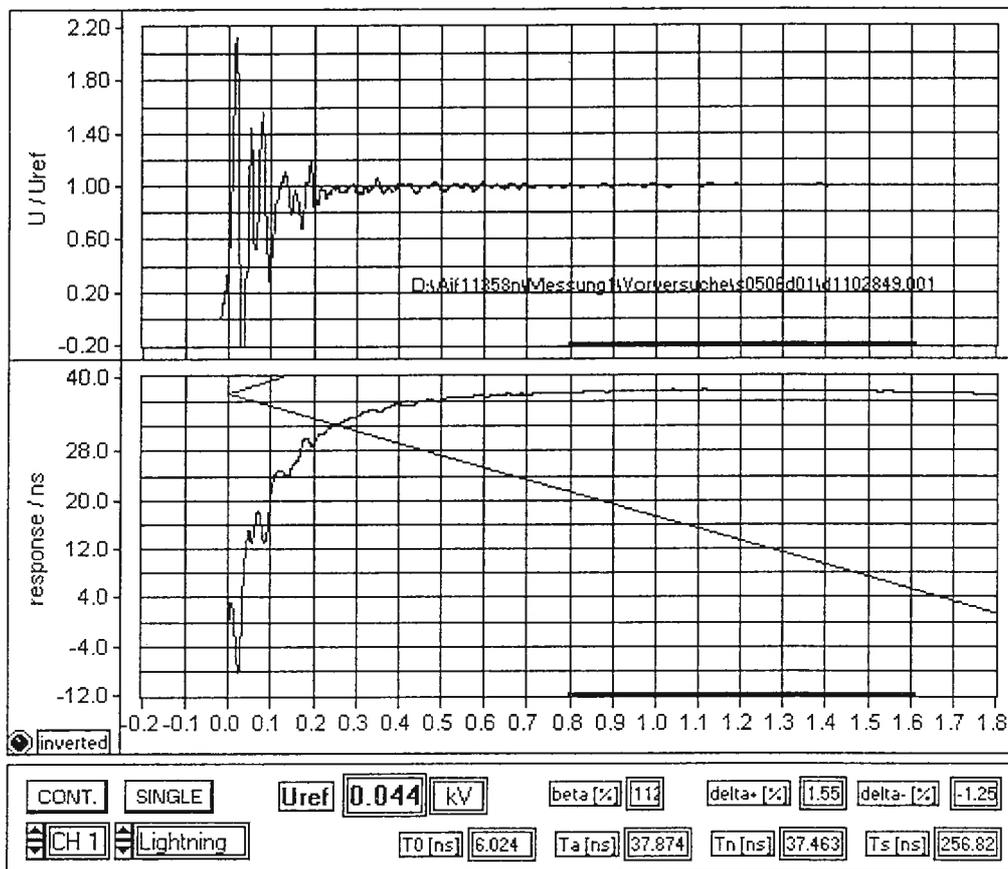
- 2 identische, parallel betriebene FGH-Impuls-Meßsysteme („DKD“ und „HV“), eingebaut in 19“-Racks, bestehend aus:
  - FGH-Vorteiler: 2-kanalig,  $\ddot{u} = 66:1$ ,
  - Transienten-Rekorder RTD710A, 2-kanalig, 10 bit Auflösung, 10 ns Abtastzeit,
  - Industrie-PC,
  - FGH-Impulsauswertesoftware.

#### Kalibriergerät:

- Haefely Referenz-Impulskalibrator RIC 422:
  - Blitzstoßspannung 0,84/60  $\mu\text{s}$ ,  $\dot{U} = 80$  bis 1600 V,
  - Schaltstoßspannung 20/4000  $\mu\text{s}$ ,  $\dot{U} = 80$  bis 1600 V,
  - abgeschnittene Blitzstoßspannung 0,5  $\mu\text{s}$ ,  $\dot{U} = 400$  bis 1250 V.

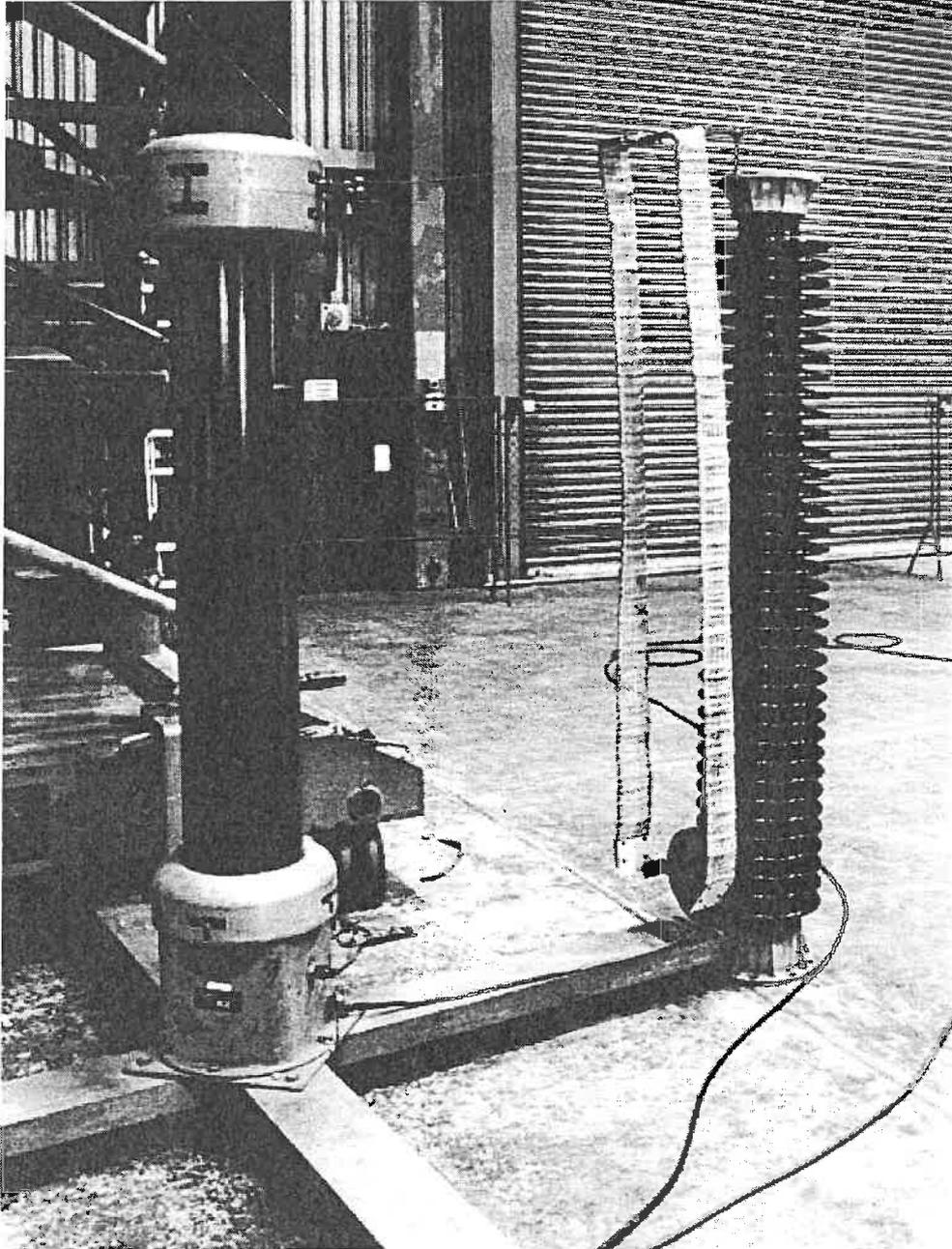
## 6 Erstellung des als Entladewiderstand benutzten ohmschen Teilers „Re“

Zunächst wurde versucht mittels des aus dem Stoßgenerator ausgebauten internen Entladewiderstandes und einem Shunt der FGH einen ohmschen Teiler aufzubauen. Die an dieser Kombination durchgeführten Step-Response-Messungen zeigten allerdings, daß der interne Entladewiderstand nicht genügend induktivitätsarm war, um damit schnelle Vorgänge genau genug erfassen zu können. Weitergehende Untersuchungen zeigten dann, daß sich aus zwei parallelgeschalteten, 2 m langen Widerstandsbändern von je ca. 500  $\Omega$  und einem induktivitätsarmen Shunt von 0,7485  $\Omega$  ( $\ddot{u} = 350:1$ ) ein ohmscher Teiler bauen läßt, der den Anforderungen genügt. **Bild 5** zeigt die Auswertung der Step-Response-Messungen an diesem Teiler.



**Bild 5:** Ergebnis der Step-Response-Auswertung für den Re-Teiler

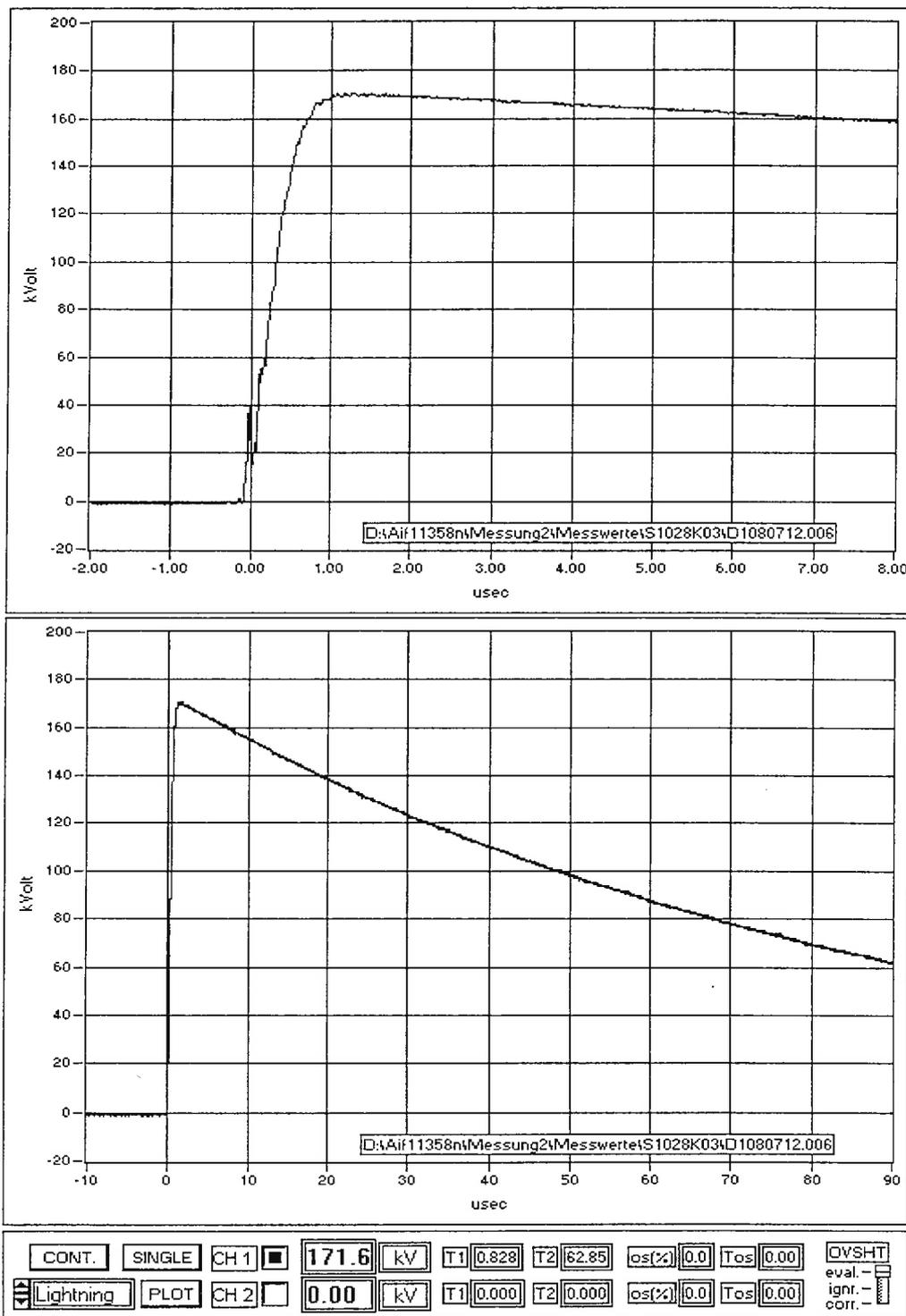
Der Einheitssprung wurde erzeugt, indem eine am Teiler angelegte Gleichspannung über ein Relais mit Quecksilberkontakten kurzgeschlossen wurde. Der so erzeugte Spannungssprung wurde mit einem digitalen Tektronix DSA 602-Speicheroszilloskop bei einer Abtastrate von 1 GSsample pro Sekunde aufgezeichnet und anschließend ausgewertet. In dem für Blitzstoßspannungen interessierenden Nenn-Zeitbereich von 0,8 bis 1,6  $\mu$ s ist die Sprungantwort eingeschwungen. Mit einer Teilantwortszeit  $T_{\alpha}$  von 38 ns und einer Beruhigungszeit von 257 ns ist der Teiler für die Messung von Blitzstoßspannungen geeignet. Der Teiler (im folgenden mit „Re“ bezeichnet) wurde in einem Abstand von ca. 1 m direkt an der Belastungskapazität montiert (**Bild 6**). Die Länge der Meßleitung des Re-Teilers betrug 8 m. Die Meßleitung wurde mit dem Kanal 1 des Transienten-Rekorders DKD verbunden und war dort mit einem 75- $\Omega$ -Widerstand gegen Erde abgeschlossen.



**Bild 6:** Ohmscher Teiler  $R_e$  aus Widerstandsbändern, als Entladewiderstand benutzt. Die senkrecht stehende Scheibe am Teilerfußpunkt ist der zur Spannungsmessung benutzte Shunt. Im Vordergrund links die Belastungskapazität  $C_b$  des Stoßgenerators.

## 7 Erzeugung der Blitzstoßspannung

Alle Versuche wurden mit einer Blitzstoßspannung 0,84/50 entsprechend der genormten Blitzstoßspannung mit der kleinsten zulässigen Frontzeit durchgeführt. Der Scheitelwert der Blitzstoßspannung betrug etwa 170 kV. **Bild 7 und 8** zeigen die mit dem Re-Teiler ohne weitere Belastung gemessene Blitzstoßspannung.

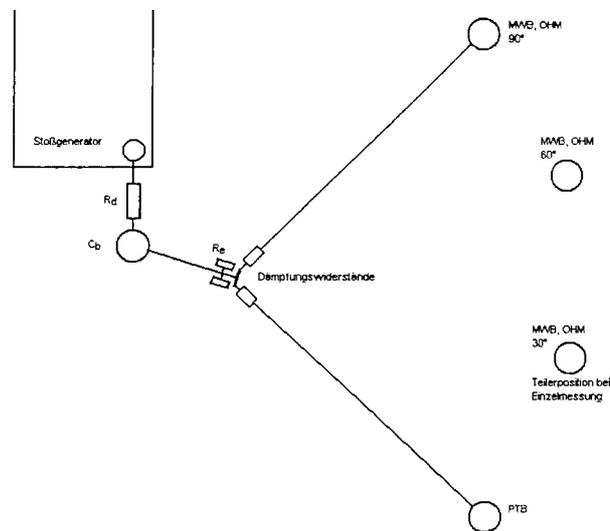


**Bild 7, 8:** Stirn (Bild 7) und Rücken (Bild 8) der eingesetzten Blitzstoßspannung, Messung mit Re.

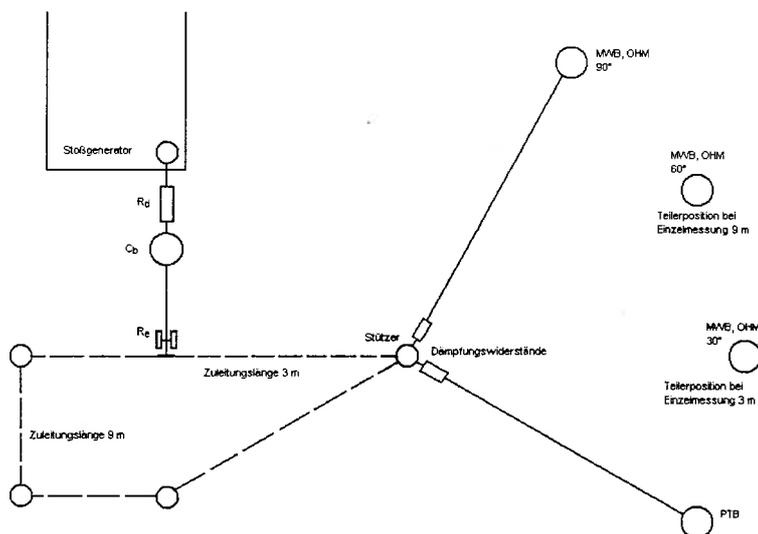
## 8 Versuchsaufbau

In zwei Meßperioden wurden jeweils alle Stoßspannungsmessungen nach Punkt 1 und 2 des Versuchsprogrammes durchgeführt. Die Versuche fanden in der Hochspannungshalle der FGH statt, und zwar in dem Teil der Halle, in dessen Boden eine durchgehende Kupferplatte als Erde verlegt ist.

Die während der ersten Meßperiode benutzten Versuchsaufbauten zeigen die **Bilder 9 und 10**. Der Teiler  $R_e$  war mit einer Kupferschiene an der Stoßkapazität befestigt und wurde mit einer Seilkonstruktion abgefangen. Beim direkten Anschluß der Teiler wurden deren Dämpfungswiderstände am Ende dieser Kupferschiene befestigt. Bei den Zuleitungslängen 3 m und 9 m erfolgte die Befestigung der Dämpfungswiderstände an einem ca. 1,8 m hohen Stützer, der in 3 m Entfernung von  $R_e$  aufgebaut war. Die 3-m-Zuleitung wurde mit einem Draht direkt von  $R_e$  zum Stützer hergestellt, für die 9-m-Zuleitung wurde dieser Draht über drei weitere Stützer umgeleitet.

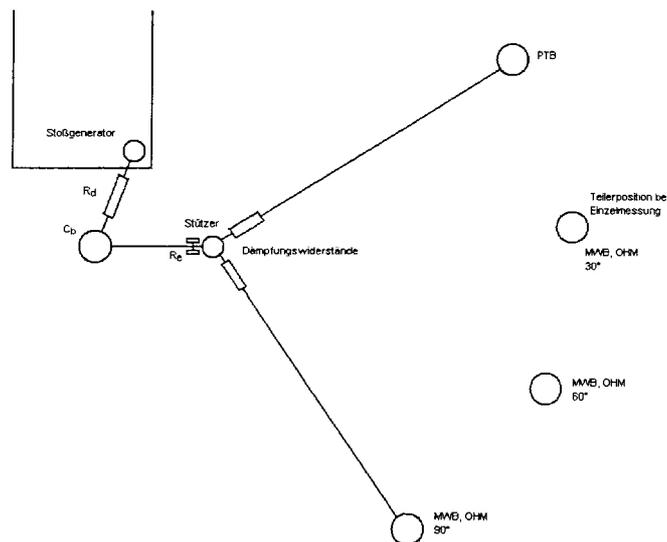


**Bild 9:** Versuchsaufbau der 1. Meßperiode, Zuleitungslänge 0 m

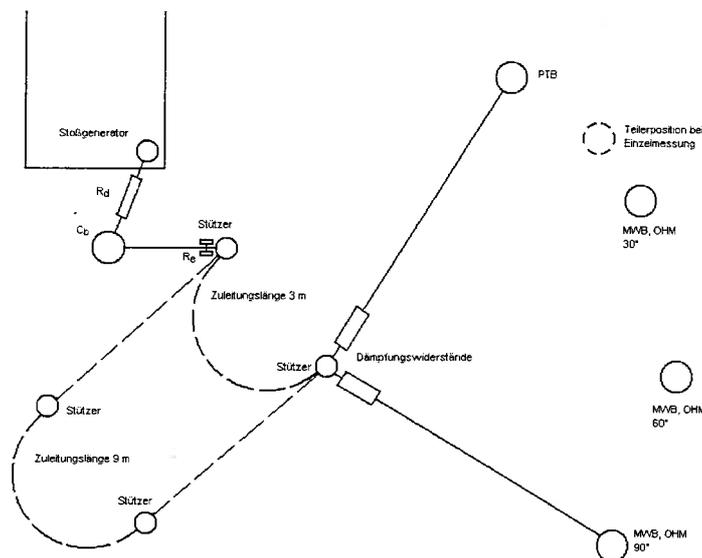


**Bild 10:** Versuchsaufbau der 1. Meßperiode, Zuleitungslänge 3 m und 9 m

Die in **Bild 11 und 12** gezeigten Versuchsaufbauten für die 2. Meßperiode wurden nach den in der ersten Meßperiode gemachten Erfahrungen weiterentwickelt. Besonderer Wert wurde hier auf die Möglichkeit eines schnellen Umbaus zwischen den Versuchen gelegt, dabei sollte die Änderung der Zuleitungslänge durch einfaches Wechseln von vorbereiteten Aluminiumrohren erfolgen. Der Re-Teiler wurde deswegen auch nicht mehr mit einer Seilkonstruktion abgefangen, sondern mit dem Ende der Kupferschiene auf einem Stützer verschraubt. An diesem Stützer wurden bei direktem Anschluß der Teiler auch die Dämpfungswiderstände befestigt. Die Verlängerung der Zuleitung wurde von diesem Stützer ausgehend mit Aluminiumrohren über weitere Stützer zum gemeinsamen Anschlußpunkt geführt.



**Bild 11:** Versuchsaufbau der 2. Meßperiode, Zuleitungslänge 0 m



**Bild 12:** Versuchsaufbau der 2. Meßperiode, Zuleitungslängen 3 m und 9 m

Während der Messungen mit unterschiedlichen Winkeln zwischen den Teilerzuleitungen behielt der Referenzteiler PTB seinen Platz bei, die Laborteiler änderten dagegen ihre Positionen. Die Position von PTB in Relation zu MWB und OHM wechselte von der ersten zur zweiten Meßperiode, auf den Grund dafür wird später eingegangen.

Bei allen Versuchsaufbauten wurde darauf geachtet, daß die in den Identifikationsakten der Teiler angegebenen Mindestabstände zu geerdeten und spannungsführenden Teilen sowie die zulässigen Längen der Teilerzuleitungen und Erdverbindungen eingehalten wurden.

## 9 Versuchsdurchführung

### 9.1 Durchführung der Hochspannungsversuche

Die Versuchsaufbauten wurden am Tag vor dem Beginn der Meßperioden durchgeführt, damit die Teiler ausreichend Zeit hatten, sich zu akklimatisieren. Außerdem wurden die beiden Impuls-Meßsysteme sowie der Referenz-Impulskalibrator 24 h vor Beginn der Meßperioden eingeschaltet, um Aufwärmeeffekte zu minimieren. Die Meßgeräte und die Steuerung des Stoßgenerators blieben während der Meßperioden ständig eingeschaltet.

Die drei Teiler wurden bei jeder der drei Zuleitungslängen (0 m, 3 m, 9 m) einzeln gemessen. Außerdem wurden Messungen an den beiden Teilerkombinationen PTB-MWB und PTB-OHM bei jeder Zuleitungslänge mit verschiedenen Winkeln (30°, 60°, 90°) zwischen ihren Teilerzuleitungen durchgeführt. In der ersten Meßperiode wurden dabei beide Teilerkombinationen bei gleicher Zuleitungslänge nacheinander geprüft, bevor die Zuleitungslänge gewechselt wurde. In der zweiten Meßperiode wurde dagegen zunächst die Kombination PTB-MWB bei allen Zuleitungslängen unter den verschiedenen Winkeln geprüft, bevor der gesamte Ablauf mit der Kombination PTB-OHM wiederholt wurde.

In der ersten Meßperiode wurden die Versuche so durchgeführt, wie normalerweise bei der FGH DKD-Kalibrierungen vorgenommen werden. Das bedeutet, daß vor jeder Einzelmessung der drei verschiedenen Teiler und – bei parallelgeschalteten Teilern – bei jedem Wechsel der Teilerkombination sowie bei jeder Änderung der Zuleitungslänge eine Kalibrierung der benutzten Transienten-Rekorder-Eingänge inklusive der Vorteiler mit dem Referenz-Impulskalibrator RIC 422 vorgenommen wurde. Die Kalibrierspannung entsprach dabei jeweils dem zu erwartenden Wert der Scheitelspannung auf der Niederspannungsseite der Teiler. Die Versuchsergebnisse (Scheitelwert der Spannung  $\hat{U}$ , Stirnzeit  $T_1$ , Rückenhalbwertszeit  $T_2$ ) wurden dann mit den bei der Kalibrierung erhaltenen Maßstabsfaktoren korrigiert.

Das eben geschilderte Verfahren hat einen Nachteil. Nach jeder Kalibrierung müssen über das Steuer- und Auswerteprogramm für die Transienten-Rekorder die Teilverhältnisse der einzelnen Teiler neu eingegeben werden, was zu einer Neueinstellung der Transienten-Rekorder führt. Dabei wird automatisch eine interne Kalibrierung der Rekorder ausgelöst, die möglicherweise von der letzten internen Kalibrierung bei der externen Kalibrierung mit dem RIC 422 abweicht.

Um diesen Effekt ausschalten zu können, wurde der Ablauf der Versuche für die zweite Meßperiode überarbeitet und optimiert. Zunächst wurden die Einstellungen der Transienten-

Rekorder bei den Kalibrierungen mit dem RIC 422 sowie das Rückschalten in den normalen Versuchsbetrieb statt über das Programm von Hand an den Transienten-Rekordern vorgenommen, so daß erneute interne Kalibrierungen entfielen. Als nächstes konnte das Versuchsprogramm durch einen geschickteren Versuchsaufbau (siehe **Bild 13**) und die Beschränkung auf jeweils eine Teilerkombination zeitlich so gestrafft werden, daß angenommen werden konnte, daß die Eingänge der Transienten-Rekorder während dieser Zeit stabil bleiben würden, und somit eine Kalibrierung vor der Prüfung einer Teilerkombination inklusive der Einzelmessungen und eine Kalibrierung im Anschluß daran ausreichen müßte.



**Bild 13:** Versuchsaufbau der 2. Meßperiode in der Hochspannungshalle der FGH. Der rote Teiler links hinten ist das Referenz-Normal PTB, der Teiler rechts hinten ist der Teiler OHM. Im Vordergrund die 9-m-Zuleitung vom Teiler Re zum gemeinsamen Anschlußpunkt mit den Dämpfungswiderständen.

Sowohl bei den Kalibrierungen als auch bei den Hochspannungsversuchen wurden in jedem Meßpunkt 10 Impulse aufgezeichnet, die im Anschluß an die Messungen statistisch ausgewertet wurden.

Die **Tabellen 1 und 2** geben einen Überblick über das Versuchsprogramm der beiden Meßperioden.

**Tabelle 1:** Versuchsablauf der 1. Meßperiode

Messung Nr.	Versuchsdaten				Meßgeräteinsatz		Umgebungsbedingungen		
	Spannungsquelle	Teilerkombination	Zuleitung [m]	Winkel [°]	Transienten-Rekorder 1	Transienten-Rekorder 2	Temp. [°C]	Druck [hPa]	Feuchte [%]
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 1	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 2	-	-	-	-
1	Stoßgen.	PTB einzeln	0	-	Kanal 1, 2	-	17	999	78
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 1	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	-	Kanal 1	-	-	-
2	Stoßgen.	MWB einzeln	0	-	Kanal 1	Kanal 1	17,5	999	77,5
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 1	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	-	Kanal 2	-	-	-
3	Stoßgen.	OHM einzeln	0	-	Kanal 1	Kanal 2	18	999	76,5
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 1	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 2	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	-	Kanal 2	-	-	-
4	Stoßgen.	PTB-OHM	0	30	Kanal 1, 2	Kanal 2	19,5	999	72
5	Stoßgen.	PTB-OHM	0	60	Kanal 1, 2	Kanal 2	20	999	70
6	Stoßgen.	PTB-OHM	0	90	Kanal 1, 2	Kanal 2	20,5	999	67,5
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 1	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 2	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	-	Kanal 1	-	-	-
7	Stoßgen.	PTB-MWB	0	30	Kanal 1, 2	Kanal 1	21	999	65,5
8	Stoßgen.	PTB-MWB	0	60	Kanal 1, 2	Kanal 1	20,5	999	65
9	Stoßgen.	PTB-MWB	0	90	Kanal 1, 2	Kanal 1	20,5	999	65
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 1	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 2	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	-	Kanal 2	-	-	-
10	Stoßgen.	PTB-OHM	3	90	Kanal 1, 2	Kanal 2	16,5	995	72
11	Stoßgen.	PTB-OHM	3	60	Kanal 1, 2	Kanal 2	16	995	71,5
12	Stoßgen.	PTB-OHM	3	30	Kanal 1, 2	Kanal 2	16	995	71
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 1	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 2	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	-	Kanal 1	-	-	-
13	Stoßgen.	PTB-MWB	3	90	Kanal 1, 2	Kanal 1	16	996	70
14	Stoßgen.	PTB-MWB	3	60	Kanal 1, 2	Kanal 1	17,5	995	70,5
15	Stoßgen.	PTB-MWB	3	30	Kanal 1, 2	Kanal 1	17,5	995	70
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 1	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 2	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	-	Kanal 1	-	-	-
16	Stoßgen.	PTB-MWB	9	30	Kanal 1, 2	Kanal 1	17,5	996	72
17	Stoßgen.	PTB-MWB	9	60	Kanal 1, 2	Kanal 1	18	996	72,5
18	Stoßgen.	PTB-MWB	9	90	Kanal 1, 2	Kanal 1	18	996	73,5
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 1	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 2	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	-	Kanal 2	-	-	-
19	Stoßgen.	PTB-OHM	0	30	Kanal 1, 2	Kanal 2	18	997	74
20	Stoßgen.	PTB-OHM	0	60	Kanal 1, 2	Kanal 2	18	996	75
21	Stoßgen.	PTB-OHM	0	90	Kanal 1, 2	Kanal 2	18	996	75
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 1	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 2	-	-	-	-
22	Stoßgen.	PTB einzeln	3	-	Kanal 1, 2	-	19	997	72,5
23	Stoßgen.	PTB einzeln	9	-	Kanal 1, 2	-	19	997	72
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 1	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	-	Kanal 2	-	-	-
24	Stoßgen.	OHM einzeln	9	-	Kanal 1	Kanal 2	19	997	71
25	Stoßgen.	OHM einzeln	3	-	Kanal 1	Kanal 2	19	997	71
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 1	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	-	Kanal 1	-	-	-
26	Stoßgen.	MWB einzeln	3	-	Kanal 1	Kanal 1	19,5	997	69
27	Stoßgen.	MWB einzeln	9	-	Kanal 1	Kanal 1	19,5	997	69

**Tabelle 2:**                    Versuchsablauf der 2. Meßperiode

Messung Nr.	Versuchsdaten				Meßgeräteeinsatz		Umgebungsbedingungen		
	Spannungs- quelle	Teiler- kombination	Zuleitung [m]	Winkel [°]	Transienten- Rekorder 1	Transienten- Rekorder 2	Temp. [°C]	Druck [hPa]	Feuchte [%]
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 1	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 2	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	-	Kanal 1	-	-	-
1	Stoßgen.	Re einzeln	-	-	Kanal 1	-	12,5	994	82,5
2	Stoßgen.	PTB einzeln	0	-	Kanal 1, 2	-	13	994	82
3	Stoßgen.	MWB einzeln	0	-	Kanal 1	Kanal 1	13	994	80
4	Stoßgen.	PTB-MWB	0	30	Kanal 1, 2	Kanal 1	13	995	79
5	Stoßgen.	PTB-MWB	0	60	Kanal 1, 2	Kanal 1	13	995	78,5
6	Stoßgen.	PTB-MWB	0	90	Kanal 1, 2	Kanal 1	13	996	78
7	Stoßgen.	PTB einzeln	3	-	Kanal 1, 2	-	13	994	74,5
8	Stoßgen.	MWB einzeln	3	-	Kanal 1	Kanal 1	13	994	73,5
9	Stoßgen.	PTB-MWB	3	90	Kanal 1, 2	Kanal 1	13,5	996	73
10	Stoßgen.	PTB-MWB	3	60	Kanal 1, 2	Kanal 1	13,5	996	73
11	Stoßgen.	PTB-MWB	3	30	Kanal 1, 2	Kanal 1	13,5	996	73
12	Stoßgen.	PTB einzeln	9	-	Kanal 1, 2	-	13,5	997	73
13	Stoßgen.	MWB einzeln	9	-	Kanal 1	Kanal 1	13,5	997	72,5
14	Stoßgen.	PTB-MWB	9	30	Kanal 1, 2	Kanal 1	13,5	997	72
15	Stoßgen.	PTB-MWB	9	60	Kanal 1, 2	Kanal 1	13,5	997	72
16	Stoßgen.	PTB-MWB	9	90	Kanal 1, 2	Kanal 1	13,5	997	71,5
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 1	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 2	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	-	Kanal 1	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	-	Kanal 2	-	-	-
17	Stoßgen.	Re einzeln	-	-	Kanal 1	-	13,5	997	72
18	Stoßgen.	PTB einzeln	0	-	Kanal 1, 2	-	13,5	998	72,5
19	Stoßgen.	OHM einzeln	0	-	Kanal 1	Kanal 2	13,5	998	71,5
20	Stoßgen.	PTB-OHM	0	30	Kanal 1, 2	Kanal 2	13,5	998	69
21	Stoßgen.	PTB-OHM	0	60	Kanal 1, 2	Kanal 2	13,5	998	68,5
22	Stoßgen.	PTB-OHM	0	90	Kanal 1, 2	Kanal 2	13,5	998	68
23	Stoßgen.	PTB einzeln	3	-	Kanal 1, 2	-	14	998	67
24	Stoßgen.	OHM einzeln	3	-	Kanal 1	Kanal 2	14	999	67
25	Stoßgen.	PTB-OHM	3	90	Kanal 1, 2	Kanal 2	14	999	66
26	Stoßgen.	PTB-OHM	3	60	Kanal 1, 2	Kanal 2	14	999	65,5
27	Stoßgen.	PTB-OHM	3	30	Kanal 1, 2	Kanal 2	14	999	65
28	Stoßgen.	PTB einzeln	9	-	Kanal 1, 2	-	14	1000	64,5
29	Stoßgen.	OHM einzeln	9	-	Kanal 1	Kanal 2	14	1000	65
30	Stoßgen.	PTB-OHM	9	30	Kanal 1, 2	Kanal 2	13,5	1000	65
31	Stoßgen.	PTB-OHM	9	60	Kanal 1, 2	Kanal 2	14	1000	64,5
32	Stoßgen.	PTB-OHM	9	90	Kanal 1, 2	Kanal 2	14	1000	62,5
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 1	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	Kanal 2	-	-	-	-
Kal.	RIC 422	-	-	-	-	Kanal 2	-	-	-
33	Stoßgen.	Re einzeln	9	-	Kanal 1	-	15	1001	60
34	Stoßgen.	Re einzeln	3	-	Kanal 1	-	15	1001	60
35	Stoßgen.	Re einzeln	-	-	Kanal 1	-	15,5	1001	59

## 9.2 Durchführung der Beeinflussungsmessungen

Der Einfluß der Kabelschirmerdung wurde in der ersten Meßperiode unter Verwendung des Versuchsaufbaus nach **Bild 9** untersucht. Die Teiler waren direkt an Re angeschlossen. Die Ausgänge der Unterspannungsteile der benutzten Teiler und ihre Meßleitungen wurden über spezielle Zwischenstücke miteinander verbunden. In diesen Zwischenstücken wurde der vom Teiler kommende Innenleiter des koaxialen Meßkabels unterbrochen und der zum Meßgerät führende Innenleiter war zum Kabelschirm hin kurzgeschlossen. Die Verbindungen der Kabelschirme blieben unverändert gegenüber den Hochspannungsmessungen.

Zunächst wurden die Beeinflussungsmessungen an den einzelnen Teilern bei parallel angeschlossenem Re durchgeführt. Dabei wurden die beiden Meßleitungen zum einen direkt an die Vorteiler der Meßsysteme angeschlossen, zum anderen wurden sie über eine mit Durchführungen versehene Kupferplatte in der Wand zwischen dem Labor und der Meßkabine geführt. Diese Ausgleichsplatte war direkt mit der im Hallenboden verlegten Erdplatte verbunden und die Kabelschirme waren über die Durchführungen an dieser Stelle zusätzlich geerdet. Der Teiler PTB wurde dann noch in einer dritten Variante gemessen, die bei DKD-Kalibrierungen häufig zum Einsatz kommt: die Meßleitung des Teilers PTB war direkt am Vorteiler des Meßsystems angeschlossen, während die Meßleitung des Teilers Re über die Ausgleichsplatte geführt wurde.

**Tabelle 3:** Versuchsablauf der Beeinflussungsmessungen

Messung Nr.	Versuchsdaten		Meßgeräteeinsatz			
	Teilerkombination	Winkel [°]	Transientenrekorder 1	angeschlossen über	Transientenrekorder 2	angeschlossen über
1	OHM einzeln	-	Kanal 1	Ausgleichsplatte	Kanal 2	Ausgleichsplatte
2	OHM einzeln	-	Kanal 1	Vorteiler direkt	Kanal 2	Vorteiler direkt
3	MWB einzeln	-	Kanal 1	Vorteiler direkt	Kanal 1	Vorteiler direkt
4	MWB einzeln	-	Kanal 1	Ausgleichsplatte	Kanal 1	Ausgleichsplatte
5	PTB einzeln	-	Kanal 1, 2	Ausgleichsplatte, Ausgleichsplatte	-	-
6	PTB einzeln	-	Kanal 1, 2	Ausgleichsplatte, Vorteiler direkt	-	-
7	PTB einzeln	-	Kanal 1, 2	Vorteiler direkt, Vorteiler direkt	-	-
8	PTB-MWB	30	Kanal 1, 2	Vorteiler direkt, Vorteiler direkt	Kanal 1	Vorteiler direkt
9	PTB-MWB	60	Kanal 1, 2	Vorteiler direkt, Vorteiler direkt	Kanal 1	Vorteiler direkt
10	PTB-MWB	90	Kanal 1, 2	Vorteiler direkt, Vorteiler direkt	Kanal 1	Vorteiler direkt
11	PTB-MWB	90	Kanal 1, 2	Ausgleichsplatte, Ausgleichsplatte	Kanal 1	Ausgleichsplatte
12	PTB-MWB	60	Kanal 1, 2	Ausgleichsplatte, Ausgleichsplatte	Kanal 1	Ausgleichsplatte
13	PTB-MWB	30	Kanal 1, 2	Ausgleichsplatte, Ausgleichsplatte	Kanal 1	Ausgleichsplatte
14	PTB-MWB	30	Kanal 1, 2	Ausgleichsplatte, Vorteiler direkt	Kanal 1	Ausgleichsplatte
15	PTB-OHM	30	Kanal 1, 2	Ausgleichsplatte, Ausgleichsplatte	Kanal 2	Ausgleichsplatte
16	PTB-OHM	60	Kanal 1, 2	Ausgleichsplatte, Ausgleichsplatte	Kanal 2	Ausgleichsplatte
17	PTB-OHM	90	Kanal 1, 2	Ausgleichsplatte, Ausgleichsplatte	Kanal 2	Ausgleichsplatte
18	PTB-OHM	90	Kanal 1, 2	Vorteiler direkt, Vorteiler direkt	Kanal 2	Vorteiler direkt
19	PTB-OHM	60	Kanal 1, 2	Vorteiler direkt, Vorteiler direkt	Kanal 2	Vorteiler direkt
20	PTB-OHM	30	Kanal 1, 2	Vorteiler direkt, Vorteiler direkt	Kanal 2	Vorteiler direkt
21	PTB-OHM	30	Kanal 1, 2	Ausgleichsplatte, Vorteiler direkt	Kanal 2	Ausgleichsplatte

Anschließend wurden die beiden Teilerkombinationen PTB-MWB und PTB-OHM, ebenfalls mit angeschlossenem Re, unter den Winkeln 30, 60, 90° durchgemessen. Auch hierbei wurden alle Meßkabel entweder über die Ausgleichsplatte geführt oder direkt an den Vorteilern angeschlossen. Für jede Teilerkombination wurde bei einem Winkel von 30° zwischen den Zuleitungen ein Zusatzversuch gemacht, bei dem der PTB-Teiler direkt an den Vorteiler

des Meßsystems angeschlossen war, während die beiden anderen Teiler über die Ausgleichsplatte angeschlossen waren (s.o.). In **Tabelle 3** ist das vollständige Versuchsprogramm der Beeinflussungsmessungen der ersten Meßperiode zusammengestellt.

Vor Beginn der zweiten Meßperiode wurden zur Überprüfung des Meßaufbaus und zur Ergänzung der Messungen nach **Tabelle 3** weitere Messungen vorgenommen. Hierbei wurden alle Teiler einzeln ohne parallelgeschalteten Re nacheinander jeweils über die Ausgleichsplatte oder direkt mit dem Kanal 1 des Transienten-Rekorders DKD verbunden. Durch diese Versuche sollte der Einfluß eines zweiten Meßanschlusses am Transienten-Rekorder deutlicher abgeklärt werden.

## 10 Versuchsergebnisse

### 10.1 Niederspannungs-Impuls-Kalibrierung der Meßsysteme

Wie unter 9.1 beschrieben, wurden die Transienten-Rekorder-Eingänge inklusive der Vor-teiler während der Versuche in regelmäßigen Abstände kalibriert. **Bild 14 und 15** zeigen die bei den Kalibrierungen in den beiden Meßperioden ermittelten Maßstabsfaktoren für den Scheitelwert, die Stirnzeit und die Rückenhalbwertszeit. In **Tabelle 4** sind die Mittelwerte und 95%-Vertrauensbereiche der Maßstabsfaktoren für die einzelnen Meßperioden und über beide Meßperioden hinweg zusammengefaßt.

**Tabelle 4:** Mittelwerte und 95%-Vertrauensbereiche der Maßstabsfaktoren des Scheitelwertes  $\hat{U}$ , der Stirnzeit  $T_1$  und der Rückenhalbwertszeit  $T_2$ . Die Transienten-Rekorder-Eingänge sind nach den angeschlossenen Teilern benannt.

TR-Eingang:	Re	$\hat{U} = 486 \text{ V}$		
nur 1. Meßperiode	120 Meßwert	(5 V)		
	MF- $\hat{U}$	MF- $T_1$	MF- $T_2$	
Mittelwert:	1,0014	0,9799	1,0087	
95%-Bereich:	0,018%	0,053%	0,025%	
nur 2. Meßperiode	30 Meßwerte	(6.2 V)		
	MF- $\hat{U}$	MF- $T_1$	MF- $T_2$	
Mittelwert:	0,9995	0,9813	1,0070	
95%-Bereich:	0,033%	0,034%	0,056%	
beide Meßperioden	150 Meßwerte			
	MF- $\hat{U}$	MF- $T_1$	MF- $T_2$	
Mittelwert:	1,0010	0,9802	1,0084	
95 %	0,021%	0,049%	0,026%	

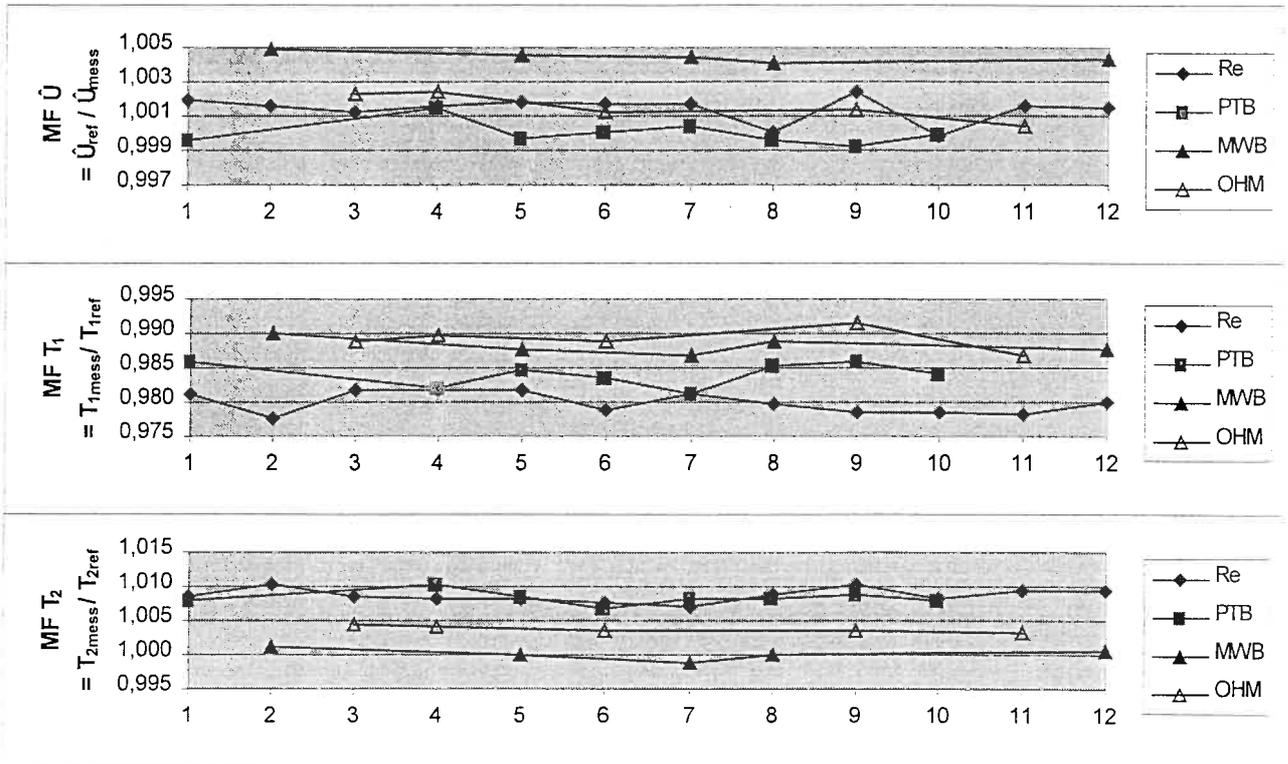
TR-Eingang:	PTB	$\hat{U} = 437 \text{ V}$		
nur 1. Meßperiode	80 Meßwerte	(5 V)		
	MF- $\hat{U}$	MF- $T_1$	MF- $T_2$	
Mittelwert:	1,0000	0,9841	1,0084	
95%-Bereich:	0,024%	0,080%	0,032%	
nur 2. Meßperiode	30 Meßwerte	(5 V)		
	MF- $\hat{U}$	MF- $T_1$	MF- $T_2$	
Mittelwert:	0,9991	0,9850	1,0069	
95%-Bereich:	0,028%	0,029%	0,056%	
beide Meßperioden	110 Meßwerte			
	MF- $\hat{U}$	MF- $T_1$	MF- $T_2$	
Mittelwert:	0,9997	0,9843	1,0080	
95 %	0,021%	0,067%	0,031%	

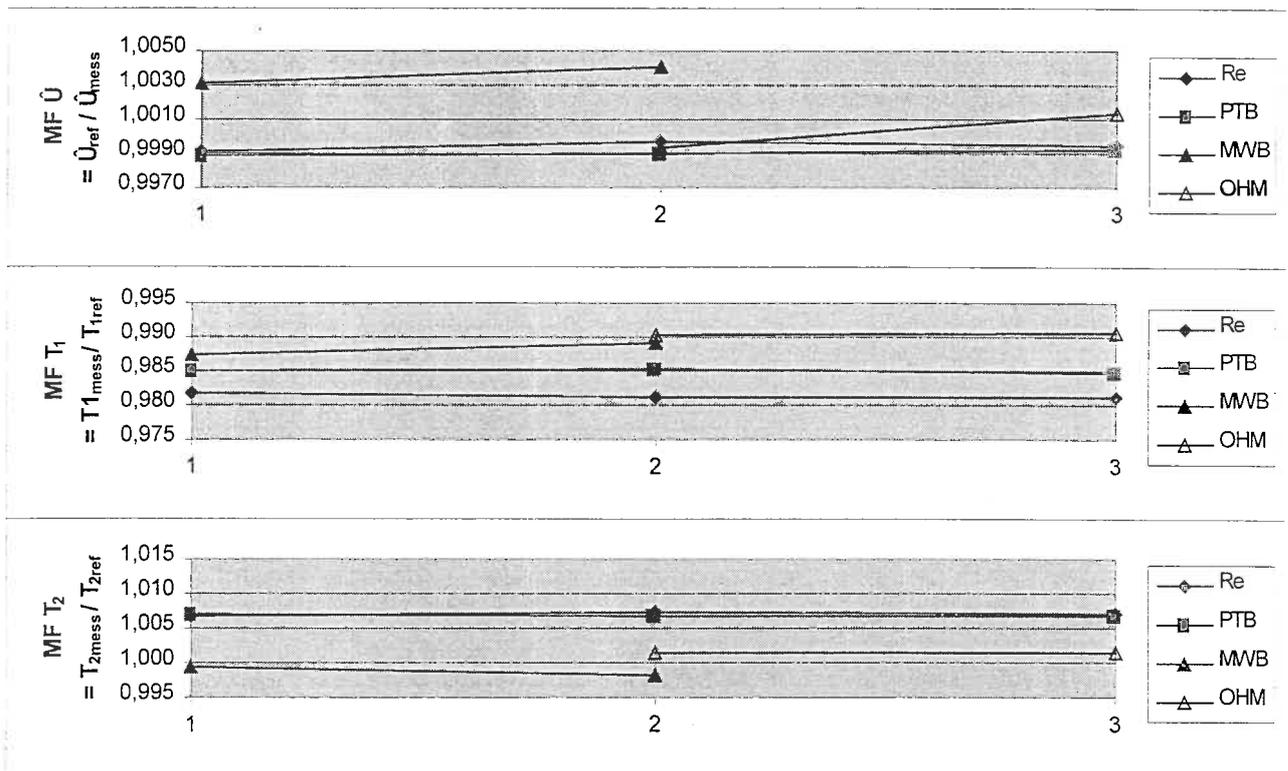
TR-Eingang:	MWB	$\hat{U} = 127 \text{ V}$		
nur 1. Meßperiode	50 Meßwerte	(1.6 V)		
	MF- $\hat{U}$	MF- $T_1$	MF- $T_2$	
Mittelwert:	1,0044	0,9882	1,0001	
95%-Bereich:	0,023%	0,111%	0,043%	
nur 2. Meßperiode	20 Meßwerte	(1.6 V)		
	MF- $\hat{U}$	MF- $T_1$	MF- $T_2$	
Mittelwert:	1,0036	0,9883	0,9988	
95%-Bereich:	0,038%	0,039%	0,050%	
beide Meßperioden	70 Meßwerte			
	MF- $\hat{U}$	MF- $T_1$	MF- $T_2$	
Mittelwert:	1,0042	0,9882	0,9997	
95%-Bereich:	0,022%	0,086%	0,037%	

TR-Eingang:	OHM	$\hat{U} = 425 \text{ V}$		
nur 1. Meßperiode	50 Meßwerte	(5 V)		
	MF- $\hat{U}$	MF- $T_1$	MF- $T_2$	
Mittelwert:	1,0014	0,9799	1,0087	
95%-Bereich:	0,027%	0,083%	0,039%	
nur 2. Meßperiode	20 Meßwerte	(5 V)		
	MF- $\hat{U}$	MF- $T_1$	MF- $T_2$	
Mittelwert:	0,9995	0,9813	1,0070	
95%-Bereich:	0,040%	0,041%	0,069%	
beide Meßperioden	70 Meßwerte			
	MF- $\hat{U}$	MF- $T_1$	MF- $T_2$	
Mittelwert:	1,0042	0,9882	0,9997	
95%-Bereich:	0,022%	0,086%	0,037%	



**Bild 14:** Maßstabsfaktoren des Scheitelwerts  $\dot{U}$ , der Stirnzeit  $T_1$  und der Rückenhalbwertszeit  $T_2$  bei den Transienten-Rekorder-Kalibrierungen der 1. Meßperiode.



**Bild 15:** Maßstabsfaktoren des Scheitelwerts  $\dot{U}$ , der Stirnzeit  $T_1$  und der Rückenhalbwertszeit  $T_2$  bei den Transienten-Rekorder-Kalibrierungen der 2. Meßperiode.

Die Unterschiede der Mittelwerte aller Maßstabsfaktoren zwischen der 1. und 2. Meßperiode betragen maximal 0,2 %. Bei den Mittelwerten der Maßstabsfaktoren des Scheitelwertes liegen die 95%-Vertrauensbereiche in den einzelnen Meßperioden unter 0,04 %, die größten Vertrauensbereiche bei den Zeitparametern liegen bei 0,1 %. Ein wesentlicher Einfluß der Kalibrierungen der Transienten-Rekorder auf die Ergebnisse der Spannungsmessungen kann ausgeschlossen werden.

## 10.2 Stabilität der Blitzstoßspannung

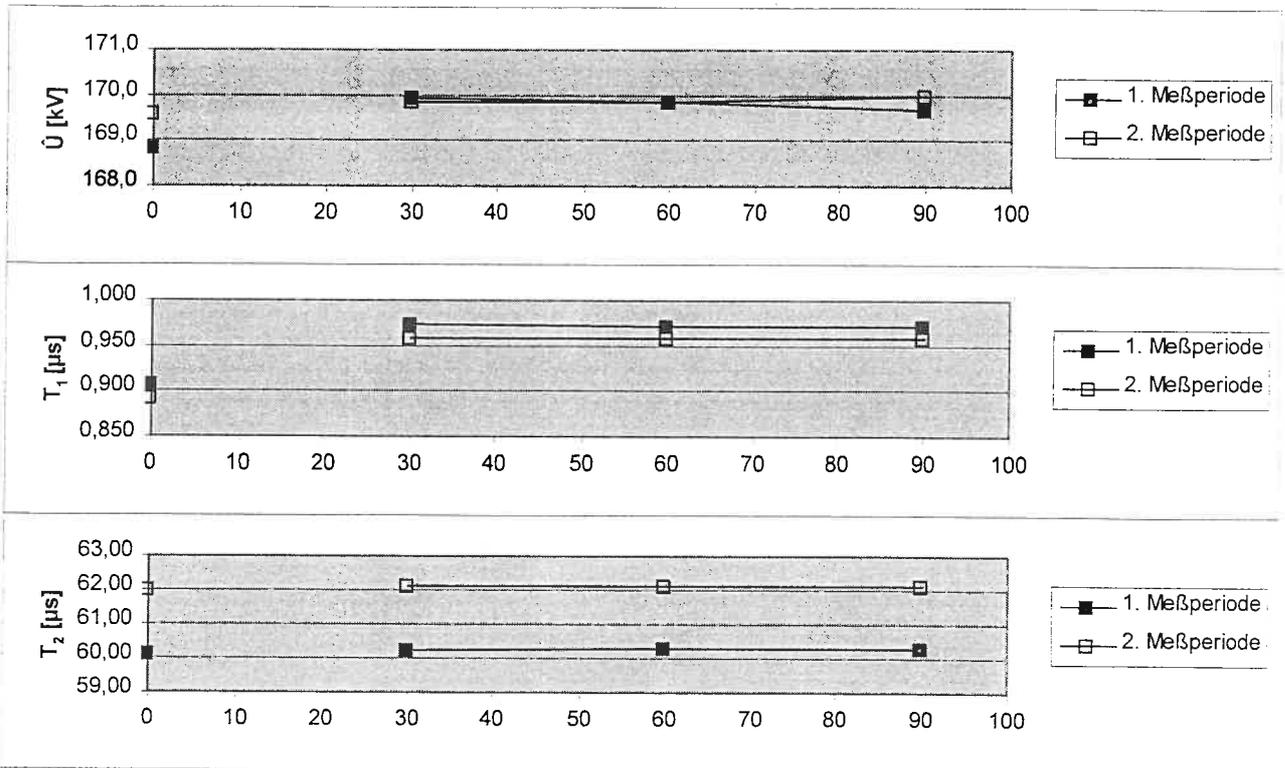
Um zu zeigen, welchen Einfluß der Anschluß zweier Teiler mit unterschiedlichen Winkeln zwischen ihren Zuleitungen auf die erzeugte Spannung hat, sind in **Bild 16 und 17** die Parameter von mit  $R_e$  gemessenen Blitzstoßspannungen über dem Zuleitungswinkel aufgetragen.

Die Teilerkombinationen PTB//MWB (**Bild 16**) und PTB//OHM (**Bild 17**) waren direkt an  $R_e$  angeschlossen, die drei Messungen einer Meßreihe erfolgten unmittelbar nacheinander. Als Vergleichswert sind die Spannungsparameter des einzeln angeschlossenen Teilers PTB bei  $0^\circ$  eingezeichnet.

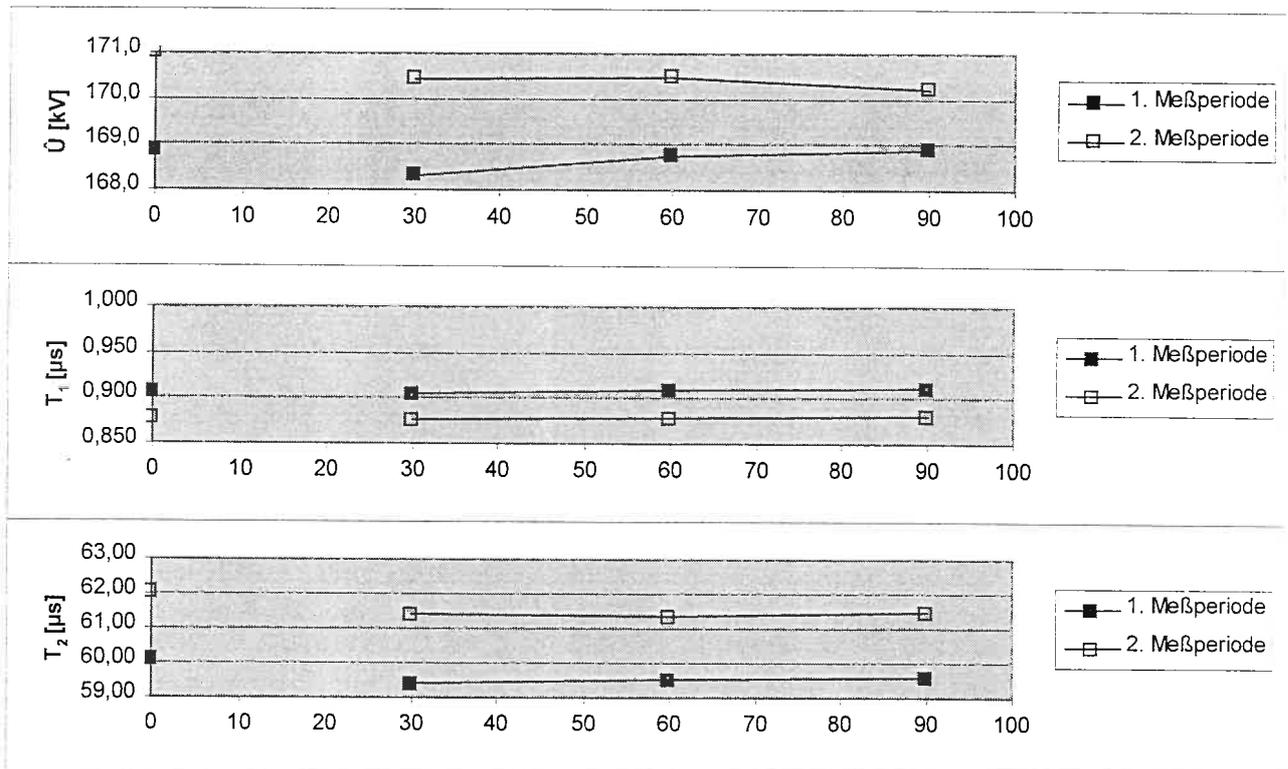
Die Stabilität der erzeugten Blitzstoßspannung ist als gut zu betrachten. Über die drei Winkel zwischen den Teilerzuleitungen gesehen, ergibt sich eine maximale Abweichung zwischen den Scheitelwerten von 0,5 kV – das entspricht etwa 0,3 % – bei der Parallelschaltung PTB – OHM in der ersten Meßperiode. Bei den anderen Meßreihen liegen die Abweichungen bei der Hälfte dieses Wertes. Die Stirn- und Rückenhalbwertszeiten sind innerhalb der einzelnen Meßreihen als konstant zu betrachten.

Auch im Vergleich mit den Werten des einzeln gemessenen Teilers PTB sind die Unterschiede nicht groß, die maximale Abweichung bei den Scheitelwerten liegt hier bei 0,7 % (PTB//MWB, 1. Meßperiode). Den größten Unterschied zwischen Einzelmessung und Parallelschaltung gibt es in der Stirnzeit bei der Kombination PTB//MWB. Wegen der höheren kapazitiven Last durch den parallelgeschalteten zweiten Teiler stieg die Stirnzeit um ca. 8 % an.

Die Stabilität der erzeugten Blitzstoßspannung war ausreichend gut, um die Meßergebnisse nicht wesentlich zu beeinflussen.



**Bild 16:** Scheitelwert, Stirnzeit und Rückenhalbwertszeit der Blitzstoßspannung an Re, aufgetragen über dem Winkel zwischen den Teilern bei 0 m Zuleitungslänge. Angeschlossene Teiler: PTB//MWB (0°: PTB einzeln).



**Bild 17:** Scheitelwert, Stirnzeit und Rückenhalbwertszeit der Blitzstoßspannung an Re, aufgetragen über dem Winkel zwischen den Teilern bei 0 m Zuleitungslänge. Angeschlossene Teiler: PTB//OHM (0°: PTB einzeln).

### 10.3 Einfluß des parallelgeschalteten zweiten Teilers

Den Einfluß eines parallelgeschalteten zweiten Teilers auf die Parameter der von den einzelnen Teilern gemessene Spannung bei direktem Teileranschluß unter verschiedenen Winkeln zwischen den Teilern zeigen die **Bilder 18 bis 21**. Alle Maßstabsfaktoren in diesen Diagrammen beziehen sich auf die vom Teiler Re am Punkt der Erzeugung gemessenen Spannungen. In **Bild 18 und 19** sind die Meßergebnisse des Teilers PTB bei parallelem MWB bzw. OHM dargestellt, in den **Bildern 20 und 21** finden sich die entsprechenden Meßergebnisse der Teiler MWB und OHM. Zur zusätzlichen Information sind in die Diagramme unter dem Winkel  $0^\circ$  die Einzelmessungen der direkt am Re angeschlossenen Teiler eingetragen.

Da die Einzelmessungen des Teilers PTB gleichzeitig der Kalibrierung des Teilers Re dienten, sind alle Maßstabsfaktoren dieser Meßpunkte in den **Bildern 18 und 19** natürlicherweise 1. Die Parameter der vom PTB in der 2. Meßperiode gemessenen Spannungen bedürfen kaum eines Kommentars, sowohl in ihrem Verlauf über den Winkel als auch im Vergleich zu den Einzelmessungen zeigen sich mit einer Ausnahme nur Unterschiede im niedrigen Promille-Bereich. Die eben erwähnte Ausnahme stellt die Messung der Stirnzeit bei parallelem MWB dar, der Maßstabsfaktor liegt in diesem Fall um fast 3 % unter dem der Einzelmessung. Wie aus **Bild 16** zu entnehmen ist, ändert sich bei der Parallelschaltung des MWB zum PTB die Stirnzeit der erzeugten Spannung um ca. 8 % von  $0,9 \mu\text{s}$  auf  $0,97 \mu\text{s}$ . Durch die unterschiedliche Form der Spannung ist nicht mehr gewährleistet, daß sich diese beiden Messungen exakt miteinander vergleichen lassen.

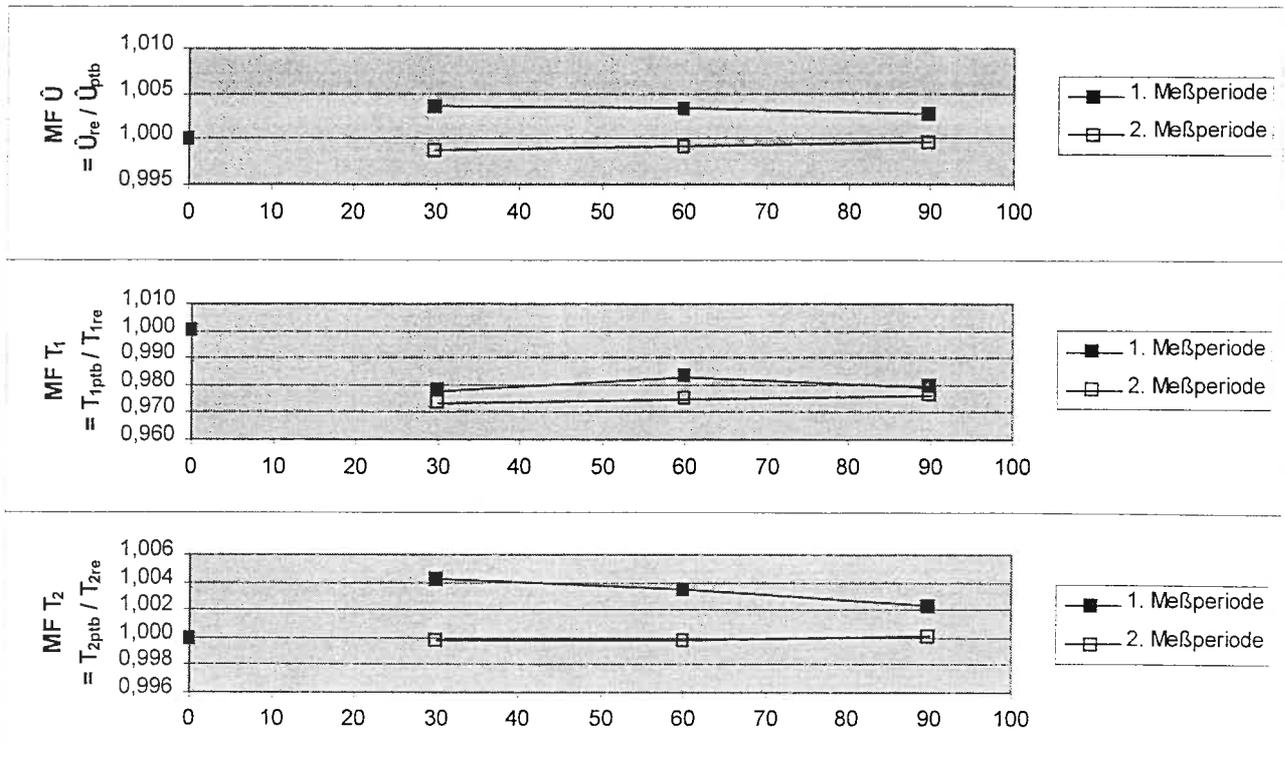
Die Meßergebnisse der ersten Meßperiode stellen sich, zumindest was die Parallelschaltung PTB – MWB betrifft, nicht ganz so günstig dar. Auch hier mißt der PTB parallel zum MWB eine deutlich kürzere Stirnzeit als der Re, während die Maßstabsfaktoren für den Scheitelwert und die Rückenhalbwertszeit zwar gering, aber doch merkbar über den Einzelmessungen liegen. Die Konstanz der Ergebnisse über dem Winkel zwischen den Zuleitungen ist akzeptabel.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß der Teiler PTB durch den parallelgeschalteten Teiler OHM in beiden Meßperioden kaum merklich beeinflusst wurde, während der Teiler MWB die Messung der Stirnzeit deutlich beeinflusste. Der in der Meßperiode 2 benutzte Versuchsaufbau ist zumindest bei der Teilerkombination PTB//MWB als günstiger anzusehen.

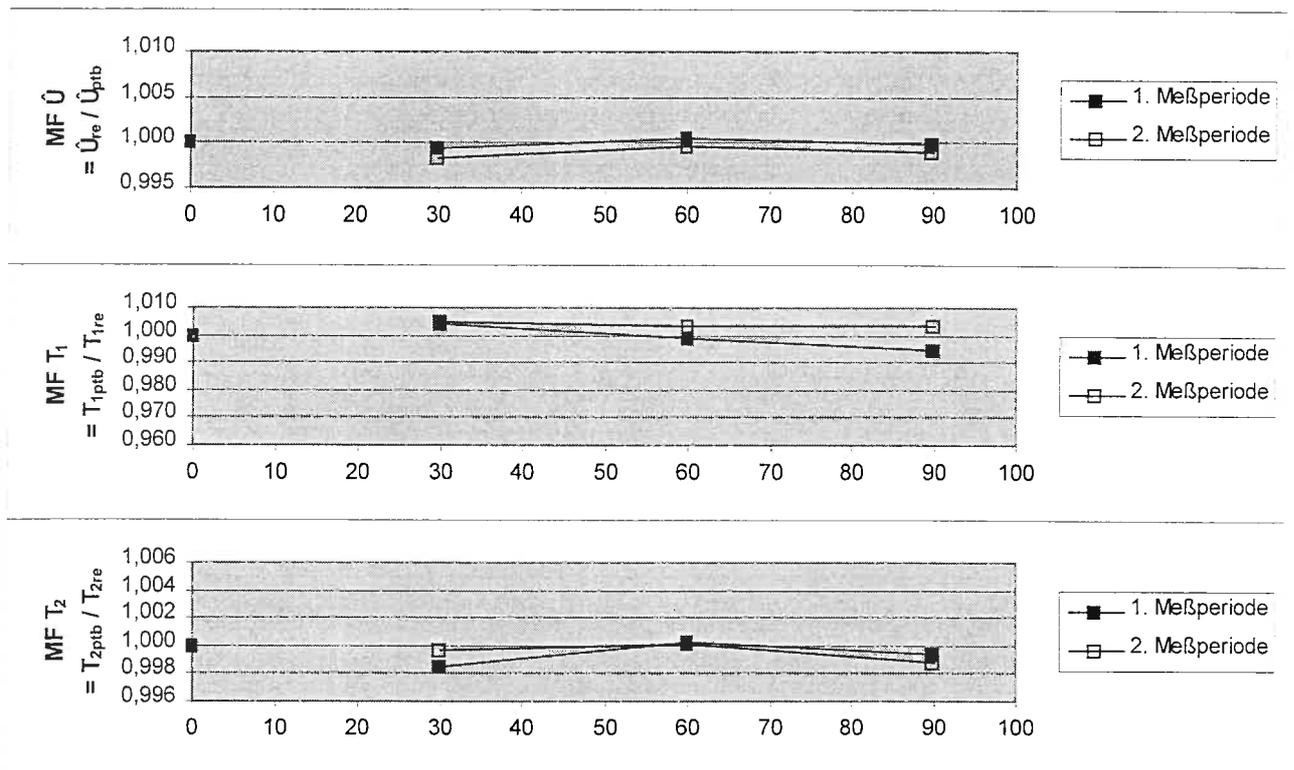
Die letzte Bemerkung gilt in noch stärkerem Maße, wenn man sich die Meßergebnisse der Teiler MWB und PTB betrachtet. Wenn sich bei diesen Messungen auch zum Teil deutliche Unterschiede zwischen den Einzel- und Parallelmessungen zeigen, so zeigen die Parameter der Stoßspannung – über den Teilerwinkel betrachtet – in der zweiten Meßperiode doch eine deutlich größere Konstanz als in der ersten Meßperiode, wo eine merkbare Abhängigkeit vom Winkel zu erkennen ist. Diese ist beim Teiler MWB ausgeprägter als beim Teiler OHM.

Vergleicht man den Versuchsaufbau der ersten Meßperiode (**Bild 9**) mit dem der zweiten (**Bild 11**), so sieht man, daß die Teiler MWB und OHM in der ersten Meßperiode mit zunehmenden Teilerwinkel dem Stoßgenerator immer näher kamen, während dieser Abstand in der zweiten Meßperiode annähernd gleich blieb. Zwar wurden bei den Versuchen die in den Identifikationsakten der Teiler festgelegten Mindestabstände eingehalten, da diese aber für

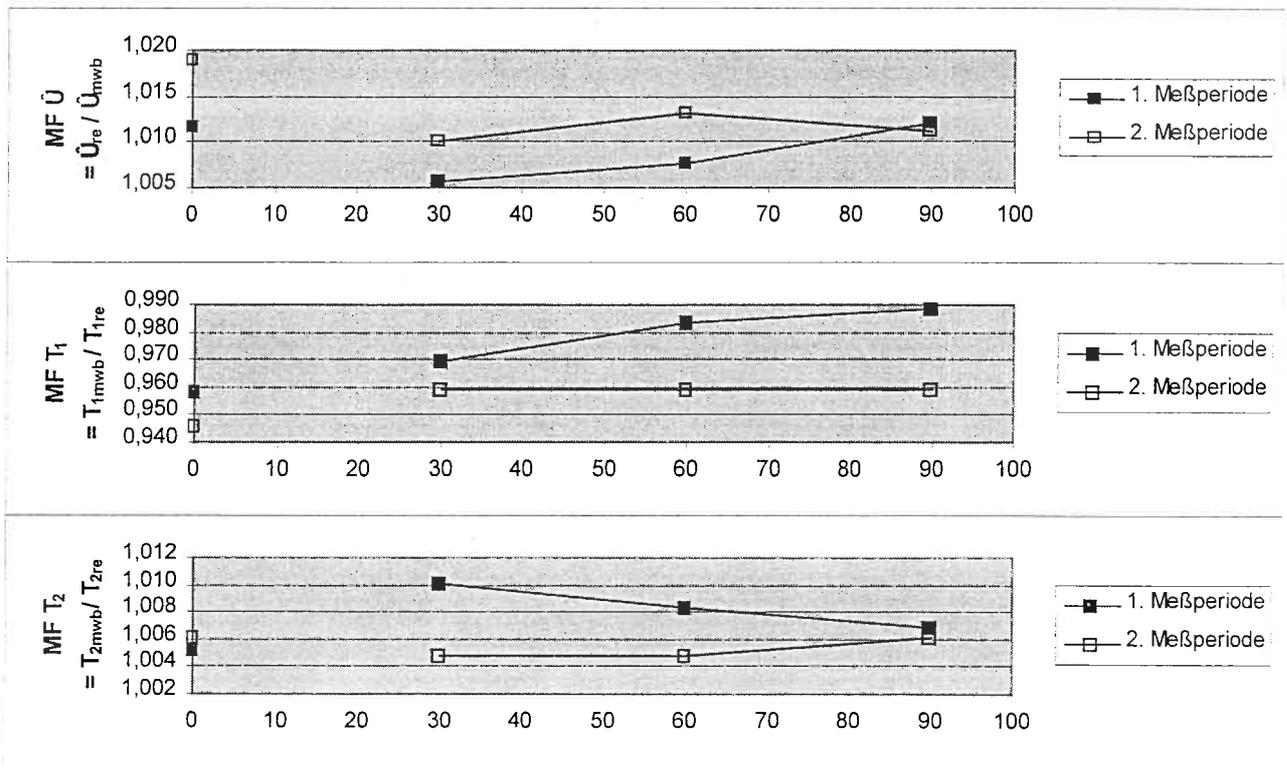
die größeren Toleranzen bei den höchstzulässigen Meßunsicherheiten anerkannter Labor-Meßsysteme ausgelegt sind, ist anzunehmen, daß sich bei den hier untersuchten Genauigkeiten der Proximity-Effekt doch bemerkbar macht. Das gilt insbesondere für den Teiler MWB mit seinen großen Abmessungen.



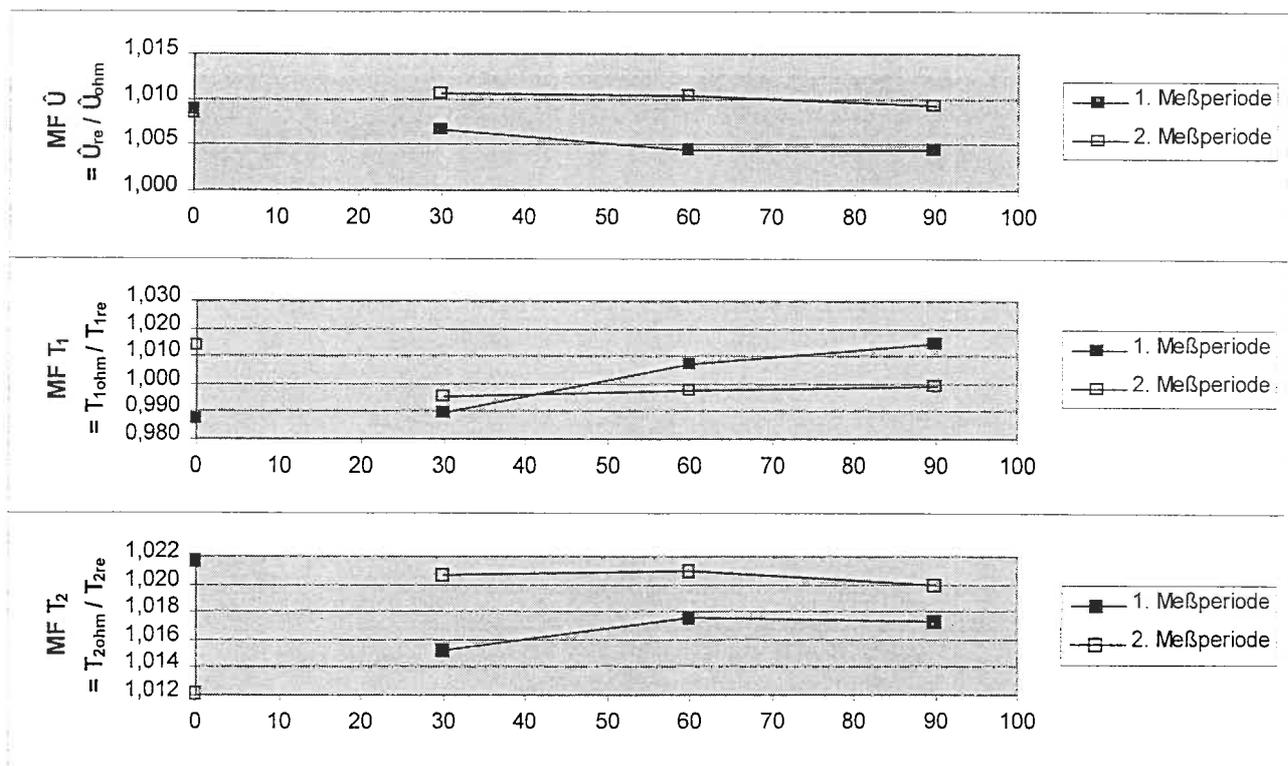
**Bild 18:** Maßstabsfaktoren von Scheitelwert, Stirn- und Rückenhalbwertszeit der Spannung an PTB bezogen auf Re, aufgetragen über dem Winkel zwischen den Teilern bei 0 m Zuleitungslänge. Angeschlossene Teiler: PTB//MWB (0°: PTB einzeln).



**Bild 19:** Maßstabsfaktoren von Scheitelwert, Stirn- und Rückenhalbwertszeit der Spannung an PTB bezogen auf Re, aufgetragen über dem Winkel zwischen den Teilern bei 0 m Zuleitungslänge. Angeschlossene Teiler: PTB//OHM (0°: PTB einzeln).



**Bild 20:** Maßstabsfaktoren von Scheitelwert, Stirn- und Rückenhalbwertszeit der Spannung an MWB bezogen auf  $Re$ , aufgetragen über dem Winkel zwischen den Teilern bei 0 m Zuleitungslänge. Angeschlossene Teiler: MWB //PTB (0°: MWB einzeln).



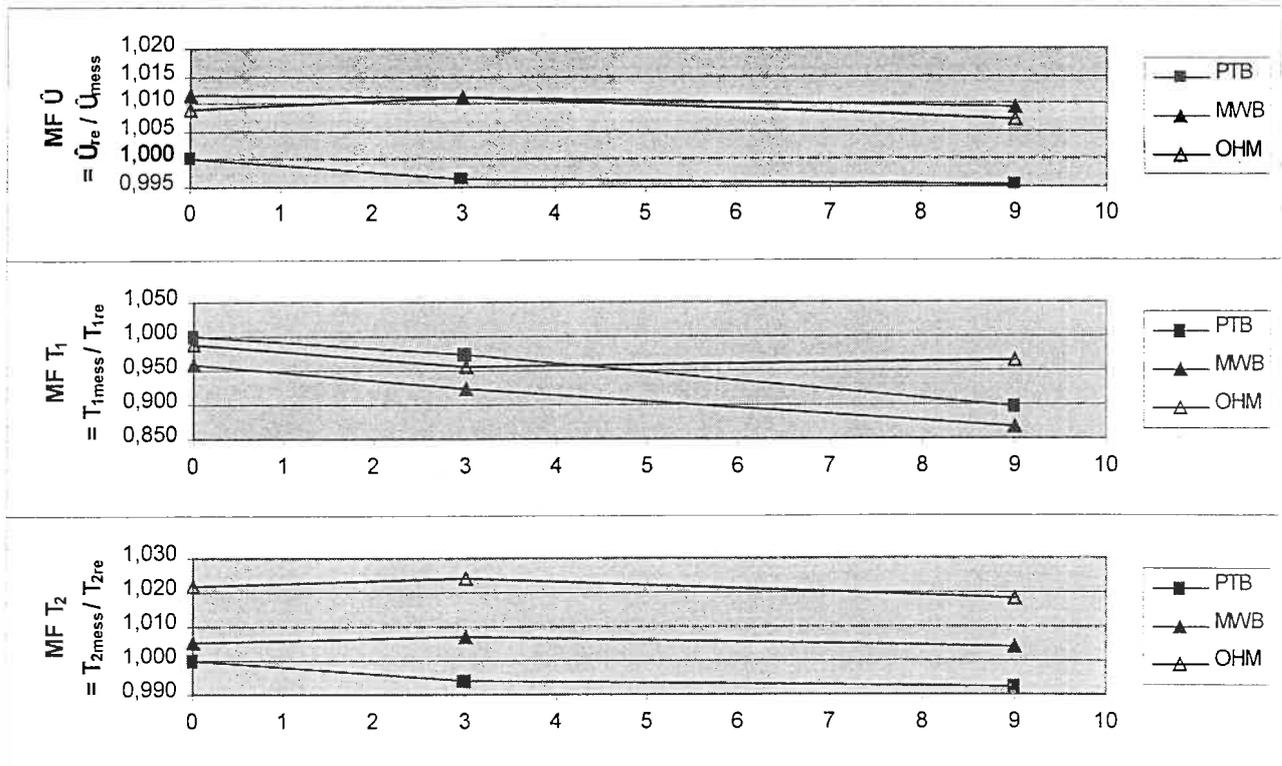
**Bild 21:** Maßstabsfaktoren von Scheitelwert, Stirn- und Rückenhalbwertszeit der Spannung an OHM bezogen auf  $Re$ , aufgetragen über dem Winkel zwischen den Teilern bei 0 m Zuleitungslänge. Angeschlossene Teiler: OHM//PTB (0°: OHM einzeln).

#### 10.4 Einfluß der Zuleitungslänge

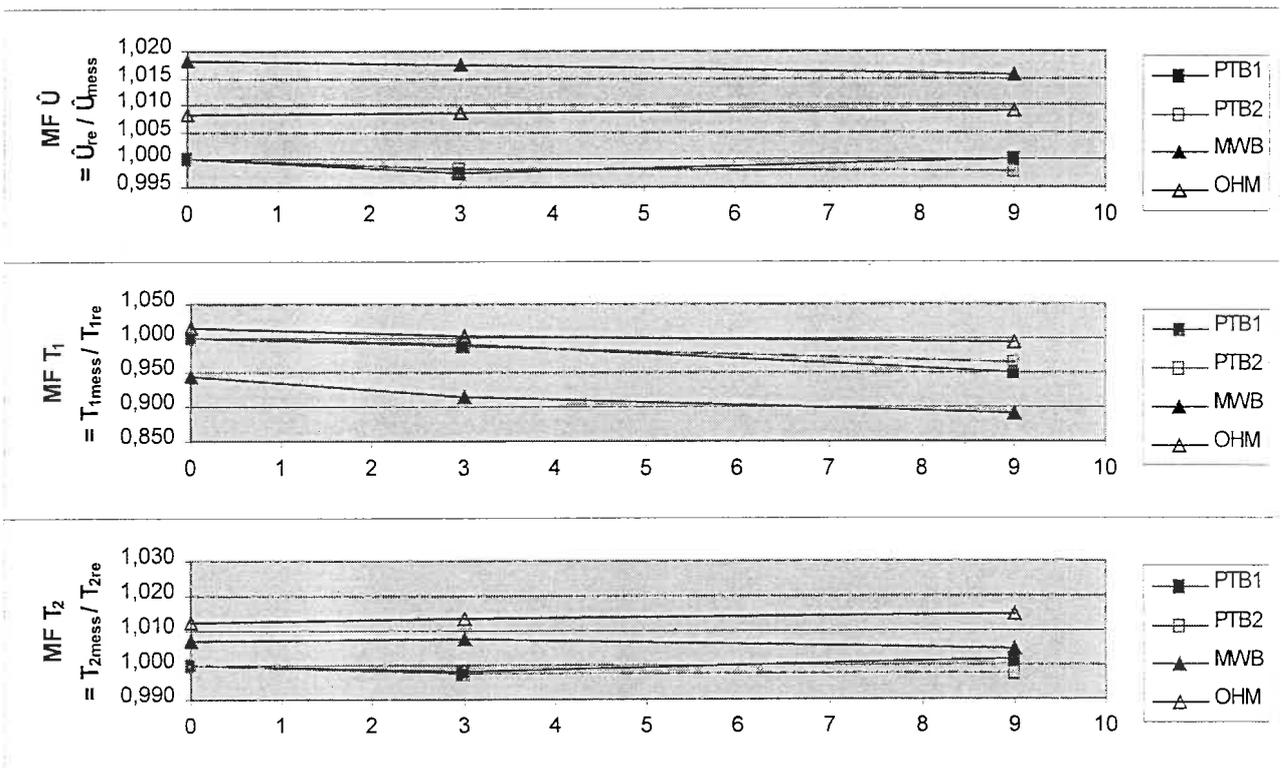
Die **Bilder 22 und 23** zeigen den Einfluß der Zuleitungslänge auf die Spannungsmessungen mit einzelnen Teilern in beiden Meßperioden, eine Anordnung, die bei Kalibrierungen normalerweise nicht vorkommt, die aber Informationen für die weiteren Betrachtungen liefert. Bezug ist die mit  $R_e$  gemessene Blitzstoßspannung. Es zeigt sich, daß der Einfluß der Zuleitungslänge auf die Messung von Scheitelwert und Rückenhalbwertszeit relativ gering ist, daß aber die von den gedämpft-kapazitiven Teilern gemessenen Stirnzeiten mit zunehmender Zuleitungslänge deutlich kürzer werden, während das Verhalten des ohmschen Teilers in dieser Hinsicht nicht so ausgeprägt ist, da dieser mit seiner geringen kapazitiven Last die erzeugte Spannung kaum beeinflusst. Der Abfall des Maßstabsfaktors der Stirnzeit über der Zuleitungslänge ist in der ersten Meßperiode etwa doppelt so hoch wie in der zweiten. Hierfür dürfte die unterschiedliche Art der Zuleitung verantwortlich sein. In der ersten Meßperiode wurde ein dünner Draht mit sehr viel höherer Induktivität benutzt, als sie das in der zweiten Meßperiode verwendete Aluminium-Rohr aufweist. Da in der zweiten Meßperiode die Teiler MWB und OHM im Gegensatz zur ersten Meßperiode nicht abwechselnd sondern nacheinander durchgemessen wurden, gibt es in den Diagrammen von **Bild 23** die Kurvenverläufe PTB1 und PTB2. PTB1 wurde im Rahmen der Messungen mit MWB aufgezeichnet, PTB2 hingegen gehört zum Meßabschnitt OHM.

Die Ergebnisse der Messungen mit parallelgeschalteten Teilern sind in den **Bildern 24 bis 31** dargestellt. Auch hier sind die Skalenfaktoren auf die Spannung am  $R_e$  bezogen. Das Verhalten des Teilers PTB bei diesen Messungen ist dem bei den Einzelmessungen sehr ähnlich. Die vom PTB gemessenen Scheitelwerte steigen im allgemeinen mit der Länge der Zuleitung leicht an und die Stirnzeiten werden deutlich kürzer. In etwa dem Maße, wie die Scheitelwerte ansteigen, werden die Rückenhalbwertszeiten kürzer.

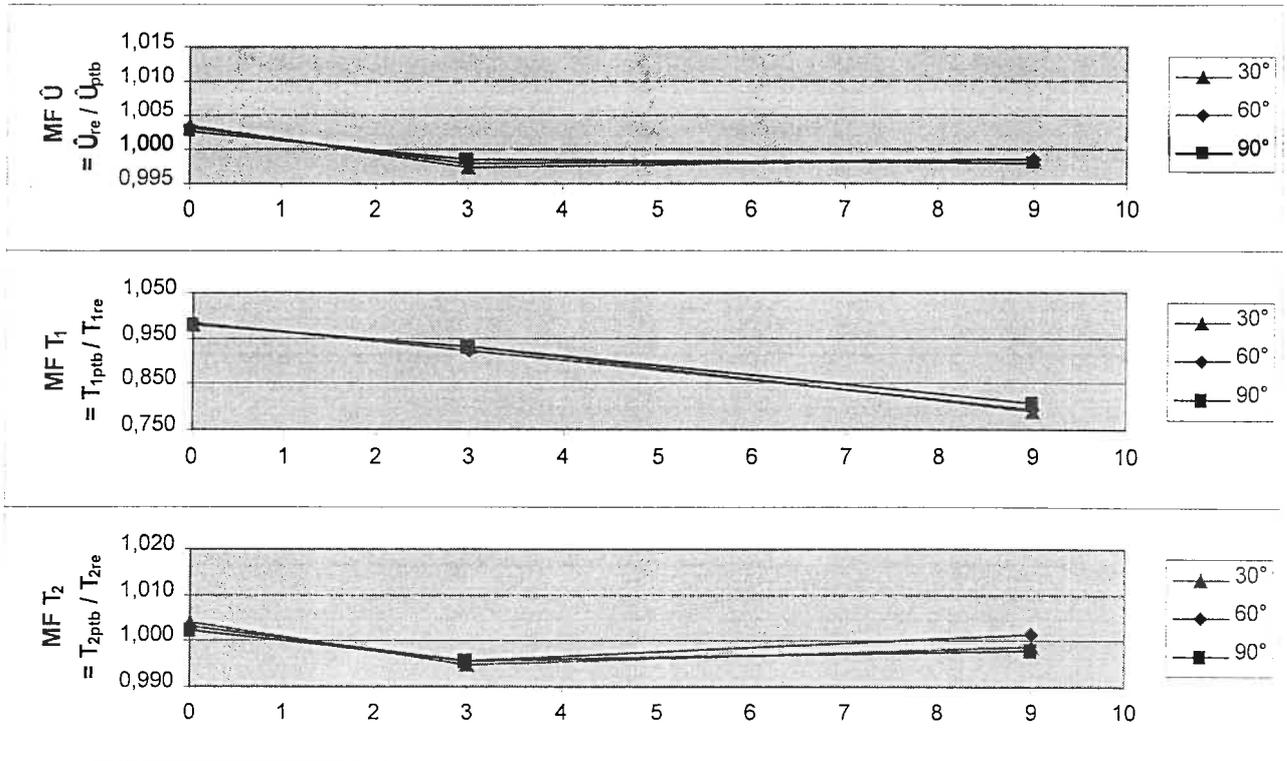
Die Teiler MWB und OHM zeigen ein unterschiedliches Verhalten in den beiden Meßperioden. Während der Verlauf der Kurven in den Diagrammen der zweiten Meßperiode dem Verlauf der Messungen des parallelgeschalteten PTB folgt, sind – besonders deutlich beim MWB zu erkennen – die Messungen der ersten Meßperiode durch den unter Abschnitt 10.3. bereits erwähnten Proximity-Effekt geprägt. Die Meßwerte des Teilers MWB werden zusätzlich von der mit steigender Zuleitungslänge steiler werdenden Wellenform beeinflusst. Die Stirnzeit der sowohl vom MWB als auch vom PTB gemessenen Blitzstoßspannung betrug bei 9 m Zuleitungslänge nur noch ca. 800 ns und lag damit unterhalb der für die Norm-Blitzstoßspannung erlaubten Toleranzen. Während der Teiler PTB den zugehörigen Scheitelwert noch richtig messen konnte, dürften die Meßwerte des Teilers MWB um ca. 1 % zu hoch liegen.



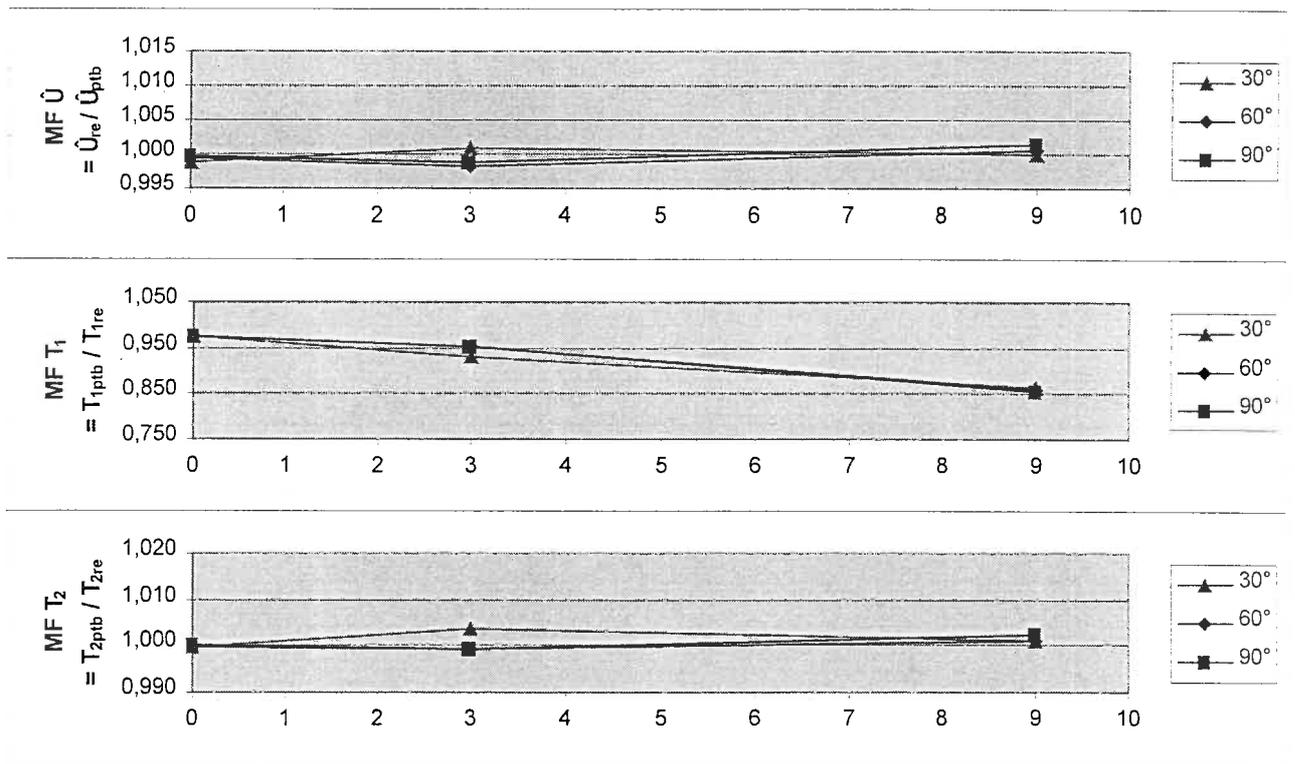
**Bild 22:** Maßstabsfaktoren von Scheitelwert, Stirn- und Rückenhalbwertszeit der Spannung an einzeln gemessenen Teilern bezogen auf  $Re$ , aufgetragen über der Zuleitungslänge in m. Messungen der ersten Meßperiode.



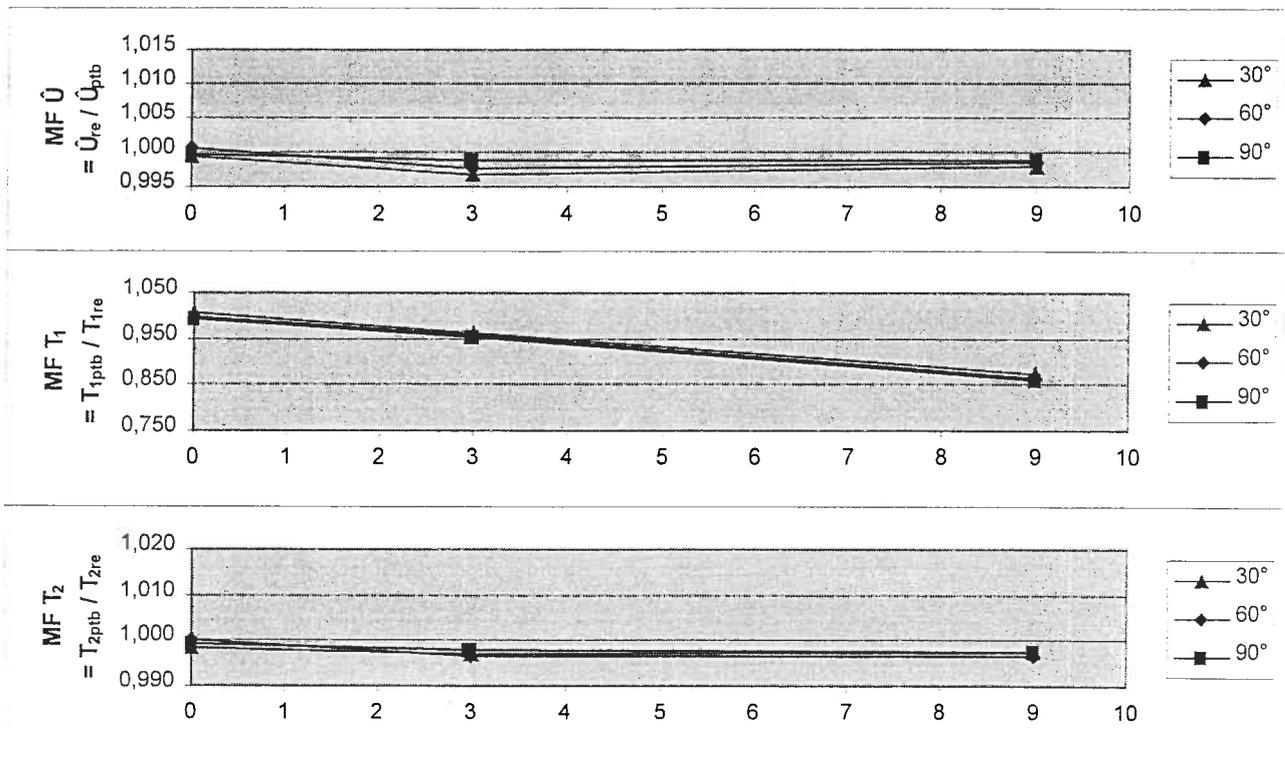
**Bild 23:** Maßstabsfaktoren von Scheitelwert, Stirn- und Rückenhalbwertszeit der Spannung an einzeln gemessenen Teilern bezogen auf  $Re$ , aufgetragen über der Zuleitungslänge in m. Messungen der zweiten Meßperiode.



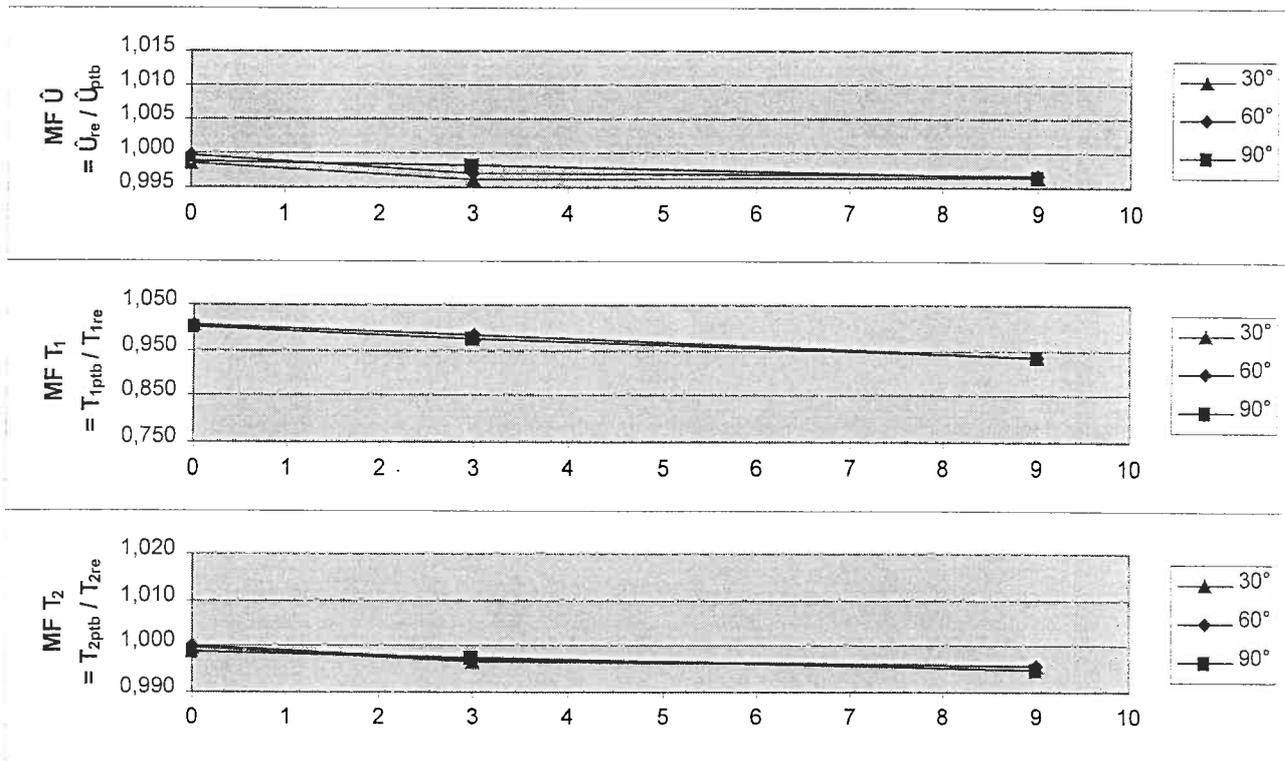
**Bild 24:** Maßstabsfaktoren von Scheitelwert, Stirn- und Rückenhalbwertszeit der Spannung am Teiler PTB parallelgeschaltet mit MWB bezogen auf  $Re$ , aufgetragen über der Zuleitungslänge in m. Messungen der ersten Meßperiode.



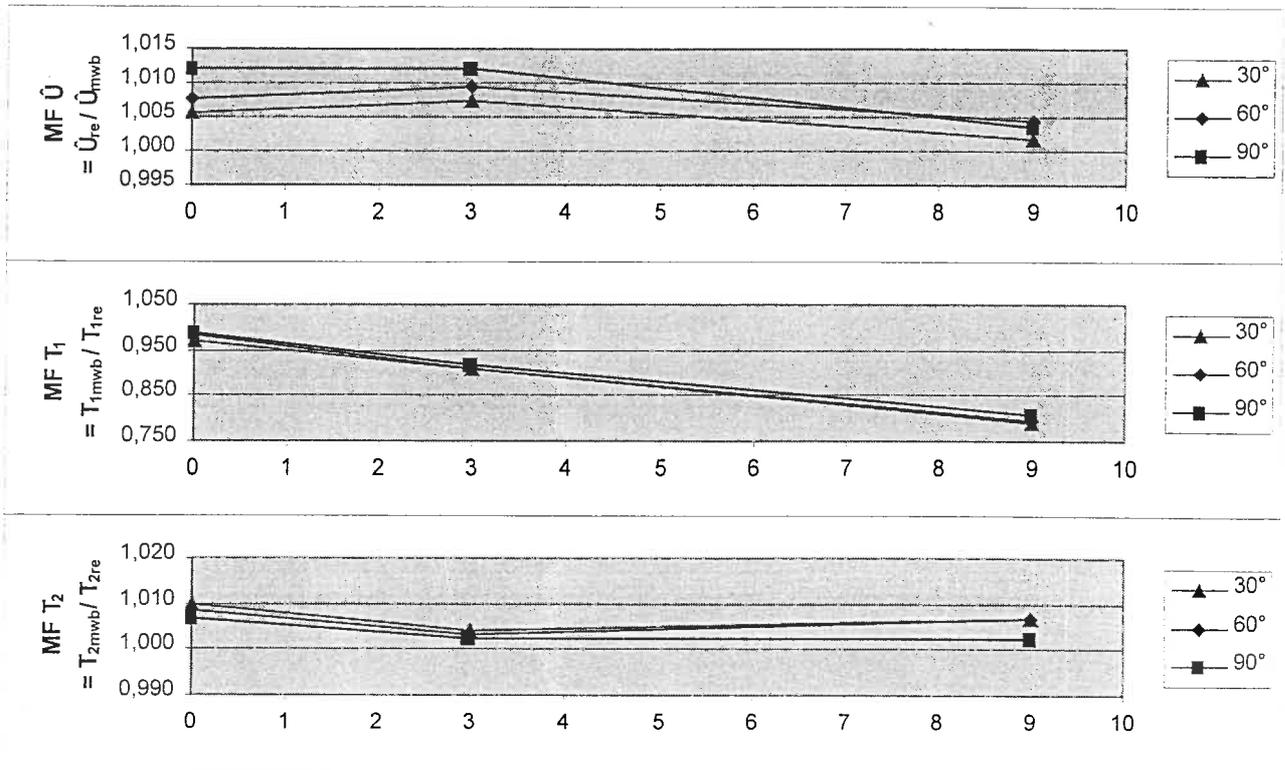
**Bild 25:** Maßstabsfaktoren von Scheitelwert, Stirn- und Rückenhalbwertszeit der Spannung am Teiler PTB parallelgeschaltet mit MWB bezogen auf  $Re$ , aufgetragen über der Zuleitungslänge in m. Messungen der zweiten Meßperiode.



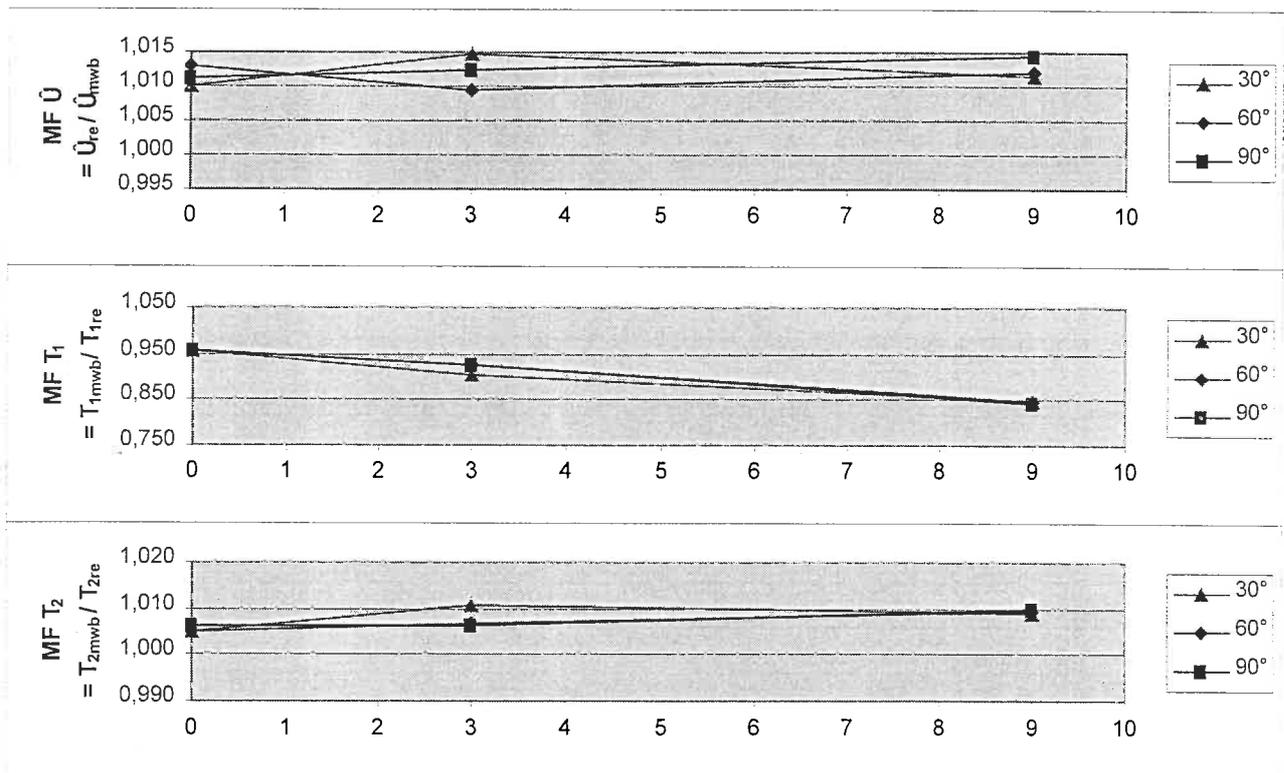
**Bild 26:** Maßstabsfaktoren von Scheitelwert, Stirn- und Rückenhalbwertszeit der Spannung am Teiler PTB parallelgeschaltet mit OHM bezogen auf Re, aufgetragen über der Zuleitungslänge in m. Messungen der ersten Meßperiode.



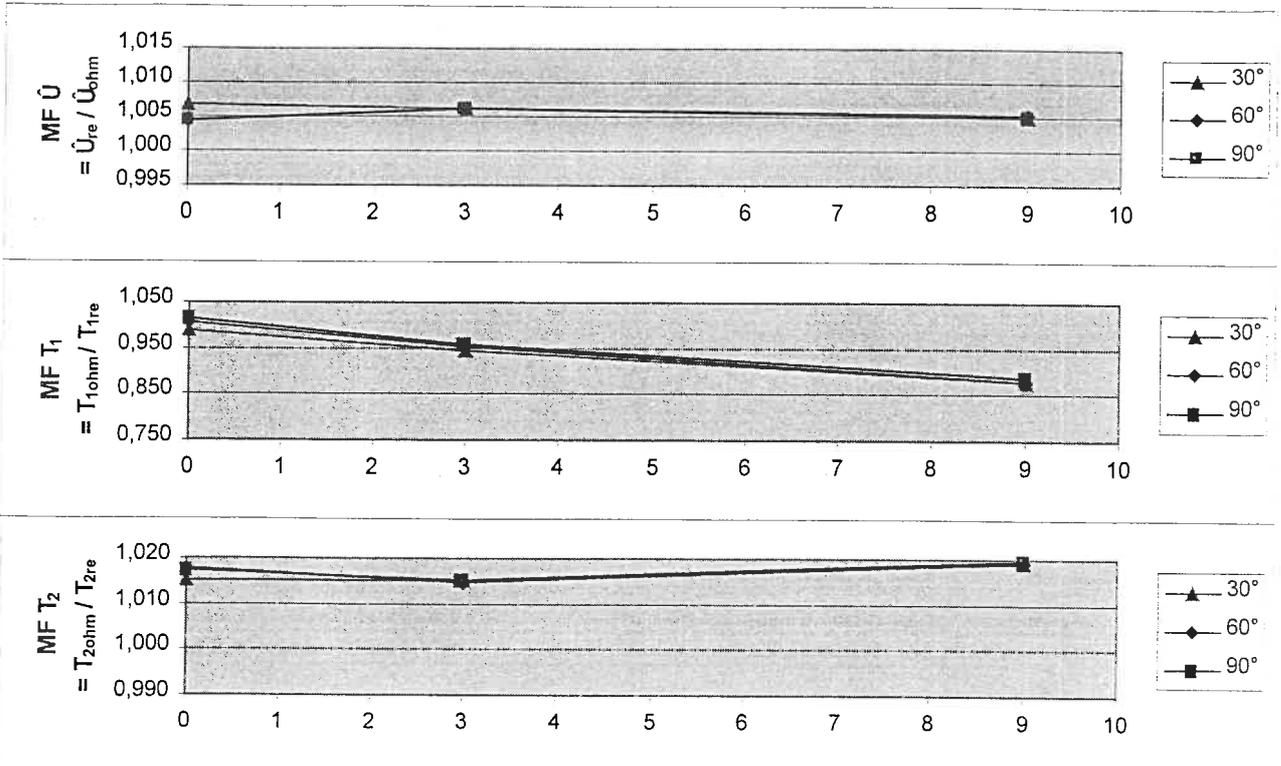
**Bild 27:** Maßstabsfaktoren von Scheitelwert, Stirn- und Rückenhalbwertszeit der Spannung am Teiler PTB parallelgeschaltet mit OHM bezogen auf Re, aufgetragen über der Zuleitungslänge in m. Messungen der zweiten Meßperiode.



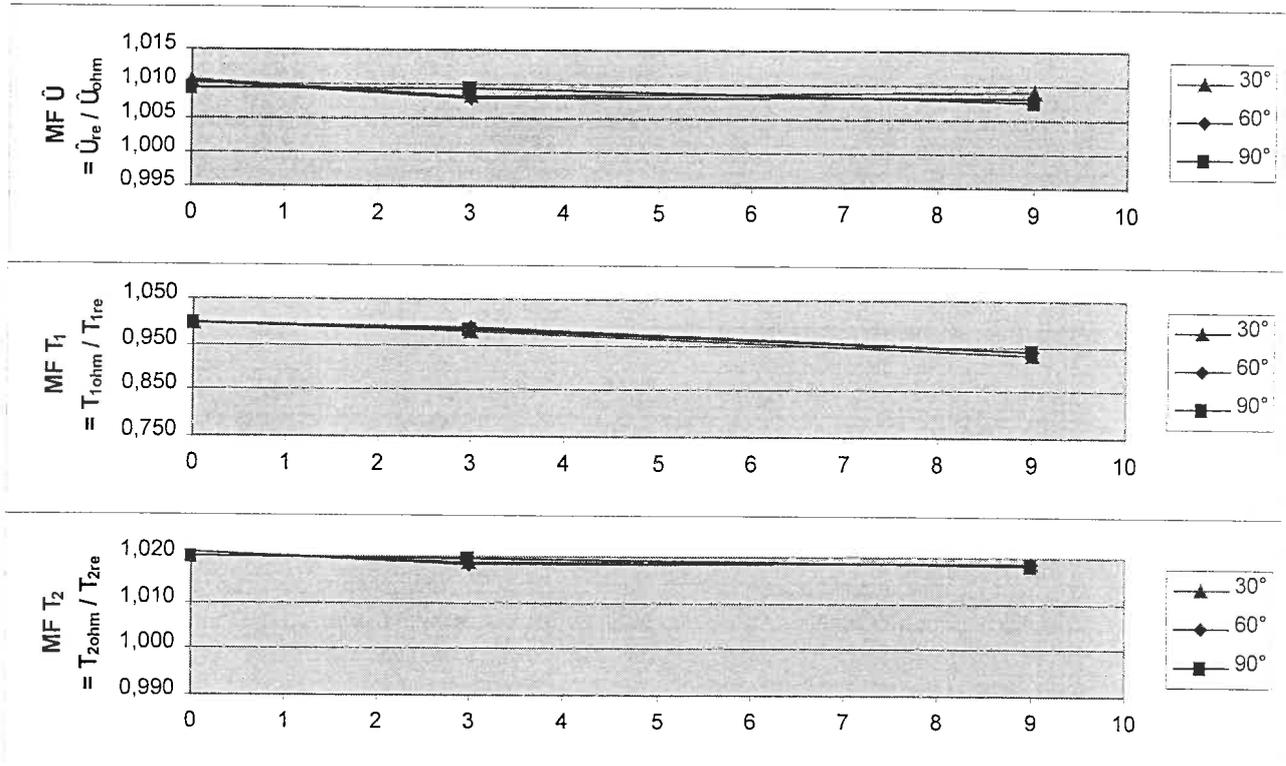
**Bild 28:** Maßstabsfaktoren von Scheitelwert, Stirn- und Rückenhalbwertszeit der Spannung am Teiler MWB parallelgeschaltet mit PTB bezogen auf Re, aufgetragen über der Zuleitungslänge in m. Messungen der ersten Meßperiode.



**Bild 29:** Maßstabsfaktoren von Scheitelwert, Stirn- und Rückenhalbwertszeit der Spannung am Teiler MWB parallelgeschaltet mit PTB bezogen auf Re, aufgetragen über der Zuleitungslänge in m. Messungen der zweiten Meßperiode.



**Bild 30:** Maßstabsfaktoren von Scheitelwert, Stirn- und Rückenhalbwertszeit der Spannung am Teiler OHM parallelgeschaltet mit PTB bezogen auf  $Re$ , aufgetragen über der Zuleitungslänge in m. Messungen der ersten Meßperiode.



**Bild 31:** Maßstabsfaktoren von Scheitelwert, Stirn- und Rückenhalbwertszeit der Spannung am Teiler OHM parallelgeschaltet mit PTB bezogen auf  $Re$ , aufgetragen über der Zuleitungslänge in m. Messungen der zweiten Meßperiode.

### 10.5 Maßstabsfaktoren der Hochspannungs-Kalibrierung

Die bei den verschiedenen Zuleitungslängen und unter den verschiedenen Winkeln mit den Teilerkombinationen PTB-MWB und PTB-OHM parallel gemessenen Spannungen gingen in eine reguläre Hochspannungs-Kalibrierung der Teiler MWB und OHM mit dem Referenz-Normal PTB ein. Die Kalibrierergebnisse für die beiden Meßperioden sind in den **Bildern 32 bis 35** dargestellt. Die Mittelwerte der dabei gefundenen Maßstabsfaktoren und ihre 95%-Vertrauensbereiche sind in **Tabelle 5** zusammengefaßt.

**Tabelle 5:** Mittelwerte der Maßstabsfaktoren und ihre 95%-Vertrauensbereiche bei den Kalibrierungen von Teiler MWB und Teiler OHM mit dem Referenzteiler PTB

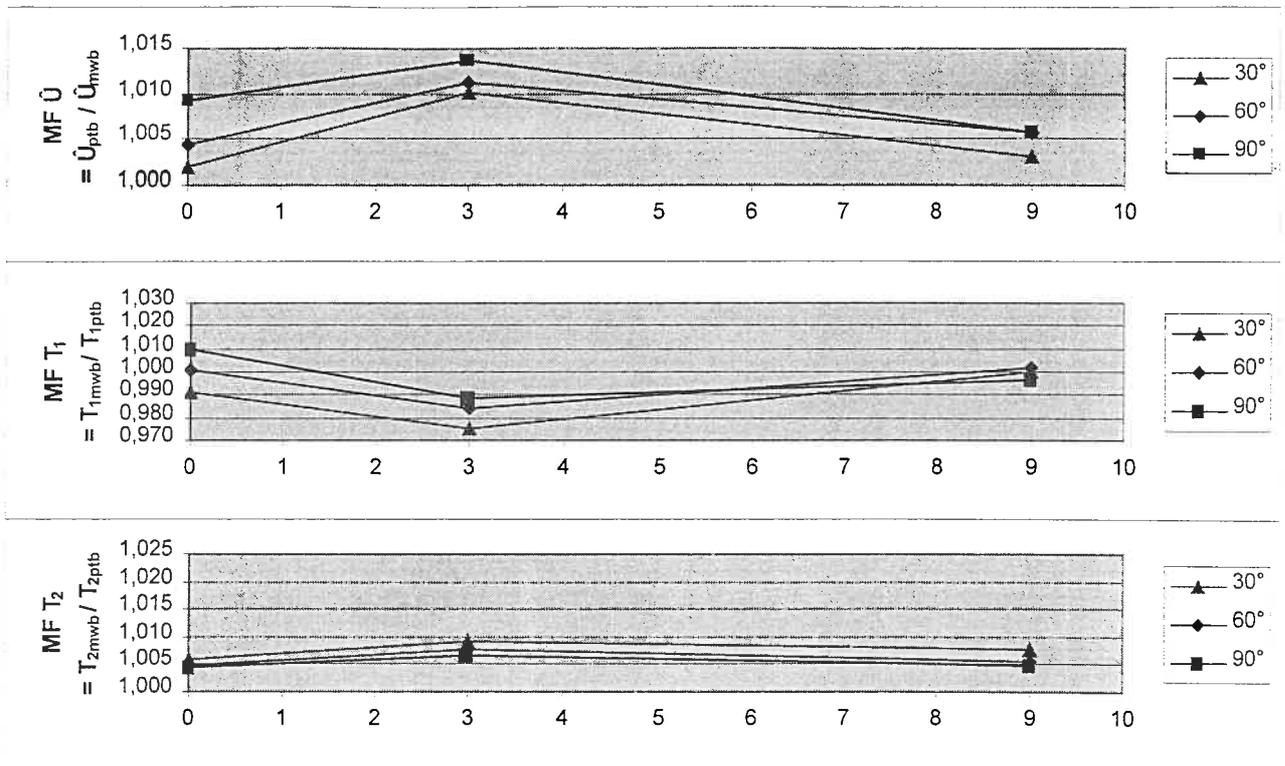
Teiler:	MWB	Bezug:	PTB
1. Meßperiode	90 Meßwerte		
	MF-Ü	MF-T <sub>1</sub>	MF-T <sub>2</sub>
Mittelwert:	1,0073	0,9942	1,0063
95 %	0,082%	0,264%	0,045%
2. Meßperiode	90 Meßwerte		
	MF-Ü	MF-T <sub>1</sub>	MF-T <sub>2</sub>
Mittelwert:	1,0126	0,9811	1,0057
95 %	0,033%	0,157%	0,037%
beide Meßperioden	180 Meßwerte		
	MF-Ü	MF-T <sub>1</sub>	MF-T <sub>2</sub>
Mittelwert:	1,0099	0,9876	1,0060
95 %	0,059%	0,183%	0,051%

Teiler:	OHM	Bezug:	PTB
1. Meßperiode	90 Meßwerte		
	MF-Ü	MF-T <sub>1</sub>	MF-T <sub>2</sub>
Mittelwert:	1,0068	1,0049	1,0191
95 %	0,044%	0,319%	0,060%
2. Meßperiode	90 Meßwerte		
	MF-Ü	MF-T <sub>1</sub>	MF-T <sub>2</sub>
Mittelwert:	1,0115	0,9989	1,0220
95 %	0,027%	0,160%	0,039%
beide Meßperioden	180 Meßwerte		
	MF-Ü	MF-T <sub>1</sub>	MF-T <sub>2</sub>
Mittelwert:	1,0091	1,0019	1,0206
95 %	0,043%	0,184%	0,042%

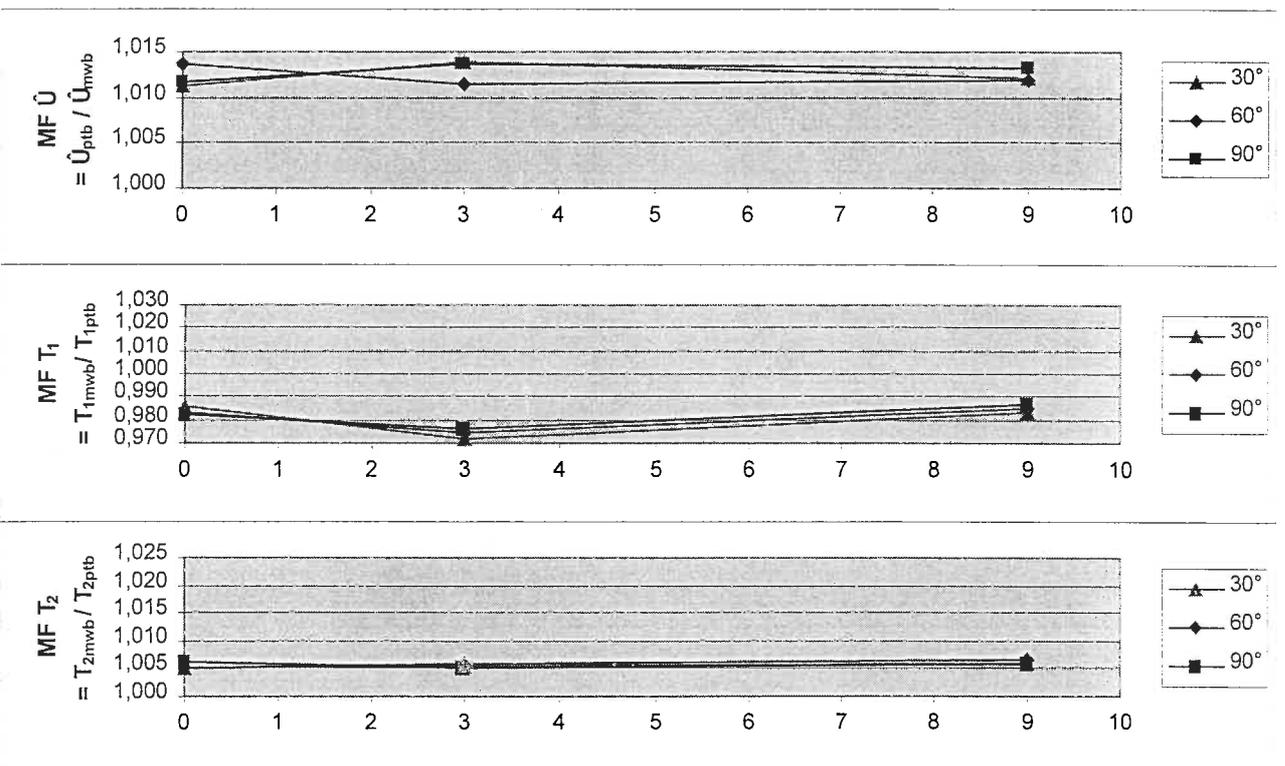
Die Meßunsicherheiten vom Typ A bei der Ermittlung der Maßstabsfaktoren eines einzelnen Kalibrierpunktes lagen zwischen 0,05 % und 0,13 % beim Scheitelwert, zwischen 0,26 % und 0,71 % bei der Stirnzeit und 0,09 % und 0,19 % bei der Rückenhalbwertszeit. Beim Teiler MWB und einer Zuleitungslänge von 9 m fielen die Meßunsicherheiten für die Stirnzeit bei Winkeln von 60° und 90° mit ca. 1 % etwas aus dem üblichen Rahmen.

Die Werte in **Tabelle 5** zeigen, daß die Vertrauensbereiche in der ersten Meßperiode deutlich größer sind als in der zweiten. Die in der ersten und zweiten Meßperiode ermittelten Maßstabsfaktoren für den Scheitelwert und die Stirnzeit unterscheiden sich um 0,5 % und 1,3 % beim Teiler MWB, beim Teiler OHM liegen die entsprechenden Unterschiede bei 0,45 % und 0,6 %. Während diese Differenzen im Rahmen der Kalibrierung eines anerkannten Meßsystems noch akzeptabel sind, dürften sie für die Kalibrierung eines Referenz-Meßsystemes schon zu groß sein.

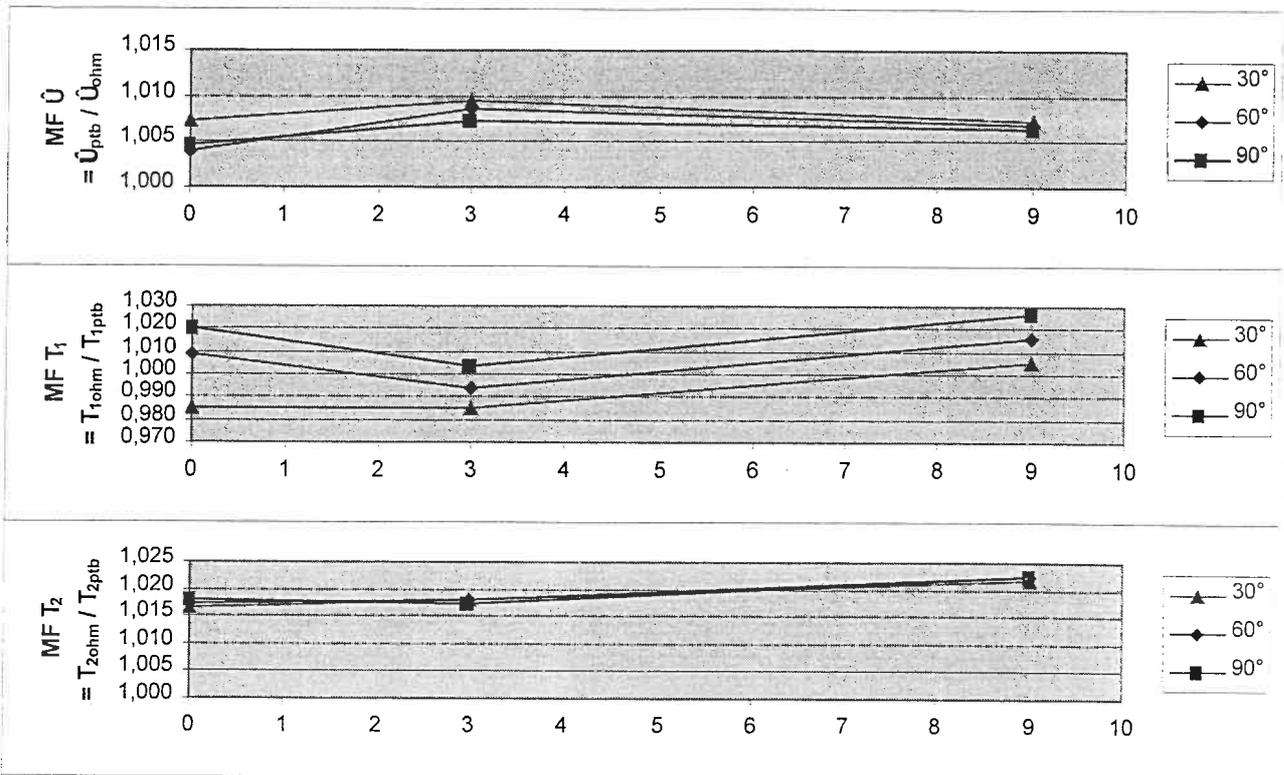
Die Diagramme in den **Bildern 32 bis 35** zeigen die Unterschiede zwischen den Kalibrierungen der ersten und zweiten Meßperiode. Während die Meßergebnisse der zweiten Meßperiode annähernd unabhängig von der Zuleitungslänge und dem Winkel zwischen den Zuleitungen zu den Teilern sind, werden die Ergebnisse der ersten Meßperiode vom Proximity-Effekt und der mit steigender Zuleitungslänge steiler werdenden Impulsform beeinflusst.



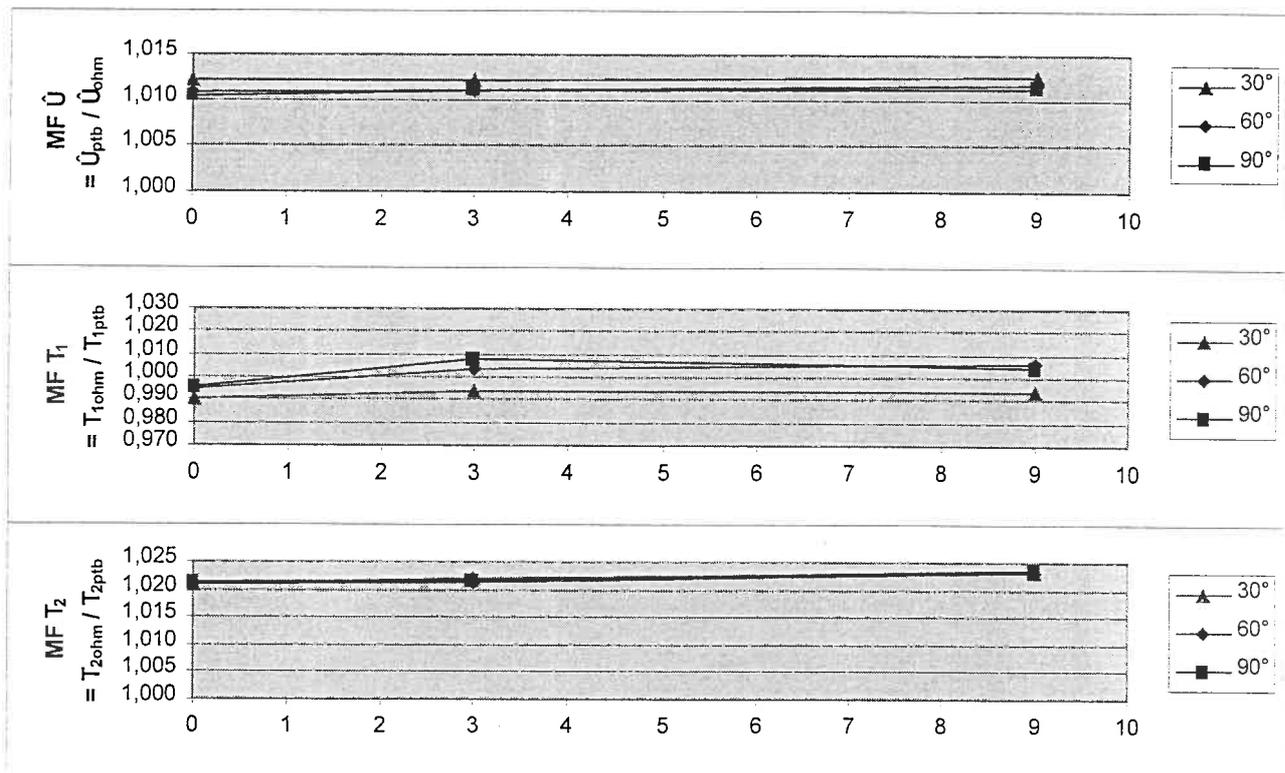
**Bild 32:** Maßstabsfaktoren von Scheitelwert, Stirn- und Rückenhalbwertszeit der Spannung am Teiler MWB bezogen auf den Referenzteiler PTB, aufgetragen über der Zuleitungslänge bei verschiedenen Teilerwinkeln. Messungen der ersten Meßperiode.



**Bild 33:** Maßstabsfaktoren von Scheitelwert, Stirn- und Rückenhalbwertszeit der Spannung am Teiler MWB bezogen auf den Referenzteiler PTB, aufgetragen über der Zuleitungslänge bei verschiedenen Teilerwinkeln. Messungen der zweiten Meßperiode.



**Bild 34:** Maßstabsfaktoren von Scheitelwert, Stirn- und Rückenhalbwertszeit der Spannung am Teiler OHM bezogen auf den Referenzteiler PTB, aufgetragen über der Zuleitungslänge bei verschiedenen Teilerwinkeln. Messungen der ersten Meßperiode.



**Bild 35:** Maßstabsfaktoren von Scheitelwert, Stirn- und Rückenhalbwertszeit der Spannung am Teiler OHM bezogen auf den Referenzteiler PTB, aufgetragen über der Zuleitungslänge bei verschiedenen Teilerwinkeln. Messungen der zweiten Meßperiode.

## 10.6 Beeinflussungsmessungen

Die Ergebnisse der Beeinflussungsmessungen zeigen deutliche Unterschiede im Verhalten der einzelnen Teiler und deutliche Unterschiede zwischen den Anschlußvarianten der Meßkabel am Meßgerät, aber keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich der Winkel zwischen den Zuleitungen bei parallel betriebenen Teilern.

In **Tabelle 6** sind die Ergebnisse der Messungen an einzelnen Teilern ohne - diese Anordnung kam bei den Hochspannungsmessungen nicht vor - und mit angeschlossenem Re dargestellt. **Tabelle 7** zeigt die Ergebnisse der Messungen an parallelgeschalteten Teilern, ebenfalls mit angeschlossenem Re.

**Tabelle 6:** Ergebnisse der Beeinflussungsmessungen, Teiler einzeln und Teiler einzeln mit angeschlossenem Re

Teiler einzeln	DKD-Kanal	HV-Kanal	Anschluß über	Ü max. ges. [kV]	Ü max. ges. [%]	Ü >500ns [kV]	Ü >500ns [%]
<b>Re</b>							
	1 / aus	aus	AgI.Platte	0,35	0,21	0,14	0,08
	1 / aus	aus	Vorteiler	9,57	5,63	3,15	1,85
<b>PTB</b>							
	1 / aus	aus	AgI.Platte	0,26	0,15	0,18	0,11
	1 / aus	aus	Vorteiler	1,42	0,84	1,11	0,65
<b>MWB</b>							
	1 / aus	aus	AgI.Platte	0,88	0,52	0,75	0,44
	1 / aus	aus	Vorteiler	3,26	1,92	1,57	0,92
<b>OHM</b>							
	1 / aus	aus	AgI.Platte	0,23	0,14	0,18	0,11
	1 / aus	aus	Vorteiler	0,34	0,20	0,34	0,20
<b>Re-PTB</b>							
Re	1	aus	AgI.Platte	1,05	0,62	0,2	0,12
PTB	2	aus	AgI.Platte	0,5	0,29	0,41	0,24
Re	1	aus	Vorteiler	13,5	7,94	5,6	3,29
PTB	2	aus	Vorteiler	5,6	3,29	3	1,76
Re	1	aus	AgI.Platte	0,52	0,31	0,5	0,29
PTB	2	aus	Vorteiler	1,15	0,68	0,52	0,31
<b>Re-MWB</b>							
Re	1 / aus		AgI.Platte	1,1	0,65	0,1	0,06
MWB		1 / aus	AgI.Platte	1,05	0,62	0,54	0,32
Re	1 / aus		Vorteiler	15,3	9,00	5,4	3,18
MWB		1 / aus	Vorteiler	47,8	28,12	14,7	8,65
<b>Re-OHM</b>							
Re	1 / aus		AgI.Platte	0,95	0,56	0,15	0,09
OHM		frei / 2	AgI.Platte	0,3	0,18	0,1	0,06
Re	1 / aus		Vorteiler	14,1	8,29	5,2	3,06
OHM		frei / 2	Vorteiler	13,6	8,00	4,2	2,47

Die gemessenen Signale wurden in zwei Zeitbereichen ausgewertet: Zum einen wurde die höchste gemessene Interference ermittelt ( $\hat{U}$  max. ges.) – dieser Wert lag im allgemeinen im Zeitbereich kleiner 500 ns – zum anderen wurde die Interference im für die Spannungsmessungen relevanten Zeitbereich ab 500 ns ( $\hat{U} > 500$  ns) festgestellt.

Die höchsten Beeinflussungsspannungen wurden mit dem Teiler MWB gemessen, gefolgt von den Teilern PTB, Re und OHM. In dieser Reihenfolge läßt sich ein Trend bezüglich der Bauart der Teiler und der Abmessungen der Teiler erkennen.

Von den untersuchten Anschlußvarianten war die Variante, bei der alle Meßkabel direkt an die Vorteiler der Meßsysteme angeschlossen waren, eindeutig die schlechteste. Hier lagen die Spannungswerte auch im Zeitbereich  $> 500$  ns noch bei mehreren Prozent, so daß die Durchführung einer Kalibrierung nicht möglich wäre. War nur ein Teiler ohne angeschlossenen Re mit dem Meßsystem verbunden, ging die Interference deutlich zurück, lag aber immer noch über den Werten bei den anderen Anschlußvarianten.

Die durchgängig besten Ergebnisse wurden erzielt, wenn alle Meßkabel über die direkt mit der Erdplatte des Hochspannungslabors verbundene Ausgleichsplatte geführt wurden, so daß die Schirme der Meßkabel zusätzlich an dieser Stelle geerdet waren. Die bei den ohmschen Teilern Re und OHM gemessenen Werte lagen in dieser Anordnung bei Zeiten  $> 500$  ns im Bereich 0,1 % und darunter. Der Teiler PTB kam in der Parallelschaltung mit andern Teilern nicht über 0,2 %, nur bei der Einzelmessung mit angeschlossenem Re lag er etwas darüber. Die höchsten Werte wurden beim Teiler MWB gemessen, mit 0,2 bis 0,35 % lagen auch sie noch im ungefährlichen Bereich.

Bei den Versuchen mit dem Teiler PTB wurde sowohl bei der Einzelmessung mit angeschlossenem Re als auch in der Parallelschaltung mit den andern Teilern eine zusätzliche Anschlußvariante geprüft. In dieser Variante wurde das Meßkabel vom PTB direkt an den Vorteiler angeschlossen, alle anderen Meßkabel wurden über die Ausgleichsplatte geführt. Bei der Einzelmessung lag die Interference mit 0,35 % etwas über der Variante „Ausgleichsplatte“, bei den Parallelschaltungen verbesserten sich die Werte des PTB leicht, während die Werte der anderen Teiler ein wenig angehoben wurden.

Die durchgeführten Messungen unterstreichen die Bedeutung des „Interference Tests“ bei Kalibrierungen. Eine ungünstige Verbindung der Teiler mit den Meßgeräten kann schnell zu Beeinflussungen führen, die eine ordnungsgemäße Kalibrierung unmöglich machen.

**Tabelle 7:** Ergebnisse der Beeinflussungsmessungen, Teiler parallel mit angeschlossenem Re

Teiler parallel	DKD Kanal	HV-Kanal	Anschluß über	Ū max. ges. [kV]	Ū max. ges. [%]	Ū >500ns [kV]	Ū >500ns [%]
<b>PTB-MWB (30°)</b>							
Re	1		Agl.Platte	0,4	0,24	0,1	0,06
PTB	2		Agl.Platte	0,3	0,18	0,3	0,18
MWB		1 / frei	Agl.Platte	0,9	0,53	0,45	0,26
Re	1		Vorteiler	13,2	7,76	5,1	3,00
PTB	2		Vorteiler	5,2	3,06	2,7	1,59
MWB		1 / frei	Vorteiler	39,4	23,18	13,5	7,94
Re	1		Agl.Platte	0,5	0,29	0,15	0,09
PTB	2		Vorteiler	0,75	0,44	0,2	0,12
MWB		1 / frei	Agl.Platte	0,9	0,53	0,15	0,09
<b>PTB-MWB (60°)</b>							
Re	1		Agl.Platte	0,4	0,24	0,05	0,03
PTB	2		Agl.Platte	0,3	0,18	0,29	0,17
MWB		1 / frei	Agl.Platte	0,8	0,47	0,6	0,35
Re	1		Vorteiler	13,8	8,12	5,2	3,06
PTB	2		Vorteiler	5,4	3,18	2,7	1,59
MWB		1 / frei	Vorteiler	40,2	23,65	14	8,24
<b>PTB-MWB (90°)</b>							
Re	1		Agl.Platte	0,36	0,21	0,06	0,04
PTB	2		Agl.Platte	0,06	0,04	0,06	0,04
MWB		1 / frei	Agl.Platte	0,8	0,47	0,37	0,22
Re	1		Vorteiler	14,5	8,53	5,2	3,06
PTB	2		Vorteiler	5,4	3,18	2,8	1,65
MWB		frei / 2	Vorteiler	15,8	9,29	5,5	3,24
<b>PTB-OHM (30°)</b>							
Re	1		Agl.Platte	0,4	0,24	0,1	0,06
PTB	2		Agl.Platte	0,35	0,21	0,3	0,18
OHM		frei / 2	Agl.Platte	0,28	0,16	0,06	0,04
Re	1		Vorteiler	13,3	7,82	5	2,94
PTB	2		Vorteiler	5,3	3,12	2,6	1,53
OHM		frei / 2	Vorteiler	15,3	9,00	5,4	3,18
Re	1		Agl.Platte	0,6	0,35	0,21	0,12
PTB	2		Vorteiler	0,82	0,48	0,23	0,14
OHM		frei / 2	Agl.Platte	1	0,59	0,2	0,12
<b>PTB-OHM (60°)</b>							
Re	1		Agl.Platte	0,32	0,19	0,1	0,06
PTB	2		Agl.Platte	0,34	0,20	0,28	0,16
OHM		frei / 2	Agl.Platte	0,35	0,21	0,05	0,03
Re	1		Vorteiler	14,1	8,29	5,2	3,06
PTB	2		Vorteiler	5,3	3,12	2,6	1,53
OHM		frei / 2	Vorteiler	15,8	9,29	5,4	3,18
<b>PTB-OHM (90°)</b>							
Re	1		Agl.Platte	0,38	0,22	0,07	0,04
PTB	2		Agl.Platte	0,34	0,20	0,29	0,17
OHM		frei / 2	Agl.Platte	0,35	0,21	0,07	0,04
Re	1		Vorteiler	13,3	7,82	5	2,94
PTB	2		Vorteiler	5,3	3,12	2,6	1,53
OHM		frei / 2	Vorteiler	15,3	9,00	5,4	3,18

## 11 Empfehlungen:

Im Rahmen dieser Untersuchung konnten einige Punkte herausgearbeitet werden, die für die Qualität einer Kalibrierung von Bedeutung sind. Es konnte kein Hinweis darauf gefunden werden, daß der Typ des zu kalibrierenden Teilers einen Einfluß auf die Kalibrierergebnisse hat. Außerdem können die Einflüsse der Länge der Zuleitung zum gemeinsamen Anschlußpunkt der Teiler und der Winkel zwischen den Zuleitungen vom Anschlußpunkt zu den Teilern bei einem sorgfältigen Versuchsaufbau auch bei Kalibrierungen von Referenz-Teilern vernachlässigt werden, auch wenn – wie die Ergebnisse der zweiten Meßperiode zeigen – wohl ein Anschluß beider Teiler direkt an der Spannungserzeugung vorzuziehen ist.

Dagegen müssen den Abständen zu geerdeten und spannungsführenden Teilen bei der Planung des Versuchsaufbaus besondere Beachtung geschenkt werden, insbesondere, wenn Teiler mit großen Abmessungen kalibriert werden sollen, da zu geringe Abstände – wie die Ergebnisse der ersten Meßperiode zeigen – die Meßergebnisse leicht beeinflussen können.

Die Beeinflussungsmessung sollte unbedingt vor Beginn der Kalibrierung durchgeführt werden, um die Qualität des Anschlusses der Meßleitungen zu überprüfen. Die Versuche zeigen, daß eine direkte Erdung des Meßkabelschirmes am Erdungssystem des Labors vor dem Anschluß des Meßkabels am Meßsystem Vorteile bringen kann.

Daß die Wellenform der Blitzstoßspannung nicht plötzlich durch eine zu lange Zuleitung zum gemeinsamen Anschlußpunkt der Teiler außerhalb der Toleranzen für die Standard-Blitzstoßspannung liegt, dürfte im Rahmen einer normalen Kalibrierung eine Selbstverständlichkeit sein.

**Förderhinweis:** Dieses Forschungsvorhaben (AiF-FV-Nr. 11358n) wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert. Die FGH bedankt sich für diese Unterstützung.

### Schrifttum:

- [1] International Electrotechnical Commission Publication 60060-2:1994: High-voltage test techniques - Part 2: Measuring systems
- [2] Hällström, J. et al.: European Intercomparison of H.V. Impulse Measuring Systems with Digital Recorder. 10<sup>th</sup> Int. Symp. on High Voltage (ISH), Montreal/Canada 1997, vol. 4, pp 7 - 12.

### Veröffentlichungen:

- Koester, H.-J.: Influence of the test set-up in h.v. divider calibrations.  
Zur Veröffentlichung beim "International Symposium on High-Voltage Engineering 1999", London, eingereicht und akzeptiert.