

Forschungsinst. der FGH eV  
Name der Forschungsstelle(n)

11611 N / 3  
AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.07.98 bis 31.12.00  
Bewilligungszeitraum

**Schlußbericht für den Zeitraum : 01.07.98 bis 31.12.00**

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten Forschungsvorhaben

Forschungsthema : Metalloxid-Überspannungsableiter in Öl

Mannheim, 25. Juni 2001

Ort, Datum

Unterschrift der/des Projektleiter(s)

**Inhalt**

1	Zusammenfassung	2
2	Problemstellung	3
3	Zielsetzung der Untersuchungen und Versuchsprogramm	5
4	Aufbau und Durchführung der Versuche	9
	4.1 Versuchsaufbau	9
	4.2 Versuchsdurchführung	13
	4.3 Versuchsvaristoren	14
5	Festlegung der Dauerspannungen	16
6	Ergebnisse	19
	6.1 Vergleich der Varistoren im Neuzustand in Öl und Luft	19
	6.2 Langzeitalterung in Neuöl	21
	6.3 Langzeitalterung in Altöl	29
7	Schlussfolgerungen	31
8	Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsvorhabens für kleine und mittlere Unternehmen	32
9	Beabsichtigte Umsetzung der Forschungsergebnisse	33
10	Literaturverzeichnis	34
	Anhang: Zusammenstellung der Messergebnisse	35

## 1 Zusammenfassung

Der Trend, Anlagen in der Ausführung einfacher, kleiner und damit wirtschaftlicher zu bauen, führt u.a. dazu, mehr und mehr von direkten Kabeleinführungen in die Geräte Gebrauch zu machen. Dies trifft insbesondere auf direkte Kabeleinführungen in Leistungstransformatoren zu. Auf der anderen Seite ist ein Überspannungsschutz durch Überspannungsableiter gerade für Leistungstransformatoren aufgrund ihres hohen Werts und aufgrund ihrer Bedeutung für die Versorgungszuverlässigkeit vorrangig und Ableiter werden in der Regel mit kurzen Zuleitungen direkt vor dem Transformator eingebaut.

Bei direkten Kabeleinführung in solche Transformatoren ist ein Überspannungsschutz durch Freiluftableiter nicht mehr möglich. Hierfür bedarf es Konzepte, die eine Integration der Ableiter in den Transformator ermöglichen. Bisher haben Bedenken insbesondere der Langzeitstabilität der Metalloxidvaristoren solche Lösungen verhindert. Auf der anderen Seite werden aus wirtschaftlichen Gründen im Ausland bereits heute Metalloxidableiter in Verteiltransformatoren integriert und bisher sind keine negativen Erfahrungen bekannt geworden.

Aus diesem Grund hat sich das vorliegende Forschungsvorhaben mit der Langzeitstabilität von Varistoren und den für ihren Nachweis erforderlichen zeitraffenden Alterungsverfahren beschäftigt. Hierzu wurden Langzeitversuche in Öl mit unterschiedlicher Qualität mit Temperaturen zwischen 120 °C und 195 °C durchgeführt. Die Versuchszeiten lagen zwischen 1000 Stunden und 6000 Stunden. Dabei wurden die Verlustleistungen, das Energieaufnahmevermögen und die Spannungsfestigkeit der Varistoren vor und nach der Langzeitalterung vergleichend beurteilt.

Für die Versuche standen Metalloxidvaristoren von zwei Herstellern zur Verfügung, die für die Anwendung solcher Ableiter in Deutschland von höchster Bedeutung sind.

Die Ergebnisse aus den Versuchen belegen die hervorragende Langzeitstabilität. Nach den Langzeitversuchen trat lediglich in der Verlustleistung bei der Dauerspannung der Varistoren leichte Veränderungen auf. Sie waren bei beiden Varistortypen nach Alterung über 1000 Stunden in Öl mit 195 °C und bei einem Hersteller nach einer Alterung über 3000 Stunden in Öl mit 155 °C feststellbar. Die Veränderungen waren jedoch gering und sind aufgrund der statistischen Streuungen in den Varistoren nicht einwandfrei belegt. Die Verlustleistungen bei höheren Spannungen, das Energieaufnahmevermögen und die Spannungsfestigkeit blieben in allen Versuchsvarianten unverändert.

Es hat sich erwiesen, dass sich die Langzeitstabilität von Metalloxidvaristoren in Öl durch eine 1000stündige Langzeitalterung bei 195 °C betriebsrelevant nachweisen lässt. Dies bedeutet, dass der Normung ein Alterungsverfahren mit akzeptabler Versuchszeit bei vergleichsweise moderaten Temperaturen vorgeschlagen kann, vergleichbar zu dem heute bereits in IEC genormten Verfahren zur Alterung von Varistoren für Freiluftableiter. Ein entsprechender Vorschlag basierend auf den hier erarbeiteten Ergebnissen wurde bei IEC eingebracht.

Trotz der durchweg positiven Ergebnisse der Langzeitstabilität von Metalloxidableitern muss bedacht werden, dass damit nicht alle für die Verwendung und Auslegung von Metalloxid-

ableitern in Transformatoren erforderlichen Kenntnisse vorhanden sind. Fragen der thermischen Stabilität, des erreichbaren Schutzpegels der Ableiter und der notwendigen Konstruktion zur Beherrschung des Versagens eines Ableiters sind noch zu klären. Diese Fragen waren in diesem Forschungsvorhaben bewusst ausgeklammert, um den ohnehin hohen Umfang der Arbeiten nicht weiterhin zu vergrößern. Sie sollten in einem Folgevorhaben geklärt werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

## 2 Problemstellung

Überspannungsableiter dienen dem Schutz wertvoller Geräte und Anlagen der elektrischen Energieversorgung vor unzulässig hohen Spannungsbeanspruchungen. Als wertvolle Geräte und Anlagen werden z.B. Transformatoren und SF<sub>6</sub>-isolierte Schaltanlagen angesehen. Überspannungsableiter können selbst durch hohe Überspannungen und in deren Folge durch zu hohe Strombelastung zerstört werden. Bei begrenzter Häufigkeit wird das akzeptiert, weil die Schutzfunktion gewahrt wurde und der Überspannungsableiter getrennt vom zu schützenden Objekt aufgestellt ist, wodurch etwaige Folgeschäden vermieden werden können. Eine Ausnahme bilden gasisolierte Schaltanlagen, bei denen metallgekapselte oder von außen aufgesteckte Überspannungsableiter heute bereits projektbezogen Anwendung finden.

Der Trend, Anlagen in der Ausführung einfacher, kleiner und damit wirtschaftlicher zu bauen, führt u.a. dazu, mehr und mehr von direkten Kabeleinführungen in die Geräte Gebrauch zu machen.

Bei Transformatoren ist damit allerdings ein konventioneller Aufbau des Überspannungsschutzes nicht mehr möglich. Es stellt sich darum die Frage, ob auch der Überspannungsschutz in das zu schützende Gerät integriert werden könnte, ohne die Gesamt-Störanfälligkeit in unakzeptabler Weise zu erhöhen.

Im Mittelspannungsbereich ermöglicht eine Integration von z.B. Sicherungen und Überspannungsableiter in Ortsnetztransformatoren besonders preisgünstige Lösungen, da so eine Reihe von Aufbauelementen entfallen können. Es gibt Hinweise aus dem Ausland, dass solche Entwicklungen auch auf dem deutschen und europäischen Markt an Bedeutung gewinnen könnten.

Dieses Forschungsvorhaben hat sich nun mit der Teilfrage beschäftigt, ob eine Integration des Überspannungsschutzes in einem ölgefüllten Transformator machbar ist. Eine ähnliche Anwendung wurde für Großtransformatoren mit komplizierten Regelwicklungen vorgeschlagen. Hier wurden an den Regelwicklungen Varistoren vorgesehen, die innere Resonanzüberspannungen, die an den Transformator клемmen nicht notwendigerweise in Erscheinung treten, lokal begrenzen sollten.

Für einen Überspannungsschutz an den Transformatorklemmen stellen sich eine Reihe von Fragen, die beantwortet werden müssen, bevor man solchen Kombinationslösungen das notwendige Vertrauen entgegenbringt:

- Wie ist das Langzeitverhalten von Metalloxidvaristoren bei den in Transformatoren möglichen hohen Temperaturen?
- Kann das Ausfallverhalten bzw. die Ausfallhäufigkeit der Überspannungsableiter des Transformators angepasst werden?
- Wie wird das Gleichgewicht von erzeugter und abgeführter Wärme des Überspannungsableiters durch umgebendes Öl mit hoher Eigentemperatur beeinflusst?
- Wie sehen konstruktive Möglichkeiten aus, um Transformatorwicklungen vor durch Überbeanspruchung zerstörten Überspannungsableitern zu schützen? Kann man sich eine leicht zu handhabende Austauschbarkeit vorstellen?

Das vorliegende Forschungsvorhaben hat sich schweremittig mit dem temperaturbedingten Alterungsverhalten bei den sich im Transformator ergebenden Wärmetransporten befasst.

Alterungsuntersuchungen müssen zwei wesentliche Bedingungen erfüllen:

- Sie müssen zeitraffend durchgeführt werden, um in relativ kurzer Zeit eine ausreichende Betriebslebenszeit zu garantieren.
- das zeitraffende Verfahren darf dabei nicht so gestaltet werden, dass sich Effekte einstellen, die unter normalen Betriebsbedingungen nicht vorhanden wären.

Für Überspannungsableiter in gasförmiger Umgebung von 40 °C erreicht man diese Bedingungen dadurch, dass man für den Parameter "Temperatur" 115 °C und den Parameter "Zeit" 1000 Stunden als Äquivalent wählt, um bei der höchsten betrieblich auftretenden Dauerspannung eine Lebensdauer von 40 Jahren zu garantieren. Die vor und nach der Alterung gemessene Verlustleistung darf sich nur geringfügig verändern bzw. die Veränderung wird bei der Arbeitsprüfung durch Korrektur der Prüfspannung berücksichtigt.

Dieses Alterungsverhalten funktioniert deshalb, weil man sich bei der angelegten Spannungshöhe und der genannten Temperatur immer noch im Bereich kleiner, durch die Varistorkennlinie bedingten Ableitströme befindet. Die Möglichkeit, nach dem Arrheniusgesetz auf die tatsächliche Alterung zu schließen erschien damit gegeben.

Überspannungsableiter in Öl müssen unter wesentlich härteren Bedingungen arbeiten, da die betriebliche Öltemperatur 90 °C erreichen kann. Bei Annahme einer erwarteten Lebensdauer von 40 Jahren in einer Umgebungstemperatur von 90 °C ergäbe sich für eine Untersuchung wiederum über 1000 Stunden eine Versuchstemperatur von 195 °C.

Da man mit solchen Temperaturen und bei angelegter Spannung in einen Bereich des Ableitstromes kommt, der nicht mehr als geringfügig klein bezeichnet werden kann, war man nicht sicher, ob und wie eine solche Untersuchung überhaupt durchführbar ist.

Es war darum zu klären, ob bei solch hohen Temperaturen zusätzliche Effekte auftreten, die das zu wählende Untersuchungsverfahren beeinflussen muss.

### 3 Zielsetzung der Untersuchungen und Versuchsprogramm

Metalloxidvaristoren werden als gesinterte Metalloxide gefertigt. Der Hauptbestandteil besteht aus kornförmigen Zinkoxid (ZnO) mit einer elektrisch gut leitfähigen Eigenschaft, Beimischungen aus anderen Metalloxiden, wie z.B. Bariumoxid, formen eine Grenzschicht um die leitfähigen Zinkoxidkörner und die Eigenschaften des Metalloxidvaristors hängen wesentlich von der Gestaltung dieser Grenzschichten ab. Die Spannungs-Strom-Kennlinie des Varistors ist gekennzeichnet durch drei unterschiedliche physikalisch wirkende Bereiche. Sie sind in Bild 1 schematisch wiedergegeben:

- Bereich 1 ist gekennzeichnet durch eine sehr geringe Leitfähigkeit der Grenzschichten zwischen den Zinkoxidkörnern. Er liegt typisch im Strombereich unterhalb  $1 \mu\text{A}/\text{mm}^2$  oder im Feldstärkebereich unterhalb von  $100 \text{ V}/\text{mm}$ .

In diesem Bereich ist der bei konstanter Spannung fließende Strom mit negativem Temperaturkoeffizienten stark temperaturabhängig. Dies bedeutet, dass der Strom und damit Verlustleistung und Temperaturerhöhung im Öl mit  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  höher sind als in Luft bei Raumtemperatur.

Die in diesem Bereich mögliche Alterungserscheinung ist die Alterung der Beimischungen von Metalloxiden, die eine Veränderung der Strom-Spannungs-Kennlinie zu höheren Verlusten hin bewirken kann. Bei Alterungsuntersuchen oder –prüfungen an Metalloxidvaristoren wird in der Regel ausschließlich dieser Bereich betrachtet.

- Im Bereich 2 bewirken Tunneleffekte in den Grenzschichten zwischen den Zinkoxidkörnern einen sehr schnellen Stromanstieg. Diese Effekte sind verantwortlich für die Sättigungserscheinung in der Spannungs-Strom-Kennlinie, die den guten Schutz der Metalloxidableiter gegen Überspannungen bewirkt. In diesem Bereich sind die Spannungs-Strom-Kennlinien der Varistoren nicht oder nur wenig temperaturabhängig.

Alterungsvorgänge die sich in diesem Strombereich auswirken sind nicht bekannt. Es wäre aber möglich, dass sich Änderungen in den Grenzschichten auf deren Stromtragfähigkeit auch in diesem Bereich auswirken, und solche Effekte sollten nicht von vorneherein vernachlässigt werden.

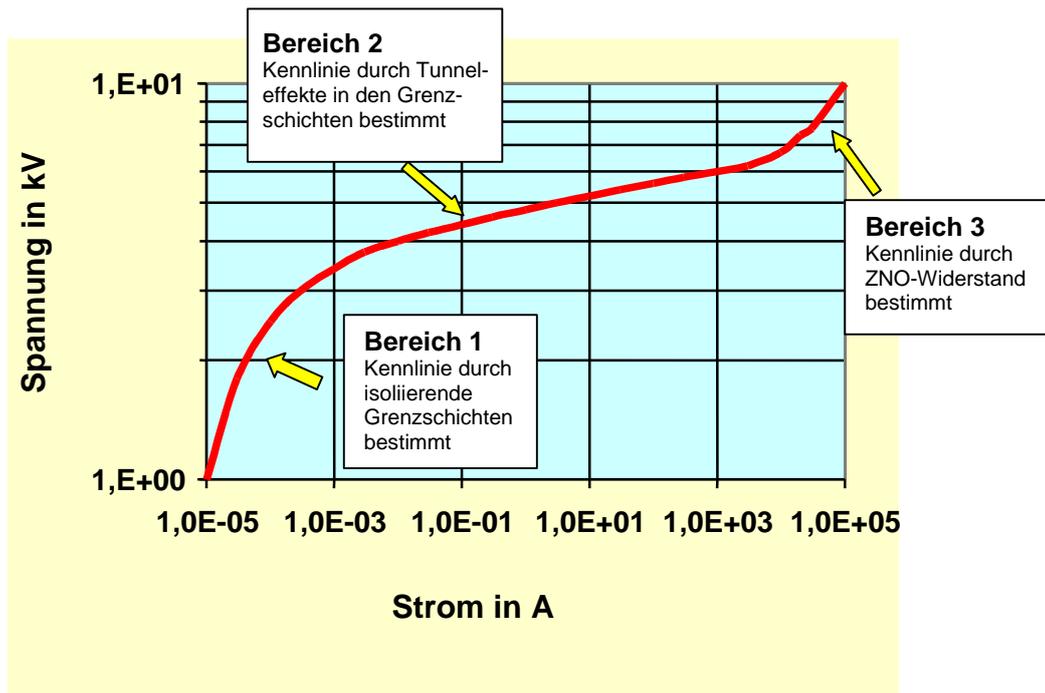


Bild 3.1: Beispiel einer Spannungs-Strom-Kennlinie von Metalloxidvaristoren mit den drei typischen Bereichen der Stromleitung.

- Im Bereich 3 wirkt sich aufgrund der hohen Ströme die begrenzte Leitfähigkeit des Zinkoxids aus. Wenn Ströme in diesem Bereich auftreten, entstehen die höchsten Spannungen über den Varistoren, und die hierfür erforderliche Spannungsfestigkeit muss gewährleistet sein.

Mögliche Alterungsvorgänge sind in der Hauptsache durch Veränderung der Varistoroberfläche aufgrund der hohen Öltemperaturen oder durch Einwirkungen des Öls auf das zur Isolierung der Längsschicht auf das Varistormaterial selbst aufgebrauchte Material gegeben. Dadurch könnte die Spannungsfestigkeit der Varistoren reduziert werden und hohe Ströme zu Oberflächenüberschlägen führen.

Die in diesem Forschungsvorhaben geplanten ersten orientierenden Versuche sollten nach Möglichkeit alle genannten Einflussfaktoren berücksichtigen, um wenigstens ungefähre Vorstellungen über den Grad der möglichen Auswirkungen schnell zur Verfügung zu haben. Aus diesem Grund wurden bei der Versuchsplanung die folgenden Grundsätze angewendet:

1. Die in Öl mit 90 °C eingesetzten Metalloxidableiter sollten im Dauerbetrieb die gleiche Verlustleistung haben wie ein Metalloxidableiter in Luft.

Dieser Grundsatz wurde angewendet, da bei der sich aus dieser Forderung ergebenden Spannung die Langzeitalterung der Varistoren bei erhöhten Temperaturen bis zu 195 °C durchgeführt wird, wobei die Spannung zur Berücksichtigung möglicher nichtlinearer Spannungsverteilungen entlang des Ableiters noch um 15% erhöht wird. Eine zu hoch gewählte Dauerspannung der Ableiter im Öl könnte aufgrund der dann beträchtlich

erhöhten Verluste zu unerwarteten Effekten führen, die zu Beginn der Versuche nicht bekannt waren.

2. Die Alterung der Varistor-Grenzschichten im Strombereich 1 nach Bild 3.1 soll durch Vergleich der Spannungs-Strom-Kennlinien vor und nach einer Langzeitalterung direkt ermittelt werden.
3. Änderungen in den Grenzschichten im Strombereich 2 nach Bild 3.1 wirken sich auf das Energieaufnahmevermögen der Metalloxidableiter aus. Sie werden insbesondere bei hohen Stromdichten deutlich, da hierbei einzelne Grenzschichten zerstört werden können. Eine mögliche Alterung wird daher durch hohe Ströme am ehesten aufgedeckt. Solche Ströme bewirken jedoch nur eine partielle Zerstörung eines Teils der Grenzschichten und eine merkliche Änderung ist erst nach mehrfacher Beanspruchung festzustellen. Die Anzahl der für die Zerstörung der Varistoren erforderlichen Beanspruchungen ist ein Maß für die graduelle Veränderung des Varistors durch solche Ströme.

Die Alterungsvorgänge in diesem Bereich werden durch Vergleich der Belastbarkeit mit Hochstoßströmen  $4/10 \mu\text{s}$  mit Amplituden von 100 kA vor und nach Langzeitalterung überprüft. Die Hochstoßströme werden in Abständen von 1 min aufeinanderfolgend bis zur Zerstörung der Varistoren aufgebracht. Die Anzahl der hierzu benötigten Beanspruchungen ist ein Maß für die graduelle Verschlechterung der Grenzschichten bei jedem der Stoßströme und damit auch ein Anzeichen für Veränderungen in den Grenzschichten, wenn die Anzahl vor und nach dem Alterungsversuch nicht übereinstimmt.

4. Änderungen der Spannungsfestigkeiten an der Oberfläche werden durch den Vergleich der Spannungsfestigkeiten vor und nach der Langzeitalterung ermittelt. Varistoren werden so ausgelegt, dass sie der Belastung mit den in 3. genannten Hochstoßströmen standhalten. Die Überprüfung mit höheren Strömen und somit Spannungen kann zu Vorgängen führen, die für das Verhalten der Varistoren nicht relevant sind und nicht angewendet werden sollten. Die Überprüfung der Spannungsfestigkeit erfolgt demnach durch die Überprüfung des Energieaufnahmevermögens in Punkt 3. Änderungen, die nicht zur Verringerung der Spannungsfestigkeit unterhalb des für diese Strombelastung nötigen Werts führen, werden als nicht relevant angesehen.

Bei der Aufstellung des Versuchsprogramms war zu berücksichtigen, dass das im Punkt drei gewählte Ermittlungsverfahren für das Energieaufnahmevermögen ein zerstörendes Verfahren ist. Dies bedeutet, dass der Vergleich der Varistoren in Luft und in Öl oder vor und nach Langzeitalterung nicht an denselben Varistoren durchgeführt werden konnte und statistische Auswerteverfahren angewendet werden mussten. Aus diesem Grund wurden für jeden Versuch fünf Varistoren für jeden der beiden Hersteller untersucht

Es ergab sich somit das folgende Versuchsprogramm:

1. Ermittlung der Spannungs-Strom-Kennlinien und der Verlustleistungen in Luft bei Raumtemperatur
2. Ermittlung der Spannungs-Strom-Kennlinien und der Verlustleistungen in Öl bei 90 °C

Festlegung der Dauerspannung für die Verwendung der Metalloxidvaristoren in Öl

3. Ermittlung des Energieaufnahmevermögens und der Spannungsfestigkeit in Luft bei Raumtemperatur
4. Ermittlung des Energieaufnahmevermögens und der Spannungsfestigkeit in Öl bei 90 °C
5. Langzeitalterung in Öl

Die Varistoren der beiden untersuchten Hersteller A und B standen zu unterschiedlichen Zeiten zur Verfügung, so dass das Versuchsprogramm nicht für beide gleich war. Die folgende tabellarische Aufstellung gibt eine Übersicht über die durchgeführten Langzeitalterungen:

Öltemperatur im Langzeitversuch	Hersteller im Langzeitversuch		
	Dauer		
	1000 Stunden	3000 Stunden	6000 Stunden
120 °C, Neuöl			A
155 °C, Neuöl	A,B	A,B	
155 °C, Altöl		A	
195 °C, Neuöl	A,B		

6. Ermittlung der Spannungs-Strom-Kennlinien und der Verlustleistungen in Öl bei 90 °C nach Langzeitalterung
7. Ermittlung des Energieaufnahmevermögens und der Spannungsfestigkeit in Öl bei 90 °C nach Langzeitalterung

## 4 Aufbau und Durchführung der Versuche

### 4.1 Versuchsaufbau

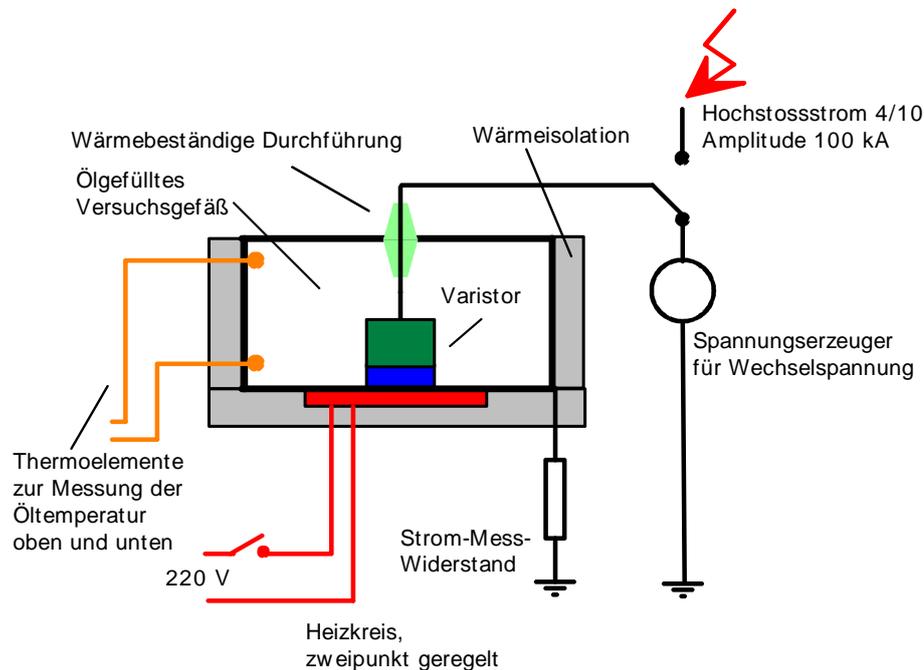


Bild 4.1: Versuchsgefäß zur Ermittlung der Spannungs-Strom-Kennlinien und des Energieaufnahmevermögens der Varistoren

Alle Versuche in Öl wurden in wärmeisolierten Edelstahlgefäßen mit einem Durchmesser von 30 cm und einer Höhe von 20 cm durchgeführt. Die für diese Gefäße verwendeten Einrichtungen sind für die beiden Aufgabenstellungen – Ermittlung der Varistorparameter in Öl mit 90 °C und Langzeitalterung in Öl mit unterschiedlicher Temperatur – etwas unterschiedlich, doch stimmen wesentliche Teile überein.

Für die Bestimmung der Spannungs-Strom-Kennlinien und des Energieaufnahmevermögens wurde jeweils ein Varistor in dem Versuchsgefäß nach Bild 4.1 geprüft. Die Beschränkung auf einen einzigen Varistor war erforderlich, da der bei der Ermittlung des Energieaufnahmevermögens unvermeidbare Durch- oder Überschlag zur Ölverschmutzung führt und ein Wechseln des Öls erforderlich machte. Der im Öl angeordnete Varistor wurde über eine wärmebeständige und spannungsfeste Durchführung an die Wechselspannungsquelle oder an den Stoßstromgenerator angeschlossen. In beiden Fällen war das Versuchsgefäß zur Messung des Stromes durch den Varistor über einen Messwiderstand gegen Erde angeschlossen, wobei die Auslegung des Messwiderstandes der sehr unterschiedlichen Messaufgaben angepasst war.

Alle Versuche zur Bestimmung der Varistorkenngrößen wurden bei einer Öltemperatur von 90 °C durchgeführt. Die Öltemperatur wurde mit zwei Thermoelementen in der Nähe des unten angeordneten Varistors und im oberen Teil des Gefäßes gemessen. Die zur Erzeugung der Öltemperatur erforderliche Heizplatte wurde in einer Zweipunktregelung mit dem unteren Thermoelement auf Öltemperaturen zwischen 90 °C und 92 °C konstant gehalten.

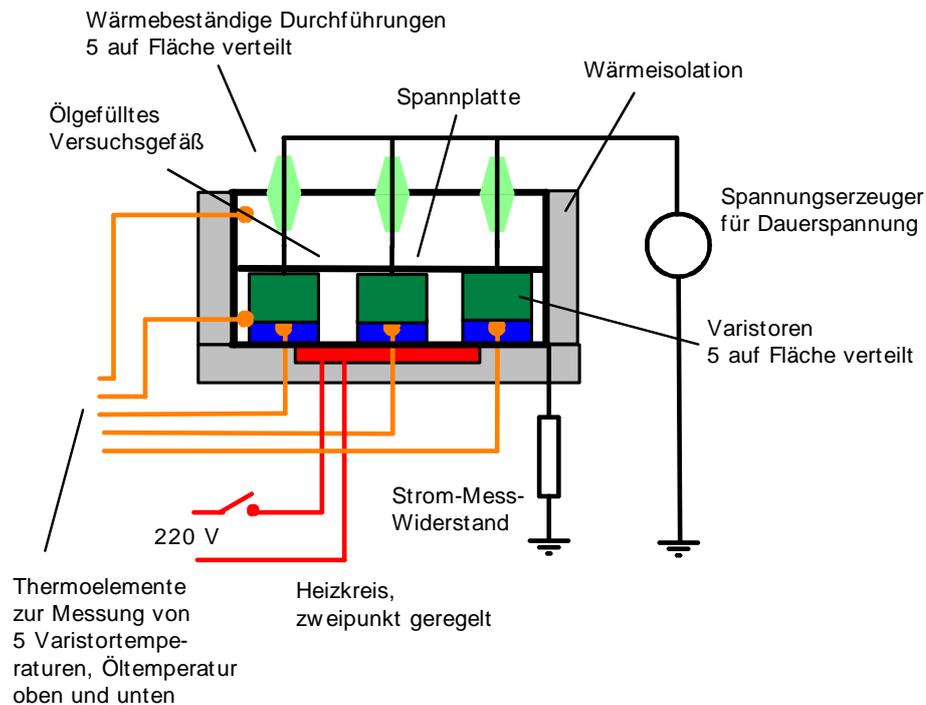


Bild 4.2: Versuchsgefäß zur Langzeitalterung der Varistoren in Öl der Varistoren

Für die Langzeitversuche war es erforderlich, die für eine Versuchsvariante geforderten fünf Varistoren in einem Gefäß unterzubringen. Zusätzlich machten die langen Versuchszeiten eine vollständig automatisierte Versuchseinrichtung notwendig. Die Ölgefäße waren die gleichen wie für die Ermittlung der Varistorkenngrößen, jedoch waren wegen der Zusatzanforderungen weitere Einrichtungen erforderlich. Sie sind schematisch in Bild 4.2 angegeben.

Die fünf Varistoren waren auf der Fläche gleichmäßig verteilt und mit einer hochspannungsseitigen Spannplatte auf die Erdplatte aufdrückt. Zwischen jedem der Varistoren und Erde befand sich ein Metallzylinder mit gleichem Durchmesser, auf dessen dem Varistor zugewandten Stirnfläche ein Thermoelement zur Messung der einzelnen Varistortemperaturen angebracht war. Die Messung der einzelnen Varistortemperaturen wurde erforderlich, da die bei den hohen Temperaturen entstehenden Varistorverluste zu Temperaturerhöhungen führen können, die bei Streuungen der Varistoreigenschaften an einzelnen Exemplaren zu wesentlich höheren Temperaturen führen könnte als durch die Öltemperatur selbst festgestellt wird. Zusätzlich wurden die Öltemperaturen am Boden und am Deckel des Versuchsgefäßes mit aufgezeichnet. Als Vergleichsstelle für die Thermoelemente diente die Raumtemperatur, die durch einen Widerstandsgeber Pt 100 aufgezeichnet wurde.

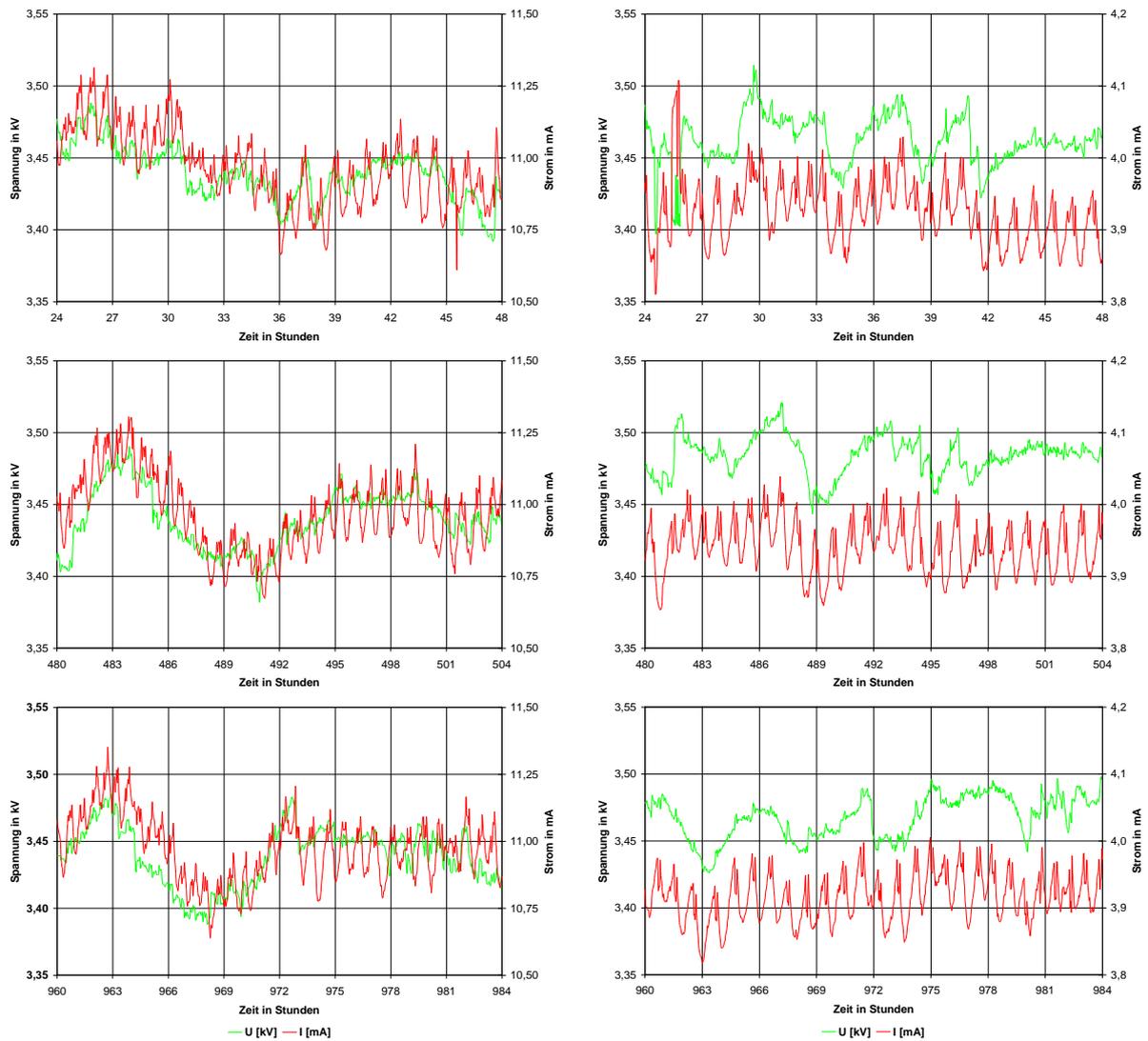


Bild 4.3: Verlauf der Prüfspannung und des Gesamtstroms mit der Zeit für die 1000stündige Langzeitalterung mit 195 °C am Anfang des Versuchs (oben), in der Mitte des Versuchs (mitte) und am Ende des Versuchs (unten)  
 Links: Hersteller A  
 Rechts: Hersteller B

Der Widerstandswert des Widerstandsgebers und die Spannungen der Thermoelemente wurden mit einem elektronischen Voltmeter über eine programmgesteuerte Scanner-Einschubkarte eines PC gemessen und die sich daraus ergebenden Temperaturen errechnet und abgespeichert. Zusätzlich wurde die anliegende Wechselspannung und der Gesamtstrom durch die fünf Varistoren aufgezeichnet.

Die Regelung der geforderten Öltemperaturen erfolgte nach dem folgenden Schema:

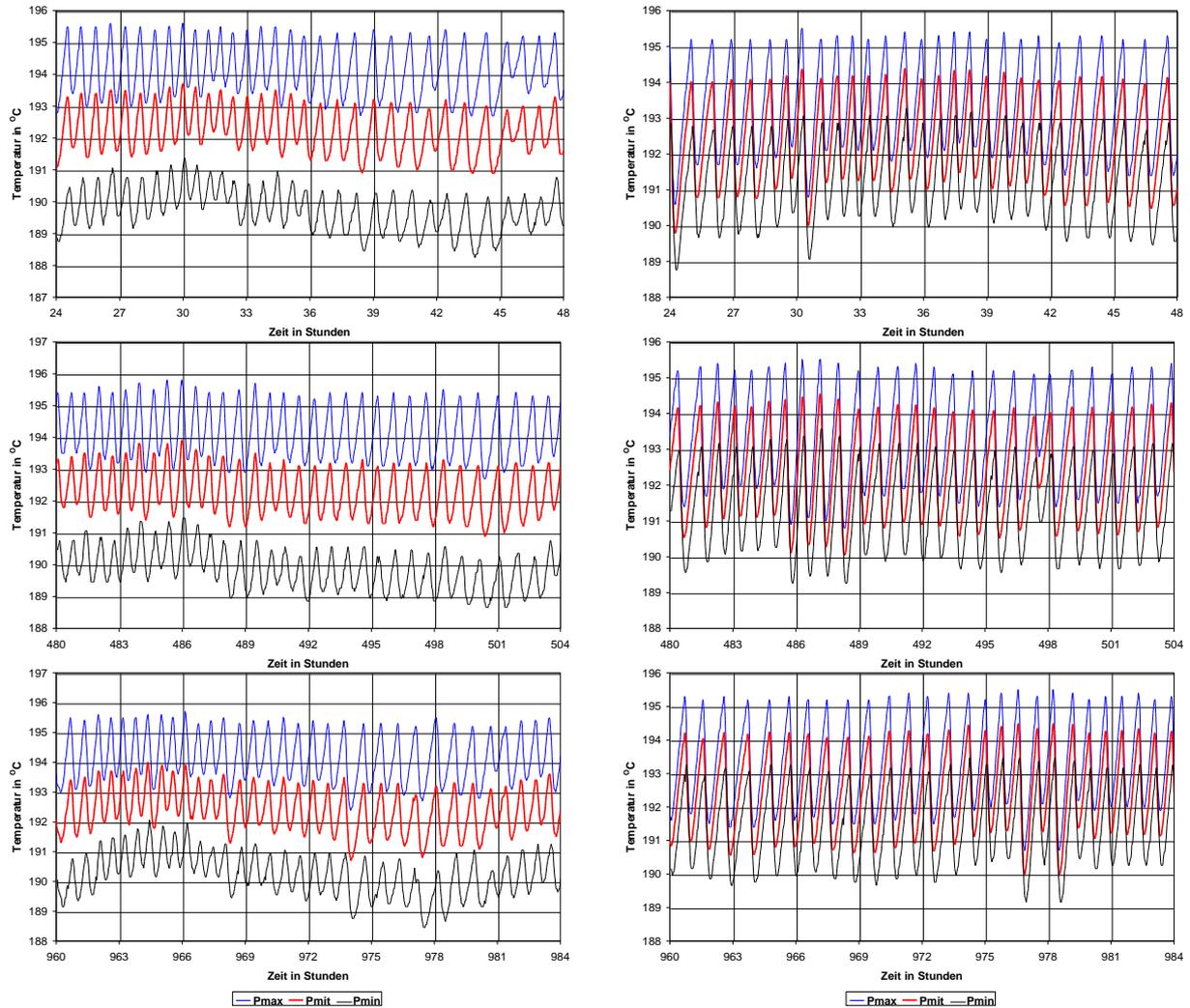


Bild 4.4: Verlauf der Varistortemperaturen mit der Zeit für die 1000stündige Langzeit-  
 alterung mit 195 °C am Anfang des Versuchs (oben), in der Mitte des Versuchs  
 (mitte) und am Ende des Versuchs (unten)  
 Links: Hersteller A  
 Rechts: Hersteller B

- Wenn der höchste Wert der fünf Varistortemperaturen die geforderte Alterungs-  
 temperatur unterschreitet oder der niedrigste Wert die geforderte Temperatur um 5 °C  
 unterschreitet, wird die Heizplatte durch den Rechner zugeschaltet.
- Wenn der höchste Wert der fünf Varistortemperaturen die geforderte Alterungs-  
 temperatur überschreitet und der niedrigste Wert die geforderte Temperatur – 5 °C nicht  
 unterschreitet, wird die Heizplatte durch den Rechner abgeschaltet.
- Wenn die eingestellte Dauer der Langzeitalterung erreicht ist, wird die Öltemperatur auf  
 90 °C eingeregelt und die Varistoren bleiben im Gefäß bis zur Entnahme zur Bestimmung  
 der Kenngrößen.

Durch dieses Regelprinzip konnte erreicht werden, dass alle Varistoren innerhalb eines Temperaturbereichs zwischen dem geforderten Wert und einem um 5 °C niedriger liegenden Wert blieben.

Insgesamt wurden in den Messungen drei voll ausgerüstete Versuchsgefäße erstellt und gleichzeitig betrieben. Es mussten also 22 Temperatur-, 3 Spannungs- und 3 Strommessungen aufeinanderfolgend durchgeführt werden. Die Einstellzeiten des eingesetzten Scanners und des vorgeschalteten Voltmeters ermöglichten eine Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messung an einer der Messstellen von 2 min.

Alle Messwerte wurden aufgezeichnet und standen für evtl. notwendige nachträgliche Auswertungen zur Verfügung. Insgesamt erwies sich die Anwendung des Regelprinzips bei den hier untersuchten Varistoren als unproblematisch, da die Exemplarstreuungen der beteiligten Hersteller gering waren. Die Bilder 4.3 und 4.4 zeigen für die Langzeitalterungsversuche an den beiden Varistortypen exemplarisch Spannungen, Ströme und Varistortemperaturen zu Beginn der 1000-Stunden-Langzeitalterung mit 195 °C, in der Mitte und am Ende dieses Versuchs. Die Temperaturen der einzelnen Varistoren streuen sehr wenig und ändern sich nicht mit der Versuchsdauer.

## 4.2 Versuchsdurchführung

Da die Versuche zur Ermittlung des Energieaufnahmevermögens nicht zerstörungsfrei waren, gilt der Vergleich der Ergebnisse aus den verschiedenen Versuchsserien nicht für dieselben Varistoren, sondern jeweils fünf andere Exemplare der gleichen Charge. An jeder dieser Charge wurde die folgende Vorgehensweise gewählt:

- Ermittlung der Ausgangskenngrößen der Varistoren in Luft bei Raumtemperatur an 5 Varistoren
  - Feststellung der Spannungs-Strom-Kennlinien, wobei hier der Gesamtstrom, d.h. die Summe aus ohmschen und kapazitivem Anteil des Stroms ermittelt wurde;
  - Ermittlung der Verlustleistung in Abhängigkeit von der Spannung;
  - Ermittlung des Energieaufnahmevermögens durch Hochstromstöße 4/10, Amplitude etwa 100 kA, im Abstand von 1 min. Die Zahl der Stöße bis zur Zerstörung oder eines Überschlages der Varistoren wird als Energieaufnahmevermögen bezeichnet. Sie weist gleichzeitig das Vorhandensein der geforderten Spannungsfestigkeit nach.
- Ermittlung der Vergleichskenngrößen der Varistoren in Öl bei 90 °C an 5 weiteren Varistoren
  - Konditionierung der Varistoren in Öl mit 90 °C über 20 Tage
  - Feststellung der Spannungs-Strom-Kennlinien, wobei hier der Gesamtstrom, d.h. die Summe aus ohmschen und kapazitivem Anteil des Stroms ermittelt wurde;

- Ermittlung der Verlustleistung in Abhängigkeit von der Spannung;
  - Ermittlung des Energieaufnahmevermögens durch Hochstromstöße 4/10, Amplitude etwa 100 kA, im Abstand von 1 min. Die Zahl der Stöße bis zur Zerstörung oder eines Überschlages der Varistoren wird als Energieaufnahmevermögen bezeichnet. Sie weist gleichzeitig das Vorhandensein der geforderten Spannungsfestigkeit nach.
  - Festlegung der Varistordauerspannung für den Betrieb in Öl mit 90 °
- Langzeitalterung in Öl mit den Temperaturen und Dauern gemäß Abschnitt 3 an fünf weiteren Varistoren pro Variante
- Durchführung der Langzeitalterung
  - Feststellung der Spannungs-Strom-Kennlinien, wobei hier der Gesamtstrom, d.h. die Summe aus ohmschen und kapazitivem Anteil des Stroms ermittelt wurde;
  - Ermittlung der Verlustleistung in Abhängigkeit von der Spannung;
  - Ermittlung des Energieaufnahmevermögens durch Hochstromstöße 4/10, Amplitude etwa 100 kA, im Abstand von 1 min. Die Zahl der Stöße bis zur Zerstörung oder eines Überschlages der Varistoren wird als Energieaufnahmevermögen bezeichnet. Sie weist gleichzeitig das Vorhandensein der geforderten Spannungsfestigkeit nach.

Die Vergleiche der Ergebnisse aus den Versuchen untereinander beziehen sich somit auf jeweils zwei Kollektive aus fünf Varistoren, wobei Mittelwert und Streuung zur Beurteilung herangezogen werden müssen.

### 4.3 Versuchsvaristoren

Metalloxidvaristoren werden in Deutschland selbst nicht gefertigt. Die hier am häufigsten eingesetzten Varistoren stammen von Herstellern aus dem benachbarten Ausland, die entweder zu deutschen Firmen gehören oder große Niederlassungen in Deutschland haben. Die Varistoren sind in Bild 4.5 wiedergegeben.

Die wesentlichen technischen Daten der Varistoren sind:

- Hersteller A:	Varistordurchmesser:	70 mm
	Varistorhöhe:	43 mm
	Referenzspannung:	5,3 kV
	Nennableitstoßstrom:	10 kA
	Leitungsentladungsklasse:	4

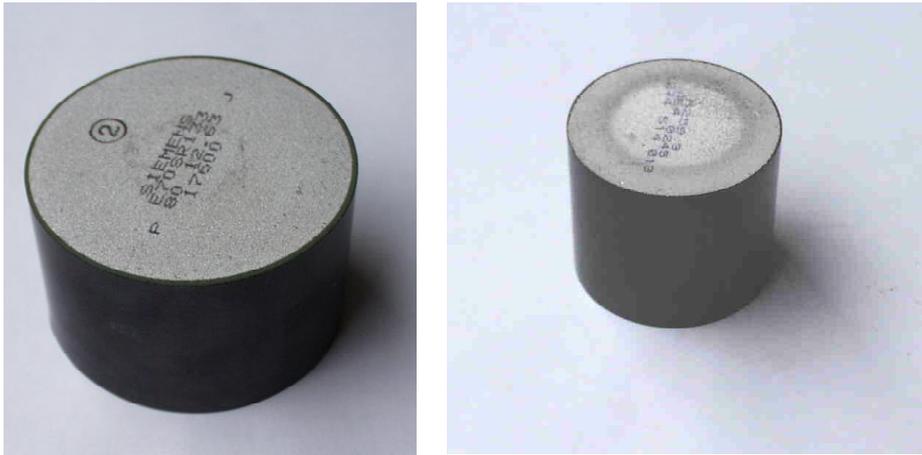


Bild 4.5 : Ansicht der beiden untersuchten Varistortypen der Herstelle A (links) und B (rechts)

- Hersteller B:	Varistordurchmesser:	42 mm
	Varistorhöhe:	37 mm
	Referenzspannung:	5,1 kV
	Nennableitstoßstrom:	10 kA
	Leitungsentladungsklasse:	2

Die beiden geprüften Varistortypen haben aufgrund ihres verschiedenen Durchmessers unterschiedliche Energieaufnahmevermögen, was bei dem Vergleich der beiden Typen untereinander berücksichtigt werden muss.

Beide Varistortypen haben auf der Radialseite einen gesinterten Belag zur Herstellung der geforderten Spannungsfestigkeit bei Hochstoßstrom 4/10, 100 kA.

## 5 Festlegung der Dauerspannungen

Die Dauerspannung der Varistoren ist für die hier betrachtete Langzeitstabilität von Bedeutung, da die Alterungsuntersuchungen nach der Norm IEC 60099-4 bei dem 1,15fachen dieser Werte durchgeführt werden. Zur Nutzung der mit solchen Versuchen in Luft gemachten Erfahrungen sollte auch für den Betrieb des Ableiters in Öl an diesem Prinzip festgehalten werden.

Die Dauerspannung eines Ableiters ist keine Kenngröße der Varistoren allein, sondern wird stark beeinflusst durch die Spannungssteuerung entlang eines Ableiters und den Wärmehaushalt in seinem Einbaumedium. Für die Ableiter in Luft wurde daher die für Freiluftableiter technisch höchstmögliche Dauerspannung gewählt:

- Die Bemessungsspannung des Ableiters ist gleich seiner Referenzspannung, die bei Stromwerten zwischen 1 mA und 5 mA ermittelt wird;
- Die Dauerspannung ist das 0,8fache der Bemessungsspannung.

Für den Betrieb in Luft mit den Bedingungen nach IEC 60099-4 ergeben sich mit diesem Prinzip Dauerspannungen von 4,2 kV für Hersteller A und 4,1 kV für Hersteller B.

Für den Betrieb von Ableitern in Öl mit 90 °C kommt hinzu, dass sich bei vorgegebener Spannung der Strom und damit die Verlustleistung gegenüber den Ausgangswerten in Luft erhöhen. Die Bilder 5.1 bis 5.4 zeigen den Vergleich der Spannungs-Strom-Kennlinien und der Verlustleistungen für die beiden Varistortypen. Die Spannungs-Strom-Kennlinien zeigen, dass die Ströme bei Hersteller B für beide Einsatzarten niedriger liegen als bei Hersteller A, was aber ausschließlich auf die kleinere Fläche zurückzuführen ist, die bei gleicher Stromdichte einen Faktor von 3,2 zwischen den beiden Strömen bewirkt. Ein ähnliches Verhalten zeigen auch die Verlustabhängigkeiten von der Spannung.

Für die Auswahl der Dauerspannung der Ableiter in Öl wurde der Grundsatz befolgt, dass die Ableiter in Öl die gleichen Verluste haben sollten wie in Luft bei Raumtemperatur. Die Bilder 5.3 und 5.4 zeigen, dass dafür eine beträchtliche Reduzierung der Dauerspannung erforderlich ist. Für beide Ableiter ergibt sich im Rahmen der statistischen Streuung der Ergebnisse aus den fünf Varistoren, dass eine Dauerspannung von 3 kV diese Forderung nach gleicher Verlustleistung erfüllt.

Eine Erniedrigung der Dauerspannung auf einen Wert von etwa 70% des für Luft zutreffenden Werts hat zur Folge, dass sich bei gleicher Betriebsspannung, also gleicher Dauerspannung des Ableiters, der Schutzpegel eines Ableiters in Öl um etwa 40% höher wäre als der eines Ableiters in Luft. Obwohl eine solche Erhöhung vom Gesichtspunkt der Isolationskoordination nicht ohne weiteres akzeptabel ist, wurde der Wert aufgrund der vor Beginn der Versuche vorhandenen geringen Kenntnisse über das Verhalten der Varistoren für die Langzeitversuche zugrundegelegt. Es ergab sich damit eine

**Spannungsbeanspruchung in der Langzeitalterung = 3,45 kV**

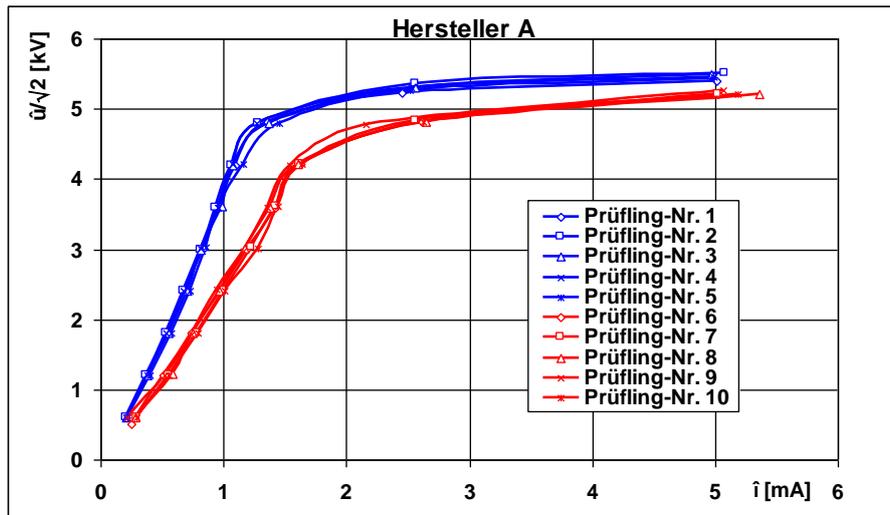


Bild 5.1: Vergleich der Spannungs-Strom-Kennlinien der Varistoren in Öl mit 90 °C (rot) mit den Kennlinien in Luft bei Raumtemperatur (blau), Hersteller A. (Spannungseffektivwert über Scheitelwert des Gesamtstroms).

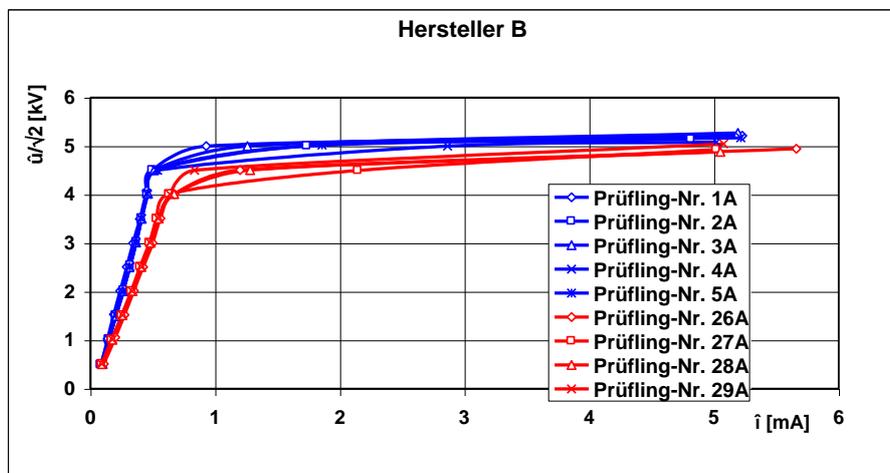


Bild 5.2: Vergleich der Spannungs-Strom-Kennlinien der Varistoren in Öl mit 90 °C (rot) mit den Kennlinien in Luft bei Raumtemperatur (blau), Hersteller B. (Spannungseffektivwert über Scheitelwert des Gesamtstroms).

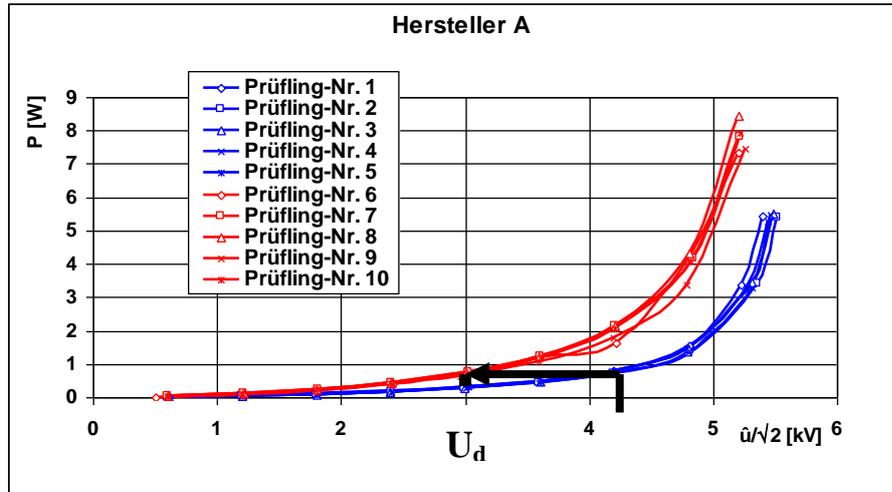


Bild 5.3: Vergleich der Verlustleistungen der Varistoren in Öl mit 90 °C (rot) mit den Kennlinien in Luft bei Raumtemperatur (blau), Hersteller A.

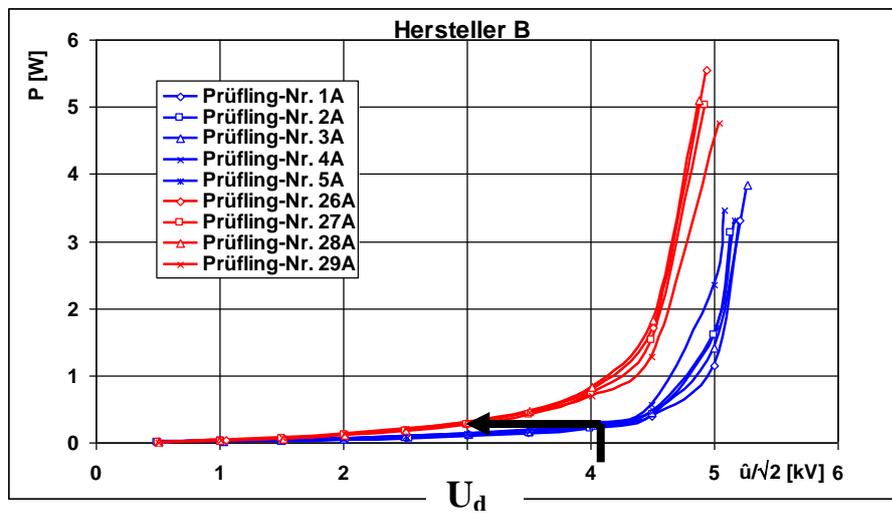


Bild 5.4: Vergleich der Verlustleistungen der Varistoren in Öl mit 90 °C (rot) mit den Kennlinien in Luft bei Raumtemperatur (blau), Hersteller B.

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Vergleich der Varistoren im Neuzustand in Öl und Luft

Die in Abschnitt 5 betrachteten Unterschiede in den Spannungs-Strom-Kennlinien und in den Verlustleistungen zwischen dem Betrieb der Varistoren in Luft und in Öl mit 90 °C waren bekannt und erwartet worden. Nicht bekannt war, wie sich die Varistoren hinsichtlich des Energieaufnahmevermögens und der Spannungsfestigkeit verhalten.

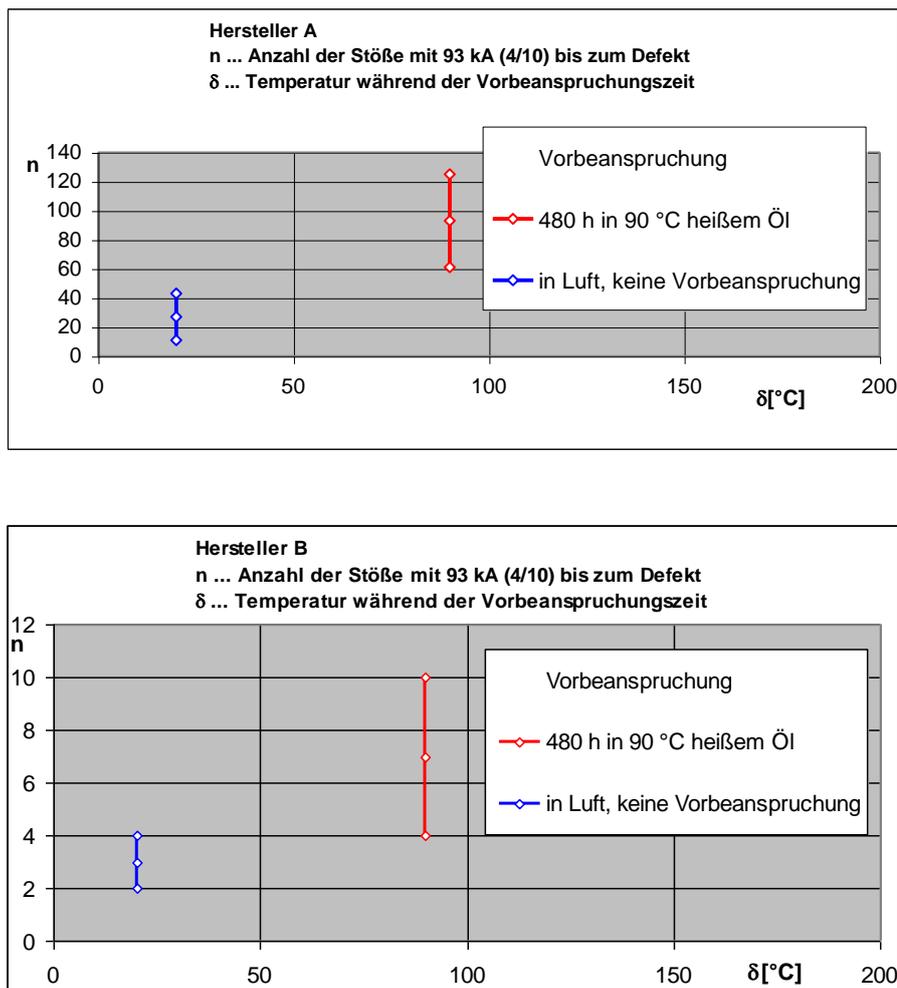


Bild 6.1: Vergleich des Energieaufnahmevermögens und der Spannungsfestigkeit der Varistoren in Öl mit 90 °C und in Luft bei Raumtemperatur

Bild 6.1 vergleicht die beiden Varistortypen für die Einsatzarten. Für beide Typen ist die Anzahl der Beanspruchungen in Öl höher als in Luft, obwohl die Ausgangstemperaturen sich stark unterscheiden. Dieses zunächst überraschende Ergebnis findet eine Erklärung in der Art der Zerstörung durch die letzte Beanspruchung:

- In Luft fand die Zerstörung stets am Rand der Varistoren statt. Dies deutet daraufhin, dass es sich hierbei um eine Kombination von Luftüberschlägen und Materialdurchschlägen handelt. Durch die Temperaturerhöhungen als Folge der aufeinanderfolgenden Stoßstrombeanspruchungen verringert sich die dielektrische Festigkeit der Luft in der Umgebung des Varistors und die Zerstörung beginnt als Überschlag.
- In Öl fanden die Zerstörungen stets innerhalb des Varistors statt. Die hohe dielektrische Festigkeit des Öls verhindert einen Überschlag, so dass die Varistoren eine merklich höhere Temperatur annehmen müssen als in Luft, bevor der Durchschlag eintritt.

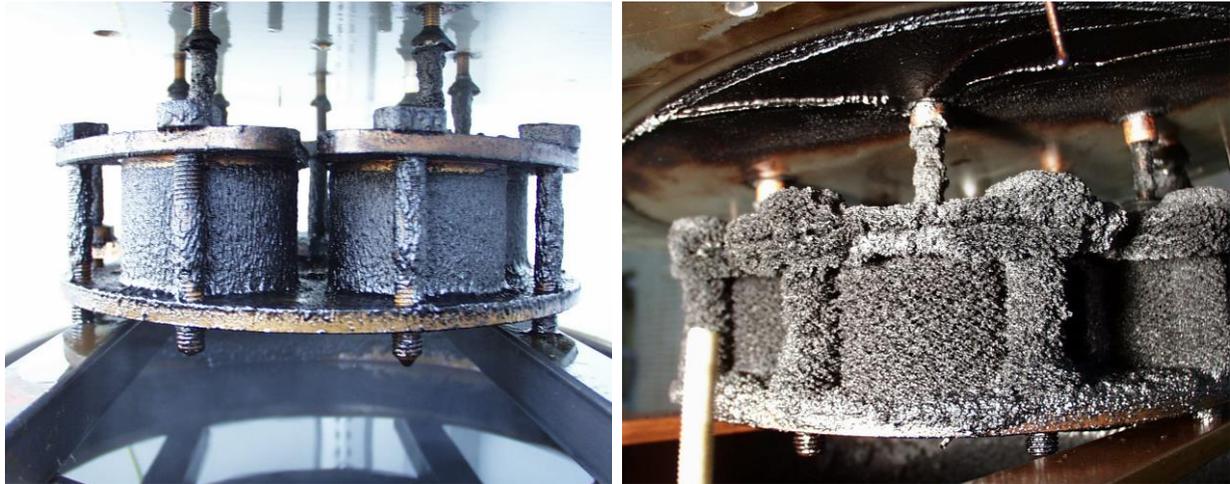
Die bei Hersteller B feststellbaren niedrigeren Anzahlen der für die Zerstörung notwendigen Beanspruchungen als bei Hersteller A sind wieder auf den geringeren Durchmesser zurückzuführen. Da die Parameter des Stoßstroms für beide gleich waren, bedingt dies einmal, dass die Temperaturerhöhung pro Beanspruchung bei Hersteller B größer ist als bei Hersteller A, zum anderen ist die entstehende Spannung aufgrund der höheren Stromdichte höher.

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass das Energieaufnahmevermögen der Ableiter in Öl höher ist als in Luft. Dies ist zurückzuführen auf die hohe Spannungsfestigkeit des Öls und kann nicht auf die hier nicht behandelten Gesichtspunkte der thermischen Stabilität übertragen werden.

## 6.2 Langzeitalterung in Neuöl

Nach anfänglichen Schwierigkeiten in den verwendeten Isolierstoffen erwies sich die Durchführung der Langzeitalterungen selbst bei den hohen Öltemperaturen als problemlos. Bild 6.2 zeigt, dass sich an den Varistoren und den Isolierstoffen ein merklicher Belag an Ölkohle bildete, der aber keine Auswirkungen auf das dielektrische Verhalten der Varistoren hatte.

Bild 6.2: Bildung von Ölkohle auf den Varistoren nach der Langzeitalterung



Links: Nach 1000 Stunden mit 155 °C

Rechts: Nach 3000 Stunden mit 155 °C

Vergleichende Messungen der Verlustleistung mit und ohne Ölkohlebelag zeigten, dass die Verlustleistungen trotz dieser ausgeprägten Ölkohlebildung gleich waren. Die Ölkohle war also vollständig isolierend, was auf den fehlenden Wassergehalt zurückzuführen sein dürfte und sich bei anderen Ölbedingungen ändern könnte.

Der Haupttext des Berichts wird sich wegen der Vielzahl der erzielten Ergebnisse auf eine zusammenfassende Darstellung beschränken. Die vollständigen Ergebnisse sind im Anhang im Detail wiedergegeben.

Die Bilder 6.3 bis 6.4 zeigen das Verhalten der Verlustleistungen nach der Langzeitalterung.

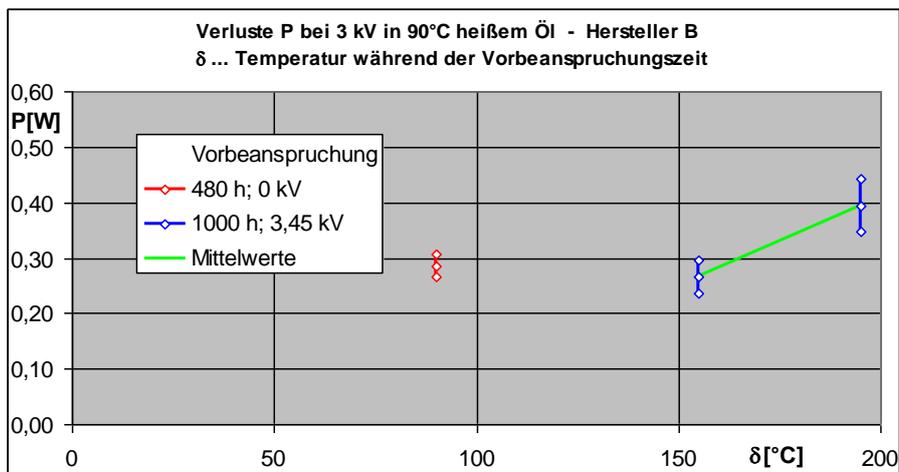
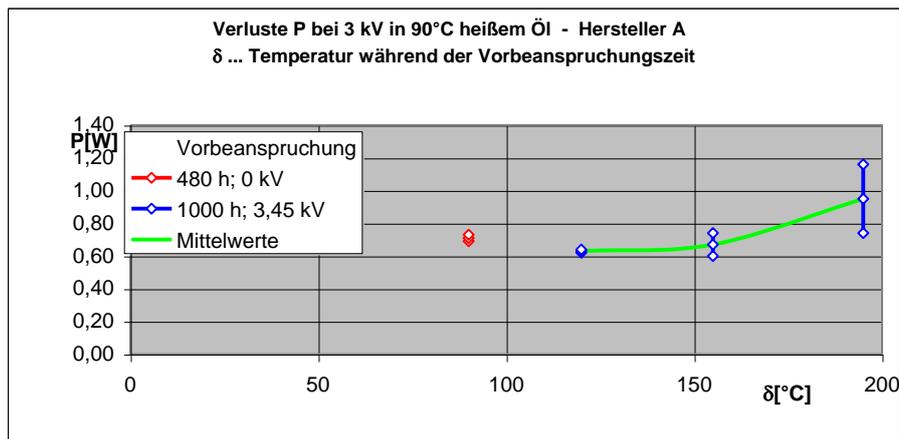


Bild 6.3: Verlustleistungen der Varistoren nach Langzeitalterung über 1000 Stunden in Abhängigkeit von der Öltemperatur für Hersteller A (oben) und Hersteller B (unten)

In Bild 6.3 ist die Verlustleistung bei Dauerspannung von 3 kV in Abhängigkeit von der Öltemperatur während der 1000stündigen Langzeitalterung wiedergegeben. Lediglich bei der höchsten Temperatur von 195 °C ist ein leichter Anstieg zu erkennen, was daraufhin deutet,

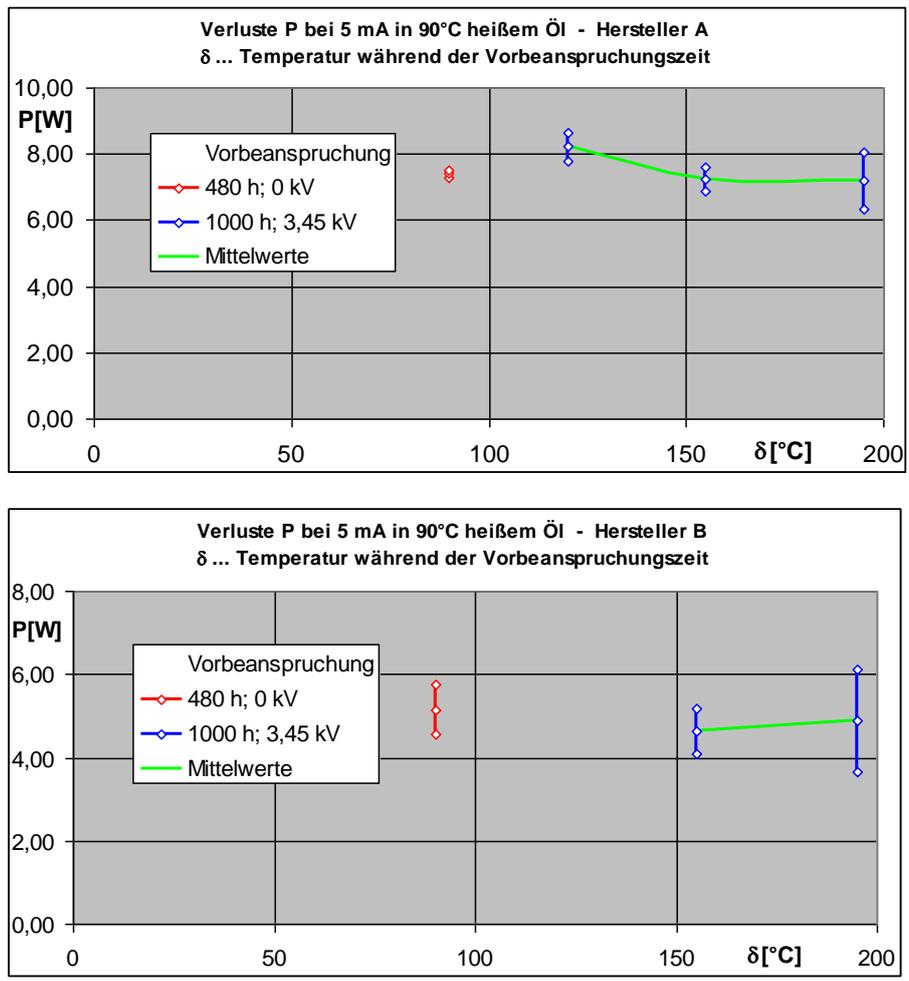


Bild 6.4 Verlustleistungen der Varistoren nach Langzeitalterung über 1000 Stunden in Abhängigkeit von der Öltemperatur für Hersteller A (oben) und Hersteller B (unten)

dass diese Temperatur für beide Varistortypen die höchste, in Langzeitalterungsprüfungen anzuwendende Temperatur sein dürfte. Bis zu dieser Temperatur sind keine Änderungen in den Verlustleistungen bei Dauerspannung erkennbar. Dies bedeutet, dass sich die isolierende Wirkung der Grenzschichten in dem gesamten Temperaturbereich nicht geändert hat.

Bild 6.4 zeigt die Verlustleistungen bei einem Stromscheitelwert von 5 mA, also in einem Bereich der Spannungs-Strom-Kennlinie, der sich bereits im Knick der Kennlinie befindet. In diesem Bereich sind keine signifikanten Veränderungen sichtbar.

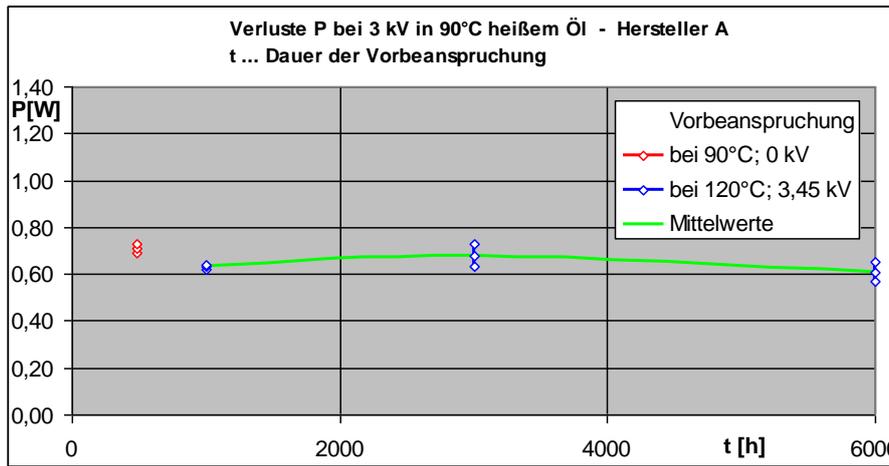


Bild 6.5: Verlustleistungen der Varistoren bei Dauerspannung bei einer Öltemperatur von 120 °C in Abhängigkeit von der Alterungsdauer für Hersteller A

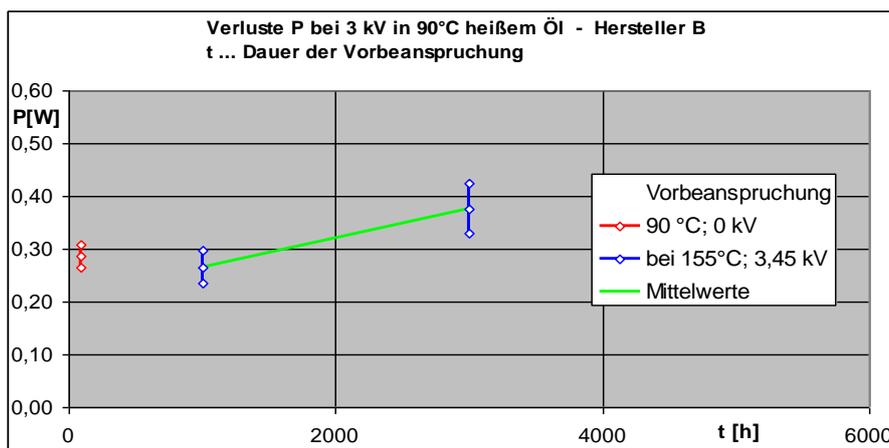
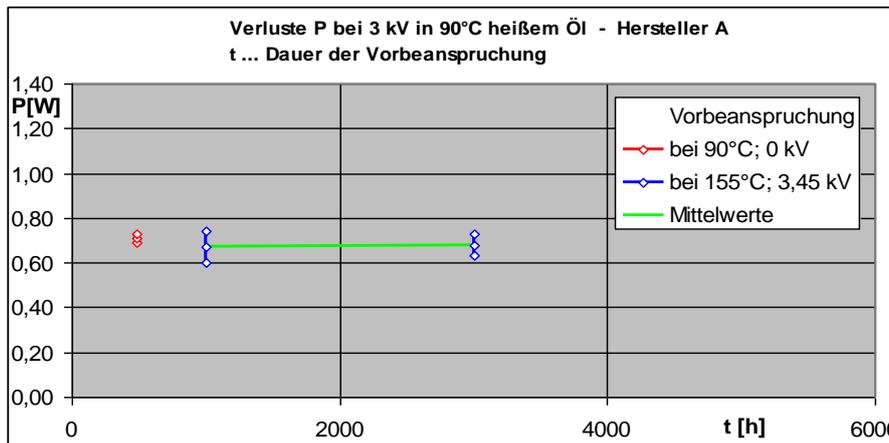


Bild 6.6: Verlustleistungen der Varistoren bei Dauerspannung bei einer Öltemperatur von 155 °C in Abhängigkeit von der Alterungsdauer für Hersteller A (oben) und Hersteller B (unten)

Die in den Bildern 6.5 und 6.6 wiedergegebene Änderung in den Verlustleistungen bei Dauerspannung in Abhängigkeit von der Alterungszeit verdeutlicht ebenfalls die Stabilität der Varistoren in diesem Bereich der Leitfähigkeit. Lediglich bei Hersteller B zeigt sich bei einer Alterung mit 155 °C über 3000 Stunden ein leichter Anstieg. Der Anstieg liegt im Vergleich zu den Neuwerten bei etwa 30% und braucht noch nicht als kritisch angesehen zu werden.

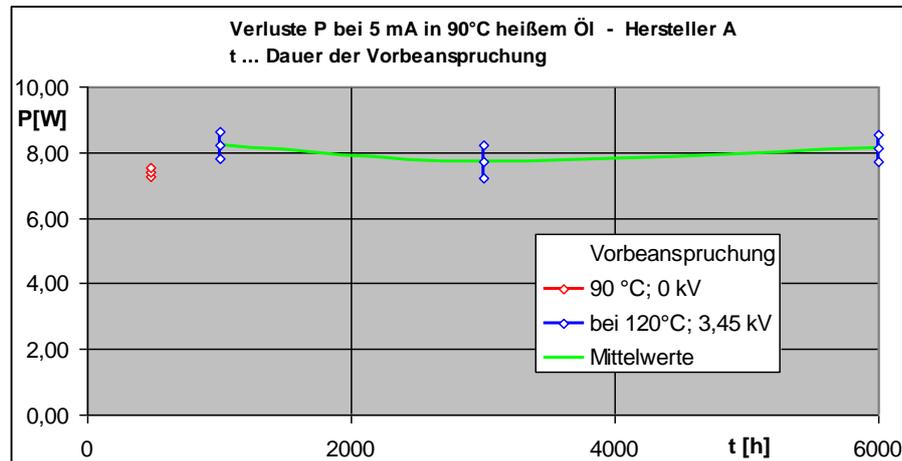


Bild 6.7: Verlustleistungen der Varistoren bei einem Stromsichelwert von 5 mA bei einer Öltemperatur von 120 °C in Abhängigkeit von der Alterungsdauer für Hersteller A

Die Bilder 6.7 und 6.8 zeigen die gleichen Abhängigkeiten für die Verlustleistungen bei einem Scheitelwert des Varistorstroms von 5 mA. In diesem Bereich der Spannungs-Strom-Kennlinie ist keine statistisch signifikante Änderung der Verlustleistungen mit der Alterungszeit erkennbar. Dies heißt, dass sich die für den Tunneleffekt verantwortlichen Eigenschaften der Grenzschichten zwischen den ZnO-Körnern nicht mit der Alterungszeit verändert haben.

Für die Verlustleistungen lassen sich die Ergebnisse nach der Langzeitalterung wie folgt zusammenfassen:

- Änderungen in der Verlustleistung sind nur in dem Bereich der Grenzschicht-Leitfähigkeiten zu erwarten, in denen die isolierende Eigenschaft maßgeblich ist. In diesem Bereich befindet sich die Dauerspannung eines Ableiters. Die Ergebnisse deuten an, dass diese Änderungen merklich werden, wenn die Öltemperatur bei 1000stündiger Alterung 195 °C und bei 3000stündiger Alterung 155 °C übersteigt.
- Änderungen in dem Bereich der Grenzschicht-Leitfähigkeiten, in dem der Tunneleffekt merklich wird, treten in dem gesamten untersuchten Bereich nicht auf.

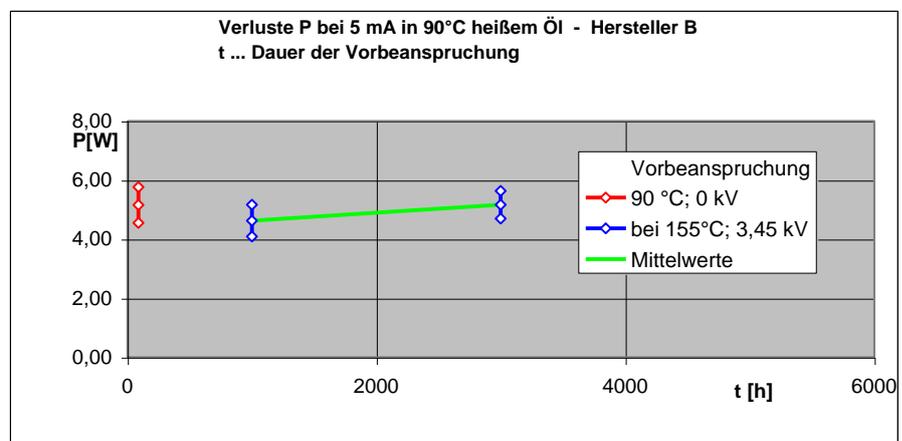
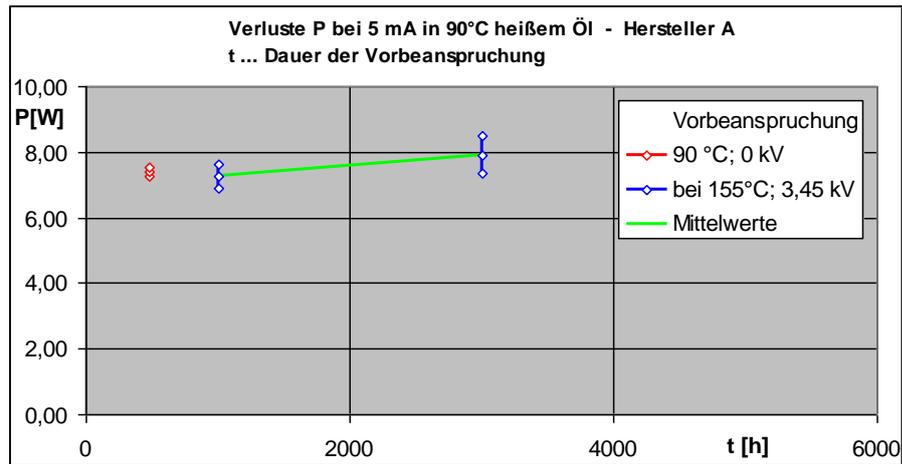


Bild 6.8: Verlustleistungen der Varistoren bei einem Stromsichelwert von 5 mA bei einer Öltemperatur von 155 °C in Abhängigkeit von der Alterungsdauer für Hersteller A (oben) und Hersteller B (unten)

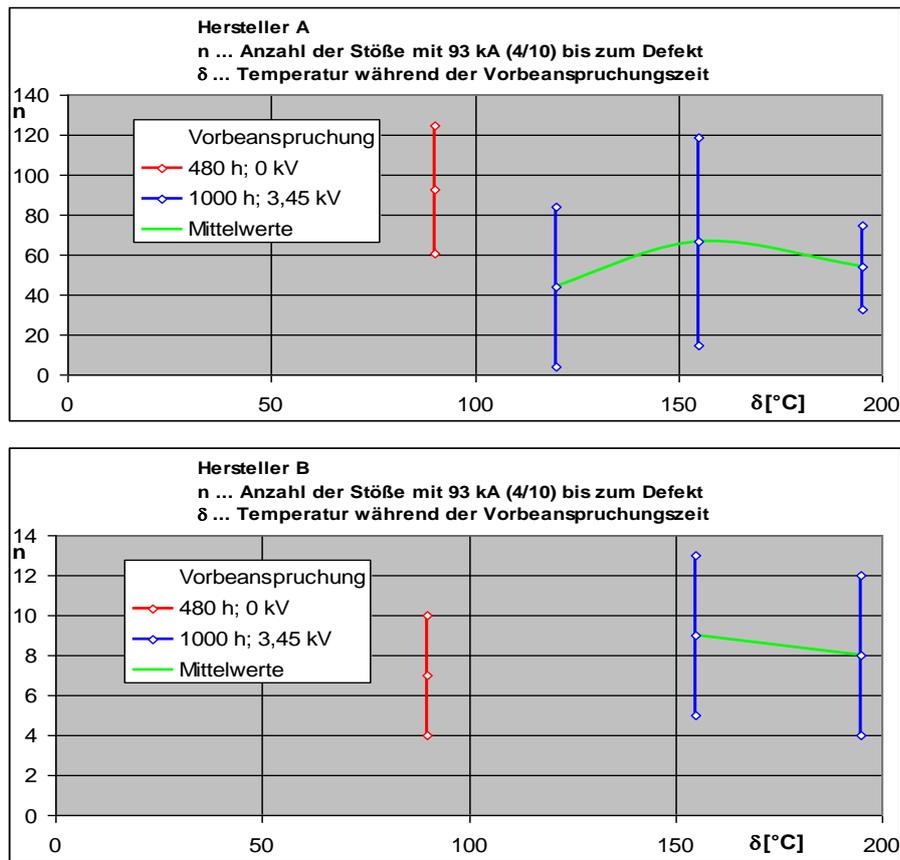


Bild 6.9: Energieaufnahmevermögen nach Langzeitalterung über 1000 Stunden. Anzahl der Beanspruchungen mit Hochstoßstrom in Abhängigkeit von der Öltemperatur, Hersteller A (oben) und Hersteller B (unten) Mittelwerte und Streubereiche der Einzelergebnisse

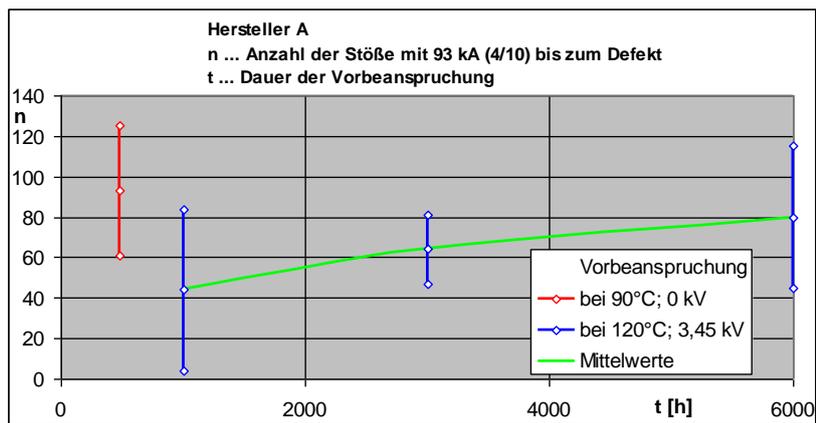


Bild 6.10: Energieaufnahmevermögen nach Langzeitalterung bei einer Öltemperatur von 120 °C Anzahl der Beanspruchungen mit Hochstoßstrom in Abhängigkeit von der Alterungszeit, Hersteller A Mittelwerte und Streubereiche der Einzelergebnisse

Die Untersuchungen zum Einfluss der Langzeitalterung auf das Energieaufnahmevermögen der Varistoren erbrachte eindeutige Ergebnisse. Bild 6.9 zeigt den Einfluss der für den Langzeitversuch gewählten Öltemperatur bei der 1000stündigen Alterung. Statistisch signifikante Änderungen mit der Temperatur sind für beide Varistortemperaturen nicht erkennbar.

Die Bilder 6.10 und 6.11 geben die Abhängigkeiten des Energieaufnahmevermögens von der Alterungsdauer für die Öltemperaturen von 120 °C und 155 °C wieder. In keinem der Fälle ist ein statistisch signifikanter Einfluss der Langzeitalterung erkennbar.

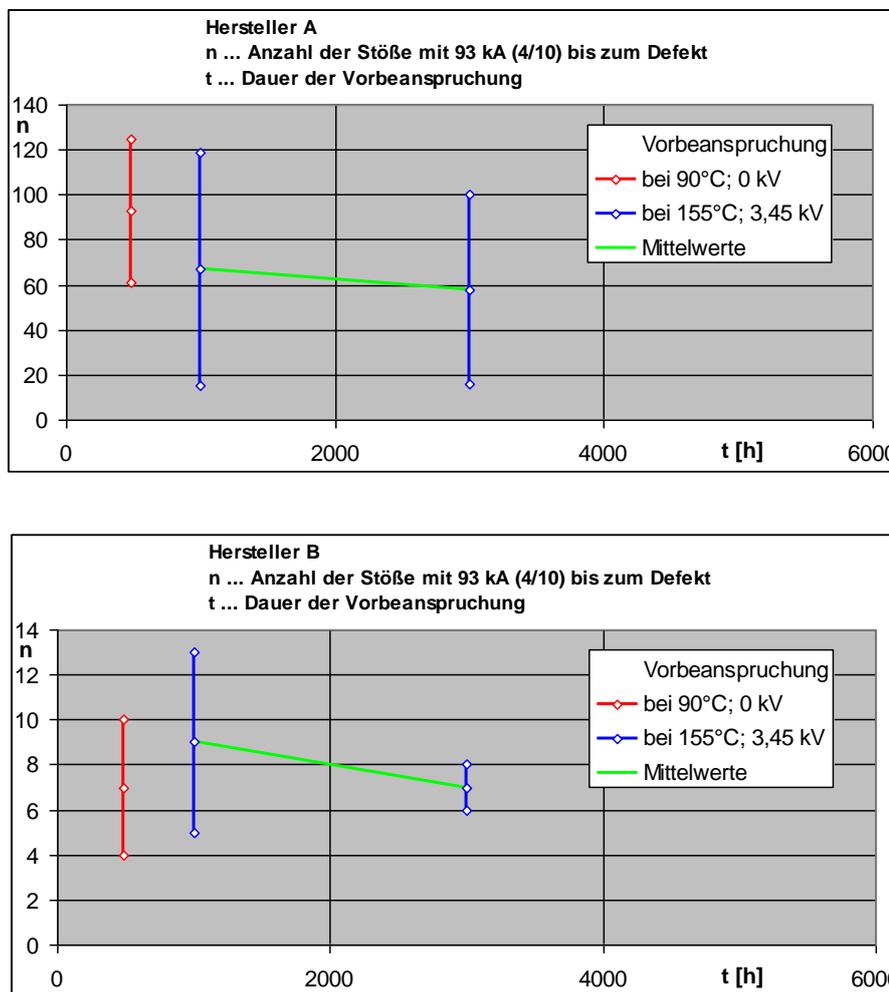


Bild 6.11: Energieaufnahmevermögen nach Langzeitalterung bei einer Öltemperatur von 155 °C  
 Anzahl der Beanspruchungen mit Hochstoßstrom in Abhängigkeit von der Alterungszeit, Hersteller A (oben) und Hersteller B (unten)  
 Mittelwerte und Streubereiche der Einzelergebnisse

Auffallend sind die großen Streubereiche in den ermittelten Anzahl der Stoßstrom-Beanspruchungen bis zur Zerstörung der Varistoren. Die an den einzelnen Varistorexemplaren erzielten Ergebnisse könne um Faktoren auseinander liegen, die in einzelnen Fällen den Wert von 20 erreichen. Diese Streuung erschwert zwar die Trendermittlung der Ergebnisse nach den unterschiedlichen Alterungen, doch sind die Ergebnisse so eindeutig, dass die generelle Aussage statistisch abgesichert zu sein scheint.

Danach lässt sich feststellen, dass sich weder das Energieaufnahmevermögen noch die Spannungsfestigkeit nach Langzeitalterung in heißem Öl merklich ändern. Dies bedeutet, dass die Tunneleigenschaften der Grenzschichten zwischen den ZnO-Körnern so geringfügig beeinflusst werden, dass die Effekte in der Streuung des Materialgefüges untergehen.

Zusammenfassend zum Energieaufnahmevermögen und der Spannungsfestigkeit ist festzustellen, dass beide aufgrund der hohen dielektrischen Festigkeit des Öls höher sind als die für Ableiter in Luft bei Raumtemperatur.

### **6.3 Langzeitalterung in Altöl**

Es war von vorneherein eine der wesentlichen Fragen, wie sich Metalloxidvaristoren in gealtertem Transformatoröl verhalten, da die in solchen Ölen vorhandene Zersetzungsprodukte durchaus Einflüsse auf die Kenngrößen der Varistoren haben können, die bei neuen Transformatorölen nicht vorhanden sind. Eine vergleichende Alterung wurde für eine der Varianten daher auch in diesen Untersuchungen mit einbezogen.

Um Transformatoröl mit betrieblich relevanten Eigenschaften in den Langzeitversuchen zu verwenden, wurde Öl aus einem Leistungstransformator eines Industriebetriebs entnommen. Der Transformator hatte eine Betriebszeit von über 30 Jahren und war entsprechend den Anforderungen eines Industriebetriebs vergleichsweise stark belastet. Das Öl wies entsprechend der Betriebszeit eine dunkle Farbe auf, war aber nach Beurteilungsvorgaben der VDEW noch betriebstüchtig.

Die Langzeitalterung in Altöl wurde nur für die 3000stündige Alterung bei einer Öltemperatur von 155 °C durchgeführt, wobei die Bestimmung der Kennwerte wie bei den Alterungsversuchen mit neuem Öl in sauberen Neuöl bei 90 °C vorgenommen wurde. Zur Verdeutlichung sind die Verlustleistungen in die bereits gezeigten Diagramme für das saubere Neuöl miteingezeichnet. Die Bilder 6.12 und 6.13 geben die Ergebnisse für die Verlustleistungen und das Energieaufnahmevermögen nach Alterung wieder. Es zeigt sich dass in keinem der Kennwerte ein Unterschied in der Alterung zwischen Alt- und Neuöl besteht.

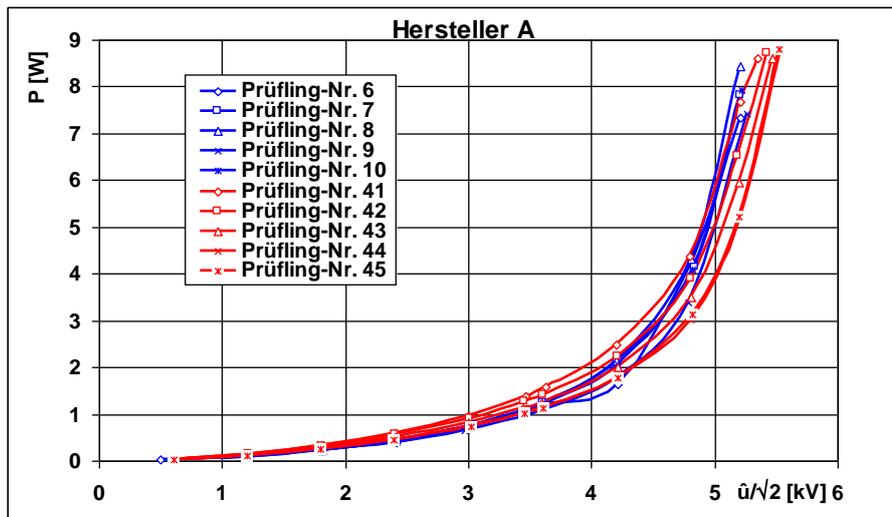


Bild 6.12: Verlustleistungen der Varistoren in Öl mit 90 °C vor (blau, Prüflinge 6 – 10) und nach Langzeitalterung (rot, Prüflinge 41 – 45) über 3000 Stunden in Altöl mit 155 °C, Hersteller A

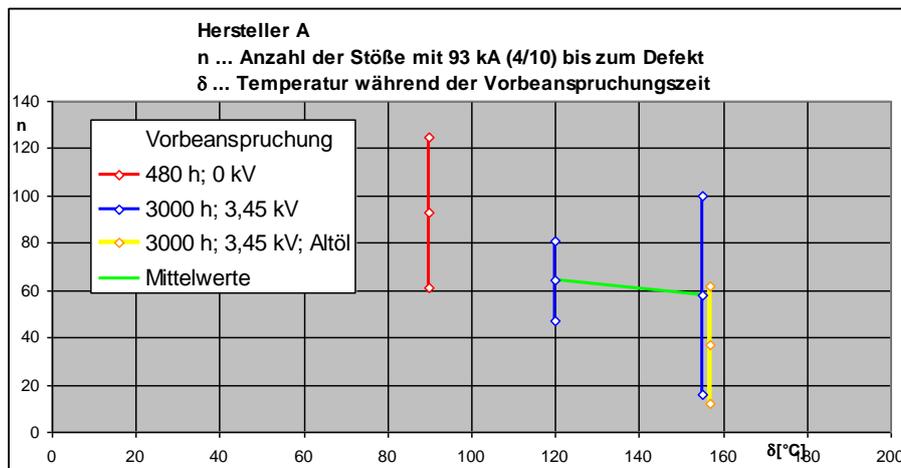


Bild 6.13: Energieaufnahmevermögen nach Langzeitalterung über 3000 Stunden in Altöl mit 155 °C im Vergleich zu den Ergebnissen für Neuöl, Hersteller A

## 7 Schlussfolgerungen

Die in diesem Forschungsvorhaben untersuchten Metalloxidvaristoren haben ihre ausgezeichnete Beständigkeit für den Betrieb in Transformatorenöl unter Beweis gestellt. Die vor und nach Langzeit-Alterungsversuchen mit Öltemperaturen zwischen 120 °C und 195 °C und Alterungsdauern von 1000 Stunden bis 6000 Stunden durchgeführten Messungen der Varistorkenngrößen haben nur in den Verlusten bei der gewählten Ableiterdauerspannung von 3 kV leichte Änderungen erbracht. Diese Änderungen waren nach 1000 Stunden Alterung bei 195 °C oder 3000 Stunden Alterung bei 155 °C bemerkbar. Energieaufnahmevermögen und Spannungsfestigkeit blieben unverändert.

Ableiter für die Anwendung in Luft werden nach IEC 60099-4 einer Langzeitalterung über 1000 Stunden bei 115 °C geprüft. Legt man die unterschiedlichen Umgebungsbedingungen für Luft mit 40 °C und Transformatoröl mit 90 °C zugrunde, so hat eine Langzeitalterung über 1000 Stunden mit einer Öltemperatur von 195 °C für Varistoren zur Verwendung in Öl denselben zeitraffenden Effekt wie das für Freiluftableiter genormte Verfahren. Basierend auf den Ergebnissen aus diesem Forschungsvorhaben wurde in IEC dieses Alterungsverfahren zur Normung vorgeschlagen und es wird erwartet, dass es bereits in dem kommenden Abstimmungsdokument enthalten ist.

Es muss jedoch betont werden, dass sich diese positiven Ergebnisse z.Z. nur auf die hier gewählten Kenngrößen der Langzeitbeständigkeit von Varistoren beziehen können und für eine endgültige betriebsgerechte Auslegung von Metalloxidableitern für den Einsatz in Transformatoren weitere klärende Untersuchungen erforderlich sein werden. Im einzelnen sind die folgenden Fragen noch zu klären:

- In den vorliegenden Untersuchungen war die Dauerspannung der Varistoren für gleiche Verlustleistung in Luft mit Raumtemperatur und Öl mit 90 °C ausgewählt. Es ergab mit diesem Kriterium für die untersuchten Varistoren eine Dauerspannung von 3 kV im Vergleich zu dem Wert von etwa 4 kV für die Verwendung in Freiluftableitern. Dieser erniedrigte Wert führt bei gegebener Betriebsspannung zu einer proportionalen Erhöhung der Ableiterschutzpegel, was in einer Realisierung nicht akzeptabel zu sein scheint. Dies bedeutet, dass für die endgültige Auslegung der Ableiter eine höhere Dauerspannung möglichst nahe an dem für Freiluft geltenden Wert verwendet werden sollte. Obwohl aus den Erfahrungen mit Varistoren für Freiluftableiter nicht erwartet wird, dass die so erhöhte Prüfspannung einen Einfluss auf die Langzeitstabilität haben wird, ist dies durch orientierende Versuche zu belegen.
- Die Untersuchungen des Forschungsvorhabens haben sich ausschließlich mit der Langzeitstabilität der Varistoren beschäftigt. Gesichtspunkte der thermischen Stabilität der Ableiter, d.h. ihre Rückkehr zur Ausgangstemperatur nach einer Überspannungsbeanspruchung im Betrieb, wurden nicht berührt. Unabhängig von der Wahl der Dauerspannung sind hierfür Dimensionierungsrichtlinien zu schaffen. Es ist zu vermuten, dass die in einer Arbeitsprüfung nach Norm zu überprüfende thermische Stabilität für Ableiter in Öl die dimensionierende Bedingung sein wird, insbesondere wenn neben der gege-

benen hohen Öltemperatur auch die Verlustleistungen durch eine erhöhte Dauer-  
spannung vergrößert wird.

Neben den dielektrischen und thermischen Anforderungen ist das Verhalten von Metalloxid-  
ableitern im Falle ihres Versagens von höchster Bedeutung. Die Bedenken der Betreiber  
hinsichtlich des Einsatzes der Ableiter in Transformatoren beruhen im wesentlichen auf die-  
sem Verhalten im Fehlerfall, da man eine Explosion des Ableiters mit anschließendem Zer-  
bersten des Ölkessels befürchtet. Auf der anderen Seite werden heute in anderen Anwen-  
dungsfällen mit in Anlagen integrierten, hermetisch abgeschlossenen Metalloxidableitern  
Lösungen vorgestellt, die diesem Gesichtspunkt Rechnung tragen. Es kann erwartet werden,  
dass solche Lösungen auch für den Ableitereinsatz in Transformatoren gefunden werden  
können.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die positiven Ergebnisse der Varistorbeständig-  
keit weitere Untersuchungen zur Auslegung der Ableiter nahe legen. Die zugrundezulegen-  
den Anforderungen und Bedingungen sind bekannt und Lösungen der inhärenten Probleme  
werden sich finden lassen.

## **8    Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsvorhabens für kleine und mittlere Unternehmen**

Die Liberalisierung des Strommarkts und die der dadurch entstandene Kostendruck hat die  
Netzbetreiber dazu veranlasst, neben strukturellen Maßnahmen nach Wegen zur Kostenein-  
sparung bei Investitionen, Instandhaltung, Betrieb und Verwaltung zu suchen. Hierbei bieten  
die Vereinfachung und Kompaktierung von Anlagen Möglichkeiten, die insbesondere bei  
Betreibern mit Versorgungsgebieten hoher Leistungsdichte genutzt werden können, ohne  
dabei die Versorgungszuverlässigkeit unzulässig zu beeinträchtigen. Kompakte, einfache  
und preisgünstige Anlagenlösungen sind damit gefragt.

Die herstellende Industrie reagiert auf solche Forderungen mit Vorschlägen, wie z.B. der  
Verwendung direkter Kabeleinführungen in Anlagen und Transformatoren. Letzteres wird  
allerdings nur möglich, wenn es gelingt, Schutzmaßnahmen gegen Überspannungen und  
Überströme sicherzustellen, z.B. durch Integration der Schutzelemente in die zu schützen-  
den Geräte.

Mit der Entwicklung funkenstreckenloser Überspannungsableiter aus keramischen Sinter-  
materialien (Metalloxid) sind einfache Konstruktionen möglich geworden, die in den früheren  
Zeiten der Funkenstreckenableiter nicht ergriffen werden konnten. Die Begrenzung der  
Überspannungen allein durch die ausgeprägte Nichtlinearität der Spannungs-Strom-Kenn-  
linie ohne Auswirkungen auf das umgebende Medium erlaubt hermetisch abgeschlossene, in  
Geräte integrierbare Lösungen, die bei Zukauf der Metalloxidvaristoren vielfältig auch von  
kmU angeboten werden.

Moderne Metalloxidvaristoren, bei denen sich die halbleitenden Eigenschaften unter betrieb-  
lichen Bedingungen als weitgehend alterungsunabhängig erwiesen haben, werden heute  
bereits in gasisolierte Schaltanlagen integriert und sind in der Verteilungsebene ein maßgeb-  
licher wirtschaftlicher Faktor für kmU. Bei der Integration in Leistungstransformatoren ist die

Haltung sowohl der Netzbetreiber als auch der herstellenden Industrie noch zögernd, insbesondere weil der Langzeitbeständigkeit der Varistoren kein ausreichendes Zutrauen entgegengebracht wird. Die Ergebnisse dieses Vorhabens werden dazu beitragen diesen Mangel an Vertrauen zu überwinden.

Das Forschungsergebnis ist somit sowohl für Betreiber von Anlagen und Geräten als auch für Hersteller innovativer Entwicklungen von Metalloxid-Überspannungsableiter von Bedeutung, die in Größe und Umsatz durchaus kleine und mittlere Unternehmen umfassen.

## **9 Beabsichtigte Umsetzung der Forschungsergebnisse**

Für die Umsetzung der Forschungsergebnisse wurden folgende Möglichkeiten genutzt:

### **- Ständiger Kontakt mit Herstellern**

Die wichtigsten Hersteller von Metalloxidvaristoren für den deutschen Markt haben ihr Interesse an diesem Forschungsvorhaben durch Bereitstellung der großen Anzahl von Varistoren für die Untersuchungen unter Beweis gestellt. Sie sind über den Fortgang der Untersuchungen informiert und werden einen vollständigen abschließenden Bericht über die Ergebnisse erhalten.

Darüber hinaus haben auch Ableiter-, Transformatoren- und Zulieferhersteller bereits ihr Interesse an den Ergebnissen dieses Forschungsvorhabens ausgedrückt.

### **- Einbringen der Ergebnisse in die Normungsarbeit**

Der Projektleiter dieses Forschungsvorhabens ist Vorsitzender des in Deutschland für Überspannungsableiter zuständigen Normungsgremiums DKE K 441. Über dieses Komitee sind Teile der Ergebnisse bereits heute in die internationale Normung der IEC eingeflossen und wurden akzeptiert.

### **- Veröffentlichung**

Eine Auswahl der Ergebnisse soll in einer Fachzeitschrift veröffentlicht werden. Die endgültige Auswahl der Zeitschrift wurde noch nicht vorgenommen, da eine deutschsprachige Zeitschrift, in der die Ergebnisse in ausreichendem Umfang dargestellt werden können, leider nicht mehr zur Verfügung steht.

Die Veröffentlichung aller Ergebnisse wird in einem Technischen Bericht der FGH erfolgen.

## 10 Literaturverzeichnis

- [1] W. Knorr, W. Peschke, B. Thiess: Das Verhalten von ZnO-Elementen in heißem Transformatorenöl. Elektrizitätswirtschaft, Jg. 84(1985), Seite 274-279
- [2] W. Knorr, W. Müller, W. Peschke: Der Einsatz von ZnO-Varistoren im Transformator. Elektrizitätswirtschaft, Jg. 85 (1986), Seite 232-235
- [3] W. Peschke, E. Buckow: Verwendung von ZnO-Varistoren zur Begrenzung von Überspannungen in Transformatorwicklungen. ETG-Fachbericht 29, 1989, Seite 131-135

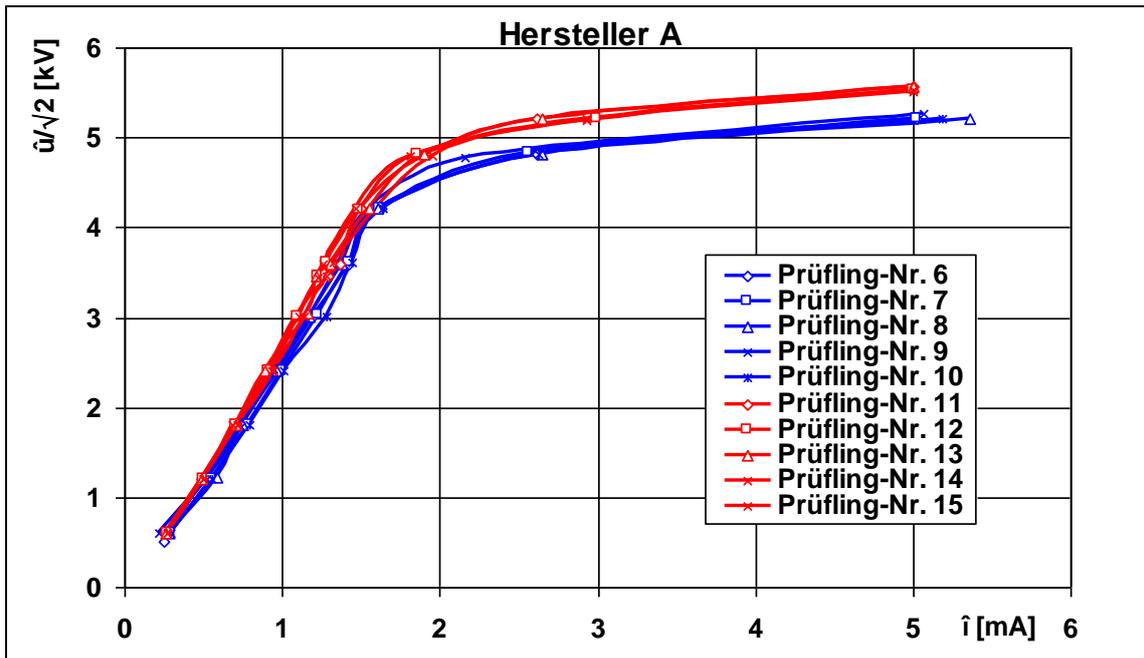
## **Anhang**

### **Zusammenstellung der Messergebnisse**

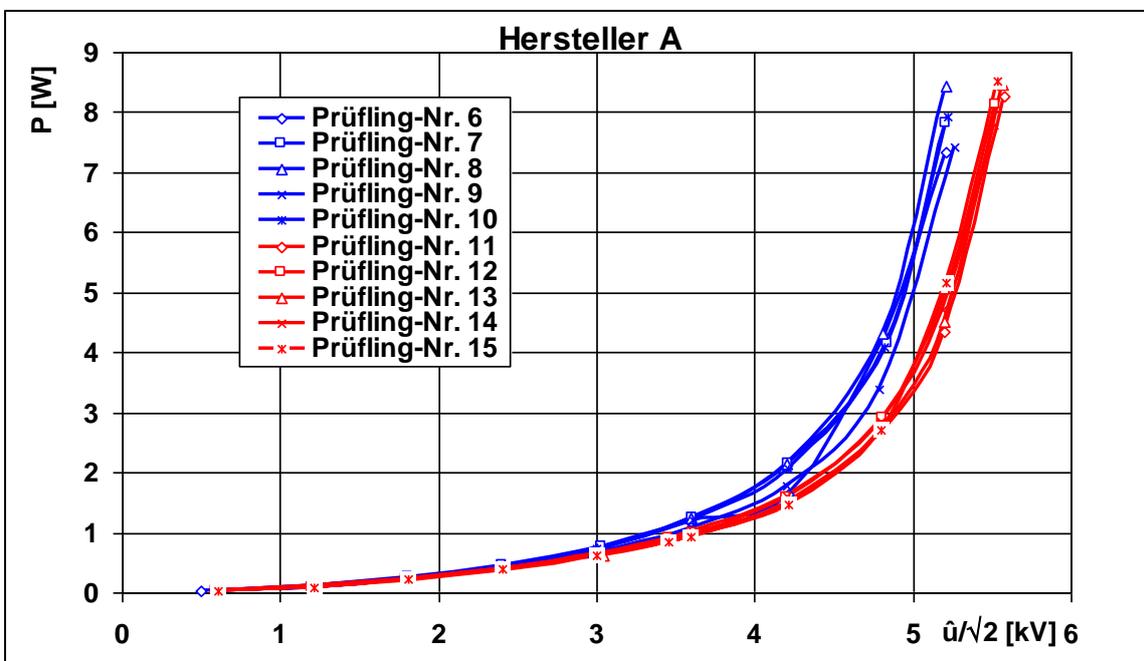




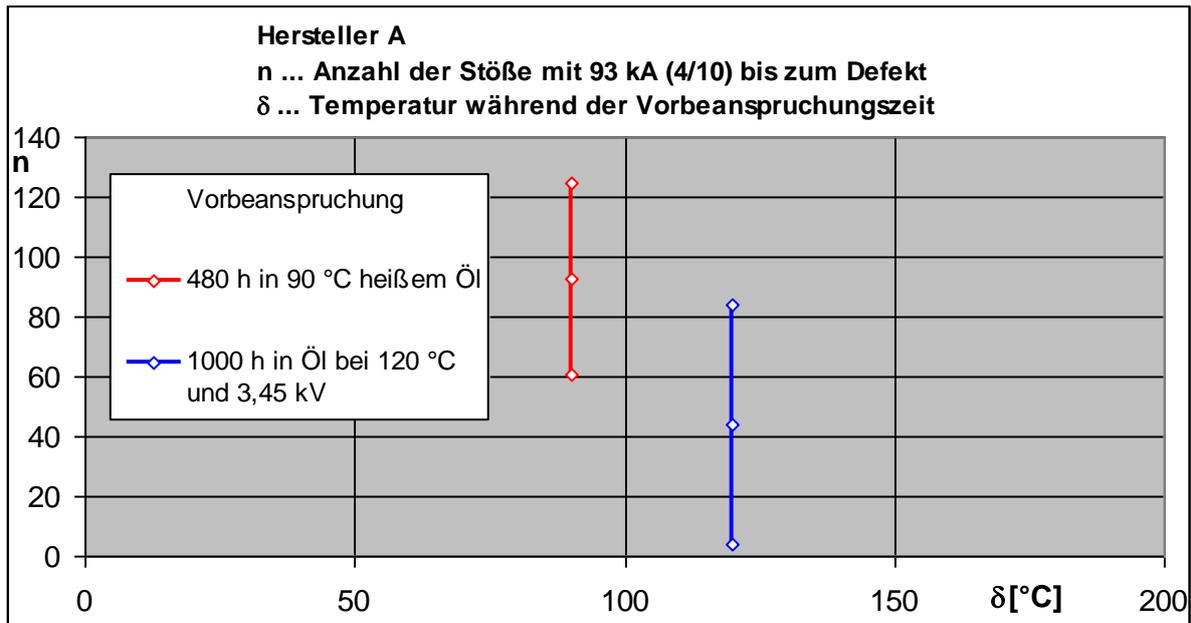




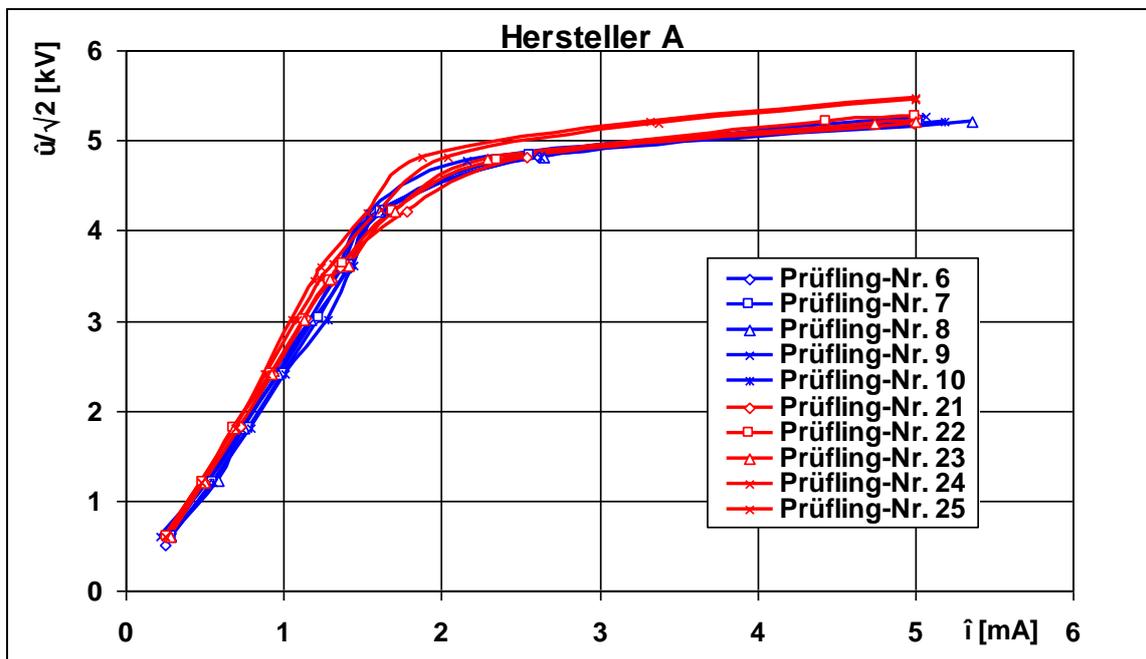
**Bild 1: U-I-Kennlinie**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 1000 h in 120 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



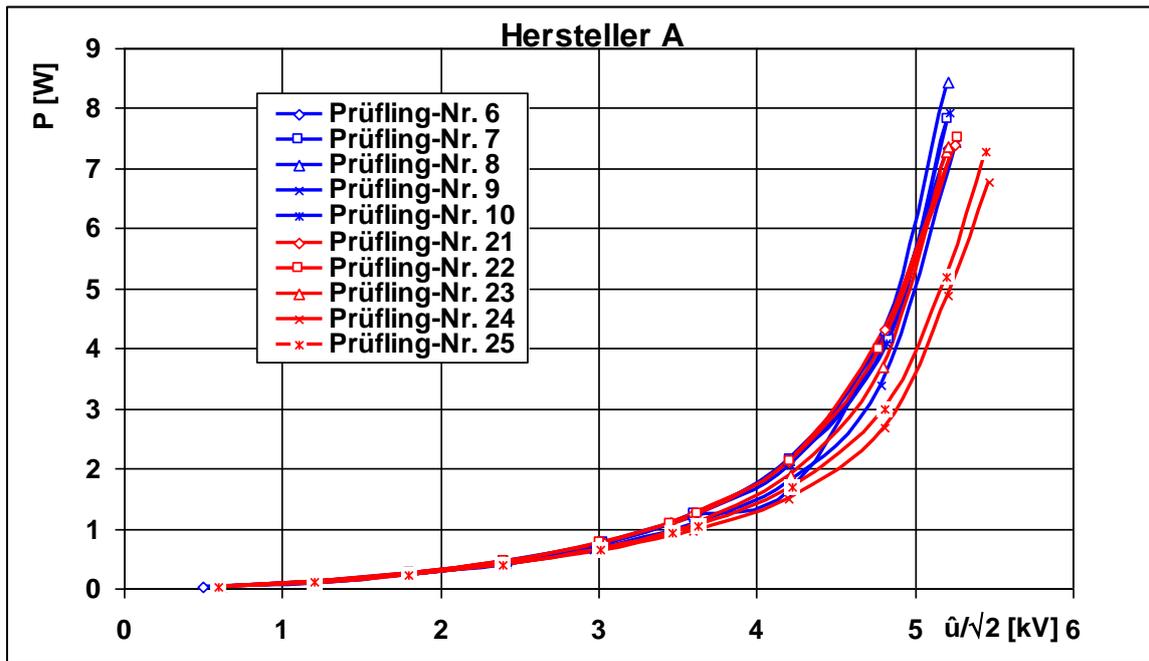
**Bild 2: Verlust-Kennlinie**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 1000 h in 120 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



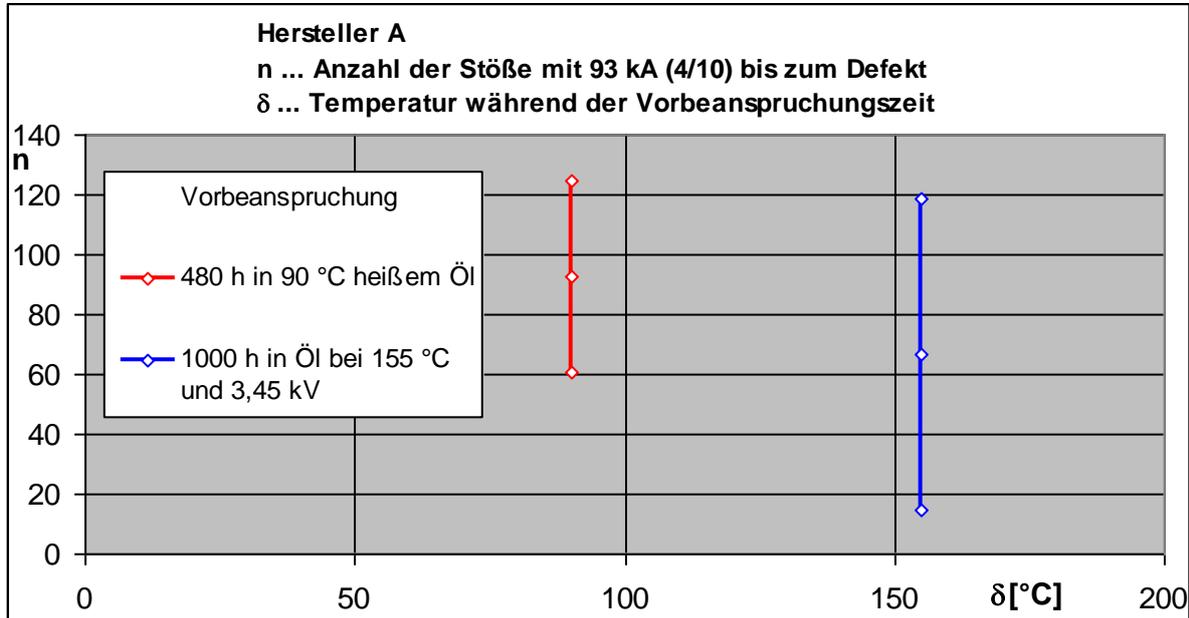
**Bild 3: Energieaufnahmevermögen**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 1000 h in 120 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



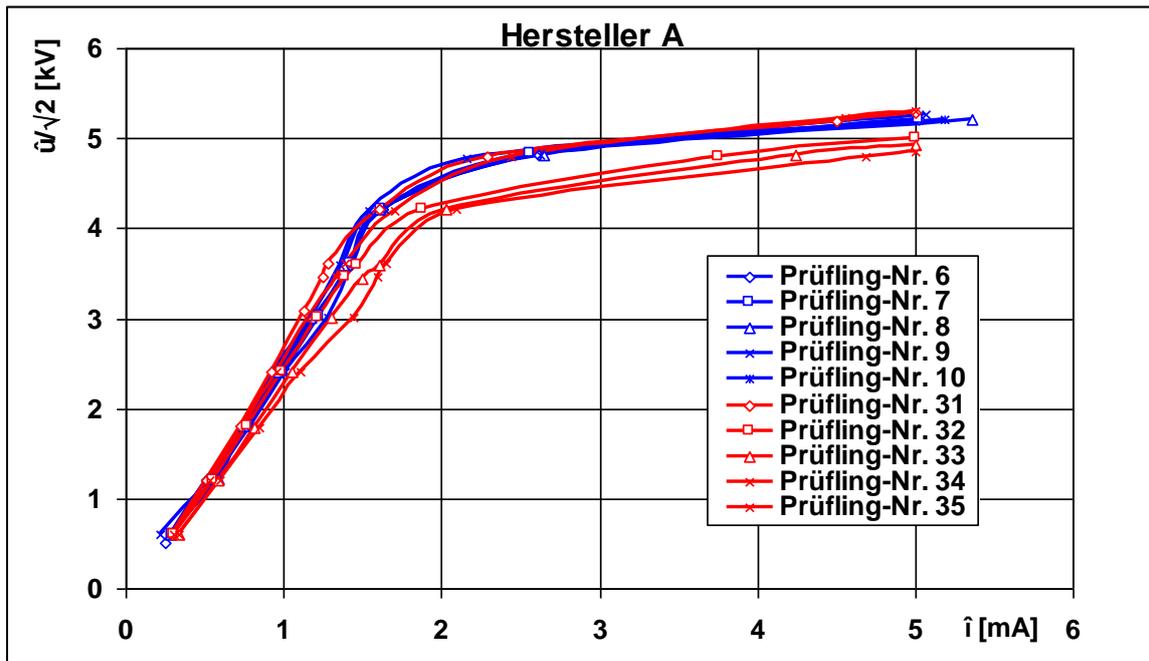
**Bild 4: U-I-Kennlinie**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 1000 h in 155 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



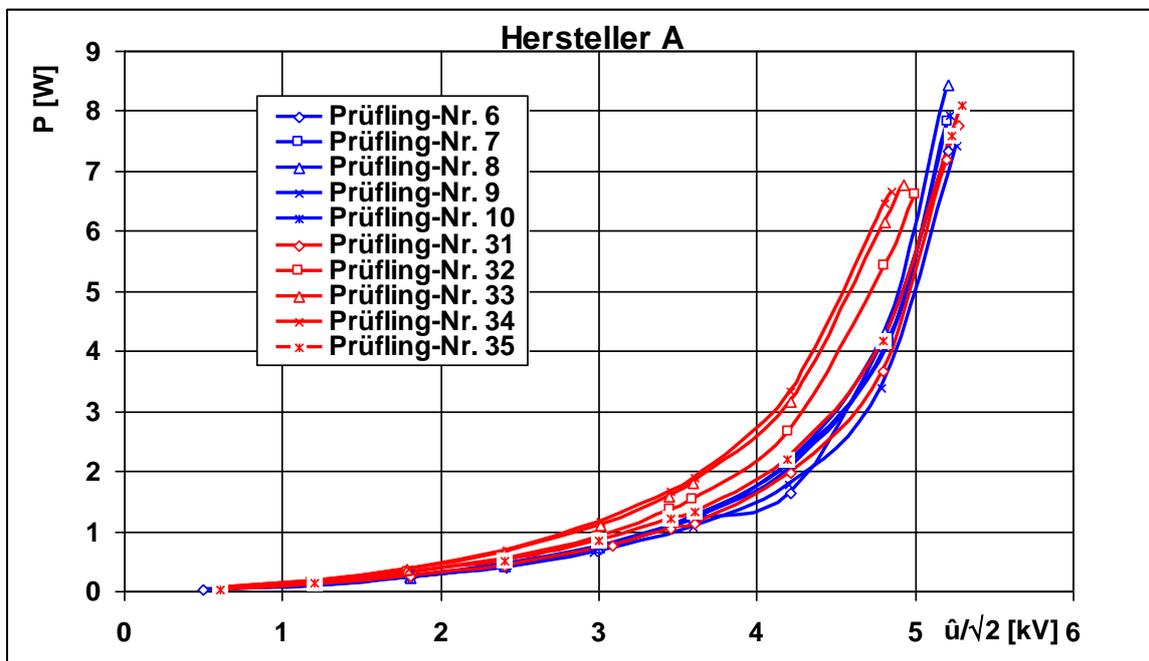
**Bild 5: Verlust-Kennlinie**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 1000 h in 155 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



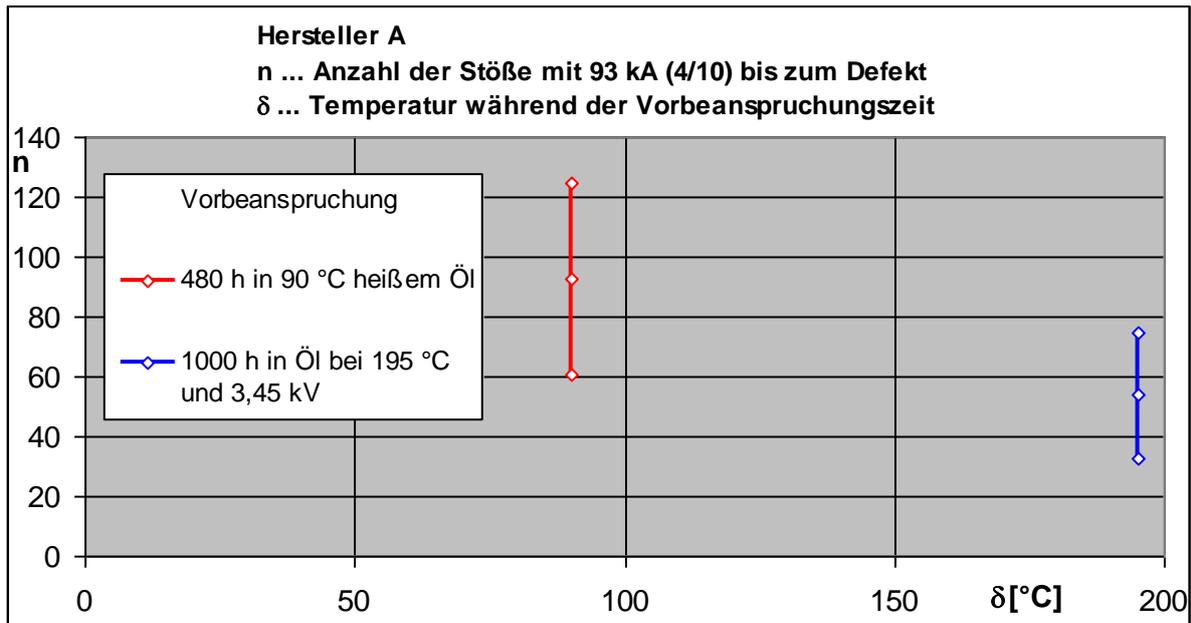
**Bild 6: Energieaufnahmevermögen**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 1000 h in 155 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



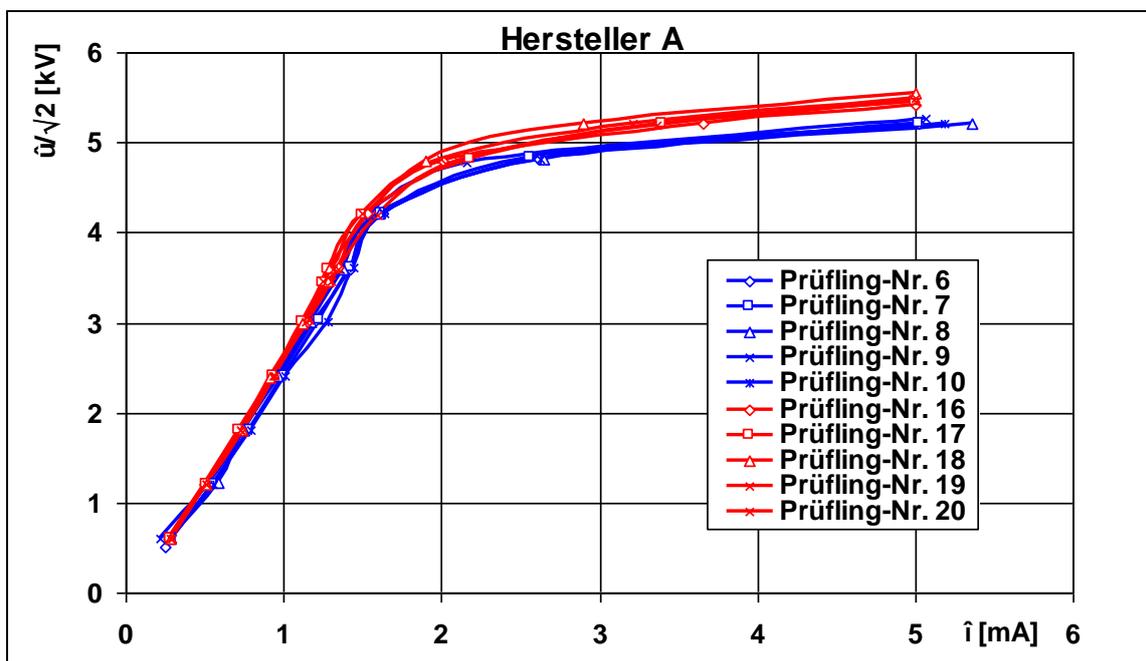
**Bild 7: U-I-Kennlinie**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 1000 h in 195 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



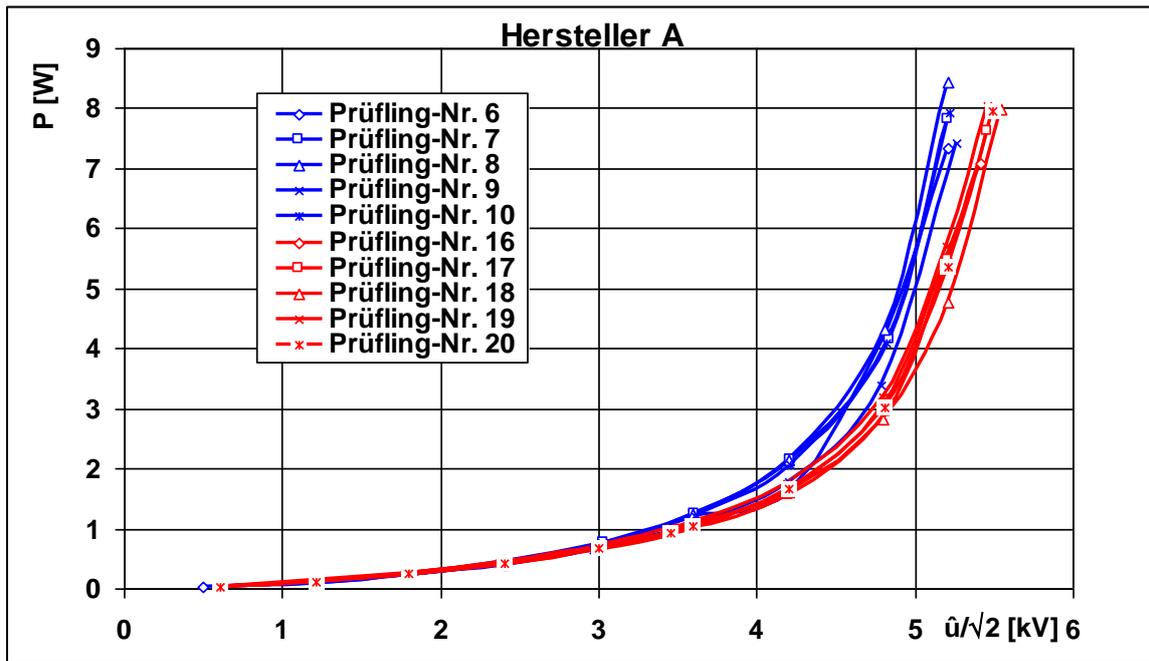
**Bild 8: Verlust-Kennlinie**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 1000 h in 195 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



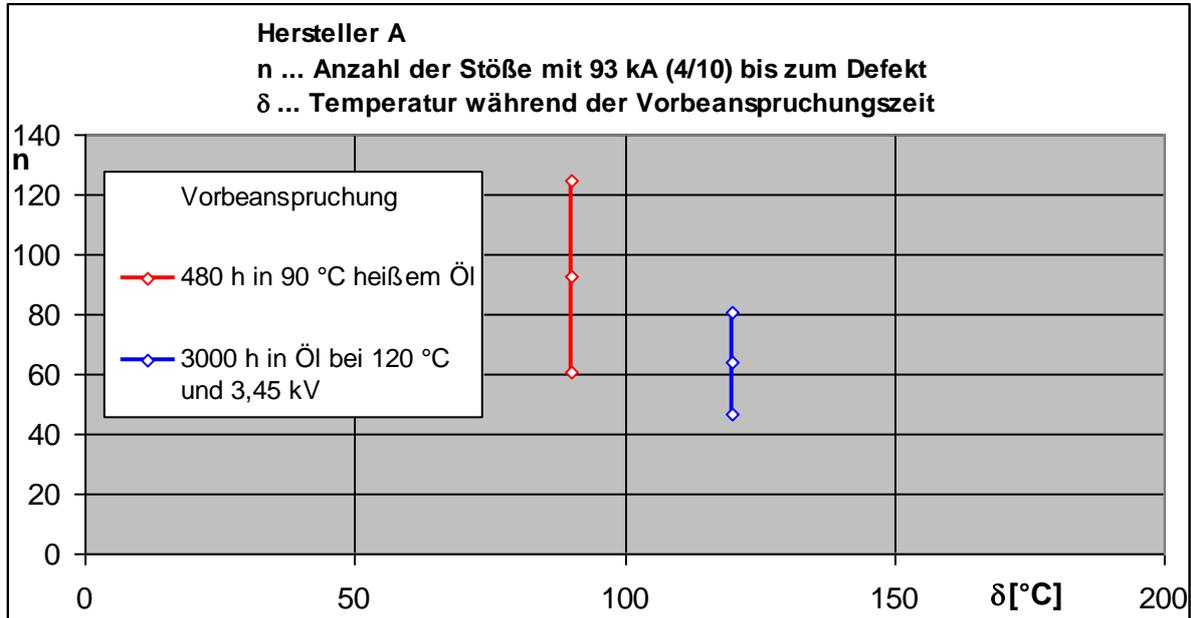
**Bild 9: Energieaufnahmevermögen**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 1000 h in 195 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



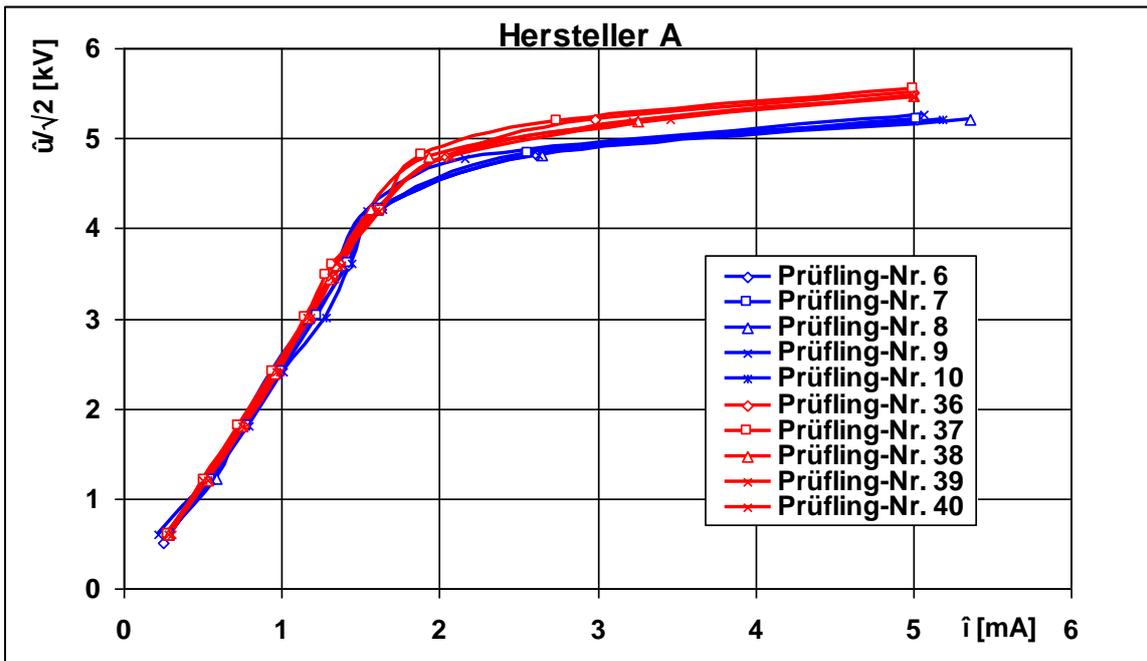
**Bild 10: U-I-Kennlinie**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 3000 h in 120 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



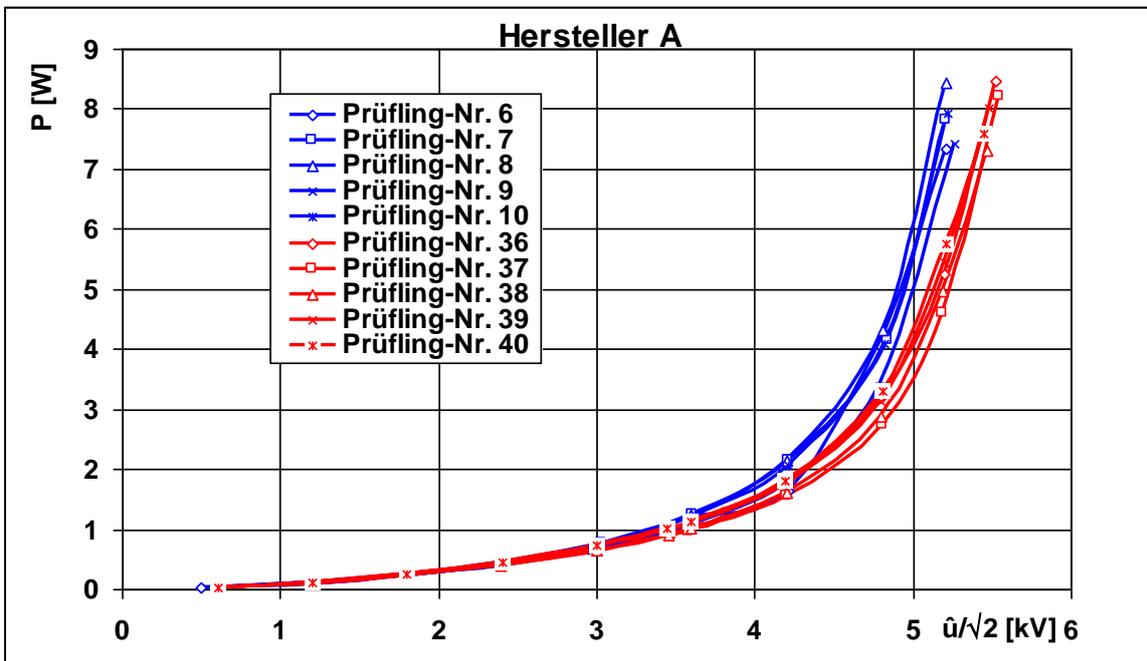
**Bild 11: Verlust-Kennlinie**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 3000 h in 120 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



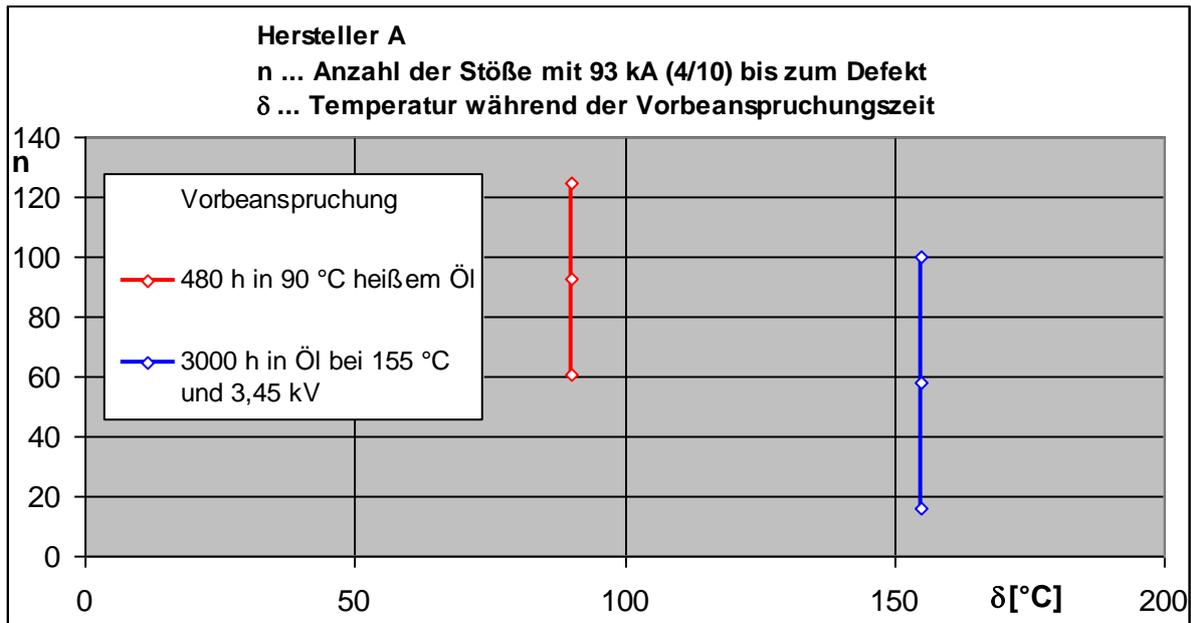
**Bild 12: Energieaufnahmevermögen**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 3000 h in 120 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



**Bild 13: U-I-Kennlinie**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 3000 h in 155 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



**Bild 14: Verlust-Kennlinie**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 3000 h in 155 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV

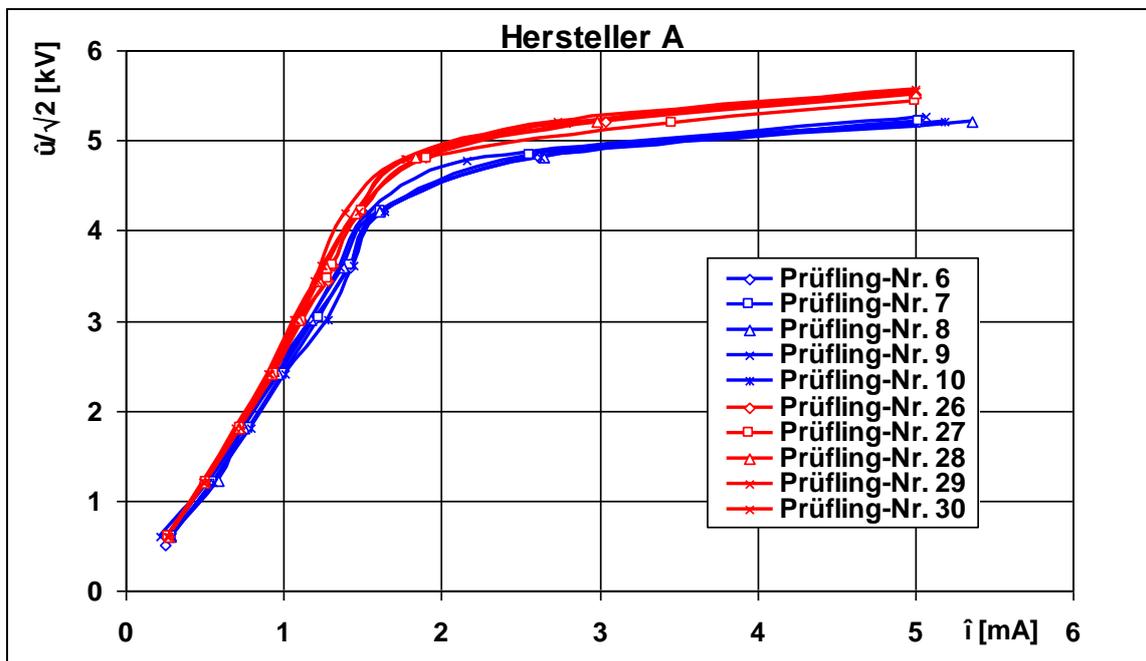


**Bild 15: Energieaufnahmevermögen**

Messung in 90 °C heißem Öl

Vorlasten:

- 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung
- 3000 h in 155 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV

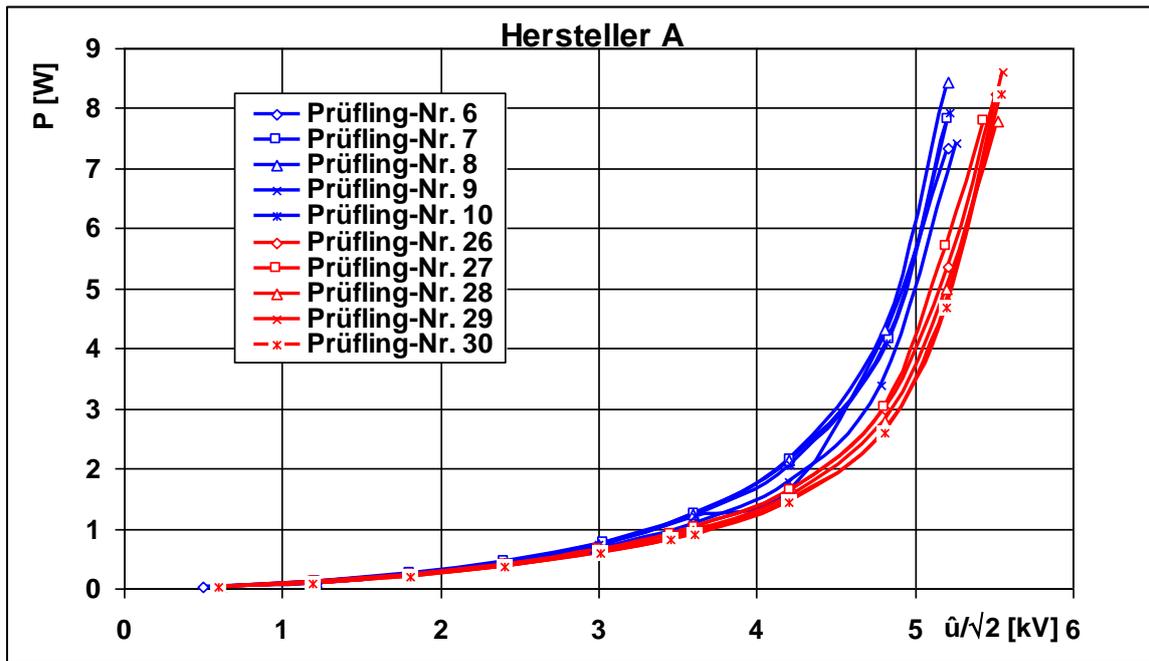


**Bild 16: U-I-Kennlinie**

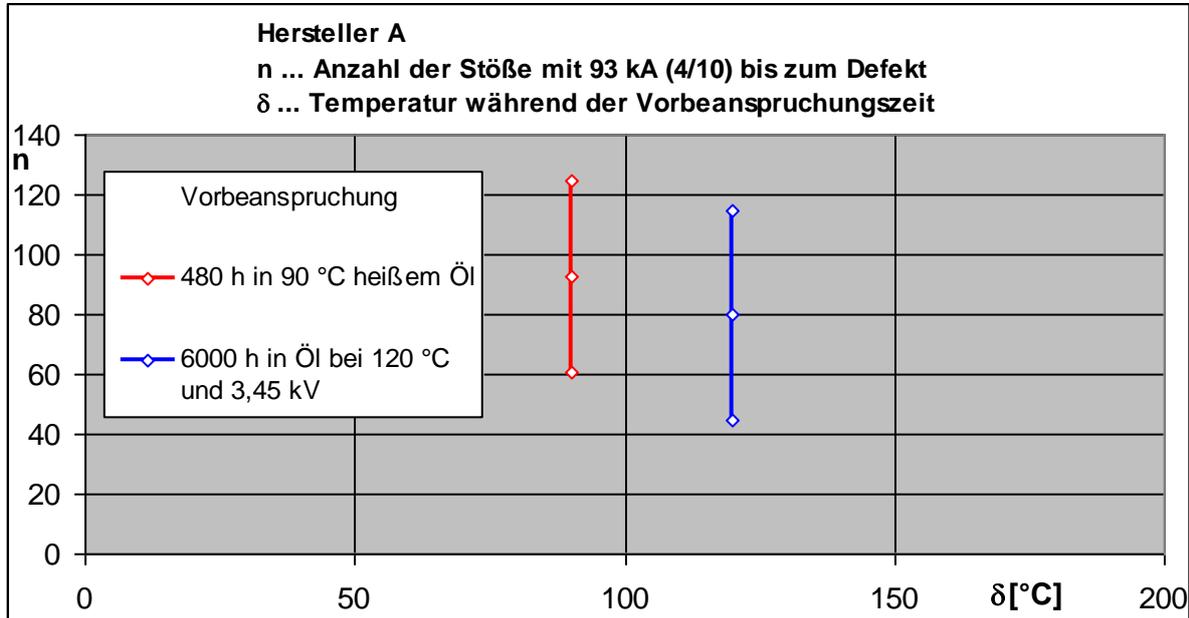
Messung in 90 °C heißem Öl

Vorlasten:

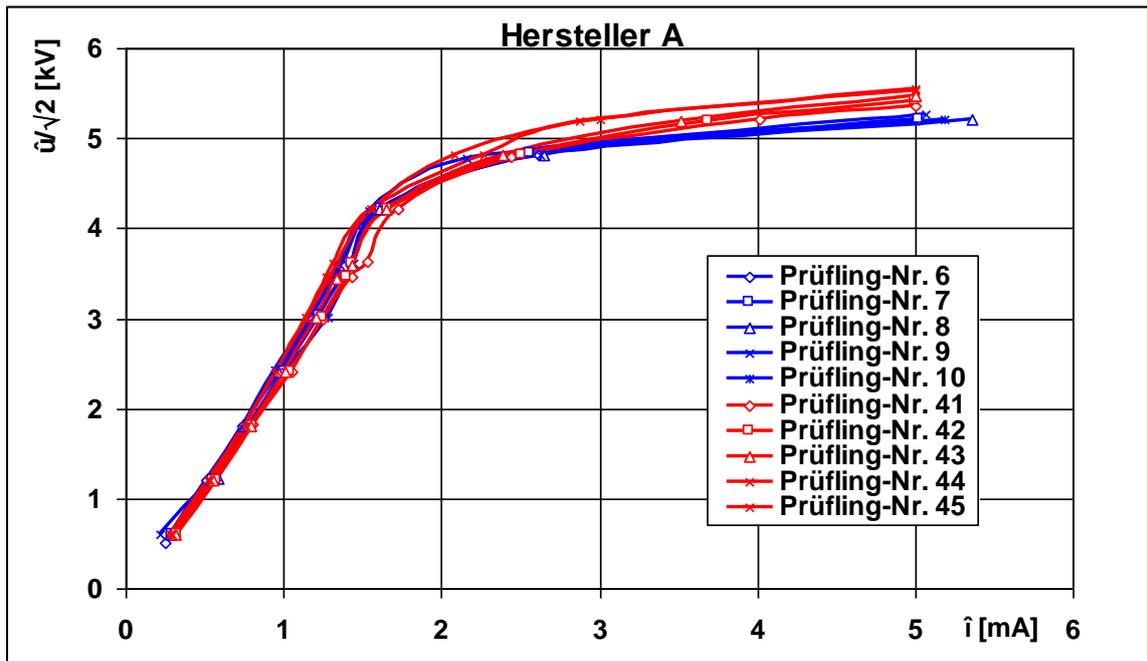
- 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung
- 6000 h in 120 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



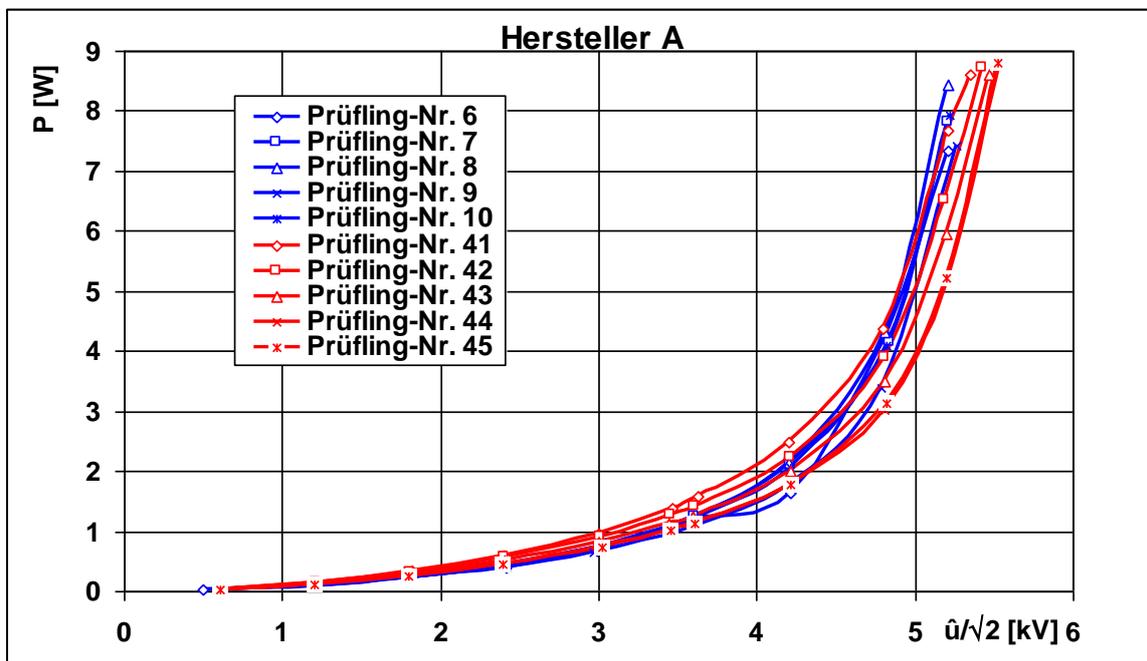
**Bild 17: Verlust-Kennlinie**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 6000 h in 120 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



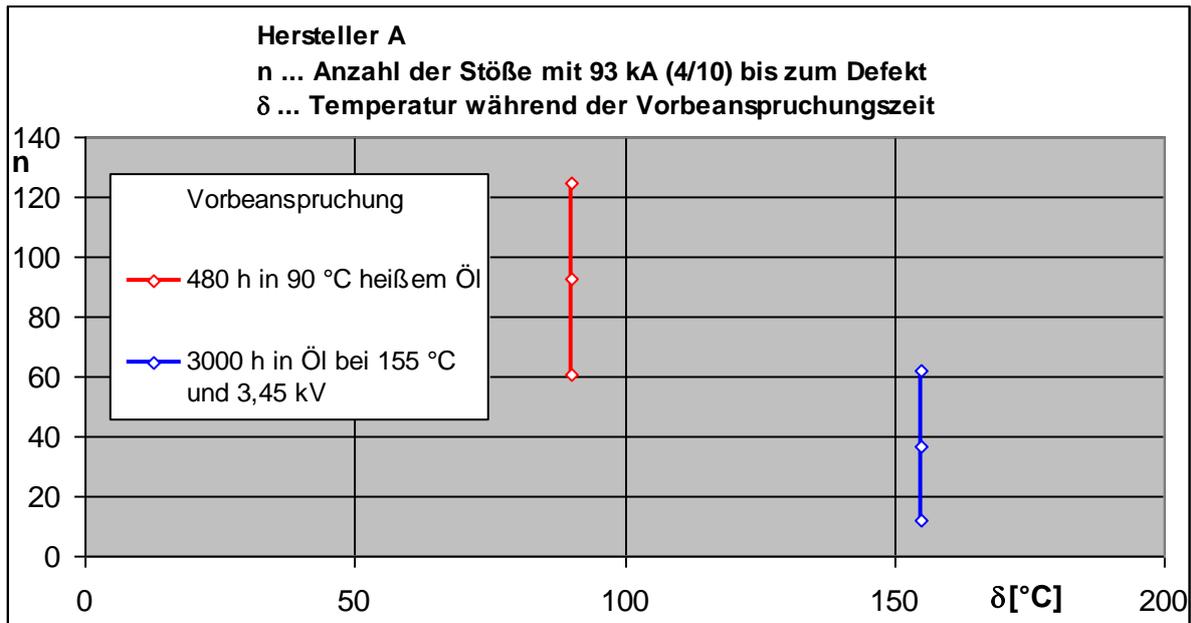
**Bild 18: Energieaufnahmevermögen**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 6000 h in 120 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



**Bild 19: U-I-Kennlinie**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 3000 h in 155 °C heißem Altöl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



**Bild 20: Verlust-Kennlinie**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 3000 h in 155 °C heißem Altöl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV

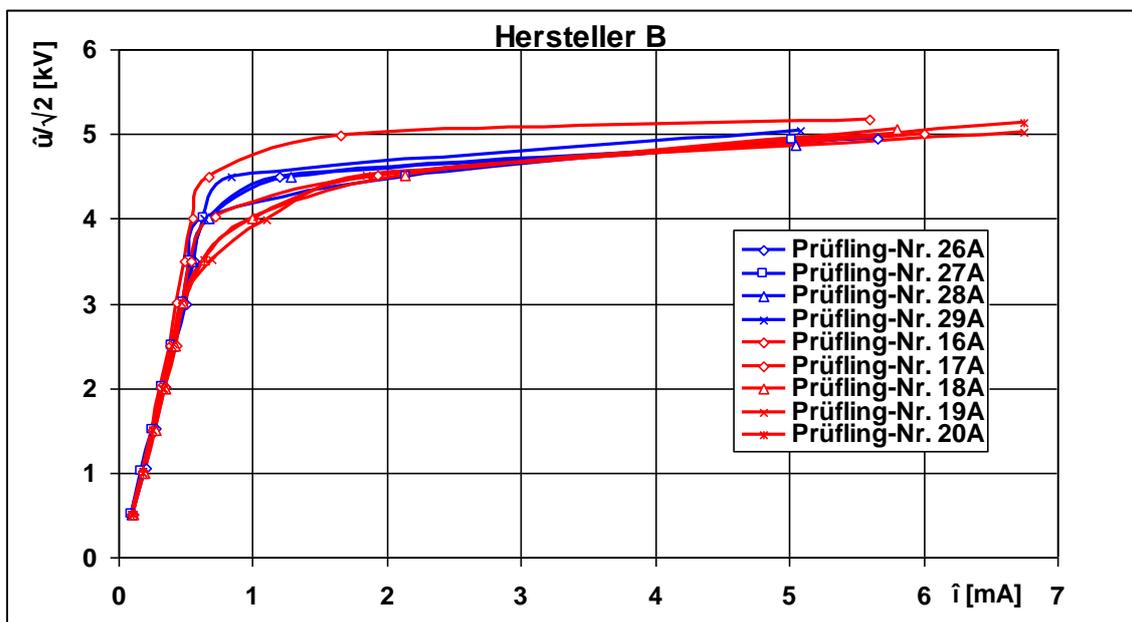


**Bild 21: Energieaufnahmevermögen**

Messung in 90 °C heißem Öl

Vorlasten:

- 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung
- 3000 h in 155 °C heißem Altöl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV

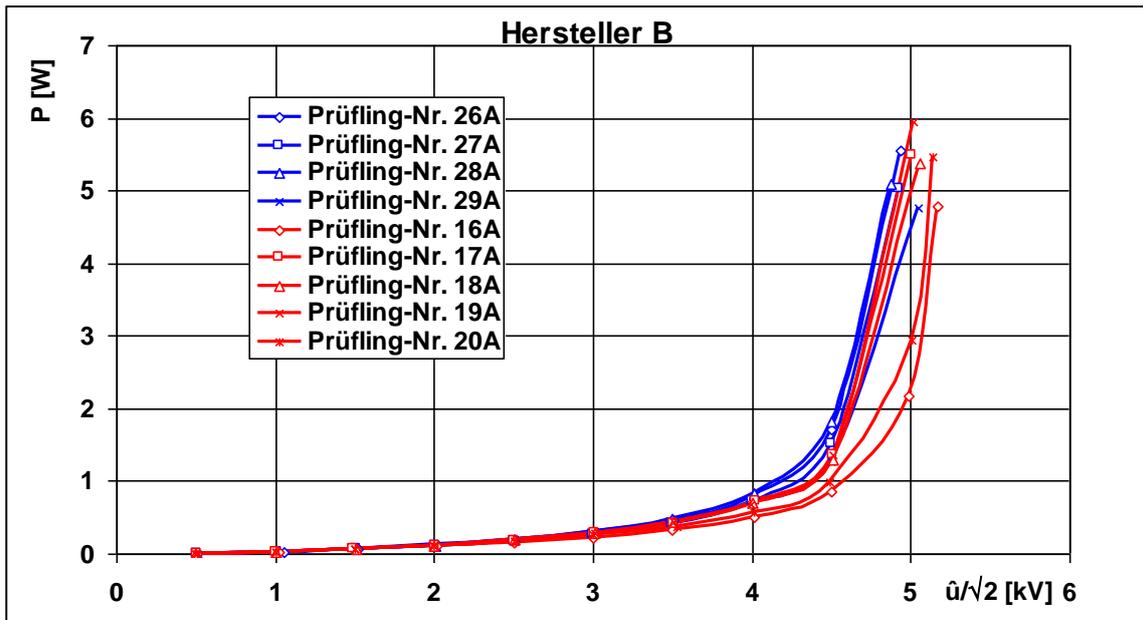


**Bild 22: U-I-Kennlinie**

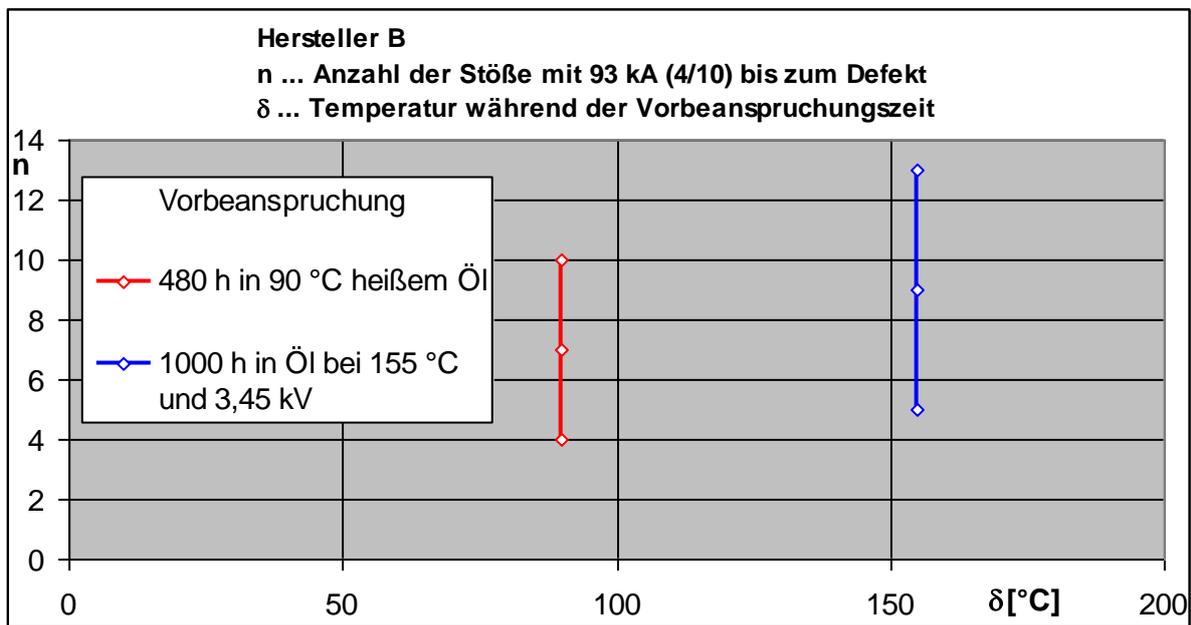
Messung in 90 °C heißem Öl

Vorlasten:

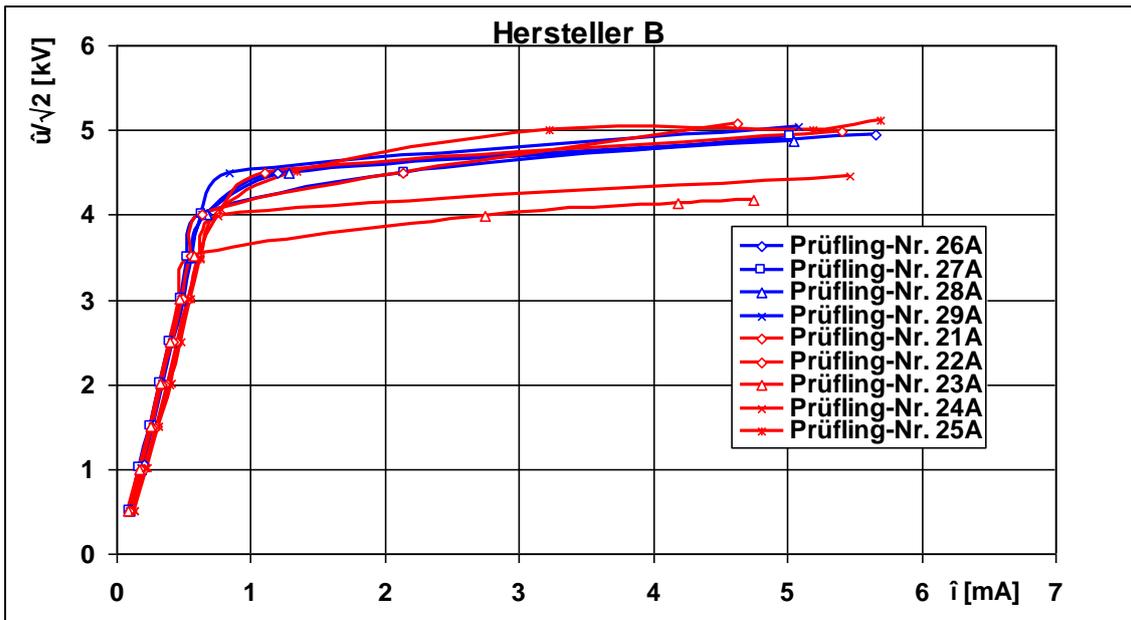
- 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung
- 1000 h in 155 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



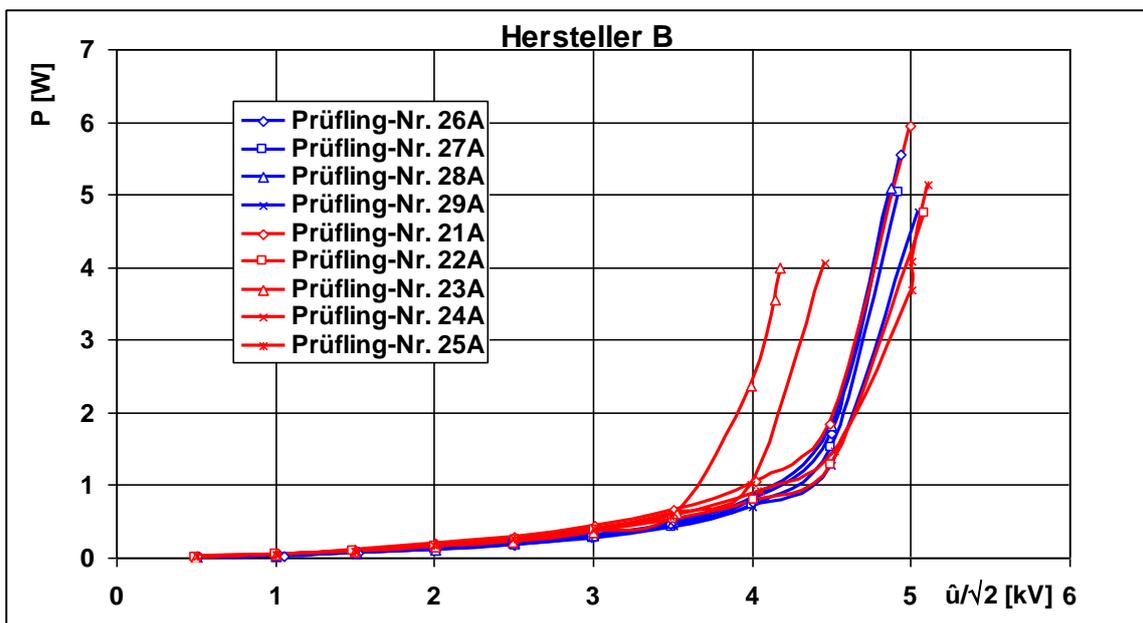
**Bild 23: Verlust-Kennlinie**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 1000 h in 155 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



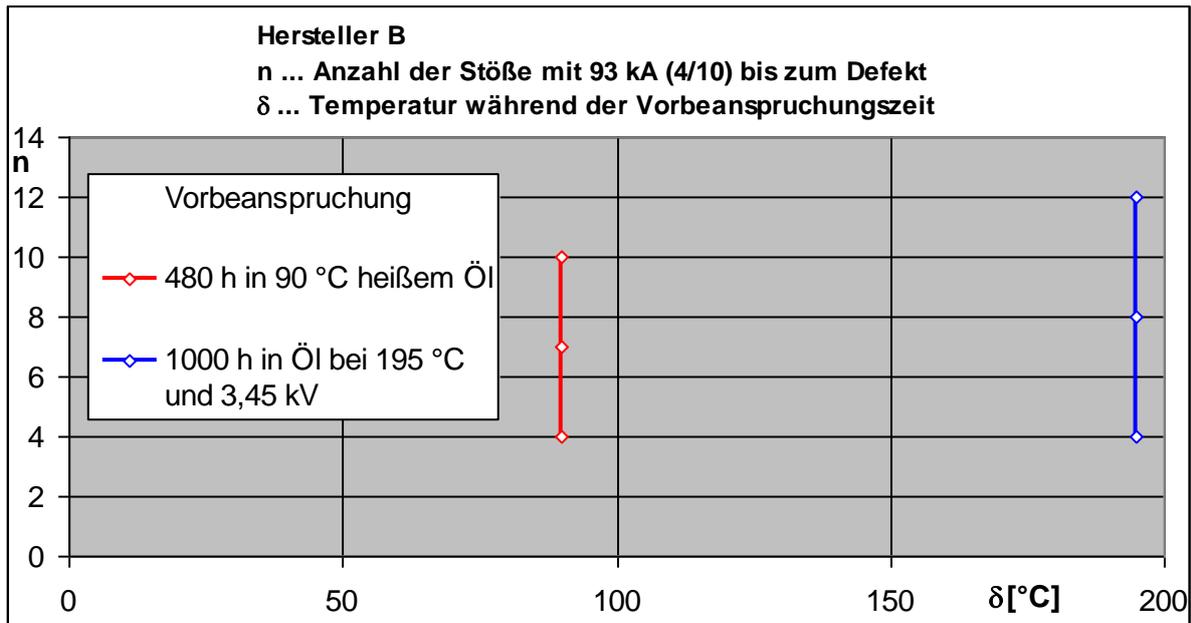
**Bild 24: Energieaufnahmevermögen**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 1000 h in 155 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



**Bild 25: U-I-Kennlinie**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 1000 h in 195 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



**Bild 26: Verlust-Kennlinie**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 1000 h in 195 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV

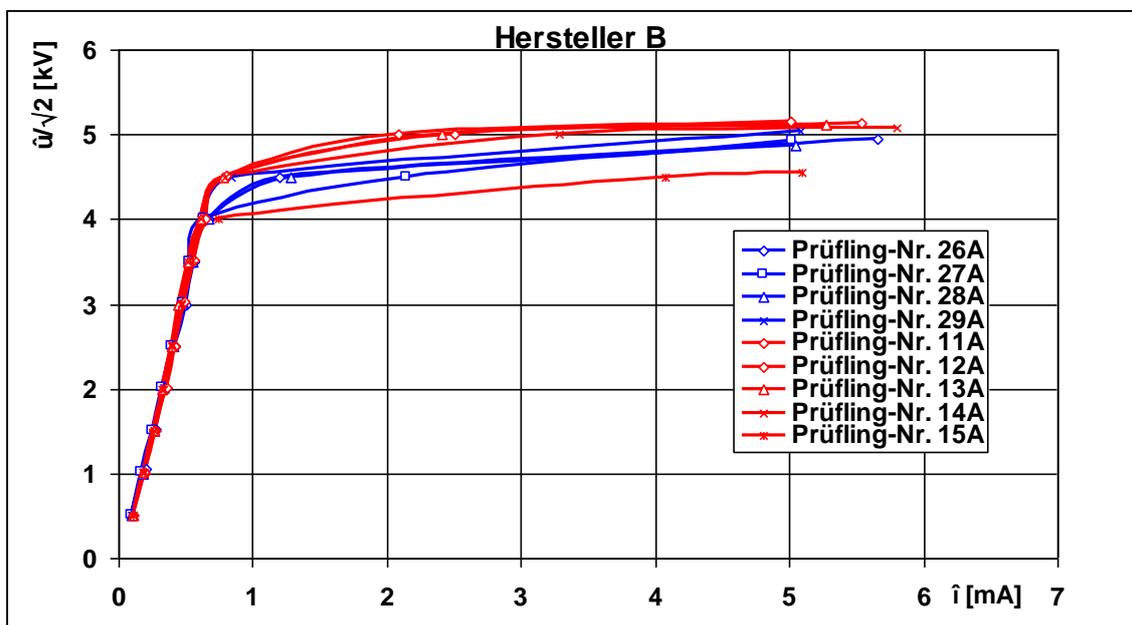


**Bild 27: Energieaufnahmevermögen**

Messung in 90 °C heißem Öl

Vorlasten:

- 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung
- 1000 h in 195 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV

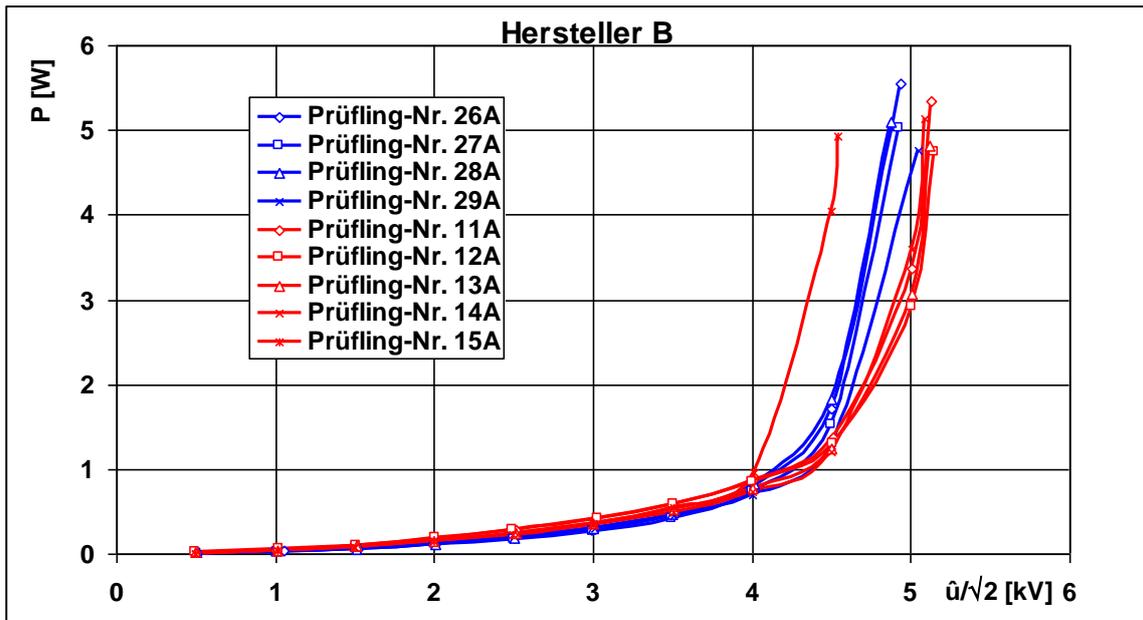


**Bild 28: U-I-Kennlinie**

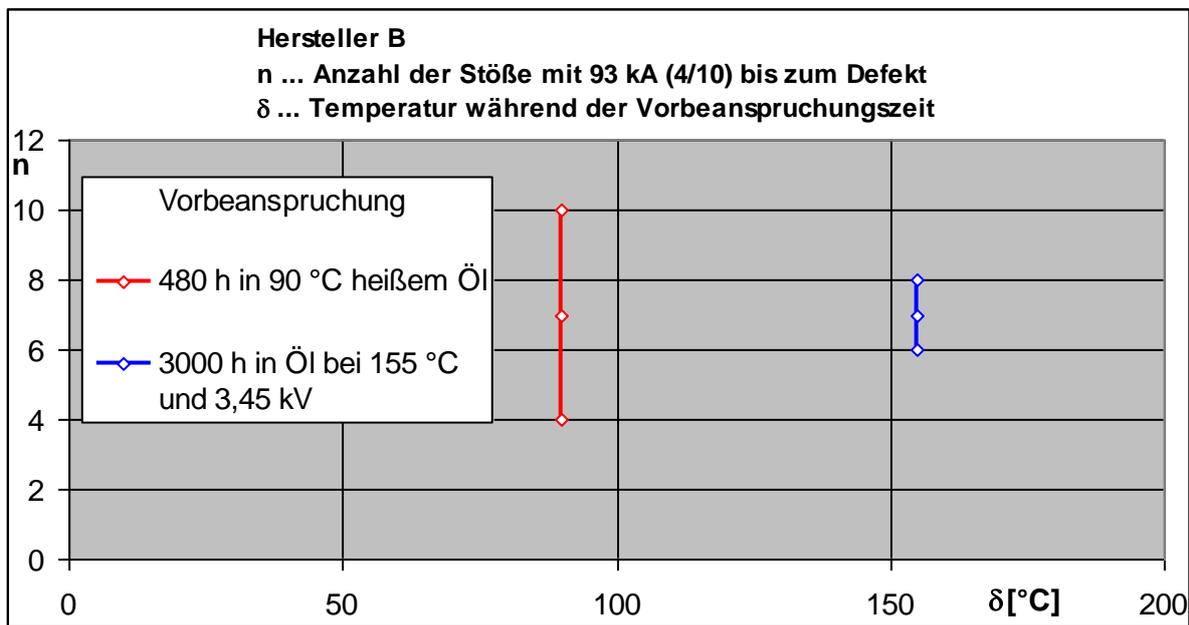
Messung in 90 °C heißem Öl

Vorlasten:

- 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung
- 3000 h in 155 °C heißem Öl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



**Bild 29: Verlust-Kennlinie**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 3000 h in 155 °C heißem Altöl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV



**Bild 30: Energieaufnahmevermögen**  
 Messung in 90 °C heißem Öl  
 Vorlasten:  
 — 20 Tage in 90 °C heißem Öl ohne Spannung  
 — 3000 h in 155 °C heißem Altöl bei einer anliegenden Spannung von 3,45 kV