

Forschungsinst. d. FGH e.V.

Name der Forschungsstelle(n)

13063 N / III

AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.10.01 bis 31.12.02

Bewilligungszeitraum

**Schlußbericht für den Zeitraum : 01.10.01 bis 31.12.02**

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten Forschungsvorhaben

Forschungsthema : Auswahl und Zusammenwirken von  
Mittelspannungs-Lastschaltern und HH-Sicherungen in  
Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen gemäß IEC 60420

Mannheim, 25. April 2003

Ort, Datum

Unterschrift der/des Projektleiter(s)

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1</b>	<b>Forschungsthema .....3</b>
<b>2</b>	<b>Zusammenfassung.....3</b>
<b>3</b>	<b>Forschungsinhalt .....4</b>
3.1	Wissenschaftliche Problemstellung .....4
3.2	Forschungsziel und Lösungsweg .....5
<b>4</b>	<b>Auswahl der Komponenten .....9</b>
4.1	Betriebspraxis .....9
4.2	Untersuchte Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen .....11
<b>5</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen an den Komponenten .....17</b>
5.1	Ermittlung der Zeit-Strom-Kennlinien der verwendeten HH-Teilbereichs-Sicherungs-Einsätze .....17
5.1.1	Durchführung der Versuche .....17
5.1.2	Ergebnisse .....18
5.2	Ermittlung des zeitlichen Verhaltens der verwendeten Lastschalter .....24
5.2.1	Durchführung der Versuche .....24
5.2.2	Ergebnisse .....25
<b>6</b>	<b>Experimentelle Ermittlung der Übergangsbereiche der Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen .....31</b>
6.1	Eingrenzung der zu untersuchenden Strombereiche .....31
6.2	Durchführung der Versuche .....33
6.3	Ergebnisse .....34
<b>7</b>	<b>Ermittlung des Übernahmestromes bei Schlagstiftbetätigung.....43</b>
<b>8</b>	<b>Ergebnisbewertung und Ausblick.....51</b>
8.1	Bewertung der Ergebnisse für die untersuchten Kombinationen .....51
8.2	Berücksichtigung ein- und zweipoliger Kurzschlüsse auf der Transformator-Sekundärseite .....52
8.3	Einfluss der Gleichstromglieder des Kurzschlussstromes.....53
8.4	Ausblick.....54

<b>9</b>	<b>Handlungsempfehlung für den Betrieb bestehender und die Auswahl künftiger Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen.....</b>	<b>55</b>
9.1	Geltungsbereich und Ausgangssituation .....	55
9.2	Handlungsempfehlung für in Betrieb befindliche Kombinationen.....	57
9.3	Handlungsempfehlung bei der Auswahl von Komponenten für Kombinationen.....	58
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>59</b>
	<b>Anhang A: Ergebnisprotokolle aller experimentellen Untersuchungen.....</b>	<b>60</b>
A.1	Ermittlung der Sicherungskennlinien .....	60
A.2	Ermittlung der Öffnungszeiten der Lastschalter bei Schlagstiftbetätigung .....	66
A.3	Ausschaltversuche an Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen.....	71

## 1 Forschungsthema

Auswahl und Zusammenwirken von Mittelspannungs-Lastschaltern und HH-Sicherungen in Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen gemäß IEC 60420

## 2 Zusammenfassung

Im nachfolgend beschriebenen AiF-Forschungsvorhaben Nr. 13063, gefördert aus Haushaltsmitteln des Bundesministerium für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) wurden das Auswahlverfahren der Komponenten für Hochspannungs-Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen, so wie in den einschlägigen Normen [4,5,6] festgelegt, und das Zusammenwirken von unterschiedlichen Mittelspannungs-Lastschaltern und HH-Sicherungen über den gesamten Strombereich theoretisch und experimentell untersucht.

Nach der Auswahl geeigneter, typischer Komponenten wurde in enger Zusammenarbeit mit den Herstellern das Verhalten der Komponenten im interessierenden Arbeitsbereich teils aus bei den Herstellern vorliegenden Daten, teils aus ergänzenden experimentellen Untersuchungen abgeleitet. Hiermit konnten Voraussagen über das Verhalten der untersuchten Kombinationen in den interessierenden Bereichen der Übernahmeströme erstellt werden, die wiederum durch experimentelle Untersuchungen an diesen Kombinationen überprüft wurden. Aufbauend auf die gewonnenen Erkenntnisse wurde der für das Betriebsverhalten der Kombination entscheidende Übernahmestrom bei Schlagstiftbetätigung ermittelt und die Ergebnisse mit denen des vereinfachten Verfahrens verglichen.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass es trotz vermeintlich entgegengesetzten Forderungen, wie Vermeidung der Inrushgefährdung und allpolige Abschaltung von sekundärseitigen Klemmenkurzschlüssen durch die Sicherungen, möglich ist, korrekt zusammenwirkende Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen für den Einsatz auf der Mittelspannungsseite von Verteiltransformatoren zusammenzustellen. Jedoch sind die Empfehlungen zur Ermittlung der Übernahmeströme nach [4,5,6] nicht ausreichend. Nach den vorliegenden Untersuchungen sollten dem Hersteller und dem Betreiber von Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen zwei über die bisherigen Angaben zu den Sicherungen hinausgehende Angaben zur Verfügung stehen, um ihnen eine Auswahl zu ermöglichen, die stets einen sicheren Betrieb gewährleistet.

Die Ermittlung dieser Angaben erfordert aber zusätzlichen Aufwand, was dem Ziel, mit der Lastschalter-Sicherungs-Kombination über eine kostengünstige Schalt- und Schutzgerätekombination zu verfügen, diametral entgegensteht. Insbesondere bei der in Deutschland üblichen Anwendung als Schalt- und Schutzgerät auf der Primärseite von Verteiltransformatoren ist das komplexe Zusammenspiel von Sicherungen und Lastschalter im Bereich der Übernahmeströme in der Regel gar nicht erwünscht. Aus diesem Grund wurde für diesen Anwendungsfall eine Handlungsempfehlung erarbeitet.

**Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.**

### 3 Forschungsinhalt

#### 3.1 Wissenschaftliche Problemstellung

Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen werden in Deutschland an Verteiltransformatoren der Netzbetreiber und der Industrie eingesetzt, wobei der Lastschalter das Schalten der Last und die HH-Sicherungen die Abschaltung bei Kurzschluss des Verteiltransformators übernehmen sollen. HH-Sicherungen werden sowohl in den Varianten Vielbereich- als auch Teilbereichsicherung verwendet. Im Gegensatz zu den Vielbereichssicherungen, die Überlastströme von längerer Dauer ( $\geq 1$  h) bis zum Bemessungswert größter Ausschaltstrom abschalten, können Teilbereichsicherungen dies nur für Ströme zwischen ihrem Mindestausschaltstrom und dem größten Ausschaltstrom. Sie sind nicht in der Lage, Überlastströme bis zum Mindestausschaltstrom zu löschen. In Innenraumanlagen werden überwiegend Lastschalter mit Freiauslösung eingesetzt, die durch den Schlagstift der HH-Teilbereichsicherungen ausgelöst werden und den Transformator alphasig abschalten. Außerdem ist es möglich, durch besondere Schlagstiftsysteme das Sicherungsabteil von gekapselten Schaltanlagen gegen thermische Überlastung zu schützen.

Die bisherige Praxis war, den Lastschalter nach dem zu schaltenden Laststrom und die Sicherung entsprechend [1] nach dem Einschaltstrom des Verteiltransformators und dem Strom bei seinem sekundärseitigen Klemmenkurzschluss auszuwählen. Ferner bestand die Möglichkeit die Auswahl der Sicherungen entsprechend den Empfehlungen nach [2] unter zusätzlicher Berücksichtigung der Selektivität zur niederspannungsseitigen gTr-Sicherung zu treffen. Diesen Anforderungen folgend werden Lastschalter nach [3] und Hochspannungssicherungen nach [1] in ihrem Ausschaltvermögen in der Typprüfung geprüft.

Das in der Praxis bislang angewandte Verfahren zur Auswahl der Sicherung sieht die folgenden Schritte vor:

- Festlegung des Transformator-Einschaltstroms (Rush), in der Regel bei 12-fachem Nennstrom des Transformators, Dauer 0,1 s. Die Sicherungen der drei Leiter dürfen hierbei nicht ansprechen, auch wenn sie an der unteren Grenze der erlaubten Toleranz liegen.
- Festlegung des primärseitigen Kurzschlussstroms bei sekundärseitigem Kurzschluss des Transformators. Die Dauer ist in der Regel gleich der zulässigen und überprüften Kurzschlussdauer des Transformators gleich 2 s gesetzt. Die Sicherungen müssen hier ansprechen, auch wenn sie an der oberen Grenze der erlaubten Toleranz liegen.

Die Streuungen der Sicherungen eines Herstellers werden nicht durch den oberen und unteren Grenzwert nach [2] erfasst, sie sind wesentlich geringer und sind für die Einzelanwendung zu Grunde zu legen. Für alle Teilbereichsicherungen gilt, dass sie für die Absicherung

gegen Dauerströme oberhalb des Nennstroms des Transformators, die zur thermischen Überlastung des Transformators führen könnten, nicht eingesetzt werden können. Hierzu dient der Überstromschutz des Lastschalters.

Die alte internationale Norm [4] bzw. nationale Norm [5] und die zwischenzeitlich in Kraft getretene neue internationale Norm [6] für Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen fordern, dass die Kombination jeden beliebigen Strom ausschalten kann. Dabei gilt grundsätzlich, dass das Ausschalten bei hohen Strömen von den Sicherungen und bei niedrigen Strömen vom Lastschalter übernommen wird. Zwischen beiden Bereichen besteht ein Bereich der sogenannten Übernahmeströme, in dem das Ausschalten, bedingt durch die Streuungen in den Ausschaltzeiten der Sicherungen und des Lastschalters, zufällig wechselt. Dieser Bereich ist abhängig vom verwendeten Lastschaltertyp und den eingesetzten Sicherungen und ist vom Hersteller der Kombination anzugeben. Das Verhalten der Kombination wird mit diesem Übernahmestrom in einer Typprüfung überprüft. Zusätzlich ist nun nach [6] die Forderung einzuhalten, dass Kurzschlussströme stets von den Sicherungen abgeschaltet werden müssen, bevor der Lastschalter öffnet. Daraus folgt, dass Sicherungen den kleinsten Transformator-Kurzschlussstrom innerhalb der Schaltereigenzeit ausschalten müssen. Diese Forderung ist teilweise im Widerspruch zu [2] und bedingt zum Teil erhebliche Abweichungen zur bisherigen Praxis der Sicherungsauswahl mit dem Ergebnis einer „Untersicherung“. Als Folge sind höhere Inrushgefährdung (Sicherungsauslösung beim Einschalten) und Erwärmung der Sicherungen zu erwarten.

### 3.2 Forschungsziel und Lösungsweg

Ausgehend von der erwarteten Gefahr einer „Untersicherung“ ist es ein Forschungsziel des beschriebenen Vorhabens, zu untersuchen, ob in Folge der veränderten Sicherungsauswahl mit Fehlauflösungen zu rechnen ist. Auch soll die Frage geklärt werden, ob die in IEC 60420 geforderte, durchgängige Einsetzbarkeit einer Lastschalter-Sicherungs-Kombination für den gesamten Strombereich überhaupt sinnvoll und notwendig ist. Dem universellen Einsatz der Kombination einerseits stehen hier verschiedene technischen Schwierigkeiten gegenüber, die aus dieser Forderung resultieren. So ist z.B. das korrekte Zusammenspiel zwischen Lastschalter und Sicherungen im Bereich der Übernahmeströme von den unterschiedlichen Schmelzzeiten der Sicherungen und von der Verzögerung des Lastschalters bei Schlagstiftauslösung abhängig. Letztere ist aber gegeben durch:

- die Bewegung des Schlagstiftes,
- die Auslösung durch die Lastschaltermechanik und
- die Öffnungszeit des Lastschalters.

Die Bewegung des Schlagstiftes des HH-Sicherungseinsatzes jedoch ist nicht streng definiert und lässt den Herstellern weiten Spielraum für die Zeit, in der der Schlagstift ausgelöst werden muss. Weitere Unwägbarkeiten sind in der Alterung des Lastschalters zu sehen.

Weiterhin sieht die Prüfvorschrift IEC 60420 nur eine Ausschaltprüfung mit dem Nenn-Übernahmestrom bei Auslöserbetätigung und bei dem Nenn-Übernahmestrom bei Schlagstiftbetätigung vor. In dem für die störungsfreie Arbeit der Kombination wichtigen Bereich zwischen diesen beiden Strömen ist aber das Verhalten der Sicherungseinsätze, z.B. der genaue Verlauf der Zeit-Strom-Kennlinie und der auftretenden Streuungen weitgehend unbekannt, da das Verhalten bei diesen Strömen weder gemäß IEC 60420 noch nach DIN EN 60282-1 (VDE 0670 Teil 4) geprüft wird. Auch hieraus könnten Störungen im Betrieb resultieren.

Schließlich ist in der Vorschrift IEC 60420 deutlich festgestellt, dass Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen eigentlich für jeden Sicherungstyp zu prüfen seien, dies aber aus Gründen des Versuchsaufwands entfallen muss. Ungeklärt bleiben die Auswirkungen eines Ersatzes oder gar nur teilweisen Ersatzes der Sicherungseinsätze nach einigen Betriebsjahren, wenn die ursprünglich eingesetzte Sicherung nicht mehr in der originären Form erhältlich ist oder falls sich der Anwender gar für Sicherungen eines anderen Herstellers entscheidet.

Bei den bisher in Deutschland überwiegend eingesetzten Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen hingegen übernehmen die Lastschalter lediglich das Schalten von Last- und Überlastströmen und die Sicherungen nur das Ausschalten von Kurzschlussströmen. Auf ein Schaltvermögen im dazwischen liegenden Bereich wird verzichtet. Die Betriebserfahrungen mit diesen Kombinationen sind sehr gut [5].

Aus den genannten Forschungsschwerpunkten lässt sich eine Reihe von Fragen ableiten, deren Klärung für einen möglichst störungsarmen Einsatz von zukünftigen Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen erforderlich erscheint:

- Wo liegen die Nennwerte für die Übernahmeströme der in Deutschland erfolgreich eingesetzten Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen?
- Kann in deutschen Netzen eine Lücke zwischen den Nenn-Übernahmeströmen toleriert werden, weil dieser Strombereich nicht auftritt?
- Decken die Vorschriften die für die deutschen Anwendungen bestehenden Anforderungen ab? Hierbei sind insbesondere die üblichen Dreieck/Stern-Transformatoren zu berücksichtigen.
- Wie wirkt sich die Auswahl der Sicherungen nach IEC 60420 auf die Selektivität zu den Sicherungen auf der Niederspannungsseite aus?
- Welche Anforderungen müssen an Sicherungstypen verschiedener Hersteller gestellt werden, um eine Austauschbarkeit zu ermöglichen?
- Können Sicherungen mit niedrigeren Nennströmen unbedenklich eingesetzt werden, d.h. ohne die Betriebssicherheit zu gefährden?

- Sind die Auslösezeiten der Sicherungen und insbesondere der Lastschalter bei Auslösung durch die Auslöseeinrichtung und durch die Schlagstiftauslösung ausreichend bekannt, um die Zeit/Strom-Kennlinien in den beiden Bereichen mit ausreichender Sicherheit aufstellen zu können?
- Unter welchen Bedingungen können Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen, die nicht der Norm IEC 60420 entsprechen oder nicht nach ihr geprüft wurden, weiter verwendet werden?
- Ist eine Anwendungsrichtlinie für die in deutschen Netzen der Netzbetreiber oder der Industrie vorliegenden Einsatzbedingungen erforderlich oder wünschenswert?
- Wie ist die tatsächliche Funktion von Lastschalter-Sicherungseinheiten nach mehreren Betriebsjahren im Vergleich zum theoretischen Anspruch der Norm IEC 60420 einzuschätzen?
- Wie können die Anforderungen der Norm in der Praxis bei einem Sicherungswechsel nach langer Betriebsdauer (z.B. nach 20 Jahren) eingehalten werden?

Aus diesen Fragen wiederum lassen sich der Umfang und die Lösungsschritte des geplanten Forschungsvorhabens ableiten. Es sollen die folgenden Punkte bearbeitet werden:

- **Umfrage unter den Betreibern von Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen**

Hier soll festgestellt werden, ob Kombinationen mit Schaltvermögen über den gesamten Strombereich im Einsatz sind und wie die Betriebserfahrungen hiermit sind, sofern solche vorhanden sind. Bei den Kombinationen mit eingeschränktem Schaltvermögen soll erkundet werden, ob und wie oft Fälle auftraten, in denen ein Ausschalten des Stromes nicht möglich war. Ferner steht die Ermittlung der Einsatzgebiete (Transformator mit welcher Schaltgruppe und bis zu welcher Bemessungsleistung) der Kombinationen im Mittelpunkt der Umfrage.

- **Feststellung der Zeit-Strom-Kennlinien von HH-Sicherungseinsätzen deutscher Hersteller**

Bei den hierfür durchgeführten experimentellen Untersuchungen steht die Frage im Vordergrund, ob die üblicherweise angenommene Form der Kennlinie zwischen den bekannten Punkten der Realität entspricht und ob die Annahmen über die Streuungen der Schmelzzeiten über den gesamten Einsatzbereich richtig sind. Auch sollen die Auslösezeiten der Schlagstifte ermittelt werden.

- **Feststellung der Zeit-Strom-Kennlinien von Lastschaltern deutscher Hersteller**

Auch hier sollen experimentelle Untersuchungen an verschiedenen Lastschaltern durchgeführt werden, um die tatsächlichen Ausschaltzeiten zu ermitteln.

- **Auswahl der Lastschalter-Sicherungs-Kombination nach der Norm IEC 60420 und Überprüfung ihrer Eignung**

Verschiedene nach der Norm zulässige Kombinationen sollen sowohl theoretisch - durch Kurzschlussstromberechnungen und Vorhersage des Verhaltens anhand der ermittelten Kennlinien – als auch praktisch – durch experimentelle Untersuchung des Ausschaltverhaltens über den gesamten Strombereich hinweg – untersucht werden. Ferner soll das Verhalten bei Austausch einzelner oder aller Sicherungen gegen Sicherungen einer anderen Charge oder eines anderen Herstellers untersucht werden.

- **Erarbeitung einer Handlungsempfehlung für die Anwendung**

Diese Empfehlung soll die grundlegenden Erkenntnisse des Forschungsvorhabens zusammenführen und ein Leitfaden sowohl für den Betrieb bestehender Kombinationen als auch für die Auswahl der Elemente bei neu zu errichtenden Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen sein.

## 4 Auswahl der Komponenten

### 4.1 Betriebspraxis

Wie einleitend festgestellt, finden Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen sowohl in öffentlichen als auch in Industrienetzen Anwendung. In Deutschland ist die weitaus häufigste Anwendung in beiden Fällen der Einsatz auf der Oberspannungsseite von Verteiltransformatoren, die die Mittelspannungsebene (10 kV oder 20 kV) mit dem Niederspannungsnetz verbinden. Hierfür kommen, bis auf wenige Ausnahmefälle mit sehr geringer Bemessungsleistung fast ausschließlich Transformatoren in Dyn5-Schaltung zum Einsatz.

Der Lastschalter wird dabei so bemessen, dass er in jedem Fall alle Lastströme bis in den Bereich von Überlasten, z.B. bis zum doppelten Transformator-Bemessungsstrom ausschalten kann und entspricht den Anforderungen der einschlägigen Norm für Hochspannungs-Lastschalter [3]. Zumeist ist das Lastschaltvermögen des Schalters noch erheblich höher. Eine punktuelle Umfrage unter deutschen Netzbetreibern zeigte, dass in Deutschland auch in Lastschalter-Sicherungs-Kombination ausschließlich Teilbereichssicherungen zum Einsatz kommen. Die Auswahl der Sicherungen erfolgte ausnahmslos gemäß der deutschen Norm für die Auswahl von strombegrenzenden Sicherungseinsätzen für Transformatorstromkreise [2], wobei in allen Fällen der oben genannte Anwendungsfall der Kombination (Einsatz auf Mittelspannungsseite eines Verteiltransformators) vorlag. Die national [5] wie international [4,6] geltende Vorschrift für Hochspannungs-Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen mit ihren Vorgaben hinsichtlich der bei der Auswahl der Sicherungseinsätze zu berücksichtigenden Charakteristika wurde hingegen in der Praxis bei der Auswahl der Komponenten in keinem Fall berücksichtigt.

Aus den beschriebenen Auswahlkriterien lässt sich ableiten, dass bei praktisch allen in Deutschland zur Zeit eingesetzten Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen ein lückenloser Einsatz über den gesamten Strombereich bis zum maximalen Ausschaltstrom der Sicherungen nicht gegeben ist: Lastströme können kurzfristig nur etwa bis zum 1,5fachen des Bemessungsstroms des Transformators betragen, wenn dieser nicht thermisch zerstört werden soll. Der Mindestausschaltstrom der Sicherungen bei einer Auswahl nach [2] liegt aber bei einem Vielfachen davon, in der Regel mindestens beim Fünffachen des zugehörigen Transformator-Bemessungsstromes. Unterhalb dieses Wertes sind erfolgreiche Ausschaltungen durch die Sicherungen nicht möglich. Tritt an der Kombination ein fehlerbedingter Strom auf, der unterhalb dieses Mindestausschaltstromes liegt, so kann dieser Strom auch durch den Lastschalter nicht ausgeschaltet werden, da er aufgrund der zu langsamen Verfestigung der Isolationsstrecke über den Schalter nicht für die bei Fehlerausschaltungen auftretenden schnellen Spannungsanstiege über der Schaltstrecke geeignet ist.

Auch wenn bei den befragten Netzbetreibern keine langfristigen Statistiken bezüglich Störungen an den Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen vorliegen, so muss aus dem Umstand, dass Störungen nicht oder nur selten bekannt waren davon ausgegangen werden,

dass solch kleine Fehlerströme in der Praxis entsprechend selten auftreten. Der Grund hierfür ist, dass in Deutschland das Prinzip der selektiven Schutzausschaltung verfolgt wird und Ströme durch Fehler im Niederspannungsnetz stets durch gTr-Sicherungen auf der Niederspannungsseite des Transformators ausgeschaltet werden. Dadurch verbleiben neben den vergleichsweise hohen und deshalb unproblematischen Strömen bei Kurzschlüssen zwischen der Kombination und den überspannungsseitigen Klemmen des Transformators praktisch nur die Fehlerströme bei inneren Fehlern des Transformators. Da diese, sobald sie einen merklichen Strom verursachen, sich meist rasch zu dreipoligen Fehlern ausweiten, gehen sie in der Regel mit Strömen einher, die über dem Mindestausschaltstrom des eingesetzten Sicherungstyps liegen.

Uns wurde nur ein einziger Fall bekannt, in dem eine Lastschalter-Sicherungs-Kombination einen Strom nicht ausschalten konnte. Hier führte eine falsche Verdrahtung zu einer Verbindung einer niederspannungsseitigen Transformator клемme über ein Kabel mit der Erdschiene. Beim Einschalten trat somit niederspannungsseitig ein einpoliger Erdkurzschluss auf, der nicht niederspannungsseitig ausgeschaltet wurde. Aufgrund der Fehler(=Kabel-)impedanz und der Schaltgruppe Dyn5 des Transformators wirkte sich dies überspannungsseitig als zweipoliger Fehlerstrom in der Größenordnung des dreifachen Transformator-Bemessungsstromes aus. Ein nicht geglückter Ausschaltversuch durch den Lastschalter zog einen dreipoligen Lichtbogenfehler am Lastschalter nach sich.

Offensichtlich sind solch stromschwache Fehler, die einen durch die Kombination nicht ausschaltbaren Strom nach sich ziehen in der Praxis so selten, dass sie bei der Auslegung der Komponenten der Kombination nicht berücksichtigt werden. Hier könnte nur der Einsatz von Vielbereichssicherungen oder von Lastschaltern mit Kurzschlussstrom-Ausschaltvermögen Abhilfe schaffen.

Aus dem Fehlen von dokumentierten Störungsfällen an Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen darf jedoch keineswegs geschlossen werden, dass deren Zusammenwirken bei Strömen oberhalb des Mindestausschaltstromes im Bereich der sogenannten Übernahmeströme stets unproblematisch ist. Zum einen treten Ausschaltungen in den kritischen Strombereichen vergleichsweise selten auf, zum anderen werden solche Störungen nicht systematisch dokumentiert. Auch zeigte sich bei den nachfolgend dokumentierten experimentellen Untersuchungen, dass Lastschalter beim Ausschalten von Fehlerströmen, abhängig vom Schaltertyp, seinen Bemessungsdaten und den Umständen des Fehlers, nicht zwingend versagen.

Abschließend sei festgehalten, dass die Kombinationen gemäß unserer Umfrage praktisch bei allen auftretenden Transformator-Bemessungsleistungen eingesetzt werden, d.h. klassischerweise im Bereich von etwa 100 bis 1250 kVA, mit dem Schwerpunkt bei Anlagen zwischen 250 und 630 kVA. Eine neue Entwicklung ist der Einsatz bei Transformatoren zum Anschluss von Windenergieanlagen, wo die Transformatoren zunehmend ansteigende Bemessungsleistungen bis derzeit rund 2500 kVA aufweisen.

## 4.2 Untersuchte Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen

Die Untersuchungen erstreckten sich auf Schaltgeräte für 10-kV und 20-kV-Netze. Aufgrund des Einflusses der Schaltzeit auf die Auswahl der Sicherungen erschien es geboten für die Versuche Lastschalter mit stark unterschiedlichen Öffnungs- bzw. Ausschaltzeiten zu verwenden. Daher entschied man sich für jede Netzspannung einen luftisolierten (offenen) und ein SF<sub>6</sub>-isolierten Lastschalter zu verwenden.

Daten der untersuchten Lastschalter:

- Fabrikat A, Isolierung offen in Luft, Bemessungsspannung 12 kV, Bemessungs-Kurzschlusseinschaltstrom 50 kA, Bemessungs-Netzlastausschaltstrom 630 A, Bemessungs-Übernahmestrom bei Schlagstiftbetätigung ( $I_4$ ) 1000 A, Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung 50 ms bis 60 ms
- Fabrikat B, Isolierung SF<sub>6</sub>, Bemessungsspannung 12 kV, Bemessungs-Kurzschlusseinschaltstrom 40/50/63 kA, Bemessungs-Übernahmestrom bei Schlagstiftbetätigung ( $I_4$ ) 3000 A, Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung 38 ms
- Fabrikat C, Isolierung offen in Luft, Bemessungsspannung 24 kV, Bemessungs-Kurzschlusseinschaltstrom 40 kA, Bemessungs-Netzlastausschaltstrom 400/630 A, Bemessungs-Übernahmestrom bei Schlagstiftbetätigung ( $I_4$ ) 405 A, Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung 74 ms
- Fabrikat D, Isolierung SF<sub>6</sub>, Bemessungsspannung 24 kV, Bemessungs-Kurzschlusseinschaltstrom 40 kA, Bemessungs-Übernahmestrom bei Schlagstiftbetätigung ( $I_4$ ) 1400 A, Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung geschätzt 35 ms

Für die Vorauswahl der Sicherungen wurden nachfolgende Verteiltransformatoren angenommen und den Lastschaltern zugeordnet:

Tabelle 4.1 Bemessungsgrößen für die Auswahl der untersuchten Sicherungen

Lastschalter Fabrikat	Bemessungsspannung kV	Bemessungsleistung kVA	Nennstrom A	Kurzschlussspannung %	Einschaltstrom <sup>1)</sup> A	Kurzschlussstrom <sup>2)</sup> A
A	12	800	46,2	6,0	554	770
B		630	36,4	4,0	436	909
C	24	800	23,1	6,0	277	385
D		630	18,2	4,0	218	455

<sup>1)</sup> angenommener max. Einschaltstrom entsprechend [2] für Transformatoren der Schaltdruppe Dyn5, Dauer 0,1 s

<sup>2)</sup> sekundärseitiger dreipoliger Klemmenkurzschluss

Mit den Daten der Transformatoren konnten Sicherungen nach der Leitlinie [2] ausgewählt werden. Diese wurden dann auf die Forderung von [4,5,6] – dreipolige Abschaltung durch die Sicherungen im sekundärseitigen Kurzschlussfall – mit Hilfe der Schmelz-Kennlinien (Beispiele in Bild 4.1) von verschiedenen Herstellern überprüft. Hierzu war es nötig, den Übernahmestrom bei Schlagstiftbetätigung der kompletten Lastschalter-Sicherungs-Kombination zu bestimmen. Dies geschah mit der Näherung nach Anhang B von [4,5,6]. Danach ergibt sich der Übernahmestrom auf der unteren Zeit/Strom-Kennlinie der Sicherung bei 0,9-facher Öffnungszeit des Lastschalters bei Schlagstiftbetätigung. Die untere Kennlinie ergibt sich einmal aus der mittleren unter Berücksichtigung der zugelassenen Toleranz des Stromes nach Abschnitt 18.9 von [1] von  $\pm 20\%$  (siehe Bild 4.2). Diese Toleranz von  $\pm 20\%$  kann durch verschiedene Chargen bei der Fertigung in Anspruch genommen werden. Nach dem zitierten Anhang B beträgt eine realistische Streuung von gleichen Sicherungen  $\pm 6,5\%$ , d.h. die untere Zeit/Strom-Kennlinie kann sich auch bei Inanspruchnahme der  $+ 20\%$  Toleranz einer Charge bei  $+ 7,0\%$  der mittleren Kennlinie befinden. Für beide Fälle der unteren Kennlinien wurde der Übernahmestrom bestimmt (siehe Bild 4.3).

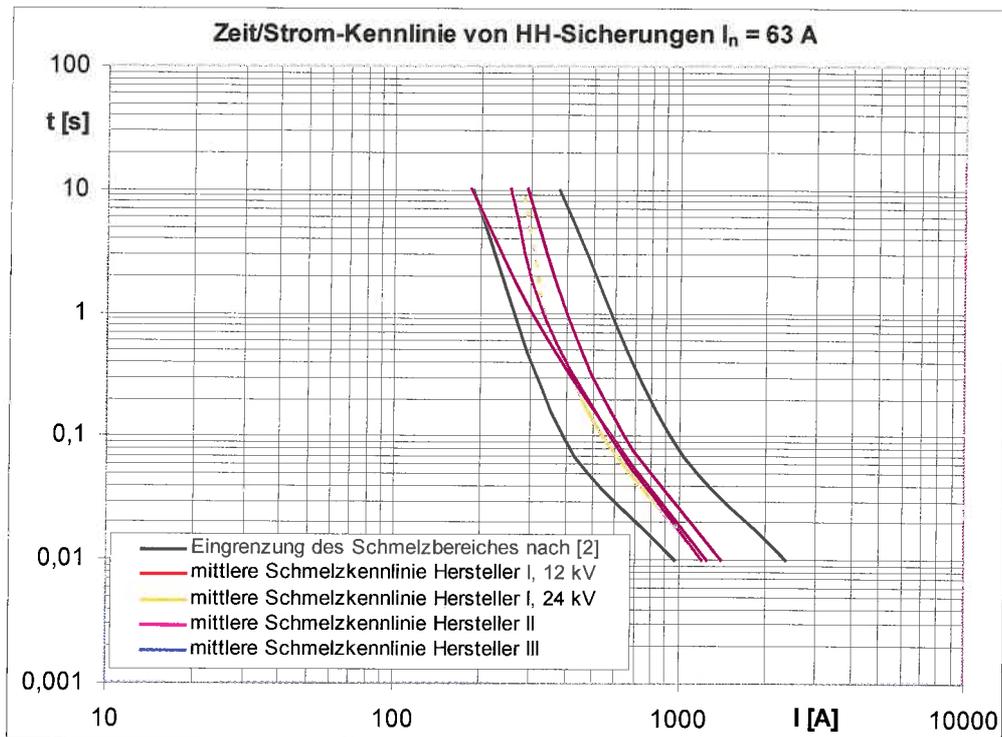
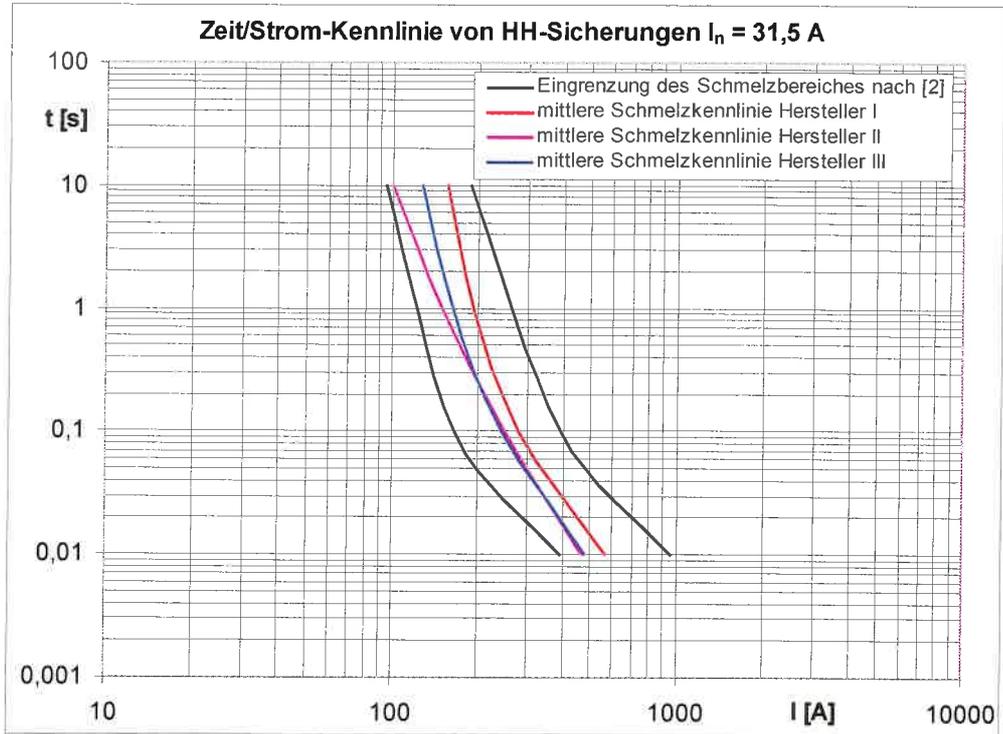
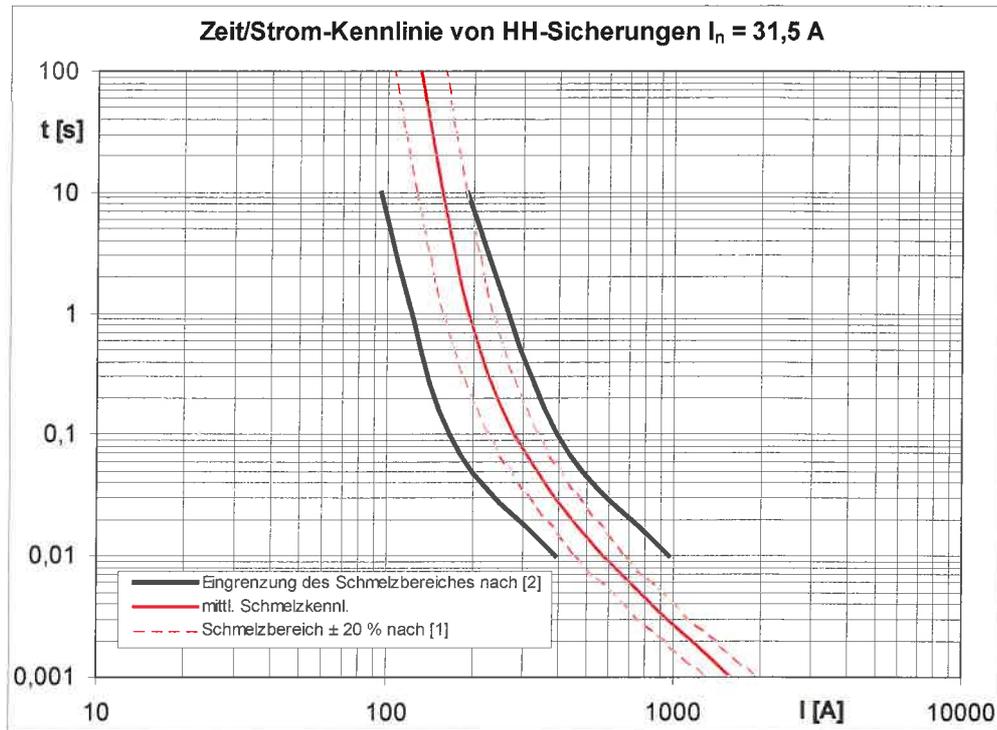
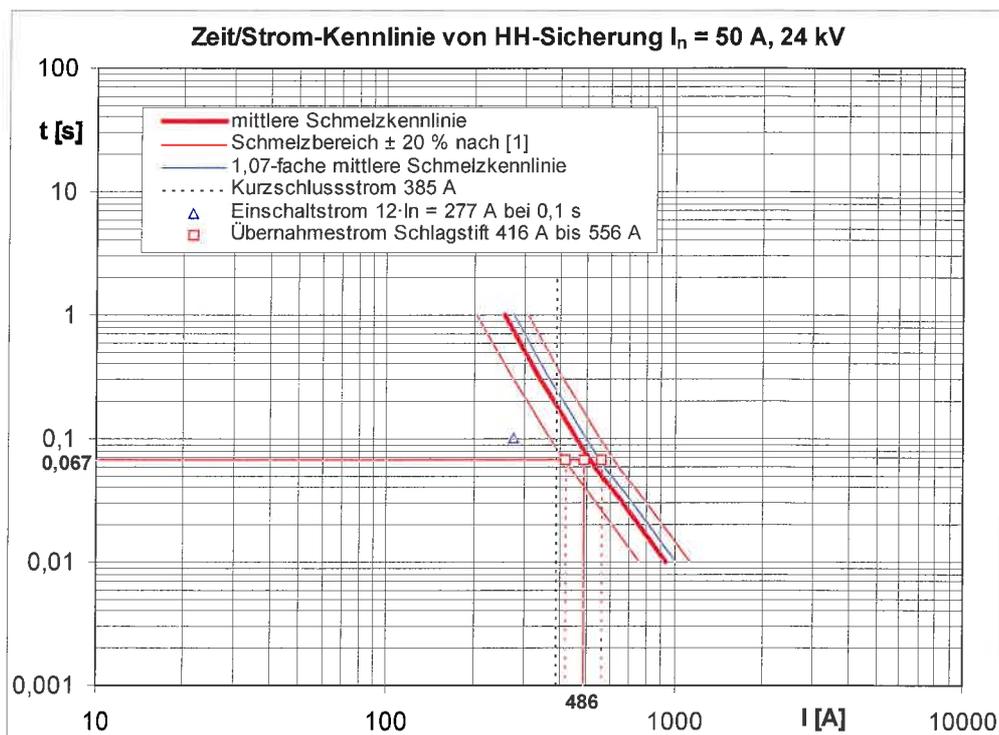


Bild 4.1 Mittlere Zeit/Strom-Kennlinien von HH-Sicherungen verschiedener Hersteller mit Schmelzbereich nach [2]



**Bild 4.2** Mittlere Zeit/Strom-Kennlinien mit Toleranzen von  $\pm 20$  % nach Abschnitt 18.9 von [1]  
– Hersteller I



**Bild 4.3** Ermittlung der Übernahmeströme an einer Lastschalter-Sicherungs-Kombination (Hersteller: Lastschalter C, Sicherung I)

Aus Bild 4.3 ist zu ersehen, dass der Kurzschlussstrom von 385 A die erste Sicherung nach 0,08 s bis 0,4 s zum Ansprechen bringt und bei einer Öffnungszeit des Lastschalters von 74 ms Übernahmeströme von 416 A bis 556 A zu erwarten sind. Der dreipolige Kurzschluss wird in diesem Beispiel einpolig von einer Sicherung und zweipolig vom Lastschalter abgeschaltet. Ein Ansprechen einer Sicherung beim Einschalten ist nicht möglich.

Konnte die Forderung einer dreipoligen Abschaltung durch die HH-Sicherungen im Fall des sekundärseitigen Klemmenkurzschlusses nicht eingehalten werden, so wurde die nächst kleinere Sicherung gewählt. Jetzt musste darauf geachtet werden, dass der Einschaltstrom bei einer Dauer von 0,1 s auf der unteren Zeit/Strom-Kennlinie nicht zur Sicherungsauslösung führt. Die Wahl der nächst kleineren Sicherung wurde so oft vorgenommen bis eine dreipolige Sicherungsabschaltung beim sekundärseitigen dreipoligen Klemmenkurzschluss zu erwarten bzw. mit einer Inrushgefährdung zu rechnen war. Die Ergebnisse dieser theoretischen Untersuchungen sind in nachfolgender Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Aus den Ergebnissen ist zu ersehen, dass bei der Sicherstellung bzw. der Möglichkeit einer dreipoligen Abschaltung des sekundärseitigen Klemmenkurzschlusses durch die Sicherungen bis auf eine Ausnahme (grün) eine Inrushgefährdung gegeben ist. Es erschien zweckmäßig, die Laboruntersuchungen mit den Sicherungen (in Tabelle 4.2 fett gedruckt) für diese kritischen Fälle durchzuführen.

Tabelle 4.2 Theoretische Überprüfung der Kurzschlussausschaltung und Inrushgefährdung

Hersteller	Lastschalter	Sicherung	Nennstrom Sicherung A	Übernahmestrom A	Einschaltstrom kann zu Sicherungsauslösung führen ja / nein	sekundärseitiger Klemmenkurzschluss wird abgeschaltet durch		
						Sicherungen, dreipolig ja / nein	erster Pol Sicherung, beide andere Lastschalter ja / nein	erster Pol Sicherung, beide andere Lastschalter oder Sicherung ja / nein
A	I	100	1025...1466	nein	nein	ja	nein	
		80	768...1098	nein	nein	ja	nein	
		63	632...898	ja	nein	nein	ja	
	II	100	1122...1586	nein	nein	ja	nein	
		80	784...1104	nein	nein	ja	nein	
		63	553...779	ja	nein	nein	ja	
B	I	80	908...1215	nein	nein	ja	nein	
		63	736...985	nein	nein	nein	ja	
		50	544...728	ja	ja	nein	nein	
C	I	63	589...787	nein	nein	ja	nein	
		50	416...556	nein	nein	ja	nein	
		40	343...458	nein	nein	nein	ja	
		31,5	252...337	ja	ja	nein	nein	
D	I	50	524...701	nein	nein	ja	nein	
		40	433...579	nein	nein	nein	ja	
		31,5	318...425	nein	ja	nein	nein	

- keine Inrushgefährdung gegeben, dreipolige Abschaltung des sekundärseitigen Klemmenkurzschlusses durch die HH-Sicherungen sichergestellt
- Inrushgefährdung gegeben, dreipolige Abschaltung des sekundärseitigen Klemmenkurzschlusses durch die HH-Sicherungen möglich bzw. sichergestellt
- Übernahmestrom überschreitet den Bemessungs-Übernahmestrom des Lasttrennschalters
- empfohlene Sicherung nach [2]

## 5 Experimentelle Untersuchungen an den Komponenten

### 5.1 Ermittlung der Zeit-Strom-Kennlinien der verwendeten HH-Teilbereichs-Sicherungs-Einsätze

#### 5.1.1 Durchführung der Versuche

Die Messungen der Zeit-Strom-Kennlinien fanden in Anlehnung an [1] repräsentativ an Sicherungs-Einsätzen 12 kV / 63 A und 24 kV / 31,5 A entsprechend der zu untersuchenden Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen statt. Es standen jeweils zwei Chargen eines Herstellers und bei den 63-A-Sicherungen zusätzlich eine Charge eines zweiten Herstellers zur Verfügung. Im Bereich zwischen Einschaltstrom und primärseitigem Kurzschlussstrom bei sekundärseitigem Klemmenkurzschluss der gewählten Transformatoren wurden die Messungen bei drei verschiedenen Stromwerten vorgenommen. Die Prüfkreise waren bei allen Stromwerten auf einen Leistungsfaktor von  $\cos\varphi=0,2$  induktiv eingestellt, lediglich beim kleinsten Stromwert fand zusätzlich die Einstellung  $\cos\varphi=0,8$  induktiv Anwendung. Das Prinzipschaltbild der Prüfkreise ist aus Bild 5.1 zu entnehmen. Nur bei zu erwartenden Schmelzzeiten der Sicherungen von größer 1 s wurde der Niederspannungs-Heizkreis nach [1] Abschnitt 13.2.2.1 Verfahren a1 zum Schmelzen der Sicherung benutzt und dann innerhalb von 150 ms auf den Hochspannungskreis umgeschaltet.

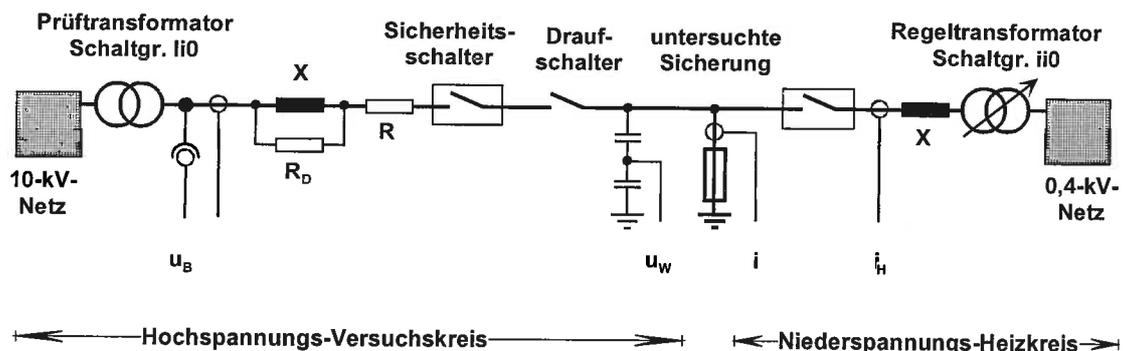


Bild 5.1 Prinzipschaltbild zur Ermittlung der Zeit-Strom-Kennlinien

Um die Messwerte statistisch abzusichern, wurden bei jedem Stromwert 5 Versuche durchgeführt. Bei allen Versuchen fand eine Registrierung des Stromes, der Bezugsspannung  $U_B$  und der wiederkehrenden Spannung  $U_w$  mittels Transientenrekorders (12 bit, 256 kbyte/Kanal) statt. Die Erfassung des Stromes und der Bezugsspannung erfolgte über induktive Wandler und die der wiederkehrenden Spannung über einen kapazitiven Spannungsteiler (350 pF, Übersetzung 2800). Ferner wurde die Dauer der Bewegung des Schlagstiftes und dessen zeitliche Zuordnung zum Stromflussende mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitsvideokamera (1000 Bilder/s) festgehalten.

### 5.1.2 Ergebnisse

Die beiden Oszillogramme von Bild 5.2 zeigen jeweils von oben nach unten die typischen Verläufe der Bezugsspannung  $u_B$ , des Stromes  $i$  und der wiederkehrenden Spannung  $u_w$  bei den Ausschaltversuchen an 63-A-Sicherungen ( $U_n = 12$  kV) des Herstellers I im für die Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen interessierenden Zeitbereich. Im oberen Oszillogramm a) bei 809 A ist zu ersehen, dass die Sicherung nach 91 ms Stromflussdauer (mittlerer Verlauf) geschmolzen ist, denn dann tritt an der Sicherung eine Lichtbogenspannung auf, die nach einer Dauer von 4,47 ms bis zum Stromflusseende in die wiederkehrende Spannung  $u_w$  (unterer Verlauf) übergeht. Im unteren Oszillogramm b) wurde die gleiche Sicherung mit 407 A im Niederspannungs-Heizkreis in 1,04 s geschmolzen und nach der Umschaltpause auf den Hochspannungskreis von 150 ms ging die Lichtbogenspannung innerhalb von 16,1 ms in die wiederkehrende Spannung über. In Bild 5.3 sind die Verläufe einer gleichen Sicherung des Herstellers II zu sehen. In beide Bilder sind die Ansprechzeiten der Schlagstifte eingetragen, die mittels Bilderfolge der Hochgeschwindigkeitsvideokamera ermittelt wurden (siehe Bild 5.4). Auffallend ist, dass die Schlagstifte der Sicherungen des Herstellers I in dem angegebenen Bereich der Ströme bei etwa halber Schmelzzeit der Sicherung ansprechen. Die Sicherung des Herstellers II weist bei dem in Bild 5.3 angegebenen Strom eine Ansprechzeit des Schlagstiftes auf, die in etwa identisch mit der Schmelzzeit ist.

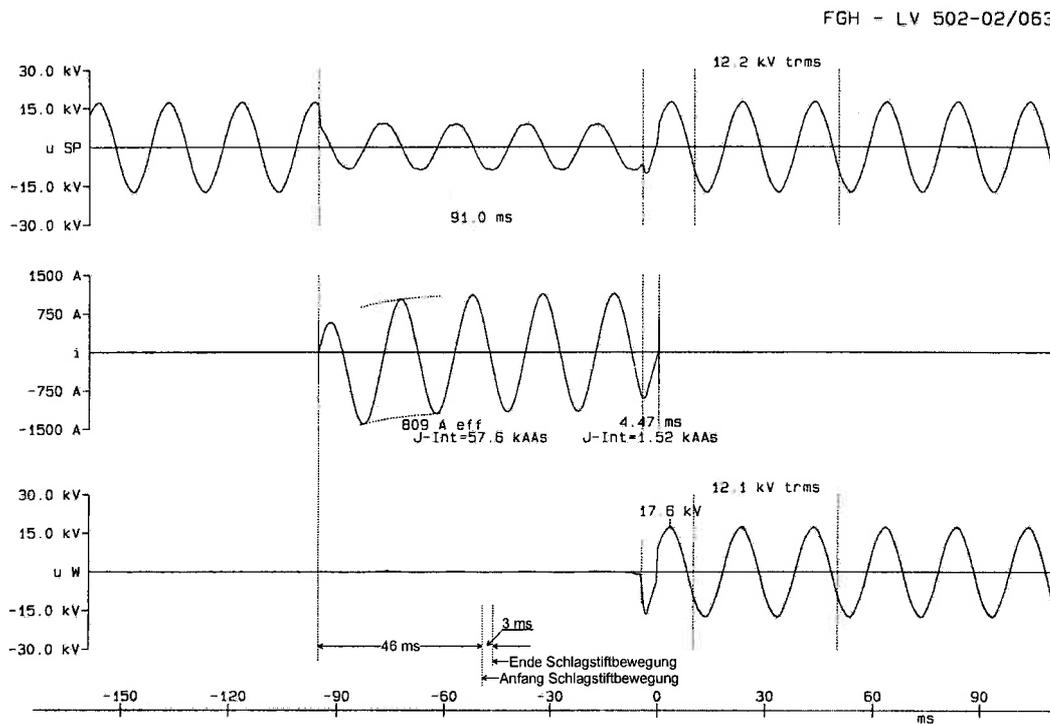
Die gemessenen Kennlinien der beiden Sicherungen sind aus Bild 5.5 bis Bild 5.7 zu entnehmen. Da die Kennlinien der beiden Chargen der Sicherungen des Herstellers I nahezu identisch sind, wurden sie in Bild 5.6 zusammengefasst und die Messpunkte mit den 95%-Vertrauensbereichen versehen. Die Abweichungen der Ströme der gemessenen Schmelzkennlinie liegen innerhalb von 20 % von denen der Kennlinie des Herstellers. Während die Sicherungen des Herstellers I Ansprechzeiten der Schlagstifte im untersuchten Bereich aufweisen, die im Mittel etwa halb so groß sind wie deren Schmelzzeiten, so sind jene des Herstellers II nahezu identisch mit den Schmelzzeiten (vergleiche Bild 5.6 und Bild 5.7).

Zu Bild 5.4 sei ergänzend erläutert, dass in die Aufnahmen des Schlagstiftbereiches der Sicherungen im 1-ms-Takt links eine LED eingeblendet ist, die bei bestehendem Stromfluss leuchtet. Die Schlagstifte der Sicherungen sind jeweils in der letzten Aufnahme jeder Folge durch einen Pfeil kenntlich gemacht. Der Schlagstift der Sicherung des Herstellers I ist als brauner Bolzen und der des Herstellers II als metallischer glänzender Stift zu erkennen.

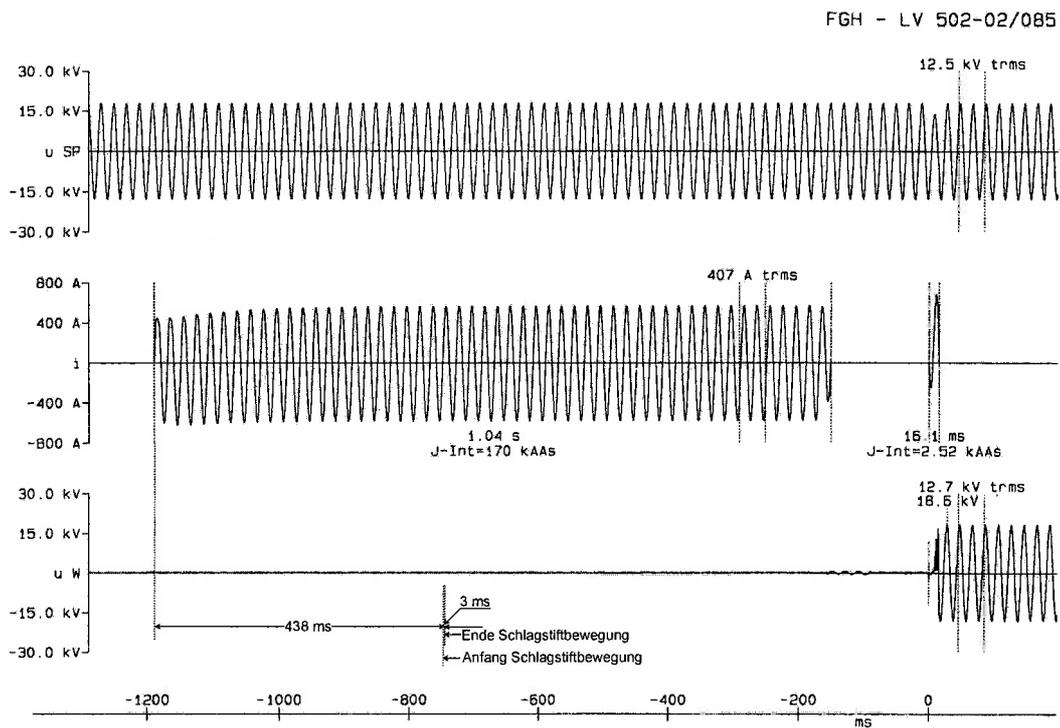
Für die 31,5-A-Sicherungen des Herstellers I können die gleichen Feststellung getroffen werden wie für dessen 63-A-Sicherungen (siehe Bild 5.8 und Bild 5.9).

Alle Einzelmessungen sind im Anhang aus den Tabellen 1A bis 5A zu entnehmen.

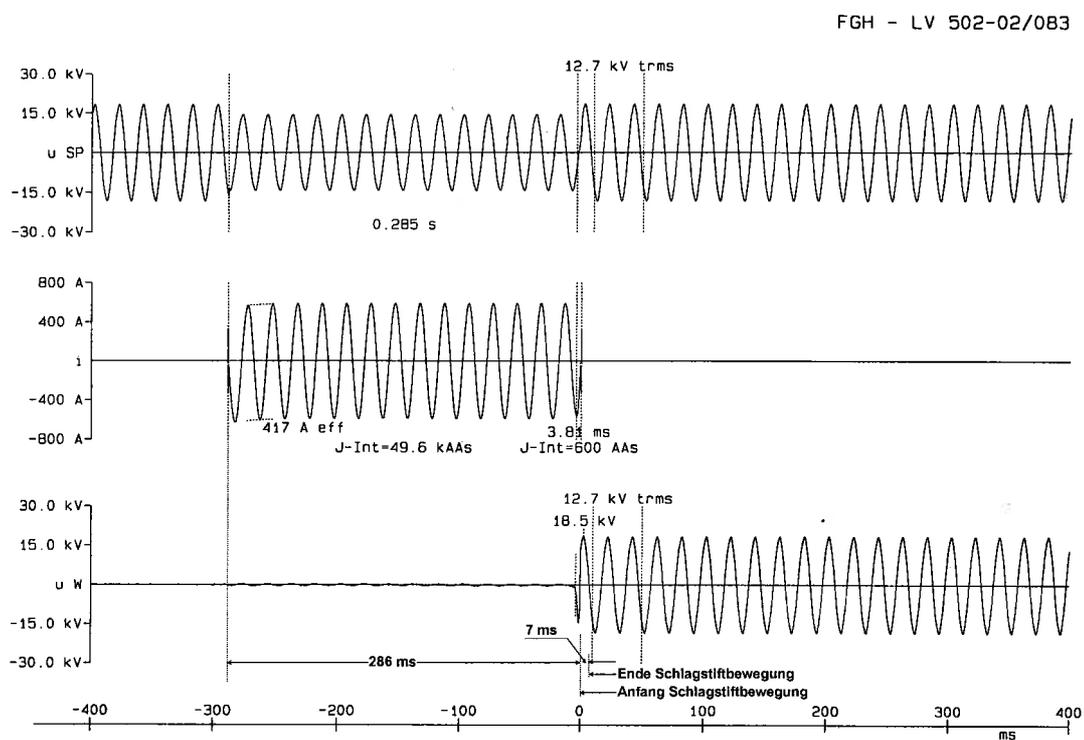
a)



b)



**Bild 5.2** Ausschaltversuch - Sicherung  $I_n = 63$  A,  $U_n = 12$  kV, Hersteller I  
 a) Ausschaltstrom 809 A, Schmelzzeit 91,0 ms, Lichtbogenzeit 4,47 ms  
 b) Ausschaltstrom 407 A, Schmelzzeit 1,04 s, Lichtbogenzeit 16,1 ms



**Bild 5.3** Ausschaltversuch - Sicherung  $I_n = 63$  A,  $U_n = 12$  kV, Hersteller II  
- Ausschaltstrom 417 A, Schmelzzeit 0,289 s, Lichtbogenzeit 3,5 ms

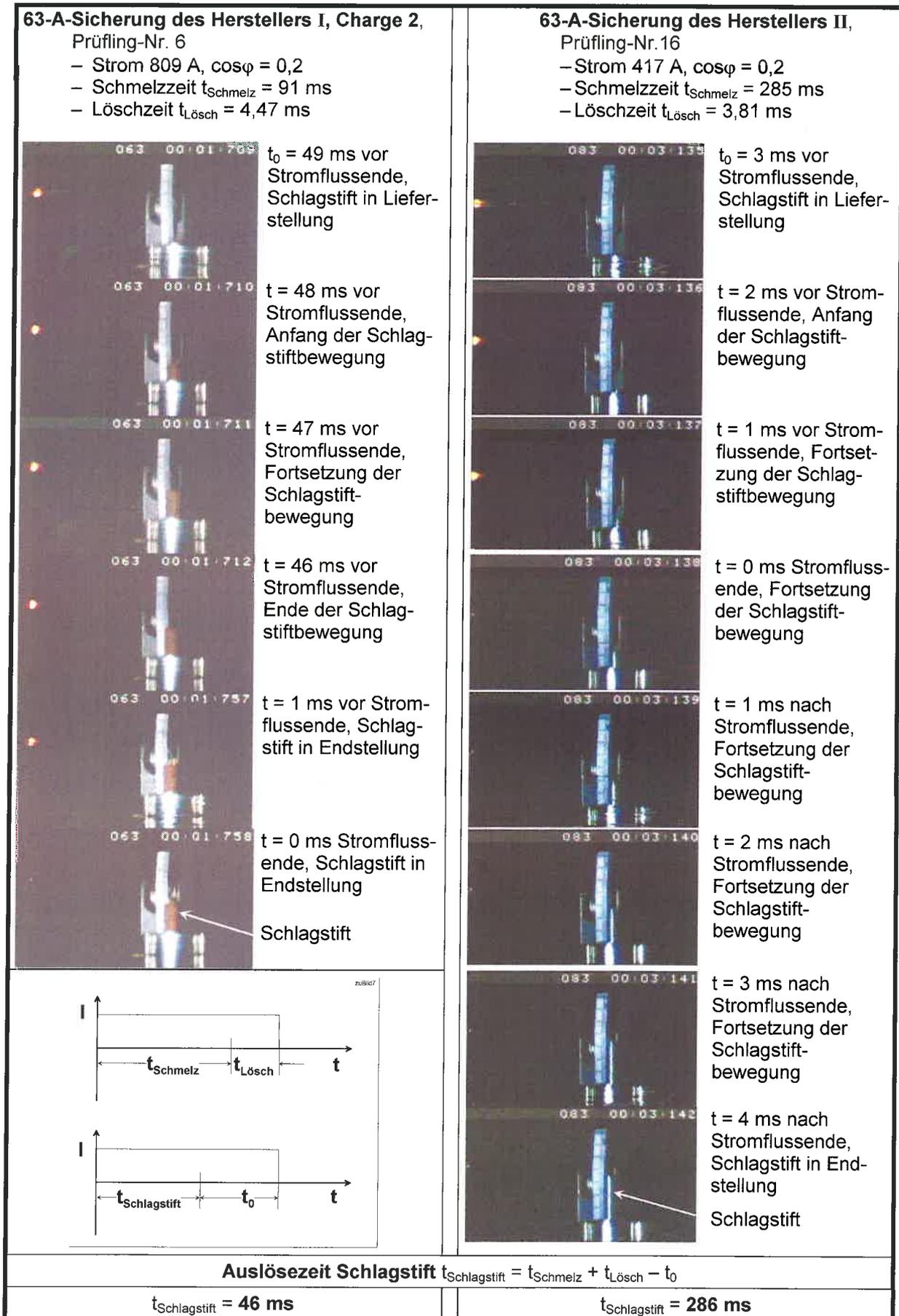
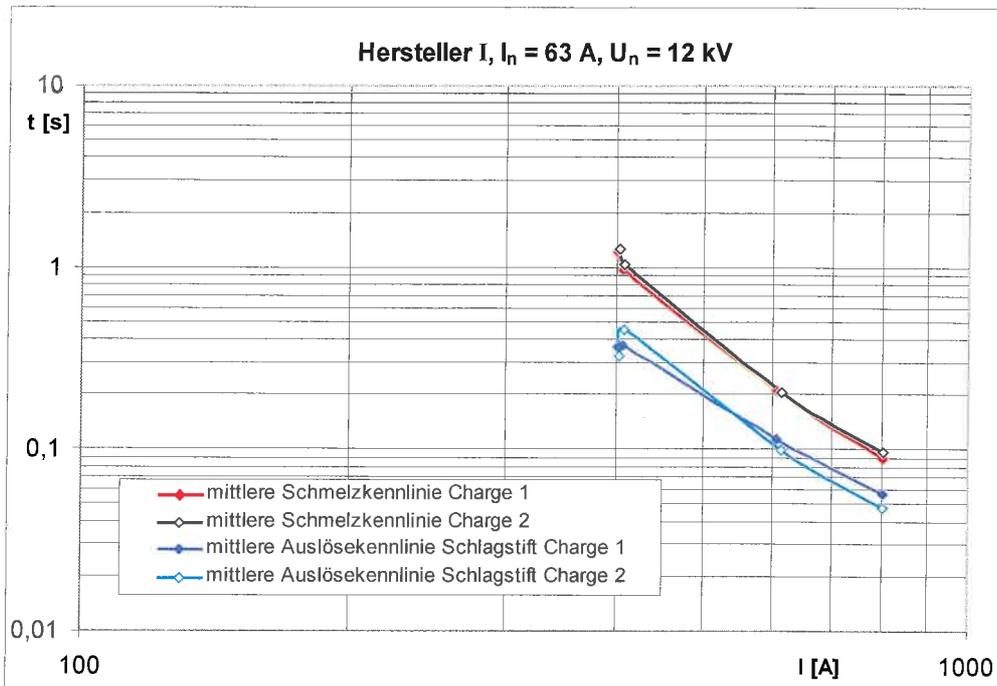
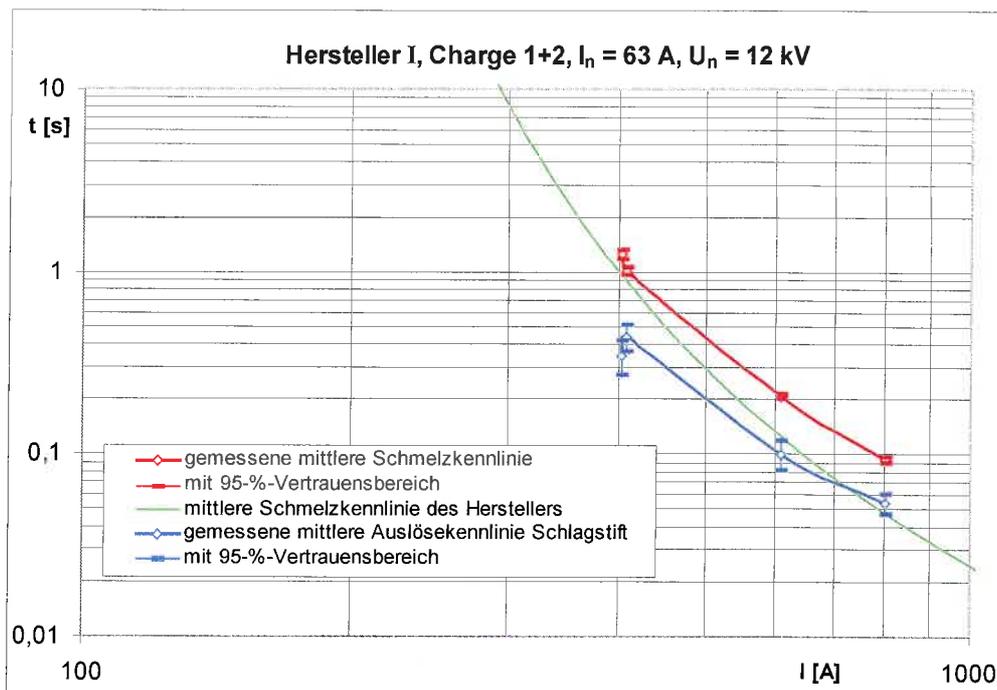


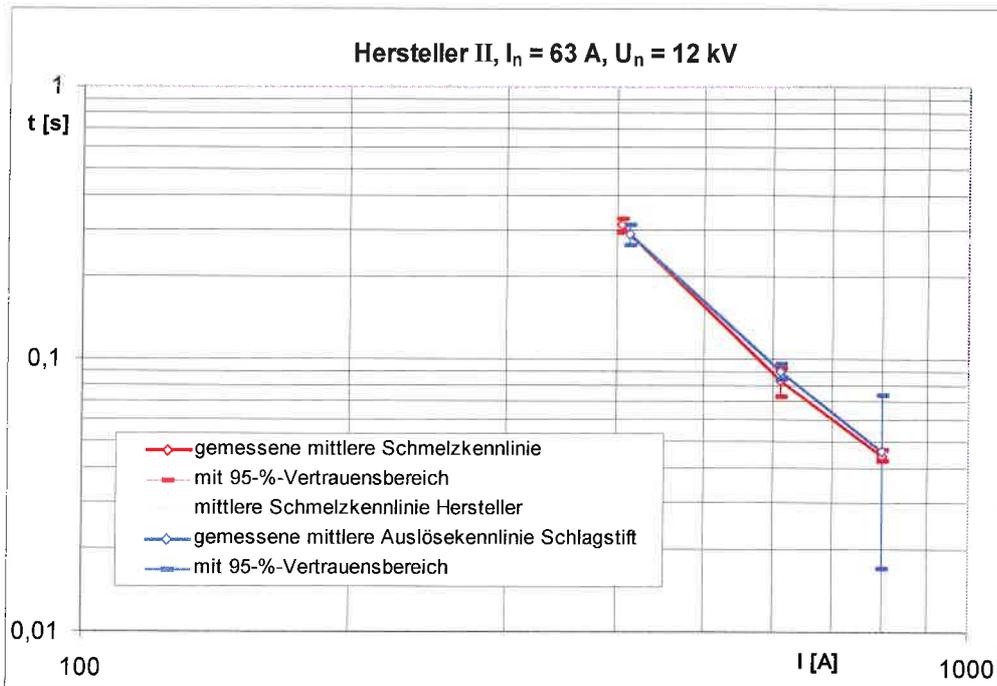
Bild 5.4 Messung der Auslösezeit der Schlagstifte



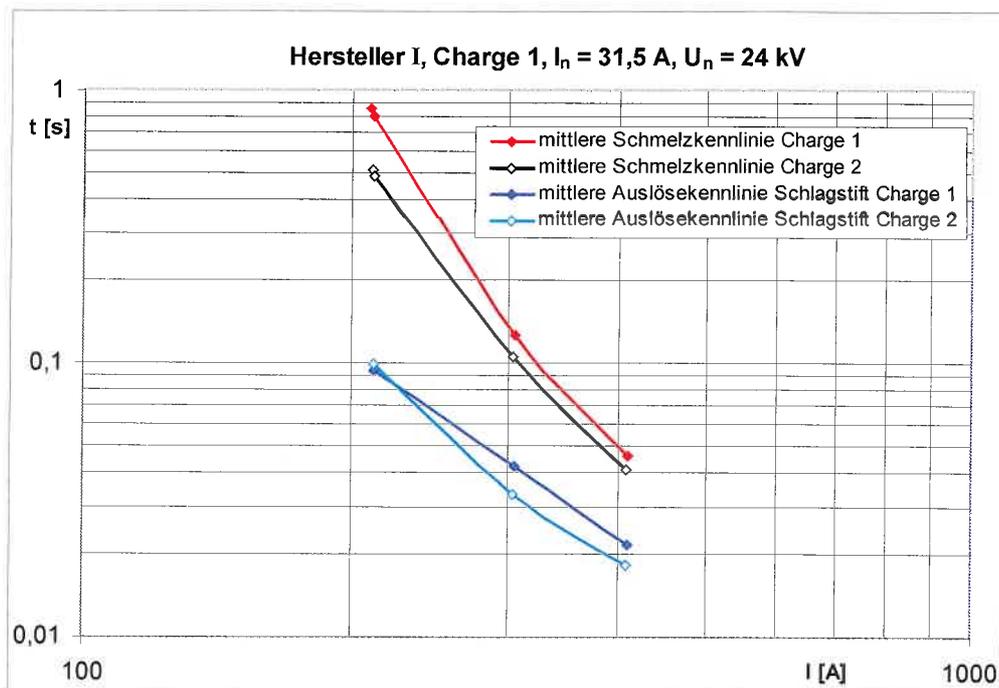
**Bild 5.5** Mittlere Schmelz- und Schlagstiftansprechzeiten der Sicherung des Herstellers I,  $I_n = 63 \text{ A}$ ,  $U_n = 12 \text{ kV}$   
 – Vergleich der beiden Chargen



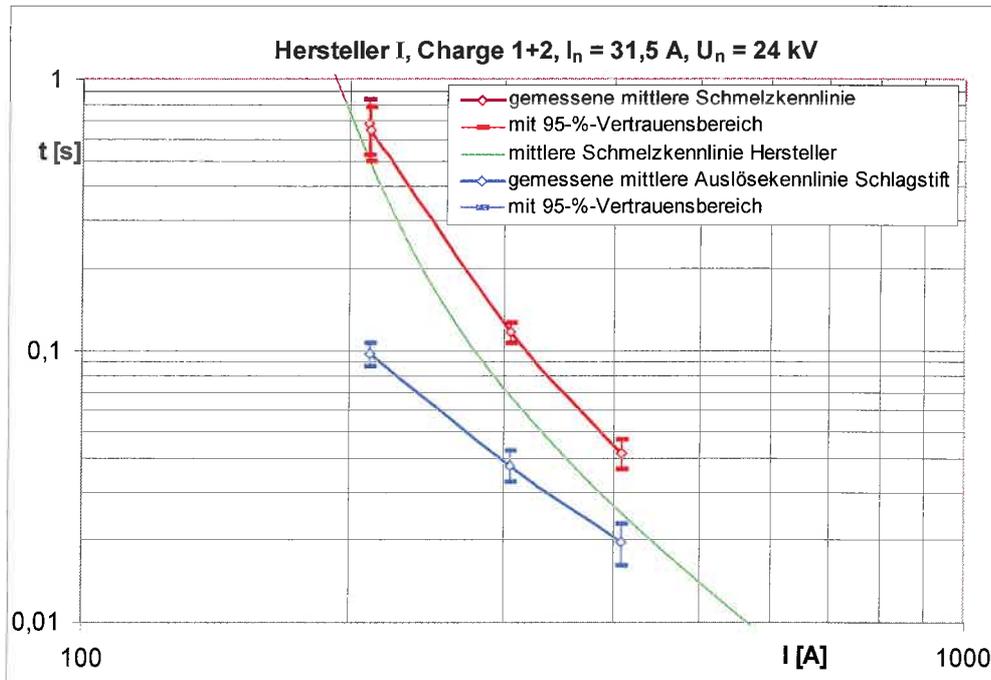
**Bild 5.6** Mittlere Schmelz- und Schlagstiftansprechzeiten der Sicherung des Herstellers I,  $I_n = 63 \text{ A}$ ,  $U_n = 12 \text{ kV}$   
 – Vergleich mit der Schmelzkennlinie des Herstellers



**Bild 5.7** Mittlere Schmelz- und Schlagstiftansprechzeiten der Sicherung des Herstellers II,  $I_n = 63\text{ A}$ ,  $U_n = 12\text{ kV}$   
– Vergleich mit der Schmelzkennlinie des Herstellers



**Bild 5.8** Mittlere Schmelz- und Schlagstiftansprechzeiten der Sicherung des Herstellers I,  $I_n = 31,5\text{ A}$ ,  $U_n = 24\text{ kV}$   
– Vergleich der beiden Chargen



**Bild 5.9** Mittlere Schmelz- und Schlagstiftansprechzeiten der Sicherung des Herstellers I,  $I_n = 31,5 \text{ A}$ ,  $U_n = 24 \text{ kV}$   
– Vergleich mit der Schmelzkennlinie des Herstellers

## 5.2 Ermittlung des zeitlichen Verhaltens der verwendeten Lastschalter

### 5.2.1 Durchführung der Versuche

Die Versuche dienten im wesentlichen der Bestimmung der Öffnungszeiten der vier verwendeten Lastschalter, und zwar bei Schlagstiftbetätigung. Sie wurden in Anlehnung an [4,5,6] Prüfschaltfolge 4 durchgeführt. Hierzu sind in einem dreiphasigen Prüfkreis nach Bild 5.10 drei Ausschaltungen nötig, und zwar mit dem vom Hersteller festgelegten Übernahmestrom bei Schlagstiftbetätigung. Bei jedem Versuch wurde in einem Pol des Lastschalters eine nach Tabelle 4.2 zugeordnete Sicherung (fett gedruckt) eingesetzt und in die beiden anderen Pole jeweils eine Sicherungsnachbildung, die die gleichen Abmessungen wie die Sicherung hatte und aus Al-Rohr mit stromtragfähigem Querschnitt bestand. Der echte Sicherungseinsatz war bei den drei Versuchen jedesmal in einem anderen Pol.

Anstelle des festgelegten Übernahmestromes bei Schlagstiftbetätigung wurden die Versuche bei zwei Strömen zwischen den Nenn-Übernahmeströmen bei Schlagstiftbetätigung und bei Auslöserbetätigung durchgeführt.

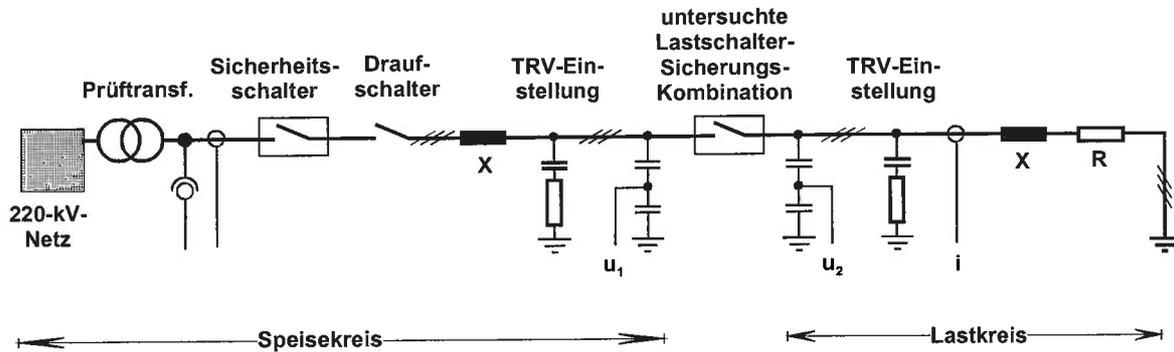


Bild 5.10 Prinzipschaltbild - Lastschalterversuche

Zum Vergleich fanden zusätzlich an drei Lastschaltern Versuche zur Ermittlung der Öffnungszeit bei Auslöserbetätigung in Prüfschaltung 5 von [4,5,6] statt, und zwar bei einem Strom unterhalb des Nenn-Übernahmestromes bei Auslöserbetätigung. Hierzu war es erforderlich, in allen drei Polen der Lastschalter die schon erwähnten Sicherungsnachbildungen einzusetzen. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden abklingende Gleichstromglieder in den Strömen vermieden. Hierfür wurde der Draufschalter bei allen Versuchen so gesteuert, dass ein Pol ca. 5 ms verzögert war. Die Zuschaltung des verzögerten Poles geschah zu eben jenem Zeitpunkt, der dem Impedanzwinkels  $\varphi_K$  des Lastkreises nach dem Nulldurchgang seiner Leiter-Erde-Spannung entspricht.

Für den Leistungsfaktor des Speisekreises galt stets  $\cos\varphi_{\text{Speise}} < 0,05$  und der des Lastkreises war bei allen Stromwerten auf  $\cos\varphi_{\text{Last}} = 0,2 \dots 0,3$  induktiv eingestellt. Die Bedingungen an den Prüfkreis für Prüfschaltfolge 4 und 5 entsprechend [4,5,6] wurden eingehalten, insbesondere der unbeeinflussten Einschwingspannung. Bei allen Versuchen fand eine Registrierung der drei Leiterströme, der speiseseitigen und der lastseitigen Spannungen mittels Transientenrekorders (12 bit, 256 kbyte/Kanal) statt. Die Erfassung der Ströme erfolgte über induktive Wandler und die der Spannungen über kapazitive Spannungsteiler (350 pF, Übersetzung 6160). Die Aufzeichnung der wiederkehrenden Spannung erfolgte mittels Auswerte-Software durch Differenzbildungen der gemessenen speise- und lastseitigen Spannungen.

## 5.2.2 Ergebnisse

Das Oszillogramm von Bild 5.12 zeigt die typischen Verläufe der Ströme und Spannungen für Prüfschaltfolge 4 von [4,5,6]. Die hierbei im mittleren Leiter eingesetzte Sicherung ist nach 63,1 ms nach der Zuschaltung geschmolzen, was an dem relativ langsamen Anstieg der Spannung über die Schaltstrecke zu erkennen ist (Lichtbogenspannung), die nach weiteren 10,7 ms (Stromflussende) in die wiederkehrende, verkettete Spannung übergeht. Die beiden äußeren Leiter werden 69,4 ms nach dem Schmelzen der Sicherung über den Lastschalter abgeschaltet. In den Spannungen über die Schaltstrecken dieser beiden Leiter entsteht dadurch ein relativ schneller Anstieg, der der Einschwingspannung entspricht, die für den Prüfkreis eingestellt wurde. Die Einschwingspannung der beiden Leiter geht dann in

die wiederkehrende Leiter-Erde-Spannung über. Auch im mittleren Leiter, der durch die Sicherung abgeschaltet wurde, fällt dann die Spannung über die Schaltstrecke auf die Leiter-Erde-Spannung ab. Der ca. 10 ms vor der Abschaltung durch den Lastschalter in den Spannungen über die Schaltstrecke der beiden äußeren Leiter jeweils zu erkennende Spannungsimpuls ist durch einen erfolglosen Abschaltversuch des Lastschalters entstanden. Die Öffnungszeit des Lastschalters bei Schlagstiftbetätigung ist nach [4,5,6] die Zeit zwischen Beginn Lichtbogenspannung und Abschaltung durch den Lastschalter, d.h. in diesem Beispiel 69,4 ms. Die tatsächliche Öffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung kann jedoch eine andere sein, nämlich dann, wenn die Ansprechzeit des Schlagstiftes nicht gleich der Schmelzzeit der Sicherung ist. In diesem Fall ist die nach [4,5,6] ermittelte Öffnungszeit des Lastschalters bei Schlagstiftbetätigung von der Höhe des abzuschaltenden Stromes abhängig und daher für die Ermittlung des Übernahmestromes nicht brauchbar.

Die Öffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung  $t_{\text{Schalter}}$  ergibt sich immer nach Bild 5.11 aus der Summe von Schmelzzeit  $t_{\text{Schmelz}}$  und Öffnungszeit  $t_{\text{Schalter, Norm}}$  nach [4,5,6] vermindert um die Ansprechzeit  $t_{\text{Schlagstift}}$  des Schlagstiftes. Für das Beispiel in Bild 5.12 bei einem Strom von 709 A ist die Ansprechzeit des Schlagstiftes 62,6 ms nach Bild 5.7 für die verwendete 63-A-Sicherung des Herstellers II und damit nahezu identisch mit deren Schmelzzeit. Mit diesen Werten ergibt sich eine Öffnungszeit des Lastschalters ab Schlagstiftbetätigung von 69,9 ms und ist damit sehr nahe jener nach [4,5,6] ermittelten.

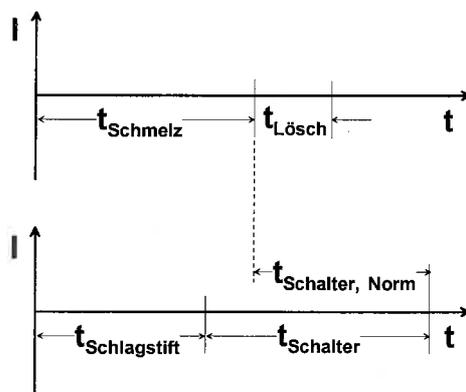
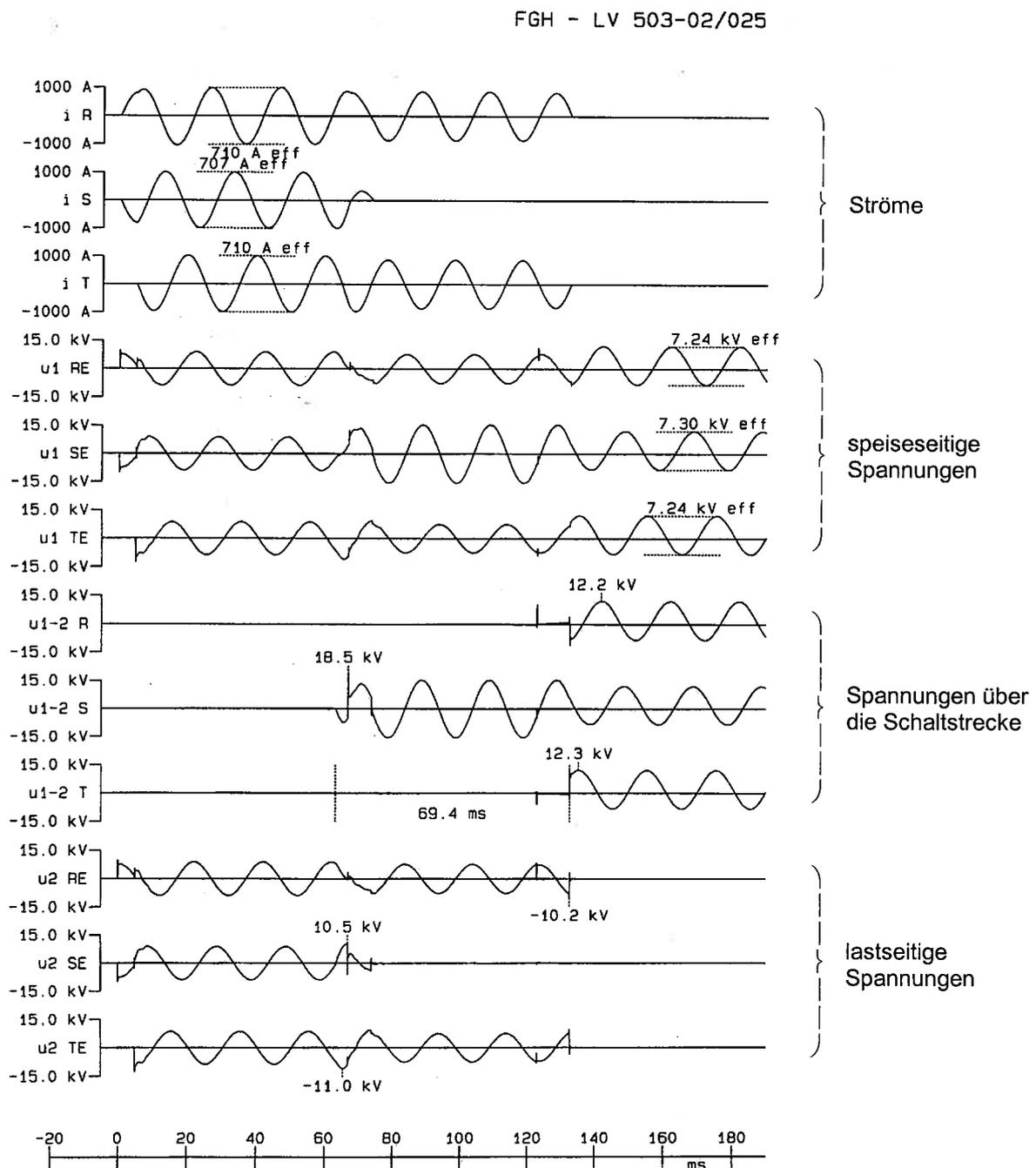


Bild 5.11 Ermittlung der Öffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung

Anders verhält es sich mit dem Beispiel nach Bild 5.13, bei welchem die Sicherung im Leiter  $L_1$  nach 25,4 ms geschmolzen ist und die Öffnungszeit des Lastschalters bei Schlagstiftbetätigung nach [4,5,6] 19,5 ms beträgt. Die tatsächliche Öffnungszeit des Lastschalters ab Schlagstiftbetätigung ergibt jedoch 31,5 ms bei einer Ansprechzeit des Schlagstiftes von 13,4 ms für 508 A nach Bild 5.8 (interpoliert) für die 31,5-A-Sicherung des Herstellers I. Wird bei einem Strom die Summe aus Ansprechzeit des Schlagstiftes und Öffnungszeit des Lastschalters ab Schlagstiftbetätigung kleiner als die Schmelzzeit der Sicherung, dann tritt eine dreipolige Abschaltung durch den Lastschalter auf. Für letztere Kombination ist dies bei einem Strom von  $\leq 355$  A gegeben (siehe Oszillogramm von Bild 5.14). Die hier im mittleren Leiter eingesetzte Sicherung ist nicht durchgeschmolzen und es

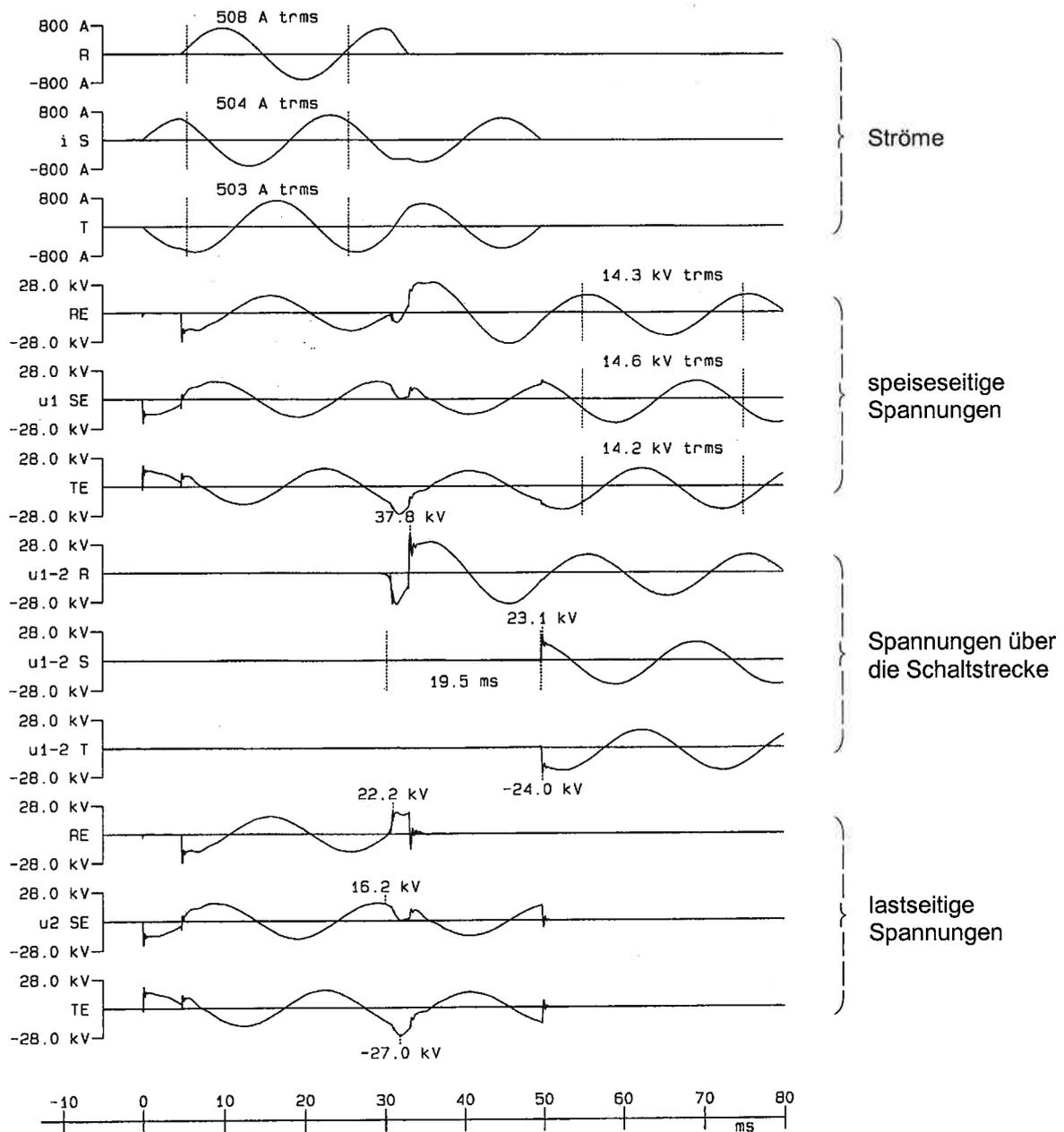
erfolgte eine dreipolige Abschaltung durch den Lastschalter. Dies ist auch an dem Fehlen des typischen Verlaufes der Spannung über die Schaltstrecke (Lichtbogenspannung an der Sicherung) wie in den Oszillogrammen von Bild 5.12 und Bild 5.13 zu erkennen.



**Bild 5.12** Ermittlung der Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung

- Lastschalter Hersteller A,  $U_n = 12 \text{ kV}$
- 63-A-Sicherungseinsatz (Hersteller II) im mittleren Leiter
- Sicherungsnachbildungen in den beiden äußeren Leitern
- Strom 709 A,  $\cos \varphi = 0,23$

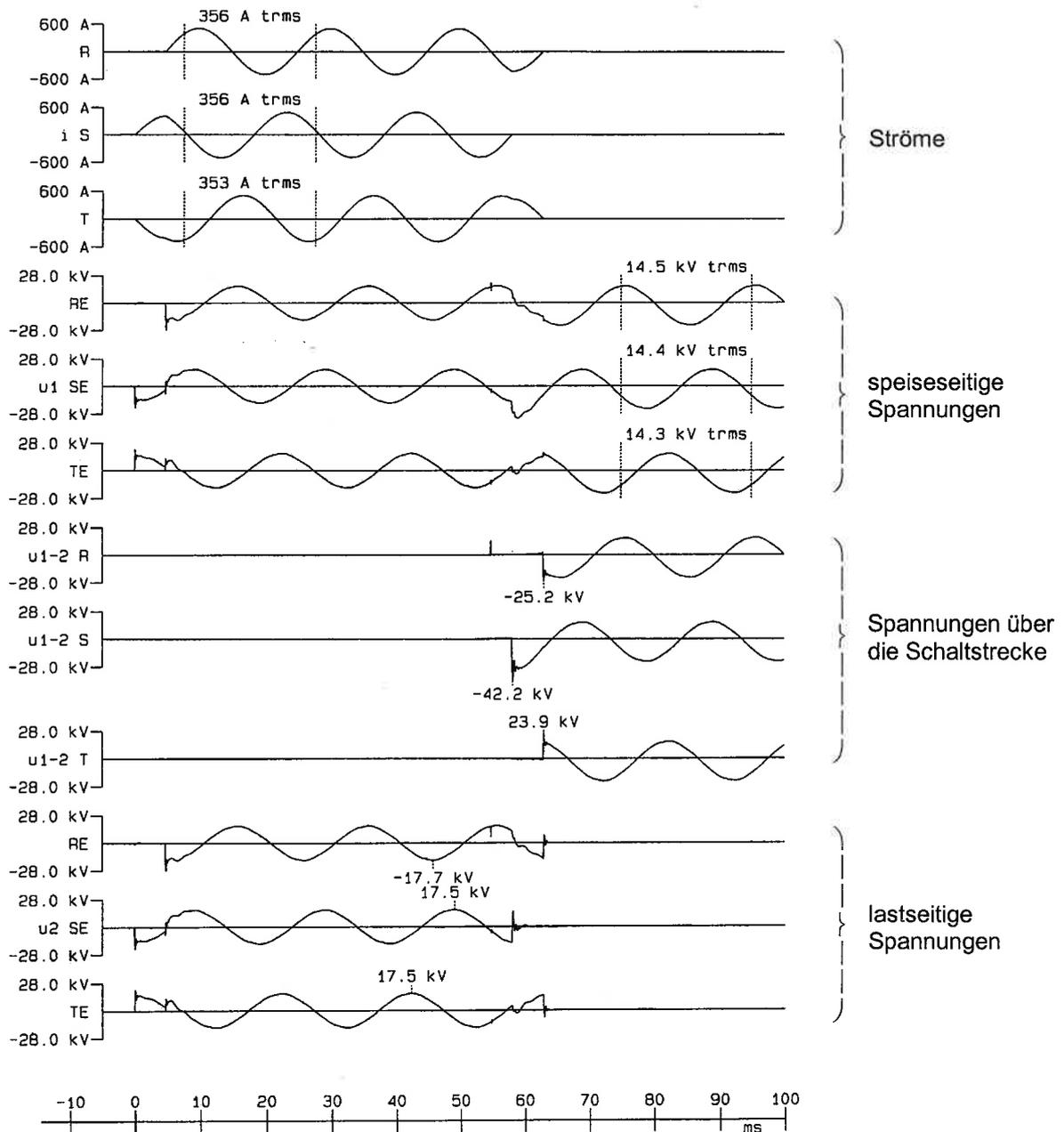
FGH - LV 503-02/008



**Bild 5.13** Ermittlung der Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung

- Lastschalter Hersteller D,  $U_n = 24 \text{ kV}$
- 31,5-A-Sicherungseinsatz (Hersteller I) im Leiter  $L_1$
- Sicherungsnachbildungen in den Leitern  $L_2$  und  $L_3$
- Strom 505 A,  $\cos \varphi = 0,23$

FGH - LV 503-02/016



**Bild 5.14** Demonstration einer dreipoligen Abschaltung durch den Lastschalter bei Schlagstiftauslösung

- Lastschalter Hersteller D,  $U_n = 24 \text{ kV}$
- 31,5-A-Sicherungseinsatz (Hersteller I) im mittleren Leiter
- Sicherungsnachbildungen in den beiden äußeren Leitern
- Strom 355 A,  $\cos \varphi = 0,23$

Die Auswertungen aller Versuche sind im Anhang in den Tabellen 6A bis 9A wiedergegeben. In nachfolgender Tabelle 5.1 sind Öffnungszeiten der Lastschalter bei Schlagstiftbetätigung statistisch ausgewertet zusammengefasst.

*Tabelle 5.1 Öffnungszeiten der Lastschalter bei Schlagstiftbetätigung*

Lastschalter	Hersteller		A	B	C	D						
	Nennspannung		kV	12	12	24	24					
	Isolierung			Luft	SF <sub>6</sub>	Luft	SF <sub>6</sub>					
Sicherung	Hersteller		II	I	I	I						
	Nennstrom		A	63	50	31,5	31,5					
Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung nach [4,5,6]												
bei Strom			A	601 ... 706	596	970	317	349	355	508		
Mittelwert			ms	73,5	23,5	36,1	12,6	29,6	1)	21,4		
Standardabweichung			ms	7,7	5,3	4,8	1,4	4,2		1,7		
95%-Vertrauensbereich			Unsicherheit		ms	8,1	13,2	11,8		3,5	10,3	4,2
			Grenzen	untere	ms	65,4	10,3	24,3		9,1	19,2	17,3
				obere	ms	81,6	36,6	47,9	16,1	39,9	25,6	
Öffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung												
Mittelwert			ms	<b>70,0</b>	<b>29,7</b>	<b>71,5</b>	<b>34,6</b>					
Standardabweichung			ms	7,9	3,6	3,6	4,1					
95%-Vertrauensbereich			Unsicherheit		ms	8,3	3,8	6,7	10,5			
			Grenzen	untere	ms	<b>61,7</b>	<b>25,9</b>	<b>64,8</b>	<b>24,0</b>			
				obere	ms	<b>78,3</b>	<b>33,4</b>	<b>78,2</b>	<b>45,1</b>			

1) Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung nach den Normen [4,5,6] konnte nicht ermittelt werden, da dreipolige Abschaltung durch den Lastschalter erfolgte.

Es ist zu ersehen, dass die nach [4,5,6] ermittelten Öffnungszeiten bei Schlagstiftbetätigung bei Verwendung von Sicherungen, deren Ansprechkenlinien der Schlagstifte sich mit denen der Schmelzkennlinien decken (Hersteller II), recht gute Übereinstimmung mit den tatsächlichen aufweisen. Anders ist es bei Verwendung von Sicherungen mit Ansprechkenlinien der Schlagstifte unterhalb der Schmelzkennlinien: dann werden die nach [4,5,6] ermittelten Öffnungszeiten stromabhängig und weisen mit kleiner werdenden Strömen fallende Tendenzen bis gegen Null (Übergang zur dreipoligen Abschaltung des Lastschalters) auf. Sie entsprechen nicht den tatsächlichen Werten und sind daher für die Ermittlung der Übernahmeströme unbrauchbar.

## 6 Experimentelle Ermittlung der Übergangsbereiche der Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen

### 6.1 Eingrenzung der zu untersuchenden Strombereiche

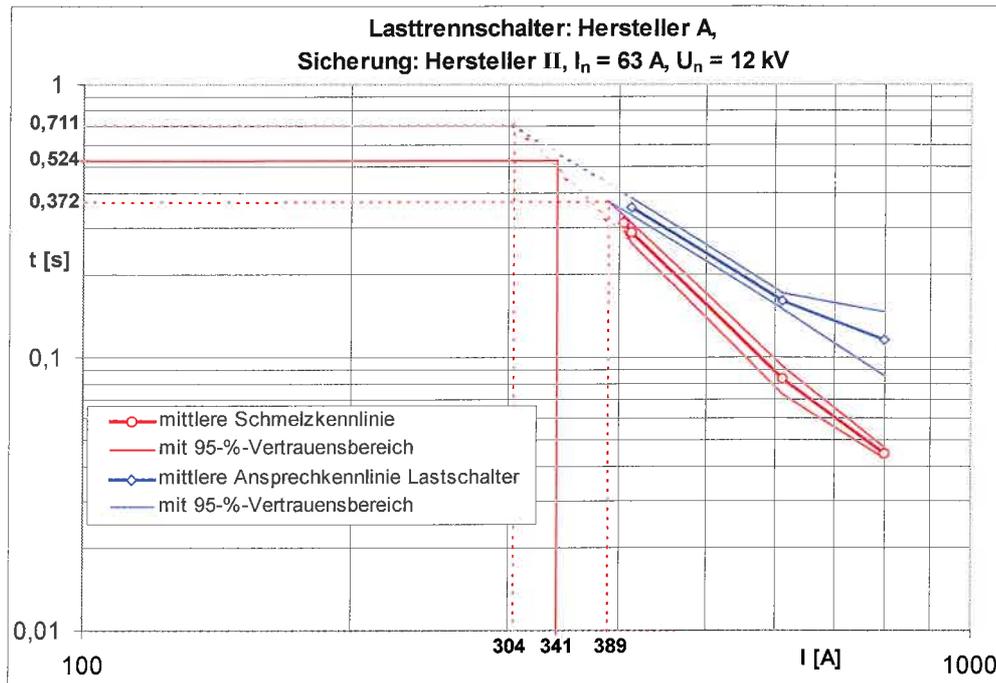
Die Untersuchungen an den kompletten Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen dienen dazu, die Übergangsbereiche vom dreipoligen Abschalten der Sicherungen auf das einpolige mit nachfolgender zweipoliger Abschaltung durch den Lastschalter zu erfassen, d.h. die Versuche müssen sich auf den Bereich des Übernahmestromes bei Schlagstiftbetätigung erstrecken. Auch die in Abschnitt 5.2.2 festgestellten dreipoligen Abschaltungen sollten mit einbezogen werden. An Hand der nach Abschnitt 5.1 ermittelten Kennlinien der Sicherungen und der nach Abschnitt 5.2 ermittelten Öffnungszeiten der Lastschalter bei Schlagstiftbetätigung wurde zunächst versucht die Bereiche der Übernahmeströme einzugrenzen.

Im nachfolgenden Text werden die Kombinationen zur Vereinfachung mit Kurzbezeichnungen aufgeführt. Die Bezeichnung D/I-31,5 bedeutet, die Kombination besteht aus dem Lastschalter des Herstellers D und den 31,5-A-Sicherungen des Herstellers I.

Die Ermittlung des Übernahmestromes nach Anhang B von [4,5,6] bei der 0,9-fachen Öffnungszeit des Lastschalters an der unteren Schmelzkennlinie der Sicherung kommt aus verständlichen Gründen nur dann in Frage, wenn die Ansprechkennlinie des Schlagstiftes mit der Schmelzkennlinie der verwendeten Sicherungen nahezu identisch ist, d.h. nur für die Kombination A/II-63. Hierfür ergibt sich bei einer nach Tabelle 5.1 ermittelten Öffnungszeit des Lastschalters von 70 ms und der Schmelzkennlinie der Sicherung nach Bild 5.7 ein Übernahmestrom von ca. 660 A.

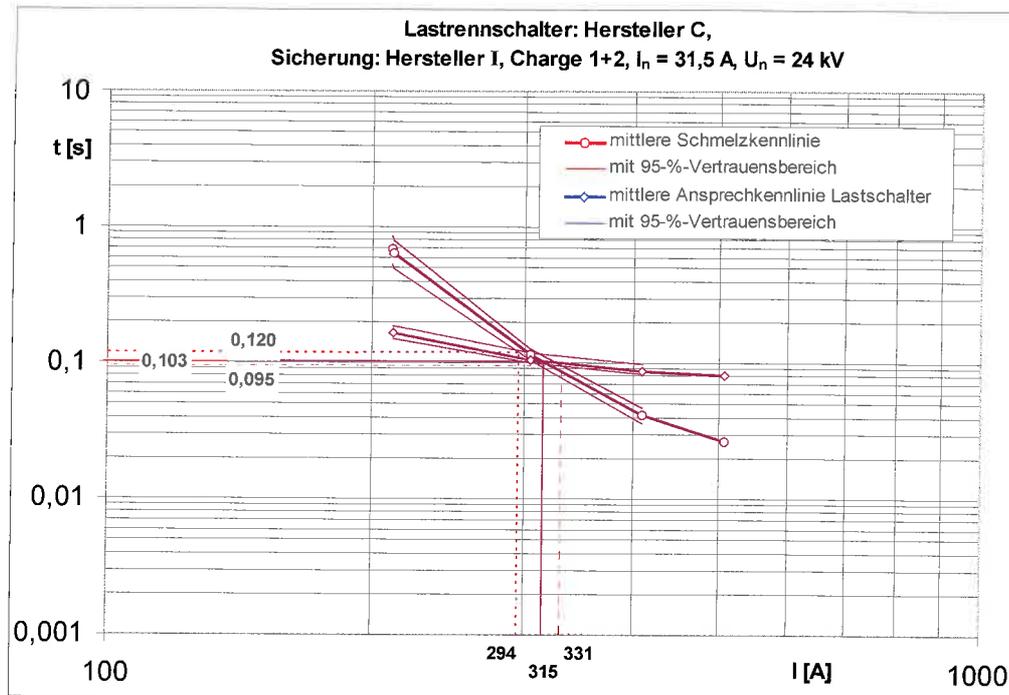
Eine Kennlinie für das Ansprechen des Lastschalters ergibt sich, wenn man seine eigene Öffnungszeit zu der Ansprechkennlinie des Schlagstiftes von Bild 5.7 addiert (siehe Bild 6.1, blaue Kennlinie). Die Unsicherheiten der Zeiten für den 95%-Vertrauensbereich wurden quadratisch addiert, so dass man eine untere und eine obere Kennlinie wie bei der Schmelzkennlinie erhält, die ebenfalls in Bild 6.1 eingetragen ist. Für Ströme, die größer sind als jener des Schnittpunktes der oberen Schmelzkennlinie mit jener der unteren Ansprechkennlinie des Lastschalters (389 A), kommen die Sicherungen immer vor dem Lastschalter, d.h. in diesen Fällen erfolgt immer eine dreipolige Abschaltung durch die Sicherungen. Ströme darunter werden auch einpolig durch eine Sicherung und zweipolig durch den Lastschalter abgeschaltet, d.h. der Übernahmestrom bei Schlagstiftbetätigung ist durch diesen Schnittpunkt bestimmt und unterscheidet sich wesentlich von dem, der nach [4,5,6] ermittelt wurde, in diesem Fall ist er etwa 1,7 mal kleiner. Im Schnittpunkt der unteren Schmelzkennlinie mit der oberen Ansprechkennlinie des Lastschalters (304 A) schaltet der Lastschalter immer dreipolig vor den Sicherungen ab. Für diese Kombination wurde der Punkt durch Interpolieren über einen weiten Bereich bei 304 A ermittelt und hat deshalb nur rein theoretische Bedeutung. Da die Schmelzkennlinie und die Ansprechkennlinie des

Schlagstiftes nach Bild 5.7 nahezu identisch sind werden die Ansprechkennlinien des Lastschalters niemals unterhalb der Schmelzkennlinie verlaufen, d.h. eine dreipolige Abschaltung durch den Lastschalter wird es bei dieser Kombination nicht geben.



**Bild 6.1** Vorermittlung des Übernahmestromes für die Lastschalter-Sicherungs-Kombination A/II-63 ( $U_n = 12\text{ kV}$ )

Anders verhält es sich, wenn die Ansprechkennlinie des Schlagstiftes unterhalb der Schmelzkennlinie liegt, wie z.B. bei der 31,5-A-Sicherung des Herstellers I (siehe Bild 5.9). In diesen Fällen treten die dreipoligen Abschaltungen durch den Lastschalter wie z.B. für die Kombination C/I-31,5 auf (siehe Bild 6.2). In Tabelle 6.1 sind die nach diesem Verfahren bestimmten Übernahmeströme bei Schlagstiftbetätigung denen nach [4,5,6] ermittelten gegenübergestellt (siehe Tabelle 4.2) und die Übergangsströme zu den gesicherten dreipoligen Abschaltungen durch die betreffenden Lastschalter aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass die nach den Messungen ermittelten Übernahmeströme bei Schlagstiftbetätigung bei Verwendung der Sicherungen des Herstellers I rein zufällig innerhalb der nach [4,5,6] ermittelten Strombereiche liegen bzw. nahe an diese heranreichen, obwohl die Ansprechkennlinien der Schlagstifte sich unterhalb der Schmelzkennlinien befinden und deshalb das Verfahren nach [4,5,6] nicht anwendbar ist. Bei den Sicherungen des Herstellers II, deren Ansprechkennlinien der Schlagstifte nahezu identisch mit deren Schmelzkennlinien ist, weist wie schon erwähnt der Übernahmestrom zu dem nach [4,5,6] ermittelten erhebliche Unterschiede auf.



**Bild 6.2** Vorermittlung des Übernahmestromes bei Schlagstiftbetätigung für die Lastschalter-Sicherungs-Kombination C/I-31,5 ( $U_n = 24$  kV)

**Tabelle 6.1** Gegenüberstellung der aus den Messungen und der nach Norm [4, 5, 6] ermittelten Übernahmeströme bei Schlagstiftbetätigung

Lastschalter-Sicherungs-Kombination	Übernahmestrom bei Schlagstiftbetätigung		Übergangsstrom zur gesicherten dreipoligen Abschaltung durch den Lastschalter bei Schlagstiftbetätigung
	nach Messungen	nach [4, 5, 6] (siehe Tabelle 4.2)	
	A	A	A
A/II-63	389	553 ... 779	–
A/I-63	737	632 ... 898	630
B/I-50	546	544 ... 728	496
C/I-31,5	331	252 ... 337	294
D/I-31,5	450	318 ... 425	349

## 6.2 Durchführung der Versuche

Die Versuche an den kompletten Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen wurden durchgeführt, um die nach Abschnitt 6.1 ermittelten Übernahmeströme bei Schlagstiftbetätigung und die Übergangsströme zur dreipoligen Abschaltung durch die betreffenden Lastschalter nachzuweisen. Hierzu wurden die Prüfkreise wie sie in Abschnitt 5.2.1 beschrieben sind verwendet. Um statistische Aussagen treffen zu können wurden möglichst bei jedem Strom fünf Versuche durchgeführt. Die Ausschaltungen fanden an allen

Kombinationen bei mindestens drei Stromwerten statt. Der Strombereich war nach oben hin eingegrenzt durch den kleinsten Strom, bei dem eine sichere dreipolige Abschaltung durch die Sicherungen nach den Werten von Tabelle 6.1 zu erwarten war, und nach unten hin durch den größten Strom, bei dem eine dreipolige Abschaltung durch den Lastschalter vorhersehbar war. Bei der Kombination A/II-63, bei der eine dreipolige Abschaltung durch den Lastschalter nicht zu erwarten war, wurde als untere Grenze der Mindestausschaltstrom der Sicherungen verwendet.

Außerdem wurden an den beiden Kombinationen A/II-63 und D/I-31,5 Einschaltungen mit Stromwerten vorgenommen, bei denen für eine Dauer von 100 ms ein Schmelzen der Sicherungen gerade nicht zu erwarten ist. Die dazu für eine Dauer von 100 ms beanspruchten Sicherungen wurden später für die Ausschaltversuche mit den höchsten Strömen verwendet. Der Draufschalter wurde immer wie in Abschnitt 5.2.1 beschrieben gesteuert, so dass abklingende Gleichstromglieder in den Strömen vermieden wurden. Lediglich bei Versuchen an der Kombination D/I-31,5 wurde (versehentlich) bei zwei Strömen der Draufschalter so gesteuert, dass eine gleichzeitige Zuschaltungen aller drei Pole erfolgte und damit abklingende Gleichstromglieder entstanden.

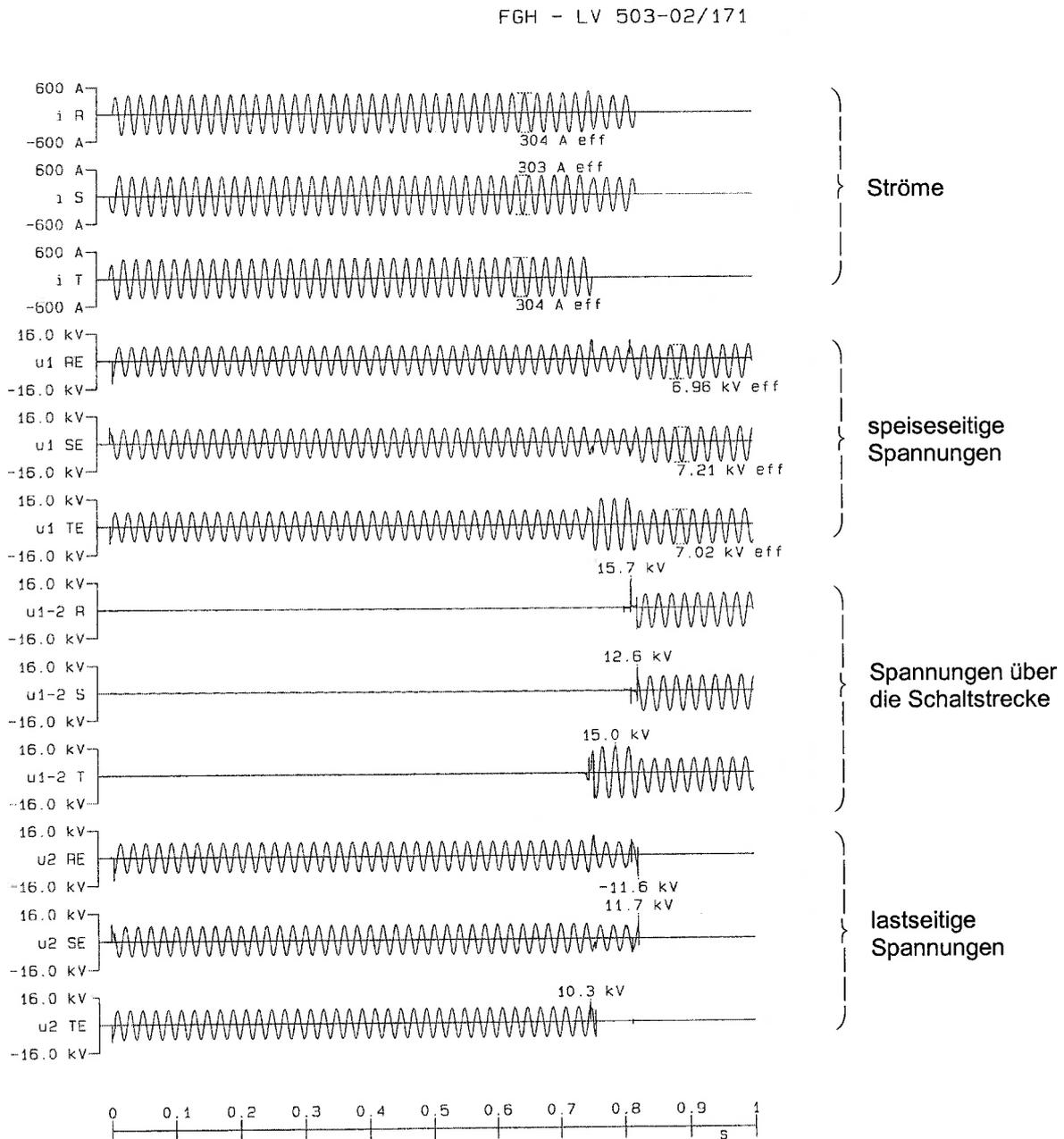
Am Lastschalter des Herstellers A wurden außerdem Ausschaltversuche mit 63-A-Sicherungseinsätzen beider Hersteller durchgeführt, und zwar jeweils mit zwei Stück des Herstellers I und einer des Herstellers II. Diese Versuche waren mangels Sicherungen nur in begrenzter Anzahl möglich.

### 6.3 Ergebnisse

In Bild 6.3 ist das Oszillogramm einer Abschaltung der Lastschalter-Sicherungs-Kombination A/II-63 bei einem Strom von 304 A zu sehen. Es ist das klassische Beispiel des Zusammenwirkens von Sicherungen und Lastschalter. Im zeitlichen Verlauf der Spannung über die Schaltstrecke des Leiters  $L_3$  ist 740 ms nach dem Einschalten das Schmelzen der Sicherung an dem relativ langsamen Anstieg zu erkennen, was nach einer Dauer der Lichtbogen-Spannung von ca. 15 ms zum Abschalten des Stromes führt. Die Spannung über die Schaltstrecke geht dann in diesem Leiter auf die verkettete wiederkehrende Spannung über und die Ströme in den beiden anderen Leitern fallen auf 87 % ihres ursprünglichen Wertes. Diese beiden Leiter werden ca. 79 ms nach dem Schmelzen der Sicherung durch den Lastschalter abgeschaltet, was durch den relativ steilen Anstieg der betreffenden Spannungen über die Schaltstrecken zu erkennen ist.

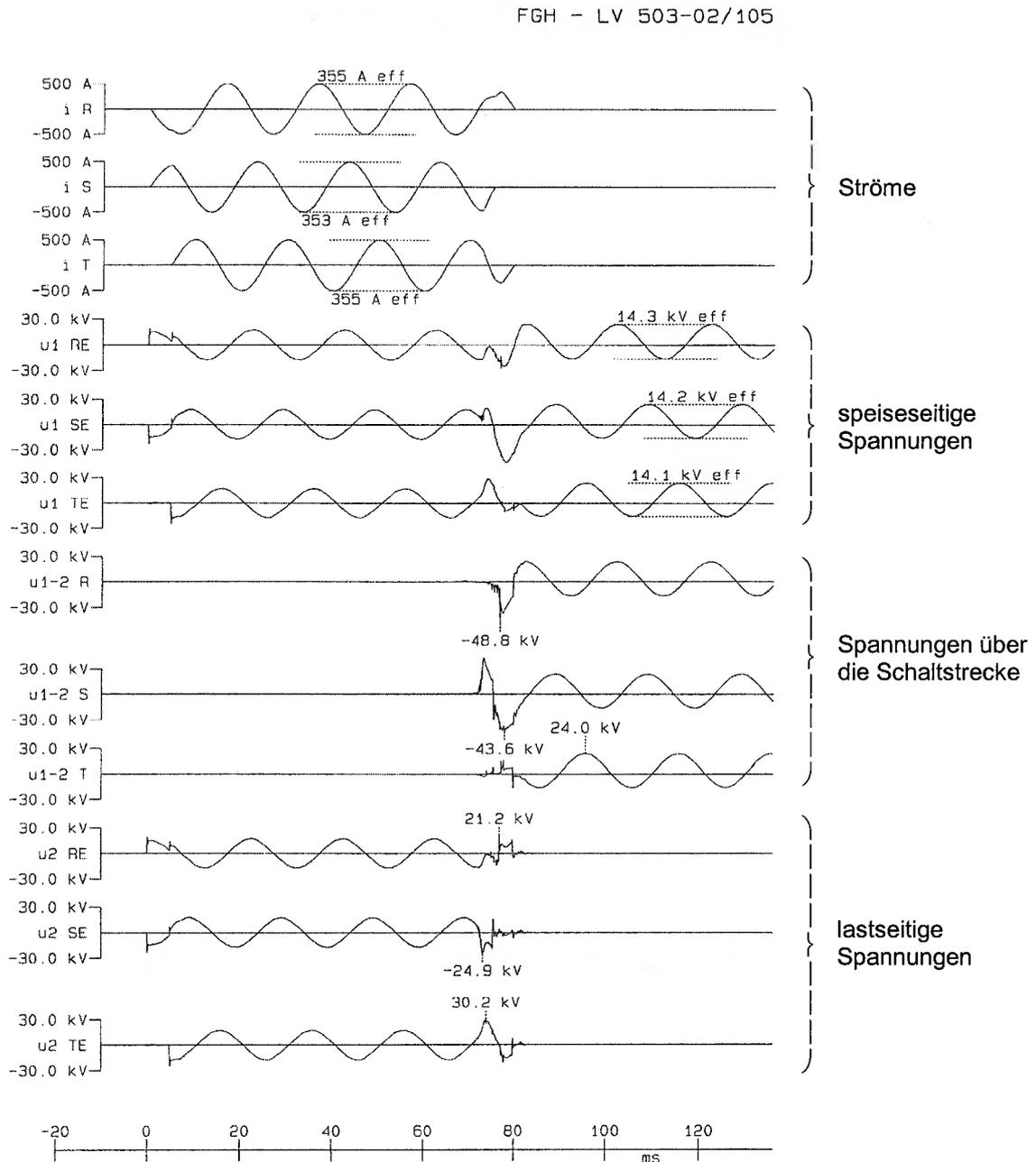
Die Impulse in den Verläufen dieser beiden Spannungen ca. 10 ms bzw. 20 ms zuvor sind durch erfolglose Abschaltversuche des Lastschalters entstanden. Die wiederkehrende Spannung geht nach der Abschaltung durch den Lastschalter auf die Leiter-Erde-Spannung über. Die Zeit zwischen dem Schmelzen der Sicherung und dem Abschalten durch den Lastschalter von 79 ms liegt innerhalb des Bereiches der nach [4,5,6] ermittelten Öffnungszeit des Lastschalters (siehe Tabelle 5.1).

Der Leiter, in welchem die Abschaltung durch die Sicherung erfolgt, ergibt sich bei symmetrischen Strömen rein zufällig durch die Streuung der Schmelzzeiten der Sicherungen. Die Abschaltung der beiden anderen Leiter wird durch die jeweils noch benötigte kürzere Zeit bestimmt, die zum Schmelzen und Löschen der beiden anderen Sicherungen bzw. zum Abschalten des Lastschalters erforderlich ist. Im Beispiel von Bild 6.3 war die noch erforderliche Zeit des Lastschalters kürzer als die der beiden Sicherungen.



**Bild 6.3** Ausschaltversuch an der kompletten 12-kV-Lastschalter-Sicherungs-Kombination A/II-63 (Lastschalter Hersteller A, 63-A-Sicherung Hersteller II)

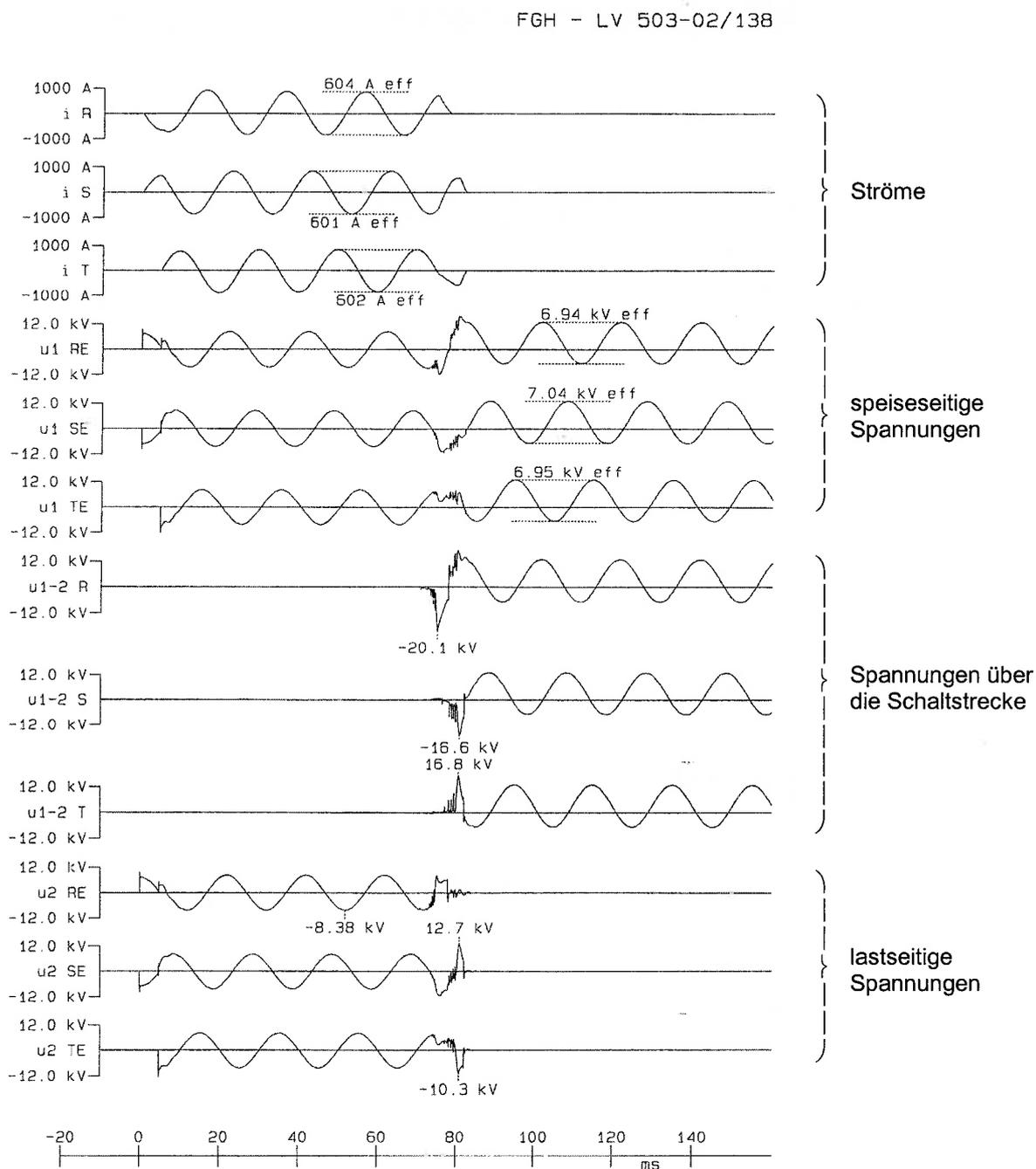
- unbeeinflusster Ausschaltstrom 300 A,  $\cos \varphi = 0,23$
- Zuschaltung Leiter  $L_1$  5 ms nach Leiter  $L_2$  und  $L_3$
- Strom 304 A



**Bild 6.4** Ausschaltversuch an der kompletten 24-kV-Lastschalter-Sicherungs-Kombination C/I-31,5 (Lastschalter Hersteller C, 31,5-A-Sicherung Hersteller I)

- unbeeinflusster Ausschaltstrom 348 A,  $\cos \varphi = 0,23$
- Zuschaltung Leiter  $L_3$  5,0 ms nach Leiter  $L_1$  und  $L_2$
- Strom 354 A

Die zeitlichen Verläufe von Bild 6.4 zeigen eine einpolige Abschaltung im mittleren Leiter durch die Sicherung und eine zweipolige Abschaltung der beiden äußeren Leiter durch die Sicherung des Leiters  $L_1$ . Hier ist also die noch benötigte Zeit zum Schmelzen und Löschen der Sicherung im Leiter  $L_1$  kürzer als die des Lastschalters gewesen.

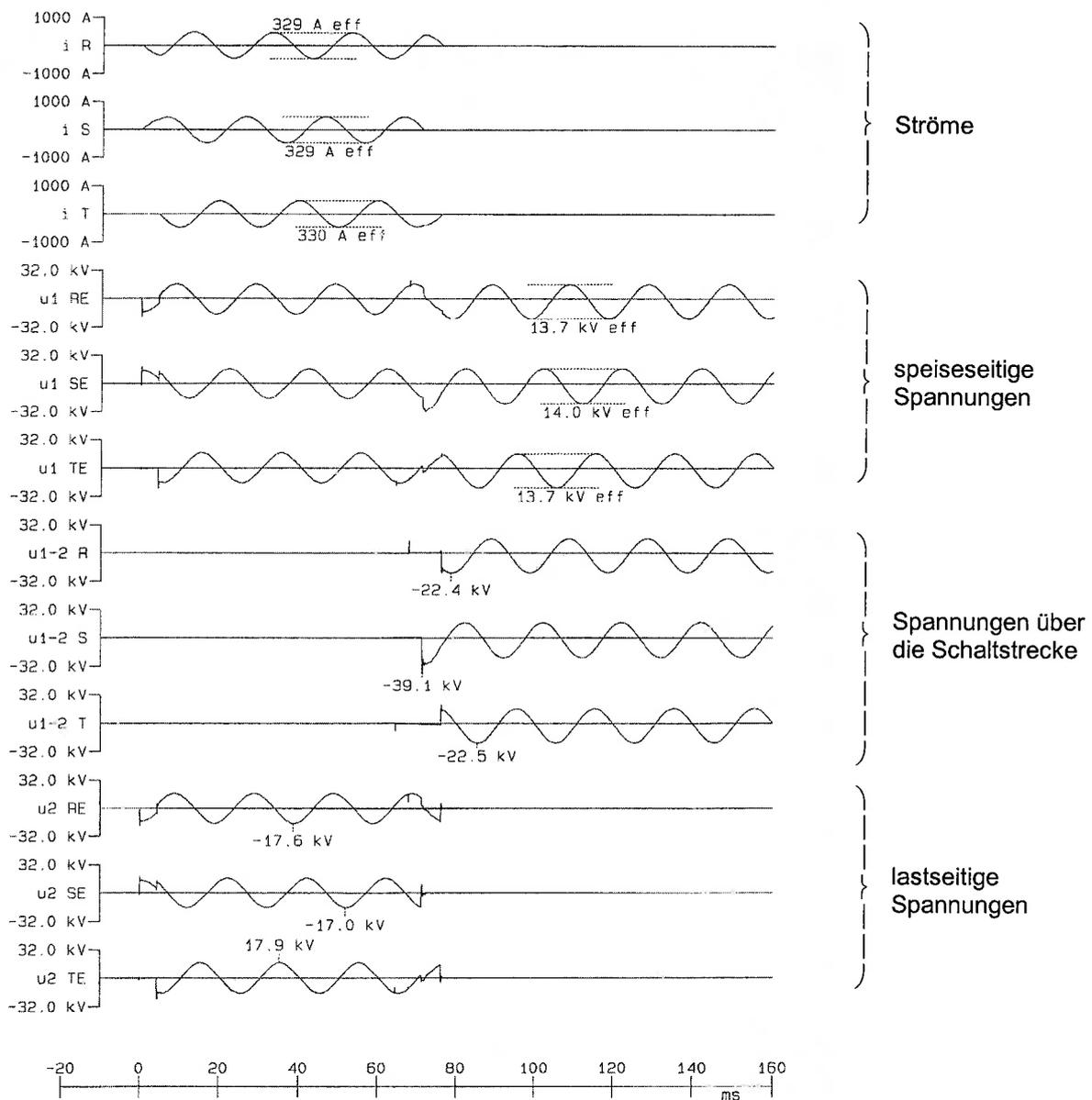


**Bild 6.5** Ausschaltversuch an der kompletten 12-kV-Lastschalter-Sicherungs-Kombination B/I-50 (Lastschalter Hersteller B, 50-A-Sicherung Hersteller I)

- unbeeinflusster Ausschaltstrom 595 A,  $\cos \varphi = 0,23$
- Zuschaltung Leiter  $L_3$  4,8 ms nach Leiter  $L_1$  und  $L_2$
- Strom 602 A

Die Verläufe von Bild 6.5 zeigen eine einpolige Abschaltung durch die Sicherung des Leiters  $L_1$  mit der nachfolgenden zweipoligen Abschaltung der beiden anderen Leiter gemeinsam durch deren Sicherungen.

FGH - LV 503-02/098



**Bild 6.6** Ausschaltversuch an der kompletten 24-kV-Lastschalter-Sicherungs-Kombination D/I-31,5 (Lastschalter Hersteller D, 31,5-A-Sicherung Hersteller I)

- unbeeinflusster Ausschaltstrom 332 A,  $\cos \varphi = 0,26$
- Zuschaltung Leiter  $L_3$  4,4 ms nach Leiter  $L_1$  und  $L_2$
- Strom 329 A

Liegt die Ansprechkennlinie der Schlagstifte unterhalb der Schmelzkennlinie der verwendeten Sicherungen, so sind wie schon in Abschnitt 6.1 erwähnt, dreipolige Abschaltungen durch den Lastschalter möglich, und zwar für Ströme, bei denen die Differenz zwischen der Ansprechzeit des Schlagstiftes und der Schmelzzeit größer bzw.

gleich der Öffnungszeit des Lastschalters ist. Ein solches Beispiel ist den Verläufen von Bild 6.6 zu entnehmen.

Die Auswertungen aller Versuche sind im Anhang den Tabellen 10A bis 15A zu entnehmen. Die verschiedenen Anteile der Ausschaltungsarten der Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen, die bei den Versuchen ermittelt wurden, beginnend von der dreipoligen Abschaltung durch die Sicherungen über den klassischen Fall der einpoligen durch eine Sicherung und nachfolgender zweipoliger durch den Lastschalter bis hin zur dreipoligen durch den Lastschalter sind in Tabelle 6.2 für die 12-kV-Ebene und in Tabelle 6.3 für die 24-kV-Ebene wiedergegeben. Ströme oberhalb der Übernahmeströme bei Schlagstiftbetätigung werden entsprechend Definition von [4,5,6] immer dreipolig durch die Sicherungen abgeschaltet. Aus den beiden Tabellen ist zu ersehen, dass die Ermittlung der Übernahmeströme bei Schlagstiftbetätigung nach Tabelle 6.1 in Abschnitt 6.1 durch die Versuche im wesentlichen bestätigt wurden. Lediglich im Fall der 12-kV-Kombination B/I-50 sind bei 549 A knapp oberhalb des nach Abschnitt 6.1 ermittelten Übernahmestromes von 546 A noch andere als dreipolige Abschaltungen durch die Sicherungen erfolgt. Dies liegt vermutlich daran, dass bei der Ermittlung nach Abschnitt 6.1 die Löszeiten der Sicherungen und die Absenkung des Stromes nach Abschaltung der ersten Sicherung auf 87 % nicht berücksichtigt wurden (siehe hierzu Abschnitt 7).

Die Versuche an der Kombination D/I-31,5 bei einem unbeeinflussten Strom von 440 A sind bezüglich des Übernahmestromes nicht korrekt zu bewerten, da hier aufgrund der gleichzeitigen Zuschaltung aller drei Pole des Draufsalters abklingende Gleichstromglieder auftraten. Die Effektivwerte der Ströme in den drei Leitern wurden daher im Zeitbereich des Schmelzens und des Auslösens des Schlagstiftes unsymmetrisch. Da dann die Sicherung mit dem höheren Strom früher auslöst und die Sicherungen mit den niedrigeren Strömen später als bei symmetrischen Strömen, steht dem Lastschalter mehr Zeit zum Abschalten zur Verfügung. Das hat zur Folge, dass für unsymmetrische Ströme, die in der Praxis häufiger als symmetrische auftreten, die Übernahmeströme bei Schlagstiftbetätigung größer werden. Dies ist dem unteren Diagramm in Tabelle 6.3 auch zu entnehmen.

Der nach Abschnitt 6.1 ermittelte gesicherte Übergangstrom zur dreipoligen Abschaltung durch den Lastschalter bei Verwendung von Sicherungen, deren Ansprechennlinie des Schlagstiftes unterhalb der Schmelzkennlinie liegt, konnte ebenfalls im wesentlichen nachgewiesen werden. Bei der Kombination A/I-63 waren Versuche knapp unter dem Übergangstrom von 630 A nicht möglich, da der für das dreipolige Ausschaltvermögen des Lastschalters entsprechend [4,5,6] bei einem  $\cos\varphi$  zwischen 0,2 und 0,3 verantwortliche Strom  $I_5$  nach Herstellerangaben bei 350 A liegt. An dieser Kombination führte der zweite Versuch bei 670 A zu einer dreipoligen Abschaltung durch den Lastschalter, der sich dabei sehr schwer tat (mehrere Lösversuche und starke Abbrandspuren an den Vorkontakten). Daraufhin wurde die Serie bei diesem Strom beendet. Dies zeigt, dass bei Verwendung von Sicherungen, deren Ansprechennlinie des Schlagstiftes unterhalb der Schmelzkennlinie liegt, darauf zu achten ist, dass die Strombereiche für die dreipolige Abschaltungen des Lastschalters durch Schlagstiftbetätigung auch von diesem beherrschbar sind. Der

Übernahmestrom bei Schlagstiftbetätigung und der Übergangstrom zur dreipoligen Abschaltung sind die bestimmenden Werte für das Ausschaltverhalten solcher Kombinationen. Zwischen den Werten treten im wesentlichen Ausschaltungen auf, an denen Sicherungen und Lastschalter beteiligt sind. Im oberen Teil dieses Strombereiches können auch dreipolige Abschaltungen durch die Sicherungen und im unteren dreipolige durch den Lastschalter auftreten.

Anders verhält es sich für Kombinationen, die mit Sicherungen ausgestattet sind, deren Ansprechkennlinie des Schlagstiftes mit deren Schmelzkennlinie identisch ist. Bei diesen Kombinationen treten oberhalb des Übernahmestromes bei Schlagstiftbetätigung nur dreipolige Abschaltungen durch die Sicherungen auf. Unterhalb dieses Stromes bis zum Mindestausschaltstrom der Sicherungen können sowohl dreipolige Abschaltungen durch diese als auch solche mit Beteiligung des Lastschalters auftreten. Je kleiner der Ausschaltstrom ist, umso häufiger ist der Lastschalter zweipolig beteiligt.

Verwendet man Sicherungen von verschiedenen Herstellern mit gleichem Nennstrom, so wird das Abschaltverhalten durch die Sicherung mit den kürzesten Schmelzzeiten bzw. den kürzesten Ansprechzeiten des Schlagstiftes bestimmt. Es wurden Versuche mit dem Lastschalter des Herstellers A durchgeführt, wobei zwei Stück 63-A-Sicherungen des Herstellers I und eine des Herstellers II (siehe Anhang Tabelle 12.1A und 12.2A) zum Einsatz kamen. Die Ausschaltungen bei 721 A, 623 A und 304 A entsprechen in etwa jenen der Kombination A/I-63 (siehe Tabelle 6.2).

Tabelle 6.2 Ausschaltanteile der 12-kV-Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen

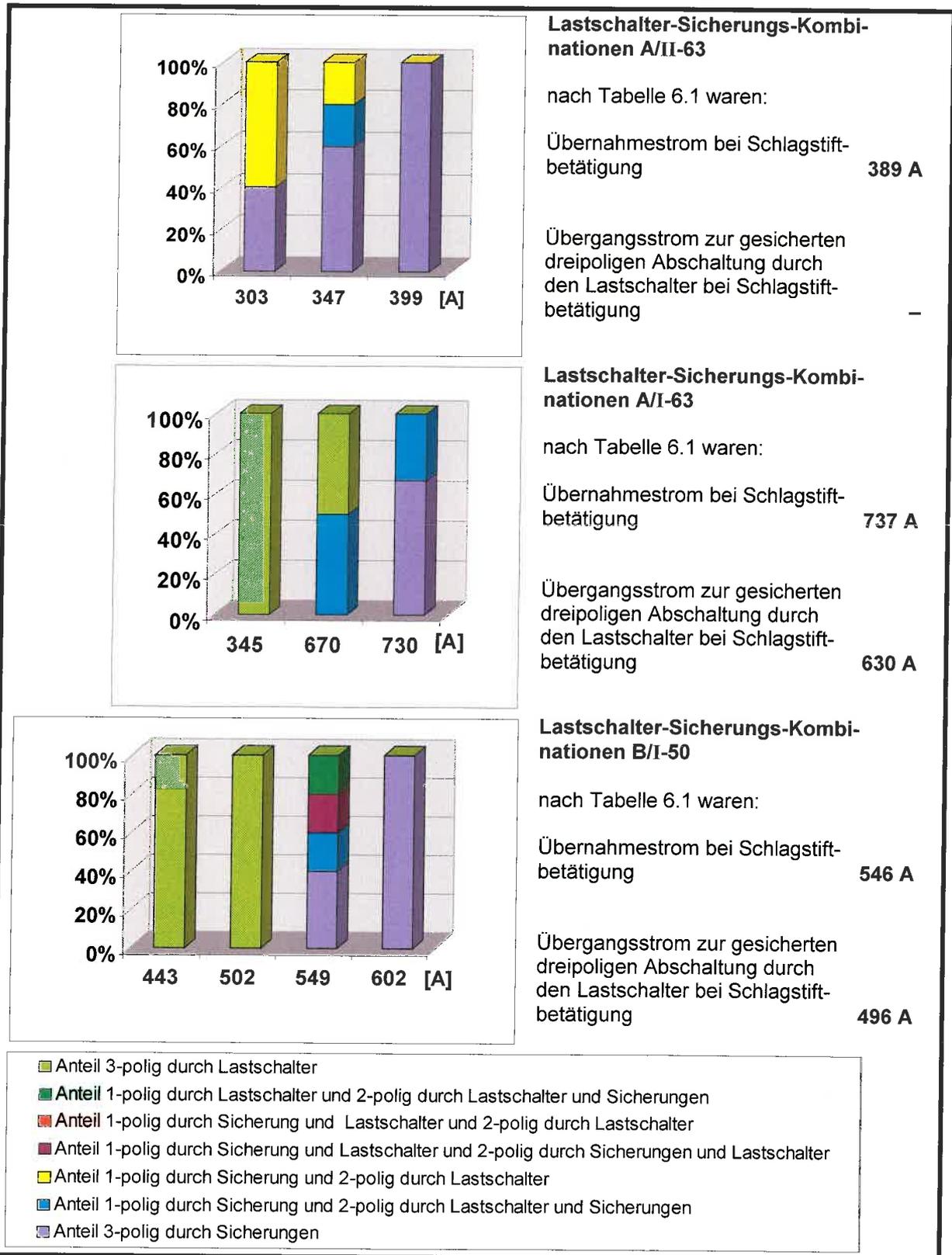
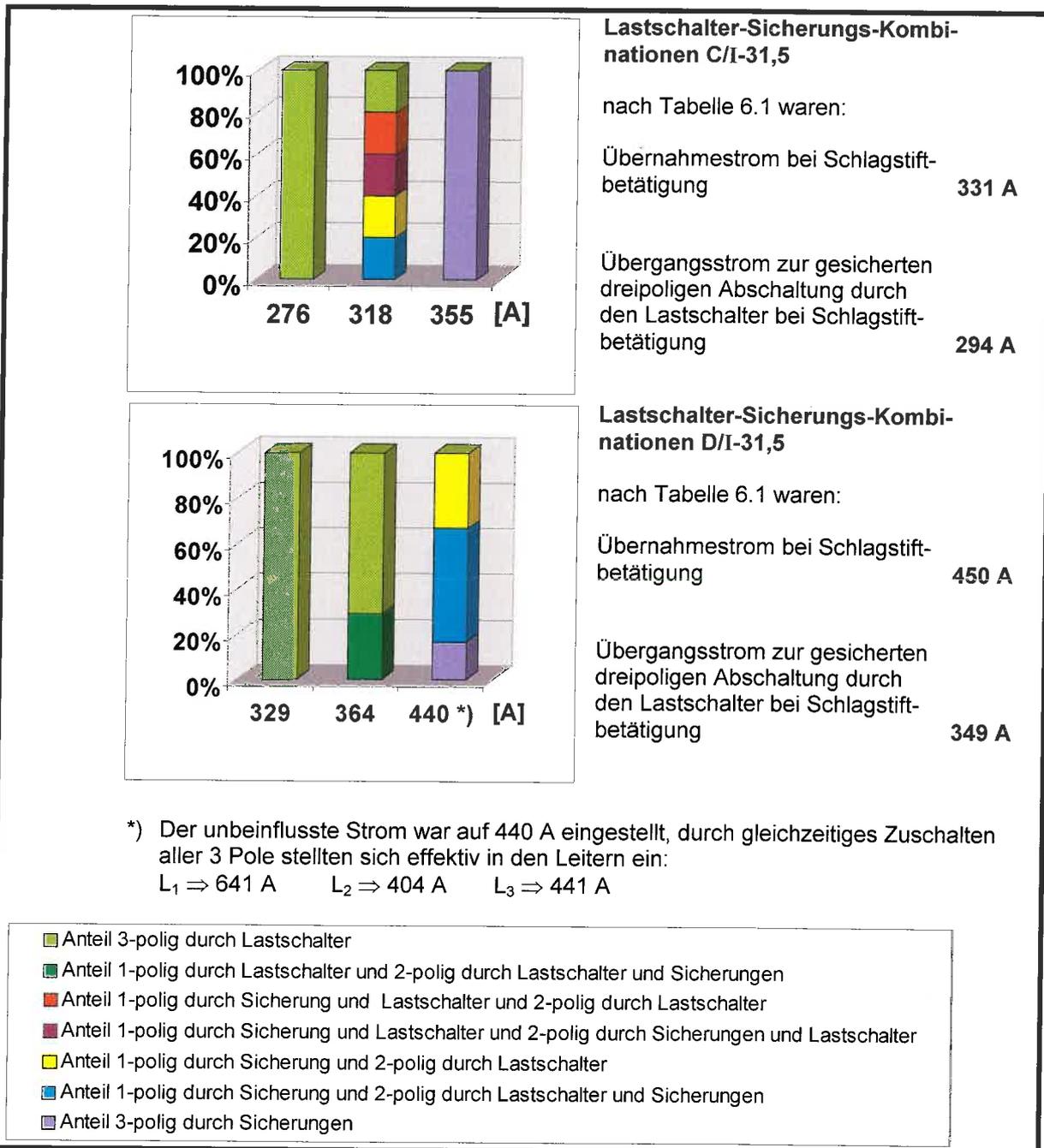


Tabelle 6.3 Ausschaltanteile der 24-kV-Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen



## 7 Ermittlung des Übernahmestromes bei Schlagstiftbetätigung

Zur Verdeutlichung der im folgenden betrachteten zeitlichen Vorgänge sei auf Bild 7.1 verwiesen:

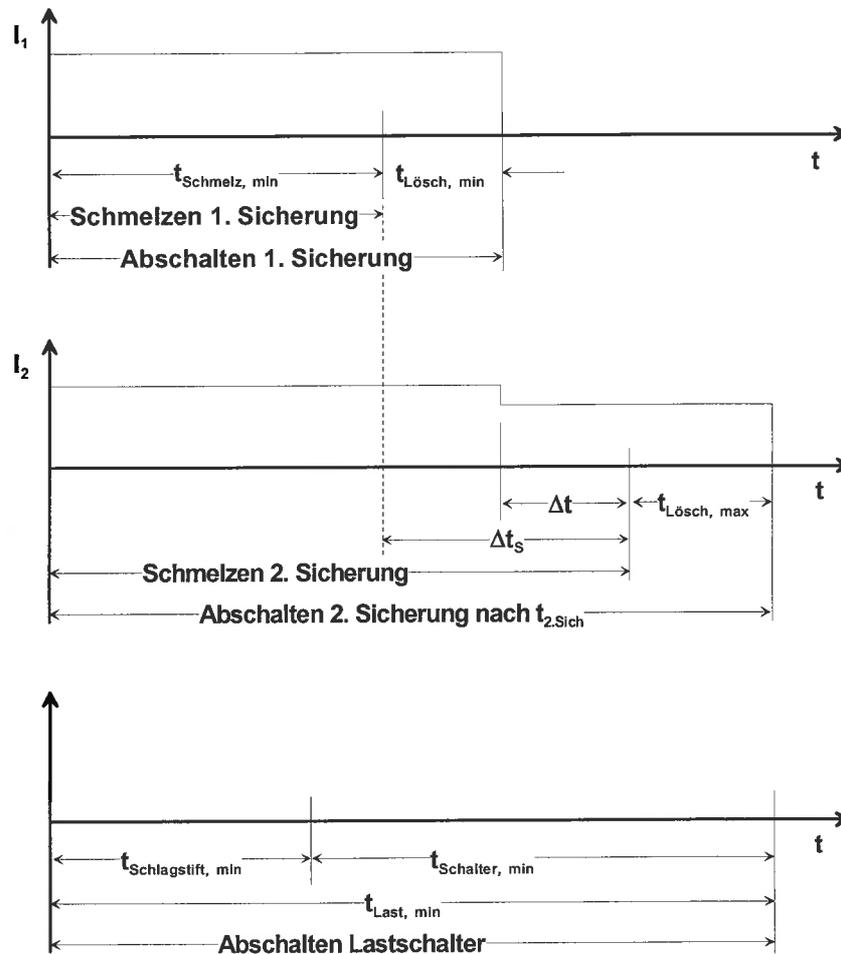


Bild 7.1 Zeitintervalle bis zum Abschalten der Sicherungen und des Lastschalters

Bei einem symmetrischen dreiphasigen Kurzschlussstrom  $I_{k, 3-ph}$  entsteht nach einer einpoligen Abschaltung durch die erstschmelzende Sicherung ein zweiphasiger Kurzschlussstrom in Höhe von:

$$I_{k, 2-ph} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k, 3-ph} \quad (7.1)$$

Die zweite Sicherung schmilzt spätestens zum Zeitpunkt der oberen Schmelzkennlinie. Nimmt man nun an, dass die erste Sicherung frühestmöglich schmilzt (untere Schmelzkennlinie), so schmilzt die zweite spätestens nach der doppelten Unsicherheit der

Schmelzzeiten. Für das späteste Schmelzen der Zweiten wird dann unter der Annahme adiabatischer Vorgänge noch folgende Energie benötigt:

$$\Delta E = I_{k,3-ph}^2 \cdot R_{Sich}(t) \cdot 2 \cdot t_{Unsicherheit, Schmelz} \quad (7.2)$$

Darin ist  $R_{Sich}(t)$  der zeitliche Verlauf des Sicherungswiderstandes vor dem Schmelzen und  $t_{Unsicherheit, Schmelz}$  die Unsicherheit der Schmelzkennlinie. Diese noch nötige Schmelzenergie wird erbracht durch:

$$\Delta E = (I_{k,3-ph}^2 \cdot t_{Lösch, min} + I_{k,2-ph}^2 \cdot \Delta t) \cdot R_{Sich}(t) \quad (7.3)$$

Dabei ist  $t_{Lösch, min}$  die kürzeste Löschzeit der Sicherung und  $\Delta t$  die noch nach der Abschaltung der ersten Sicherung benötigte Zeit bis zum spätesten Schmelzen der zweiten Sicherung (siehe Bild 7.1).

Nimmt man nun an, dass der zeitliche Verlauf des Sicherungswiderstandes vor dem Schmelzen für die drei Sicherungen in etwa gleich ist, so ergibt sich die nach dem Schmelzen der ersten Sicherung noch benötigte Zeit  $\Delta t_S$  zum spätesten Schmelzen der zweiten Sicherung zu

$$\Delta t_S = t_{Lösch, min} + \Delta t \quad (7.4)$$

und es wird bei Berücksichtigung der Gleichungen (7.2) bis (7.4):

$$\Delta t_S = \frac{1}{3} (8t_{Unsicherheit, Schmelz} - t_{Lösch, min}) \quad (7.5)$$

Der Übernahmestrom bei Schlagstiftbetätigung ergibt sich dann, wenn die früheste Zeit zur Abschaltung durch den Lastschalter  $t_{Last, min}$  gleich der spätesten Zeit zum Abschalten durch die zweiten Sicherung  $t_{2.Sich}$  ist.

$$t_{Last, min} = t_{2.Sich} \quad (7.6)$$

Aus der Auslösezeit des Schlagstiftes  $t_{\text{Schlagstift}}$  und der frühesten Öffnungszeit des Lastschalters  $t_{\text{Schalter, min}}$  ergeben sich bei Berücksichtigung der zugehörigen Unsicherheit des Schlagstiftes:

$$t_{\text{Last, min}} = t_{\text{Schalter, min}} + t_{\text{Schlagstift}} - t_{\text{Unsicherheit, Schlagstift}} \quad (7.7)$$

Mit der kürzesten Schmelzzeit  $t_{\text{Schmelz, min}}$  und der größten Löschzeit  $t_{\text{Lösch, max}}$  der Sicherungen wird:

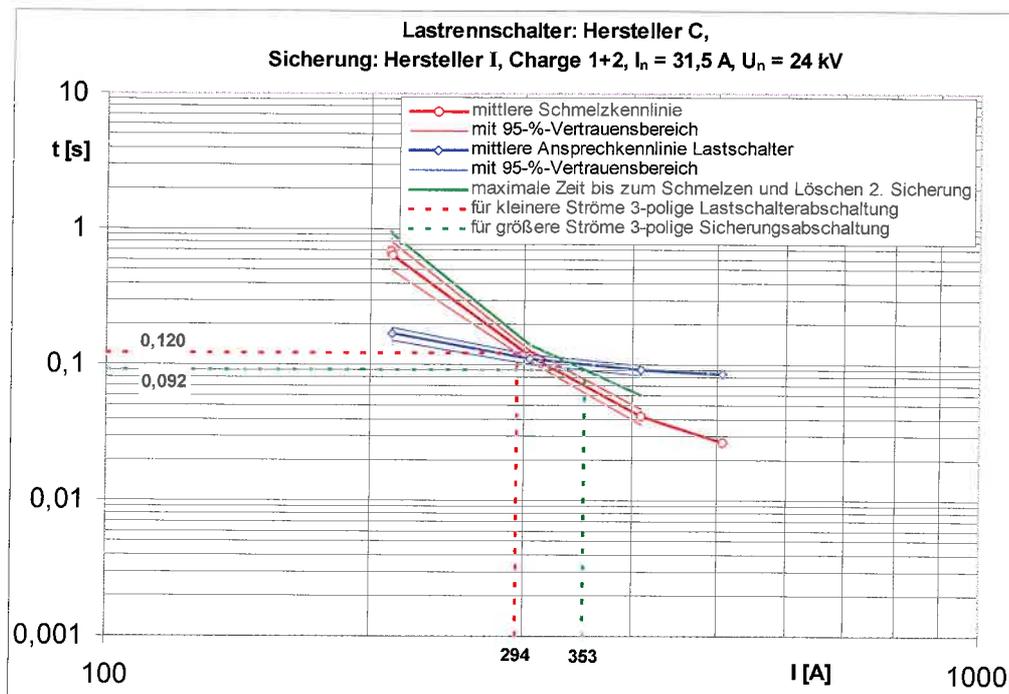
$$t_{2, \text{Sich}} = t_{\text{Schmelz, min}} + \Delta t_{\text{S}} + t_{\text{Lösch, max}} \quad (7.8)$$

Damit ergibt sich bei Verwendung von Gleichung (7.5):

$$t_{2, \text{Sich}} = t_{\text{Schmelz, min}} + \frac{8}{3} t_{\text{Unsicherheit, Schmelz}} + \frac{2}{3} t_{\text{Lösch, min}} + 2 t_{\text{Unsicherheit, Lösch}} \quad (7.9)$$

Darin bedeutet  $t_{\text{Unsicherheit, Lösch}}$  die Unsicherheit der Löschzeit. Für die untersuchten Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen wurden die Bedingungen für die Übernahmeströme nach Gleichung (7.6) nach der rechnerischen Ermittlung der spätesten Zeit  $t_{2, \text{Sich}} (I)$  der Abschaltung durch die zweiten Sicherung und der frühesten Zeit  $t_{\text{Last, min}} (I)$  der Abschaltung durch den Lastschalter aus den gemessenen Daten als Schnittpunkt der beiden Funktionen bestimmt. Für die Kombination C/I-31,5 (vergleiche Bild 6.2) wurde der Übernahmestrom bei Schlagstiftbetätigung nach Bild 7.2 mit 353 A als Schnittpunkt der unteren blauen Kennlinie  $t_{\text{Last, min}} (I)$  mit der dunkelgrünen  $t_{2, \text{Sich}} (I)$  ermittelt. Damit ergibt sich ein um 6,6 % größerer Übernahmestrom als er in Abschnitt 6.1 ohne Berücksichtigung der Stromabsenkung nach dem einpoligen Abschalten der erstschmelzenden Sicherung und ohne Berücksichtigung der Löschzeiten der Sicherungen ermittelt wurde.

In Tabelle 7.1 sind die auf diese Art ermittelten Übernahmeströme für die untersuchten Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen aufgeführt.



**Bild 7.2** Ermittlung des Übernahmestromes bei Schlagstiftbetätigung für die Lastschalter-Sicherungs-Kombination C/I-31,5 ( $U_n = 24$  kV)

**Tabelle 7.1** Ermittelte Übernahmeströme der untersuchten Kombinationen

Lastschalter-Sicherungs-Kombination	Übernahmestrom bei Schlagstiftbetätigung *)	Änderung der Werte gegenüber denen von Tabelle 6.1
	A	%
A/II-63	411	+ 5,7
A/I-63	773	+ 4,9
B/I-50	593	+ 8,6
C/I-31,5	353	+ 6,6
D/I-31,5	490	+ 8,9

\*) jeweils ermittelt als Schnittpunkt der Funktionen aus  $t_{\text{Last, min}}(I)$  und  $t_{2.\text{Sich}}(I)$

Die so ermittelten Übernahmeströme bei Schlagstiftbetätigung werden durch die Arten der Ausschalthäufigkeiten nach Tabelle 6.2 und Tabelle 6.3 recht gut bestätigt. Dies gilt insbesondere für die Kombination B/I-50 für die nach Tabelle 6.1 ein Übernahmestrom von 546 A ermittelt wurde und der jetzt bei 593 A liegt und damit besser zu den Ausschaltvarianten bei 549 A passt. Für die Kombination A/II-63 liegt der ermittelte Übernahmestrom von 411 A rund 3 % über dem festgestellten 100%-Wert für die dreipolige Sicherungsabschaltungen von 399 A. Der Grund hierfür ist darin zu suchen, dass die blaue Kennlinie  $t_{\text{Last, min}}(I)$  und die dunkelgrüne  $t_{2.\text{Sich}}(I)$  nahezu tangieren (siehe Bild 7.3) und dadurch die Ermittlung ungenau wird. Die Schmelzkennlinie der Sicherungen für diese Kombination liegt immer unterhalb der Kennlinie "mittlere Ansprechennlinie Lastschalter",

d.h. dreipolige Abschaltungen durch den Lastschalter bei Schlagstiftauslösung sind hier wie schon in Abschnitt 6.1 angeführt nicht zu erwarten.

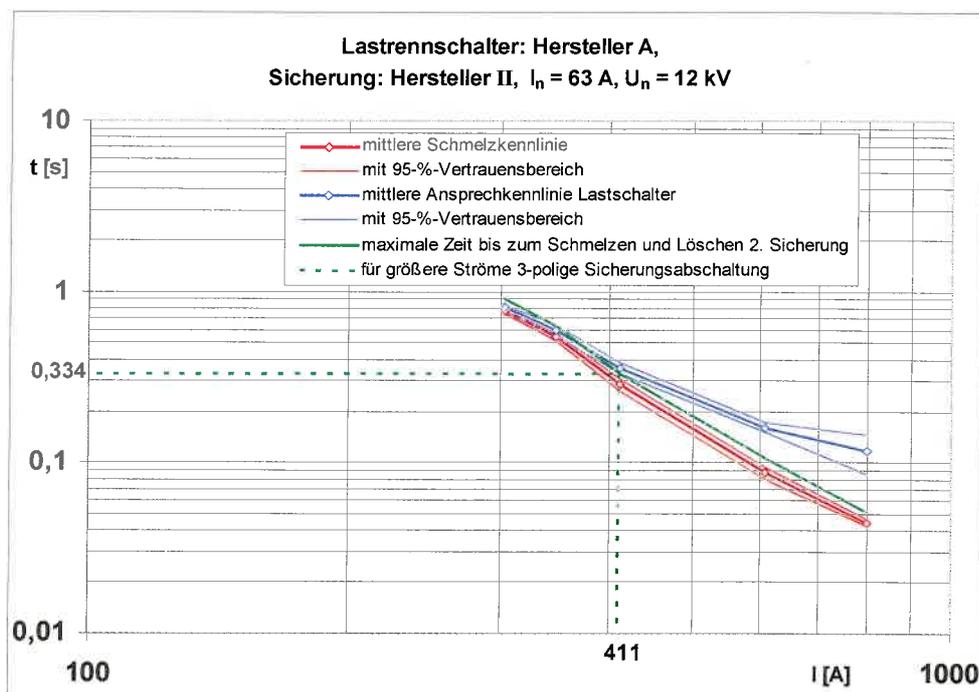


Bild 7.3 Ermittlung des Übernahmestromes bei Schlagstiftbetätigung für die Lastschalter-Sicherungs-Kombination A/II-63 ( $U_n = 12$  kV)

Es sei noch bemerkt, dass die Kennlinien der Sicherungen in Bild 7.2 und Bild 7.3 gegenüber von Bild 5.9 bzw. Bild 5.7 um Messpunkte erweitert wurden, die aus den Versuchen an den kompletten Kombinationen gewonnen wurden.

Für die Praxis wäre es sicherlich sinnvoll, von den Sicherungen Kennlinien zu haben, aus denen die Abhängigkeiten der Übernahmeströme bei Schlagstiftauslösung von den kürzesten Öffnungszeiten der Lastschalter zu entnehmen sind. Aus Gleichung (7.6), (7.7) und (7.9) erhält man die durch die Sicherungen bedingte früheste Öffnungszeit  $t_{\text{Schalter, min}}$  des Lastschalters in Gleichung (7.10).

$$t_{\text{Schalter, min}} = t_{\text{Schmelz}} - t_{\text{Schlagstift}} + \frac{2}{3}t_{\text{Lösch}} + \frac{5}{3}t_{\text{Unsicherheit, Schmelz}} + \frac{4}{3}t_{\text{Unsicherheit, Lösch}} + t_{\text{Unsicherheit, Schlagstift}} \quad (7.10)$$

Darin sind die Mittelwerte der Schmelz-, der Schlagstiftansprech- und der Löschzeit mit ihren Unsicherheiten enthalten. Die damit aus den gemessenen Werten errechneten Funktionen  $t_{\text{Schalter, min}}(I)$  sind in Bild 7.4 wiedergegeben. Für die untersuchten Kombinationen sind die daraus entnommenen Übernahmeströme bei Schlagstiftauslösung in Tabelle 7.2 aufgeführt, sie weichen aufgrund der gemittelten Kurvenverläufe bis zu 4,5 % von denen aus Tabelle 7.1 ab.

Tabelle 7.2 Übernahmeströme bei Schlagstiftbetätigung nach Bild 7.4

Lastschalter-Sicherungs-Kombination	Übernahmestrom bei Schlagstiftbetätigung nach Bild 7.4	Änderung der Werte gegenüber denen von Tabelle 6.1
	A	%
A/II-63	424	+ 9,0
A/I-63	791	+ 7,3
B/I-50	605	+ 10,8
C/I-31,5	337	+ 1,8
D/I-31,5	490	+ 8,9

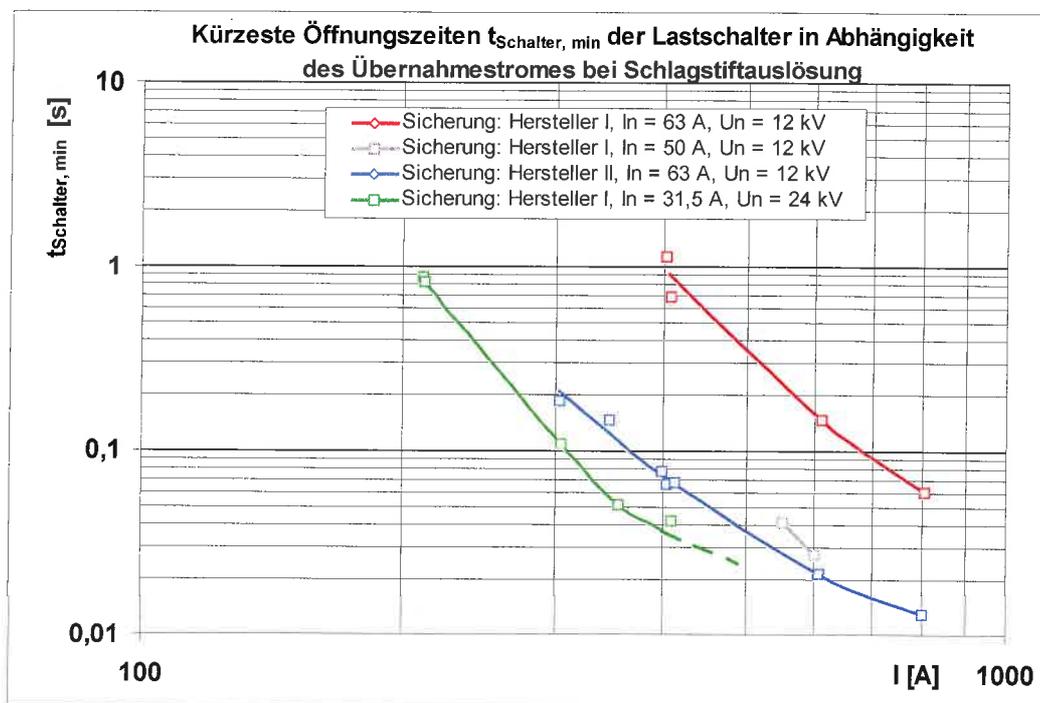


Bild 7.4 Ermittlung der Übernahmeströme bei Schlagstiftbetätigung

Bezieht man nun die Schmelzkennlinie  $t_{\text{Schmelz}}(I)$  der Sicherung auf die durch sie bedingte Kennlinie der frühesten Öffnungszeit  $t_{\text{Schalter, min}}(I)$  des Lastschalters, so wäre es möglich, die Übernahmeströme bei den  $t_{\text{Schmelz}} / t_{\text{Schalter, min}}$ -fachen Wert der kürzesten Öffnungszeit der jeweiligen Lastschalter unmittelbar an der mittleren Schmelzkennlinie der Sicherungen abzulesen. Aus Bild 7.5 ist zu ersehen, dass diese Faktoren in Abhängigkeit des Stromes für die einzelnen Sicherungen vereinfacht als konstant betrachtet werden können.



**Bild 7.5** Faktoren  $t_{\text{Schmelz}} / t_{\text{Schalter, min}}(I)$  für die kürzesten Öffnungszeiten  $t_{\text{Schalter, min}}$  der Lastschalter zur Bestimmung der Übernahmeströme an der Schmelzkennlinie der untersuchten Sicherungen

Für die einzelnen Sicherungen ergeben sich die in Tabelle 7.3 aufgeführten Mittelwerte von  $t_{\text{Schmelz}} / t_{\text{Schalter, min}}$ . Die damit an den mittleren Schmelzkennlinien ermittelten Übernahmeströme bei Schlagstiftbetätigung für die untersuchten Kombinationen sind ebenfalls in Tabelle 7.3 aufgeführt und weichen um bis von + 0,5 % bis + 6,2 % von denen in Tabelle 7.2 ab. Da dies nur positive Abweichungen sind, d. h. zu höheren Übernahmeströmen führen, ist dies für die Sicherstellung der Forderung nach [4,5,6] zu akzeptieren, dass die Kurzschlussströme der Transformatoren bei sekundärseitigem Kurzschluss nur durch die Sicherungen abgeschaltet werden dürfen und diese dann oberhalb der Übernahmeströme liegen müssen. Um sicherzustellen, dass die Benutzung der mittleren Faktoren  $t_{\text{Schmelz}} / t_{\text{Schalter, min}}$  nicht doch zu größeren Abweichungen bei der Ermittlung der Übernahmeströme führt und deswegen besser die Kennlinien  $t_{\text{Schalter, min}}(I)$  hierfür benutzt werden sollten, bedarf es noch weiterer Untersuchungen an den Sicherungen, insbesondere an denen weiterer Hersteller.

Nach Anhang B von [4,5,6] wird empfohlen, den Übernahmestrom bei der 0,9-fachen Öffnungszeit des Lastschalters bei Schlagstiftbetätigung an der unteren Schmelzkennlinie der Sicherung zu entnehmen. Dafür ist allerdings vorausgesetzt worden, dass die Ansprechennlinie des Schlagstiftes mit der Schmelzkennlinie identisch ist. Dies gilt für die untersuchten Sicherungen jedoch nur für die des Herstellers II. Aus diesem Grund wurde der mittlere Faktor  $t_{\text{Schmelz, min}} / t_{\text{Schalter, min}}$  ebenfalls bestimmt, wobei  $t_{\text{Schmelz, min}}$  die kürzeste Schmelzzeit für diese Sicherung ist. Mit einem ermittelten Wert von 3,888 weicht dieser erheblich von dem in [4,5,6] angegebenen ab.

Tabelle 7.3 *Ermittelte Faktoren  $t_{\text{Schmelz}}/t_{\text{Schalter, min}}$  und daraus ermittelte Übernahmeströme*

Sicherung			Faktoren $t_{\text{Schmelz}} / t_{\text{Schalter, min}}$	erm. Übernahmeströme *)	
Hersteller	$U_n$ [kV]	$I_n$ [A]		Lastschalter	$I_{\text{Übernahme}}$ [A]
I	12	63	<b>1,385</b>	A	824
II			<b>4,108</b>		426
I		50	<b>2,408</b>	B	626
I	24	31,5	<b>1,004</b>	C	358
				D	496

\*) Mit den Faktoren und der frühesten Öffnungszeit der Lastschalter bei Schlagstiftbetätigung nach Tabelle 5.1 an den mittleren Schmelzkennlinien der Sicherungen ermittelte Übernahmeströme bei Schlagstiftbetätigung

## 8 Ergebnisbewertung und Ausblick

### 8.1 Bewertung der Ergebnisse für die untersuchten Kombinationen

Ob die untersuchten Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen mit den nach Tabelle 4.1 zugeordneten Transformatoren und den in den Normen [4,5,6] gestellten Bedingungen

1. Kurzschlussströme bei dreipoligem sekundärseitigen Klemmenkurzschluss am Transformator dürfen nur durch die Sicherungen abgeschaltet werden,
2. Einschaltströme (12-facher Nennstrom des Transformators) dürfen innerhalb von 0,1 s nicht zur Sicherungsauslösung führen,

betrieben werden können ist aus Tabelle 8.1 zu entnehmen. Im Gegensatz zu den ursprünglich theoretisch abgeleiteten Annahmen nach Tabelle 4.2 erfüllen die 12-kV-Kombinationen A/II-63 und A/I-63 die Bedingung der Einschaltströme nach den Kennlinien aus Bild 5.6 und Bild 5.7, wenn auch nur knapp. Das gleiche kann für die Kombination B/I-50 nach den Versuchen an der kompletten Kombination bei 443 A (siehe Anhang Tabelle 13.4A) festgestellt werden. Anders ist es mit den beiden 24-kV-Kombinationen. Diese werden nach Bild 5.9 beim Einschalten zwar nicht durch die Sicherungen abgeschaltet, jedoch über die Schlagstiftauslösung.

Tabelle 8.1 Übersicht über die Ergebnisse für die untersuchten Kombinationen

Nennspannung	Lastschalter-Sicherungs-Kombination	Transformator			Abschaltungsart des Kurzschlussstromes <sup>1)</sup>	Sicherungsauslösung bei Einschaltung zu erwarten	Übernahmestrom bei Schlagstiftbetätigung nach Tabelle 7.2	Übergangstrom zur sicheren 3-poligen Abschaltung durch den Lastschalter <sup>3)</sup>
		Nennleistung	Kurzschlussstrom	Einschaltstrom				
kV		kVA	A	A	Si / La / K	ja / nein	A	A
12	A/II-63	800	770	554	Si	nein	424	-
	A/I-63				Si, K	nein	791	630
	B/I-50	630	909	436	Si	nein	605	496
24	C/I-31,5	800	385	277	Si	ja <sup>2)</sup>	337	295
	D/I-31,5	630	455	218	Si, K	ja <sup>2)</sup>	490	349

<sup>1)</sup> Si ⇒ 3-polig durch Sicherungen  
 La ⇒ 3-polig durch Lastschalter  
 K ⇒ Lastschalter und Sicherungen beteiligt

<sup>2)</sup> Auslösung durch den Schlagstift

<sup>3)</sup> Werte nach Tabelle 6.1

Die Bedingung für den sekundärseitigen Klemmenkurzschluss, die dreipolige Abschaltung durch die Sicherungen, wird von den drei Kombinationen A/II-63, B/I-50 und C/I-31,5 erfüllt. Bei den beiden anderen, die in Tabelle 8.1 rot gekennzeichnet sind, kann auch der Lastschalter beteiligt sein, was nach Norm [4,5,6] wegen der dabei eventuell auftretenden steilen Einschwingspannung nicht erlaubt ist, da diese unter Umständen vom Lastschalter nicht beherrscht werden kann.

## 8.2 Berücksichtigung ein- und zweipoliger Kurzschlüsse auf der Transformator-Sekundärseite

Alle vorgenommenen Untersuchungen bezogen sich bisher auf den dreipoligen sekundärseitigen Klemmenkurzschluss am Transformator. In weitergehenden Untersuchungen müsste auch der einpolige und der zweipolige sekundärseitige Klemmenkurzschluss einbezogen werden.

Der zweipolige sekundärseitige Klemmenkurzschluss führt bei Transformatoren der meist eingesetzten Transformatoren der Schaltgruppe Dyn5 primärseitig in einem Leiter zum gleichen Kurzschlussstrom wie beim dreipoligen und in den beiden anderen Leitern jeweils zu einem solchen mit halber Amplitude. Nach Sicherungsabschaltung des Leiters mit dem vollen Strom kann kein Kurzschlussstrom mehr fließen, d.h. der zweipolige sekundärseitige Klemmenkurzschluss kann einpolig durch die Sicherung abgeschaltet werden. Für alle untersuchten Kombinationen bedeutet dies, dass der Kurzschlussstrom durch die Sicherung im Leiter mit dem vollen Strom abgeschaltet wird.

Der einpolige sekundärseitige Klemmenkurzschluss führt bei Transformatoren der gleichen Schaltgruppe Dyn5 primärseitig zu einem zweipoligen Kurzschlussstrom mit der  $1/\sqrt{3}$ -fachen Amplitude des dreipoligen und kann durch eine bzw. im Zusammenwirken beider betroffener Sicherungen abgeschaltet werden. Dies bedeutet für die Kombinationen A/I-63, C/I-31,5 und D/I-31,5 mit den zugeordneten Transformatoren eine Abschaltung der Störung durch den Lastschalter (Überschreitung der Übergangsströme zur sicheren dreipoligen Abschaltung durch den Lastschalter, Tabelle 8.1, letzte Spalte), was aus den schon erwähnten Gründen nach [4,5,6] nicht zulässig ist. Die Kombination B/I-50 mit dem 630-kVA-Transformator unterschreitet mit 525 A den Übernahmestrom bei Schlagstiftbetätigung von 605 A und liegt knapp über dem Übergangsstrom von 496 A zur sicheren Abschaltung durch den Lastschalter. Das bedeutet, auch in diesem Fall ist eine Beteiligung des Lastschalters an der Abschaltung des Fehlerstromes nicht auszuschließen.

Beim einpoligen Kurzschluss ist deshalb darauf zu achten, dass bei Verwendung eines Sicherungstyps, bei dem der Schlagstift vor dem Schmelzen der Sicherung anspricht, keine Abschaltung durch den Lastschalter vor der Sicherung erfolgt. Grundsätzlich ist kein Schutz gegen Fehlerströme unterhalb des Mindestausschaltstromes der Sicherungen gegeben, so dass stets überprüft werden muss, ob einpolige Kurzschlüsse, soweit sie nicht auf Grund der Verwendung von entsprechend platzierten gTr-Sicherungen stets sekundärseitig abgeschaltet werden, primärseitig einen erforderlich großen Fehlerstrom verursachen.

### 8.3 Einfluss der Gleichstromglieder des Kurzschlussstromes

In Abschnitt 6.3 wurde bereits auf den Einfluss abklingenden Gleichstromglieder verwiesen, die eine Anhebung der Übernahmeströme zur Folge haben. Eine Abschätzung mit mittleren Kurzschlussimpedanzen der Transformatoren und den vorgeschalteten Netzimpedanzen ( $R/X \approx 0,2 \dots 0,3 \Rightarrow$  Zeitkonstante von 11 ms ... 16 ms) erbrachte eine Anhebung Übernahmestrom-Kennlinien von Bild 7.4 auf die gestrichelten Kurven in Bild 8.1.

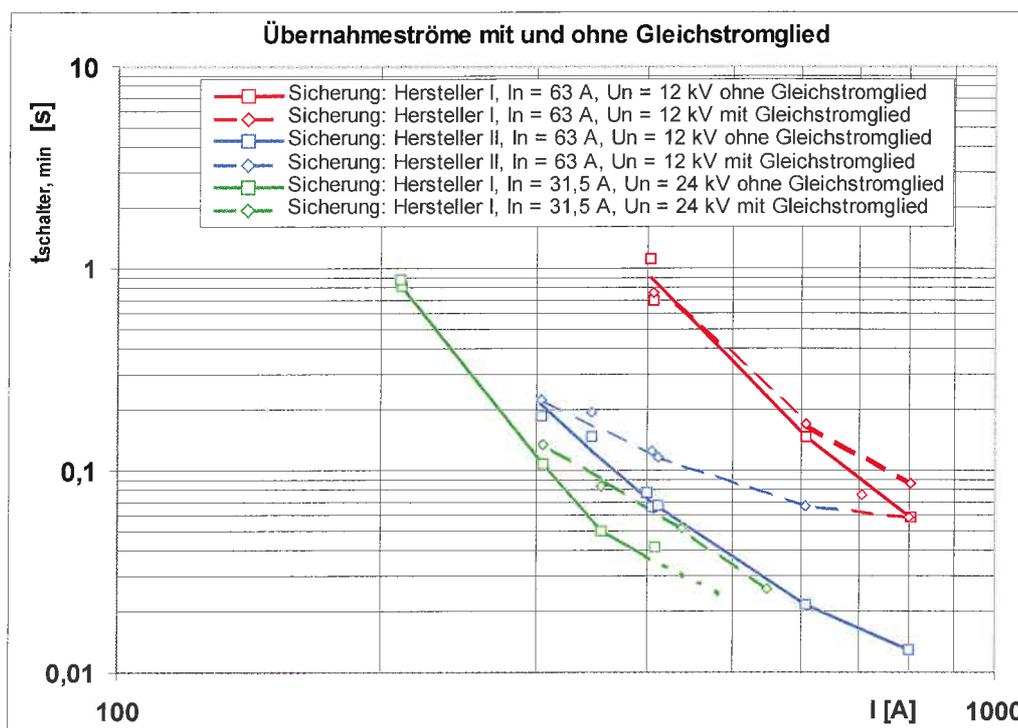


Bild 8.1 Übernahmeströme bei Schlagstiftbetätigung mit und ohne Berücksichtigung auftretender Gleichstromglieder

Da hierbei der Anfangswert des Gleichstromgliedes mit seiner maximalen Höhe angenommen wurde, nämlich mit dem Scheitelwert des Kurzschlussstromes, ist ersichtlich, dass die Übernahmeströme sich in der Praxis zwischen den beiden Kennlinien mit und ohne Berücksichtigung des Gleichstromgliedes befinden. Aus den Kennlinien ist zu ersehen, dass die Anhebung für Sicherungen, bei denen der Schlagstift mit dem Schmelzen der Sicherung anspricht, deutlicher ausfällt als bei denen, wo der Schlagstift vor dem Schmelzen austritt. Dies ist einsichtig, weil hier, aufgrund der frühzeitigeren Auslösung des Schlagstiftes der unmittelbare Zeitraum nach Kurzschlusseintritt, in dem die Gleichstromglieder die größten Werte einnehmen, stärker ins Gewicht fällt.

## 8.4 Ausblick

Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass es trotz vermeintlich entgegenstehenden Forderungen, wie Vermeidung der Inrushgefährdung und allpolige Abschaltung von sekundärseitigen Klemmenkurzschlüssen durch die Sicherungen, möglich ist, korrekt zusammenwirkende Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen für den Einsatz auf der Mittelspannungsseite von Verteiltransformatoren zusammenzustellen. Jedoch sind die Empfehlungen zur Ermittlung der Übernahmeströme nach [4,5,6] nicht ausreichend. Nach den vorliegenden Untersuchungen sollten dem Hersteller und dem Betreiber von Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen zwei über die bisherigen Angaben zu den Sicherungen hinausgehende Angaben zur Verfügung stehen, um ihnen eine Auswahl zu ermöglichen, die stets einen sicheren Betrieb gewährleistet:

1. Ansprechkennlinie des Schlagstiftes, sofern diese nicht identisch mit der Schmelzkennlinie der Sicherung ist. Dies ist nötig, um mit der Öffnungszeit des Lastschalters bei Schlagstiftbetätigung den Strom ermitteln zu können, bei dem mit einer Abschaltung des Lastschalters vor den Sicherungen zu rechnen ist.
2. Einen Faktor, der beinhaltet, beim Wievielfachen der kleinsten Öffnungszeit des Lastschalters der Übernahmestrom an der Schmelzkennlinie abgelesen werden kann.

Zu erstem Punkt wird es als ausreichend angesehen, wenn zur Ermittlung des Stromes, bei dem der Lastschalter vor den Sicherungen abschaltet, der Schnittpunkt der Schmelzkennlinie mit der Kennlinie verwendet wird, die aus der Addition der mittleren Öffnungszeit des Lastschalters und der Ansprechkennlinie des Schlagstiftes entsteht. Zu zweitem Punkt ist im Bericht ein Verfahren zur Bestimmung des Faktors beschrieben, das durch weitere Untersuchungen an den Sicherungen noch untermauert werden sollte, insbesondere an solchen weiterer Hersteller. Beides müsste dann in die einschlägige Vorschrift [1] für die Sicherungen einfließen.

Beide genannte Punkte erfordern aber zusätzlichen Aufwand zur Ermittlung der Angaben, wobei insbesondere der zusätzliche finanzielle Aufwand für Typprüfungen zu erheblichen Kosten führen würde. Dies steht dem Ziel, mit der Lastschalter-Sicherungs-Kombination über eine kostengünstige Schalt- und Schutzgerätekombination zu verfügen, diametral entgegen. Insbesondere bei der diskutierten Anwendung als Schalt- und Schutzgerät auf der Primärseite (Mittelspannung) von Verteiltransformatoren, in Deutschland praktisch die ausschließliche Anwendung von Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen, ist das unter Umständen komplexe Zusammenspiel von Sicherungen und Lastschalter im Bereich der Übernahmeströme in der Regel gar nicht erforderlich, ja sogar unerwünscht. Hier ist vielmehr die Wirkung als rasche Schutz-, Ausschalt- und Trenneinrichtung (mit schneller Ausschaltung durch die Sicherungen und nachfolgender dreipoliger Trennung durch den Lastschalter) in Verknüpfung mit der Option des Zu- und Abschaltens von Last- und Überlastströmen (Lastschalter) gefragt. Aus diesem Grund wurde für diesen Anwendungsfall die nachfolgende Handlungsempfehlung erarbeitet.

## 9 Handlungsempfehlung für den Betrieb bestehender und die Auswahl künftiger Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen

### 9.1 Geltungsbereich und Ausgangssituation

Diese Handlungsempfehlung gilt nur für solche Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen, die aus einem Lastschalter gemäß DIN EN 60265-1 [3] und einer Teilbereichssicherung gemäß DIN EN 60282-1 [1] zusammengesetzt sind und zum Schalten von Lastströmen wie auch zum Erkennen und Schalten von Fehlerströmen auf der Oberspannungsseite (Mittelspannungsseite) von Verteiltransformatoren eingesetzt werden, die sekundärseitig mit gTr-Sicherungen zum selektiven Ausschalten niederspannungsseitiger Fehler ausgestattet sind.

Bild 9.1 zeigt die unterschiedlichen Arbeitsbereiche einer solchen Lastschalter-Sicherungs-Kombination bei typischen Annahmen hinsichtlich der Bemessung der Komponenten und der auftretenden Überlast- und Fehlerströme. Wie im unteren Bereich des Bildes gekennzeichnet, kann ein unzulässiger Arbeitsbereich auftreten. Er existiert immer dann, wenn der kleinste primärseitig auszuschaltende Fehlerstrom kleiner ist als der Übernahmestrom der Lastschalter-Sicherungs-Kombination bei Schlagstiftbetätigung und ist dadurch gekennzeichnet, dass sich in diesem Bereich der Lastschalter unter Umständen am Ausschalten von Fehlerströmen beteiligt.

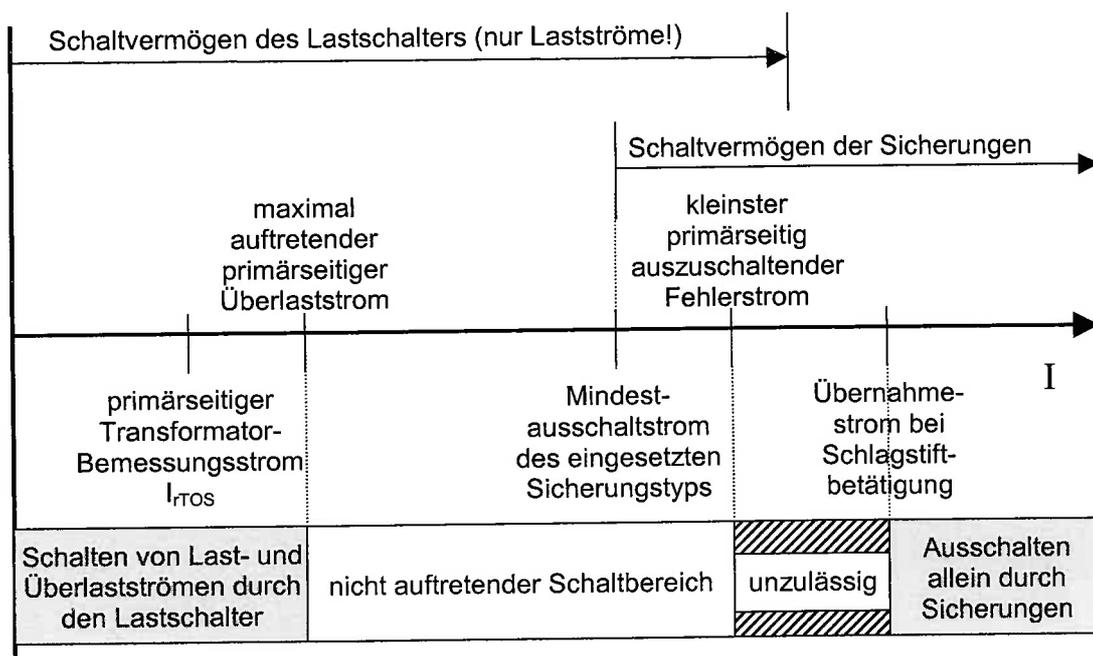


Bild 9.1 Typische Arbeitsbereiche von Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen bei Einsatz auf der Mittelspannungsseite eines Verteiltransformators

Ein Lastschalter gemäß DIN EN 60265-1 [3] ist jedoch den dabei auftretenden Belastungen hinsichtlich der erforderlichen Spannungsverfestigung der Schaltstrecke in der Regel nicht gewachsen, was zu einem Versagen des Schalters mit nachfolgendem Lichtbogenfehler führen kann. Dies gilt auch dann, wenn der auszuschaltende Strom bezüglich seiner Höhe innerhalb des Schaltvermögens des Lastschalters liegt, da sich dieses nicht auf das Schalten von Fehlerströmen mit den hierbei möglicherweise auftretenden steilen Wiederkehrspannungen bezieht.

Aus Bild 9.1 lässt sich ferner erkennen, dass es zwischen dem maximal auftretenden Überlaststrom und dem kleinsten primärseitig auszuschaltenden Fehlerstrom typischerweise einen weiten Bereich gibt, der nicht auftritt, und in dem ein Schaltvermögen der Kombination daher nicht erforderlich ist. Die erforderlichen Schaltbereiche lassen sich hinsichtlich der Höhe des Stromes auf getrennte Bereiche für Last- und Überlastströme einerseits und Fehlerströme andererseits beschränken.

Während die Last- und Überlastströme durch den Lastschalter geschaltet werden können, müssen die Fehlerströme, wie in der Norm [4,5,6] gefordert, allein durch die Sicherungen ausgeschaltet werden. Dies bedeutet, dass der kleinste primärseitig auszuschaltende Fehlerstrom stets größer sein muss als der Übernahmestrom der Lastschalter-Sicherungs-Kombination bei Schlagstiftbetätigung. Da aber gerade der letztgenannte Strom, sei es bedingt durch die Eigenschaften der eingesetzten Sicherungen oder durch das Auftreten von Gleichstromgliedern bei Kurzschlusseintritt, wie aus den Ergebnissen der Untersuchungen hervorgeht oft größer ist als aus den vereinfachten Verfahren in [4,5,6] ermittelt und für die Kombination angegeben (Bemessungs-Übernahmestrom), droht hier die Gefahr eines dem Anwender nicht bekannten, unzulässigen Arbeitsbereiches der Kombinationen.

Die Aufteilung der zulässigen Betriebsbereiche für den betrachteten Anwendungsfall in einen Bereich, in dem allein der Lastschalter schaltet, und einen anderen, in dem das Schalten von Strömen nur durch die Sicherungen erfolgt, lässt erkennen, dass die ursprüngliche Zielvorstellung und in den Normen [4,5,6] beschriebene Eigenschaft einer Schaltgerätekombination, die durch ihr Zusammenwirken über den gesamten Strombereich von kleinen Lastströmen bis zum größten Fehlerstrom funktionsfähig ist, hier nicht gegeben ist. **Bei den Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen, die in oben beschriebener Anwendung Einsatz finden, handelt es sich deshalb nicht um Kombinationen im Sinne dieser Normen [4,5,6], sondern um eine Reihenschaltung aus Lastschalter zum Schalten aller Last- und Überlastströme (die praktisch immer unterhalb des Mindestausschaltstromes der Sicherungen liegen) und HH-Sicherungen zum Schalten aller Fehlerströme, die lediglich mit einer zusätzlichen Einrichtung zum Zwecke einer allpoligen Trennung nach Abschaltung (Lastschalter nach Schlagstiftbetätigung) versehen sind. Für diese Kombinationen ist das in [4,5,6] beschriebene Zusammenwirken von Lastschalter und Sicherung beim Ausschalten von Strömen weder wünschenswert noch technisch zulässig.** Die Handlungsempfehlungen zum Betrieb und zur Auswahl solcher Kombinationen werden im folgenden aus den genannten Ergebnissen abgeleitet.

## 9.2 Handlungsempfehlung für in Betrieb befindliche Kombinationen

Für die in Betrieb befindlichen Kombinationen ist zu überprüfen, dass

- a) der maximale auftretende Überlaststrom des nachfolgenden Transformators innerhalb des Schaltvermögens des Lastschalters liegt. Wenn dieser Strom zu einer unzulässigen Erwärmung der Sicherungen und in deren Folge zu einem Auswurf der Schlagstifte derselben führen kann, ist die hierdurch ausgelöste Ausschaltung durch den Lastschalter beherrschbar.
- b) der kleinste primärseitig (durch die Sicherungen) auszuschaltende Fehlerstrom größer als der Mindestausschaltstrom der Sicherungen ist und die Ausschaltung durch diese innerhalb einer angemessenen Zeit erfolgt (maximale Fehlerdauer, z.B. zwei Sekunden).
- c) der (tatsächliche) Übernahmestrom bei Schlagstiftauslösung kleiner ist als der kleinste primärseitig auszuschaltende Fehlerstrom. Dies ist erforderlich, damit Fehlerströme nie durch den Lastschalter ausgeschaltet werden, was zu Folgefehlern (Lichtbogen) am Lastschalter führen kann.

In der Regel wird die Überprüfung der unter c) genannten Bedingung problematisch sein, da der tatsächliche Übernahmestrom wie weiter oben ausgeführt größer als der Bemessungs-Übernahmestrom sein kann und dem Anwender deshalb ohne weitere Angaben zum Verhalten der Komponenten (siehe Abschnitt 8.4) nicht genau bekannt ist.

Bleiben Zweifel hinsichtlich des Erfüllens der Bedingung c) und soll ein Schaltversagen des Lastschalters im unzulässigen Strombereich nach Bild 9.1 ausgeschlossen werden, so stehen dem Anwender zwei Handlungsalternativen zur Verfügung:

1. Die mechanische Kopplung zwischen Sicherungen und Lastschalter wird beseitigt. Dies kann durch Sperren der Schlagstiftauslösung am Lastschalter oder einfach durch Umdrehen der Sicherungseinsätze geschehen. Hierbei handelt man sich den Nachteil ein, dass das allpolige Trennen nach Fehlerabschaltung (Trennen des dritten, stromfreien Pols) nicht mehr erfolgt. Auch kann im oben unter Punkt a) genannten Fall einer Schlagstiftauslösung zum Schutz vor unzulässiger Erwärmung einer Sicherung diese nicht mehr automatisch „freigeschaltet“ werden. Unter ungünstigen Umständen kann dies einen Lichtbogenfehler an der überlasteten Sicherung hervorrufen. Letzteres kann jedoch weitgehend ausgeschlossen werden, wenn eine Sicherung mit entsprechender Stromtragfähigkeit unter gegebenen Umgebungsbedingungen gewählt wurde.
2. Die Schlagstiftauslösung des Lastschalters wird durch geeignete Modifikation um eine ausreichend lange Zeitdauer verzögert. Nimmt man als ungünstigsten Fall an, dass der Schlagstift der ersten Sicherung unmittelbar nach Fehlereintritt ausgeworfen wird, so muss diese Zeitdauer gerade der maximalen Zeit bis zum Abschalten der zweiten Sicherung entsprechen. Diese Zeit kann unter Kenntnis des kleinsten abzuschaltenden Fehlerstromes aus der Strom-Zeit-Kennlinie des eingesetzten Sicherungstyps unter

Berücksichtigung der auftretenden Störungen ermittelt werden. Nachteilig an diesem Verfahren sind die damit verbundenen Kosten zur „Nachrüstung“ des Lastschalters.

Im gegebenen Fall trifft ein Netzbetreiber die Auswahl der Handlungsalternativen unter Abwägung von Fragen der Betriebssicherheit und Kosten. Vielfach wird nach Prüfung der Bedingungen a) bis c) und unter Beachtung der langjährigen guten Betriebserfahrungen kein Handlungsbedarf erkennbar sein.

### 9.3 Handlungsempfehlung bei der Auswahl von Komponenten für Kombinationen

Bei der Auswahl von Komponenten für neu zu errichtende Kombinationen sollen selbstverständlich die im vorangegangenen Abschnitt unter a) bis c) genannten Bedingungen ebenfalls erfüllt werden. Für die Auswahl der Sicherungen sollte ferner unter Beachtung der oben getroffenen Feststellung, dass die hier benutzten Kombinationen nicht zu den Kombinationen im Sinne von [4,5,6] zu zählen sind, weiterhin die deutsche Norm zur Auswahl von strombegrenzenden Sicherungseinsätzen von Transformatorstromkreisen [2] herangezogen werden. Die hiermit gemachten guten Betriebserfahrungen (siehe auch Vorwort zu [5]) bestätigen, dass die so ausgewählten Sicherungen einerseits den sekundärseitigen Klemmenkurzschlussstrom rechtzeitig ausschalten und andererseits einschaltfest sind. Zusammen mit den oben genannten Bedingungen sichern sie das erforderliche und gewünschte Verhalten der Kombination.

Die FGH wird sich um eine entsprechende Empfehlung im Vorwort zur anstehenden Neufassung der deutschen Norm [5] bemühen.

## 10 Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 60282-1 (VDE 0670 Teil 4): Hochspannungssicherungen - Teil 1: Strombegrenzende Sicherungen. Februar 1998
- [2] DIN VDE 0670 Teil 402: Wechselstromschaltgeräte für Spannungen über 1 kV – Auswahl von strombegrenzenden Sicherungseinsätzen für Transformatorstromkreise. Mai 1988
- [3] DIN EN 60265-1 (VDE 0670 Teil 301): Hochspannungs-Lastschalter – Teil 1: Hochspannungs-Lastschalter für Bemessungsspannungen über 1 kV und unter 52 kV. Mai 1999
- [4] IEC 60420: High-voltage alternating current switch-fuse combinations. 1990
- [5] DIN EN 60420 (VDE 0670 Teil 303): Hochspannungs-Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen. September 1994
- [6] IEC 62271-105: High-voltage alternating current switch-fuse combinations. 2002

## **Anhang A: Ergebnisprotokolle aller experimentellen Untersuchungen**

### **A.1**      *Ermittlung der Sicherungskennlinien*

**Tabelle 1A: Ermittlung der Sicherungskennlinien – HH-Teilbereichssicherung – Hersteller I, Bemessungsstrom 63 A, Bemessungsspannung 12 kV, Charge 1**

		cosφ = 0,2						Mittelwert	Standardabweichung	95%-Vertrauensbereich		Unsi-cherheit in % vom Zeitmittelwert	
										Unsi-cherheit	Grenzen		
											obere		untere
cosφ = 0,2													
Prüfling-Nr.		8	9	10	11	13	25						
Strom	A	406,0	406,0	407,0	408,0	406,0	407,0	406,7					
Schmelzzeit	s	0,898	1,08	0,937	0,873	1,05	1,00	<b>0,9730</b>	0,0837	0,0878	<b>1,0608</b>	<b>0,8852</b>	9,0
Schmelzintegral	kA²s	149	182	158	148	172	165	162,3	13,34	14,00	176,3	148,3	
Lichtbogenzeit	ms	18,4	11,7		15,2	15,0		<b>15,1</b>	2,74	4,35	<b>19,4</b>	<b>10,7</b>	28,9
Löschintegral	kA²s	2,35	2,61		2,41	2,40		2,4	0,11	0,18	2,6	2,3	
virt. Lichtbogenzeit	ms	14,3	15,8		14,5	14,6		<b>14,8</b>	0,71	1,13	<b>15,9</b>	<b>13,6</b>	7,7
Ausschaltzeit	s	0,916	1,092		0,888	1,065		<b>0,9903</b>	0,1029	0,1637	<b>1,1540</b>	<b>0,8266</b>	16,5
Ausschaltintegral	kA²s	151,4	184,6		150,4	174,4		165,2	17,05	27,13	192,3	138,1	
virt. Ausschaltzeit	s	0,918	1,120		0,904	1,058		<b>0,9999</b>	0,1061	0,1688	<b>1,1687</b>	<b>0,8312</b>	16,9
t <sub>Anf.Schlagst.Bew.-Stromende</sub>	ms						619	619					
t <sub>Anf.Schlagst.Bew., Dauer</sub>	ms						3	3					
Auslösezeit Schlagstift	s						0,371	<b>0,371</b>					
cosφ = 0,2													
Prüfling-Nr.		14	15	16	17	18	19						
Strom	A	607,0	608,0	606,0	606,0	606,0	610,0	607,2					
Schmelzzeit	s	0,213	0,204	0,203	0,219	0,202	0,218	<b>0,2098</b>	0,0078	0,0082	<b>0,2180</b>	<b>0,2017</b>	3,9
Schmelzintegral	kA²s	81,8	79,0	79,3	80,9	79,1	83,8	80,7	1,91	2,01	82,7	78,6	
Lichtbogenzeit	ms	6,75	6,81	19,7	16,1	9,05	6,30	<b>11,7</b>	5,71	5,99	<b>17,7</b>	<b>5,7</b>	51,3
Löschintegral	kA²s	1,91	1,70	3,21	2,14	1,92	1,61	2,1	0,58	0,61	2,7	1,5	
virt. Lichtbogenzeit	ms	5,2	4,6	8,7	5,8	5,2	4,3	<b>5,7</b>	1,60	1,68	<b>7,3</b>	<b>4,0</b>	29,8
Ausschaltzeit	s	0,220	0,211	0,223	0,235	0,211	0,224	<b>0,2206</b>	0,0091	0,0096	<b>0,2302</b>	<b>0,2110</b>	4,3
Ausschaltintegral	kA²s	83,71	80,70	82,51	83,04	81,02	85,41	82,7	1,75	1,84	84,6	80,9	
virt. Ausschaltzeit	s	0,227	0,218	0,225	0,226	0,221	0,230	<b>0,2244</b>	0,0042	0,0044	<b>0,2288</b>	<b>0,2200</b>	2,0
t <sub>Anf.Schlagst.Bew.-Stromende</sub>	ms						110	110					
t <sub>Anf.Schlagst.Bew., Dauer</sub>	ms						3	3					
Auslösezeit Schlagstift	s						0,114	<b>0,114</b>					
cosφ = 0,2													
Prüfling-Nr.		20	21	22	23	24							
Strom	A	807,0	805,0	800,0	800,0	799,0		802,2					
Schmelzzeit	s	0,095	0,087	0,091	0,085	0,089		<b>0,0894</b>	0,0038	0,0040	<b>0,0934</b>	<b>0,0854</b>	4,5
Schmelzintegral	kA²s	61,6	60,1	58,1	60,6	62,5		60,6	1,67	1,75	62,3	58,8	
Lichtbogenzeit	ms	9,70	5,41	3,93	5,65	9,75		<b>6,9</b>	2,67	2,80	<b>9,7</b>	<b>4,1</b>	40,7
Löschintegral	kA²s	1,38	1,98	1,56	1,70	1,30		1,6	0,27	0,28	1,9	1,3	
virt. Lichtbogenzeit	ms	2,1	3,1	2,4	2,7	2,0		<b>2,5</b>	0,42	0,44	<b>2,9</b>	<b>2,0</b>	17,7
Ausschaltzeit	s	0,105	0,093	0,095	0,091	0,099		<b>0,0963</b>	0,0056	0,0059	<b>0,1022</b>	<b>0,0904</b>	6,1
Ausschaltintegral	kA²s	62,98	62,08	59,66	62,30	63,80		62,2	1,55	1,63	63,8	60,5	
virt. Ausschaltzeit	s	0,097	0,096	0,093	0,097	0,100		<b>0,0966</b>	0,0024	0,0026	<b>0,0992</b>	<b>0,0940</b>	2,6
t <sub>Anf.Schlagst.Bew.-Stromende</sub>	ms	42	42					42					
t <sub>Anf.Schlagst.Bew., Dauer</sub>	ms	3	3					3					
Auslösezeit Schlagstift	s	0,063	0,051					<b>0,057</b>					
cosφ = 0,5													
Prüfling-Nr.		3	4	5	6	7							
Strom	A	246,0	247,0	248,0	248,0	247,0		247,2					
Schmelzzeit	s	146,0	175,0	194,0	155,0	67,0		<b>147,4</b>	48,6	60,4	<b>207,8</b>	<b>87,0</b>	41,0
Schmelzintegral	kA²s	8835	10677	11932	9533	4088		9013	2994	3717	12730	5296	
Lichtbogenzeit	ms	43,0	35,5	35,8	67,2	54,3		<b>47,2</b>	13,6	16,8	<b>64,0</b>	<b>30,3</b>	35,7
Löschintegral	kA²s	1,79	1,43	1,49	2,29	2,19		1,8	0,39	0,49	2,3	1,3	
virt. Lichtbogenzeit	ms	29,6	23,4	24,2	37,2	35,9		<b>30,1</b>	6,40	7,94	<b>38,0</b>	<b>22,1</b>	26,4
Ausschaltzeit	s	146,0	175,0	194,0	155,1	67,1		<b>147,4</b>	48,6	60,4	<b>207,8</b>	<b>87,1</b>	40,9
Ausschaltintegral	kA²s	8837	10678	11933	9535	4090		9015	2993,4	3716,8	12732	5298	
virt. Ausschaltzeit	s	146,0	175,0	194,0	155,0	67,0		<b>147,4</b>	48,6	60,4	<b>207,8</b>	<b>87,1</b>	40,9
cosφ = 0,86													
Prüfling-Nr.		27	28	29	30	31							
Strom	A	399,0	401,0	401,0	406,0	405,0		402,4					
Schmelzzeit	s	1,22	1,17	1,26	1,11	1,33		<b>1,2180</b>	0,0841	0,1044	<b>1,3224</b>	<b>1,1136</b>	8,6
Schmelzintegral	kA²s	189,0	183,0	196,0	178,0	211,0		191,4	12,86	15,96	207,4	175,4	
Lichtbogenzeit	ms	22,8	12,4	5,88	13,3	25,3		<b>15,9</b>	7,99	9,92	<b>25,9</b>	<b>6,0</b>	62,3
Löschintegral	kA²s	1,15	1,09	0,914	1,09	1,89		1,2	0,38	0,47	1,7	0,8	
virt. Lichtbogenzeit	ms	7,2	6,8	5,7	6,6	11,5		<b>7,6</b>	2,28	2,83	<b>10,4</b>	<b>4,7</b>	37,5
Ausschaltzeit	s	1,243	1,182	1,266	1,123	1,355		<b>1,2339</b>	0,0876	0,1088	<b>1,3428</b>	<b>1,1251</b>	8,8
Ausschaltintegral	kA²s	190,2	184,1	196,9	179,1	212,9		192,6	13,15	16,32	208,9	176,3	
virt. Ausschaltzeit	s	1,194	1,145	1,225	1,086	1,298		<b>1,1896</b>	0,0800	0,0994	<b>1,2890</b>	<b>1,0903</b>	8,4
t <sub>Anf.Schlagst.Bew.-Stromende</sub>	ms				775	978		877					
t <sub>Anf.Schlagst.Bew., Dauer</sub>	ms				3	3		3					
Auslösezeit Schlagstift	s				0,348	0,377		<b>0,363</b>					

**Tabelle 2A: Ermittlung der Sicherungskennlinien – HH-Teilbereichssicherung  
– Hersteller I, Bemessungsstrom 63 A, Bemessungsspannung 12 kV, Charge 2**

	Mittelwert	Standardabweichung	95%-Vertrauensbereich		Unsicherheit in % vom Zeitmittelwert									
			Unsicherheit	Grenzen										
				obere		untere								
<b>cosφ = 0,2</b>														
Prüfling-Nr.			11	12	13	14	15							
Strom	A		410,0	410,0	412,0	407,0	406,0		409,0					
Schmelzzeit	s		0,972	1,060	1,090	1,040	0,970		1,0264	0,0536	0,0666	1,0930	0,9598	6,5
Schmelzintegral	kA²s		163	176	181	170	161		170,2	8,47	10,51	180,7	159,7	
Lichtbogenzeit	ms		18,3	17,8	15,7	16,1	11,5		15,9	2,68	3,33	19,2	12,5	21,0
Löschintegral	kA²s		2,76	2,46	2,48	2,52	2,68		2,58	0,13	0,16	2,74	2,42	
virt. Lichtbogenzeit	ms		16,4	14,6	14,6	15,2	16,3		15,4	0,87	1,08	16,5	14,3	7,0
Ausschaltzeit	s		0,990	1,078	1,106	1,056	0,982		1,0423	0,0545	0,0676	1,1099	0,9746	6,5
Ausschaltintegral	kA²s		165,8	178,5	183,5	172,5	163,7		172,8	8,35	10,37	183,1	162,4	
virt. Ausschaltzeit	s		0,986	1,062	1,081	1,041	0,993		1,0326	0,0418	0,0519	1,0845	0,9807	5,0
t <sub>Anf.Schlagst.Bew.-Stromende</sub>	ms					618	524		571					
t <sub>Anf.Schlagst.Bew., Dauer</sub>	ms					3	3		3					
Auslösezeit Schlagstift	s					0,438	0,458		0,448					
Prüfling-Nr.			1	2	3	4	5							
Strom	A		613,0	616,0	614,0	615,0			614,5					
Schmelzzeit	s		0,196	0,196	0,202	0,201	0,220		0,2030	0,0099	0,0123	0,2153	0,1907	6,1
Schmelzintegral	kA²s		76,4	77,2	80,6	77,2	84,3		79,1	3,3088	4,1084	83,2	75,0	
Lichtbogenzeit	ms		4,46	4,46	2,98	4,47	9,11		5,1	2,3340	2,8981	8,0	2,2	56,9
Löschintegral	kA²s		0,979	0,946	0,765	1,01	1,38		1,0	0,2246	0,2789	1,3	0,7	
virt. Lichtbogenzeit	ms		2,6	2,5	2,0	2,7	3,7		2,7	0,5944	0,7381	3,4	2,0	27,4
Ausschaltzeit	s		0,200	0,200	0,205	0,205	0,229		0,2081	0,0120	0,0149	0,2230	0,1932	7,2
Ausschaltintegral	kA²s		77,38	78,15	81,37	78,21	85,68		80,2	3,45	4,28	84,4	75,9	
virt. Ausschaltzeit	s		0,206	0,206	0,216	0,207	0,227		0,2123	0,0092	0,0114	0,2237	0,2009	5,4
t <sub>Anf.Schlagst.Bew.-Stromende</sub>	ms						131		131					
t <sub>Anf.Schlagst.Bew., Dauer</sub>	ms						3		3					
Auslösezeit Schlagstift	s						0,098		0,098					
Prüfling-Nr.			6	7	8	9	10							
Strom	A		809,0	807,0	797,0	796,0	796,0		801,0					
Schmelzzeit	s		0,091	0,093	0,102	0,096	0,098		0,0961	0,0043	0,0053	0,1013	0,0908	5,5
Schmelzintegral	kA²s		57,6	61,9	62,2	60,6	61,0		60,7	1,83	2,27	62,9	58,4	
Lichtbogenzeit	ms		4,47	5,12	5,47	10,30	8,73		6,8	2,55	3,17	10,0	3,7	46,4
Löschintegral	kA²s		1,52	1,62	1,60	1,77	1,16		1,5	0,23	0,28	1,8	1,3	
virt. Lichtbogenzeit	ms		2,3	2,5	2,5	2,8	1,8		2,4	0,36	0,44	2,8	1,9	18,5
Ausschaltzeit	s		0,095	0,098	0,107	0,106	0,107		0,1029	0,0055	0,0069	0,1097	0,0960	6,7
Ausschaltintegral	kA²s		59,12	63,52	63,80	62,37	62,16		62,2	1,86	2,31	64,5	59,9	
virt. Ausschaltzeit	s		0,090	0,098	0,100	0,098	0,098		0,0970	0,0039	0,0048	0,1018	0,0922	5,0
t <sub>Anf.Schlagst.Bew.-Stromende</sub>	ms		49	49					49					
t <sub>Anf.Schlagst.Bew., Dauer</sub>	ms		3	3					3					
Auslösezeit Schlagstift	s		0,046	0,049					0,048					
<b>cosφ = 0,86</b>														
Prüfling-Nr.			16	17	18	19	20							
Strom	A		403,0	403,0	403,0	405,0	404,0		403,6					
Schmelzzeit	s		1,200	1,270	1,490	1,110	1,230		1,2600	0,1414	0,1756	1,4356	1,0844	13,9
Schmelzintegral	kA²s		189	199	234	177	195		198,8	21,36	26,52	225,3	172,3	
Lichtbogenzeit	ms		21,3	13,7	12,8	14,7	7,59		14,0	4,91	6,10	20,1	7,9	43,5
Löschintegral	kA²s		1,01	0,911	0,732	1,15	0,903		0,9	0,15	0,19	1,1	0,8	
virt. Lichtbogenzeit	ms		6,2	5,6	4,5	7,0	5,5		5,8	0,92	1,15	6,9	4,6	19,9
Ausschaltzeit	s		1,221	1,284	1,503	1,125	1,238		1,2740	0,1404	0,1743	1,4483	1,0997	13,7
Ausschaltintegral	kA²s		190,0	199,9	234,7	178,2	195,9		199,7	21,21	26,34	226,1	173,4	
virt. Ausschaltzeit	s		1,170	1,231	1,445	1,086	1,200		1,2265	0,1337	0,1660	1,3925	1,0605	13,5
t <sub>Anf.Schlagst.Bew.-Stromende</sub>	ms					755	960		858					
t <sub>Anf.Schlagst.Bew., Dauer</sub>	ms					3	3		3					
Auslösezeit Schlagstift	s					0,370	0,278		0,324					

 Oszillogramm in Bild 5 b

 Oszillogramm in Bild 5 a

**Tabelle 3A: Ermittlung der Sicherungskennlinien – HH-Teilbereichssicherung  
– Hersteller II, Bemessungsstrom 63 A, Bemessungsspannung 12 kV**

							Mittelwert	Standardabweichung	95%-Vertrauensbereich				Unsic-herheit in % vom Zeitmit-telwert
									Unsic-herheit	Grenzen			
										obere	untere		
<b>cosφ = 0,2</b>													
Prüfling-Nr.		12	14	15	16	17							
Strom	A	405,0	409,0	416,0	417,0	417,0	412,8						
<b>Schmelzeit</b>	<b>s</b>	0,314	0,264	0,295	0,285	0,275	<b>0,2866</b>	0,0192	0,0238	<b>0,3104</b>	<b>0,2628</b>	8,3	
Schmelzintegral	kA²s	51,6	47,3	50,9	49,6	47,9	49,5	1,86	2,30	51,8	47,2		
<b>Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>			3,94	3,81	3,94	<b>3,9</b>	0,08	0,19	4,1	3,7	4,8	
Löschintegral	kA²s			0,701	0,600	0,668	0,7	0,05	0,13	0,8	0,5		
<b>virt. Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>			4,05	3,45	3,84	<b>3,8</b>	0,30	0,76	4,5	3,0	20,0	
<b>Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>			0,299	0,289	0,279	<b>0,2889</b>	0,0100	0,0248	<b>0,3137</b>	<b>0,2641</b>	8,6	
Ausschaltintegral	kA²s			51,60	50,20	48,57	50,1	1,52	3,77	53,9	46,4		
<b>virt. Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>			0,298	0,289	0,279	<b>0,2887</b>	0,0094	0,0234	<b>0,3122</b>	<b>0,2653</b>	8,1	
t <sub>Anf.Schlagst.Bew.-Stromende</sub>	ms			4	3	3	3	1	1	5	2		
t <sub>Anf.Schlagst.Bew., Dauer</sub>	ms			7	7	7	7	0	0	7	7		
<b>Auslösezeit Schlagstift</b>	<b>s</b>			0,295	0,286	0,276	<b>0,286</b>	0,010	0,024	0,309	0,262	8,3	
Prüfling-Nr.		1	2	3	4	5	6						
Strom	A	614,0	614,0	616,0	612,0	612,0	605,0	612,2					
<b>Schmelzeit</b>	<b>s</b>	0,084	0,093	0,091	0,070	0,074	0,086	<b>0,0830</b>	0,0093	0,0097	<b>0,0927</b>	<b>0,0732</b>	11,7
Schmelzintegral	kA²s	32,8	34,4	35,5	32,4	33,4	34,0	33,8	1,13	1,19	34,9	32,6	
<b>Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	4,47	3,30	3,42	10,6	7,54	3,45	<b>5,5</b>	2,99	3,13	8,6	2,3	57,4
Löschintegral	kA²s	1,60	1,08	0,890	1,66	1,38	1,10	1,3	0,31	0,33	1,6	1,0	
<b>virt. Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	4,2	2,9	2,3	4,4	3,7	2,9	<b>3,4</b>	0,83	0,87	4,3	2,5	25,6
<b>Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,088	0,096	0,095	0,081	0,081	0,089	<b>0,0884</b>	0,0065	0,0069	<b>0,0953</b>	<b>0,0816</b>	7,7
Ausschaltintegral	kA²s	34,40	35,48	36,39	34,06	34,78	35,10	35,0	0,83	0,87	35,9	34,2	
<b>virt. Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,091	0,094	0,096	0,091	0,093	0,094	<b>0,0931</b>	0,0019	0,0020	<b>0,0951</b>	<b>0,0912</b>	2,1
t <sub>Anf.Schlagst.Bew.-Stromende</sub>	ms	2	2	2			1	2	1	1	3	1	
t <sub>Anf.Schlagst.Bew., Dauer</sub>	ms	7	8	7			7	7	1	1	8	6	
<b>Auslösezeit Schlagstift</b>	<b>s</b>	0,086	0,094	0,093			0,088	<b>0,090</b>	0,004	0,006	0,096	0,084	6,6
Prüfling-Nr.		8	9	10	11								
Strom	A	802,0	800,0	798,0	798,0			799,5					
<b>Schmelzeit</b>	<b>s</b>	0,045	0,043	0,045	0,045			<b>0,0444</b>	0,0013	0,0020	<b>0,0464</b>	<b>0,0423</b>	4,6
Schmelzintegral	kA²s	27,3	24,8	28,2	27,6			27,0	1,50	2,38	29,4	24,6	
<b>Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	3,48	3,98	3,43	3,48			<b>3,6</b>	0,26	0,41	4,0	3,2	11,5
Löschintegral	kA²s	1,85	1,99	1,68	1,78			1,8	0,13	0,21	2,0	1,6	
<b>virt. Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	2,9	3,1	2,6	2,8			<b>2,9</b>	0,20	0,31	3,2	2,5	11,0
<b>Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,048	0,046	0,049	0,048			<b>0,0479</b>	0,0010	0,0016	<b>0,0496</b>	<b>0,0463</b>	3,4
Ausschaltintegral	kA²s	29,15	26,79	29,88	29,38			28,80	1,37	2,19	30,99	26,61	
<b>virt. Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,045	0,042	0,047	0,046			<b>0,0450</b>	0,0022	0,0035	<b>0,0485</b>	<b>0,0415</b>	7,8
t <sub>Anf.Schlagst.Bew.-Stromende</sub>	ms	0	3					2					
t <sub>Anf.Schlagst.Bew., Dauer</sub>	ms	6	7					7					
<b>Auslösezeit Schlagstift</b>	<b>s</b>	0,048	0,043					<b>0,046</b>					
<b>cosφ = 0,86</b>													
Prüfling-Nr.		18	19	20	21	22							
Strom	A	405,0	405,0	404,0	404,0	405,0	404,6						
<b>Schmelzeit</b>	<b>s</b>	0,313	0,293	0,323	0,295	0,325	<b>0,3098</b>	0,0151	0,0188	<b>0,3286</b>	<b>0,2910</b>	6,1	
Schmelzintegral	kA²s	50,3	47,0	51,6	47,3	52,5	49,7	2,49	3,09	52,8	46,6		
<b>Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	3,80	4,26	4,43	12,8	11,4	<b>7,3</b>	4,38	5,44	12,8	1,9	74,1	
Löschintegral	kA²s	0,553	0,593	0,656	1,16	0,881	0,8	0,25	0,31	1,1	0,5		
<b>virt. Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	3,4	3,6	4,0	7,1	5,4	<b>4,7</b>	1,55	1,93	6,6	2,8	41,1	
<b>Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,317	0,297	0,327	0,308	0,336	<b>0,3171</b>	0,0155	0,0192	<b>0,3364</b>	<b>0,2979</b>	6,1	
Ausschaltintegral	kA²s	50,85	47,59	52,26	48,46	53,38	50,5	2,46	3,05	53,6	47,5		
<b>virt. Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,310	0,290	0,320	0,297	0,325	<b>0,3085</b>	0,0150	0,0186	<b>0,3271</b>	<b>0,2900</b>	6,0	
t <sub>Anf.Schlagst.Bew.-Stromende</sub>	ms	2	2				2						
t <sub>Anf.Schlagst.Bew., Dauer</sub>	ms	7	7				7						
<b>Auslösezeit Schlagstift</b>	<b>s</b>	0,315	0,295				<b>0,305</b>						

 Oszillogramm in Bild 6

**Tabelle 4A: Ermittlung der Sicherungskennlinien – HH-Teilbereichssicherung  
– Hersteller I, Bemessungsstrom 31,5 A, Bemessungsspannung 24 kV, Charge 1**

							Mittelwert	Standardabweichung	95%-Vertrauensbereich		Unsicherheit in % vom Zeitmittelwert	
									Unsicherheit	Grenzen		
										obere		untere
<b>cosφ = 0,2</b>												
Prüfling-Nr.		1	2	3	4	5						
Strom	A	206,0	211,0	211,0	211,0	211,0	210,0					
<b>Schmelzzeit</b>	<b>s</b>	0,978	0,836	0,743	0,805	0,917	<b>0,8558</b>	0,0927	0,1151	<b>0,9709</b>	<b>0,7407</b>	13,5
Schmelzintegral	kA²s	41,6	37,2	33,7	35,7	40,5	37,7	3,29	4,08	41,8	33,7	
<b>Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	12,0	11,0	16,8	10,7	10,0	<b>12,1</b>	2,73	3,38	<b>15,5</b>	<b>8,7</b>	28,0
Löschintegral	kA²s	0,902	0,256	0,576	0,229	0,2	0,4	0,30	0,38	0,8	0,1	
<b>virt. Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	21,3	5,8	12,9	5,1	4,5	<b>9,9</b>	7,20	8,94	<b>18,9</b>	<b>1,0</b>	90,1
<b>Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,990	0,847	0,760	0,816	0,927	<b>0,8679</b>	0,0912	0,1132	<b>0,9811</b>	<b>0,7547</b>	13,0
Ausschaltintegral	kA²s	42,50	37,46	34,28	35,93	40,70	38,2	3,39	4,20	42,4	34,0	
<b>virt. Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	1,002	0,841	0,770	0,807	0,914	<b>0,8668</b>	0,0922	0,1145	<b>0,9813</b>	<b>0,7523</b>	13,2
t <sub>Anf.Schlagst.Bew.-Stromende</sub>	ms			672	742	822	745	75	186	932	559	
t <sub>Anf.Schlagst.Bew., Dauer</sub>	ms			3	3	3	3	0	0	3	3	
<b>Auslösezeit Schlagstift</b>	<b>s</b>			0,088	0,074	0,105	<b>0,089</b>	0,016	0,039	<b>0,128</b>	<b>0,050</b>	43,8
Prüfling-Nr.		11	12	13	14	15						
Strom	A	306,0	305,0	305,0	305,0	305,0	305,2					
<b>Schmelzzeit</b>	<b>s</b>	0,116	0,124	0,116	0,134	0,141	<b>0,1262</b>	0,0111	0,0138	<b>0,1400</b>	<b>0,1124</b>	10,9
Schmelzintegral	kA²s	10,7	11,3	10,8	12,5	12,8	11,6	0,97	1,21	12,8	10,4	
<b>Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	3,05	3,62	10,60	3,50	6,11	<b>5,4</b>	3,16	3,92	<b>9,3</b>	<b>1,5</b>	72,9
Löschintegral	kA²s	0,242	0,338	0,311	0,288	0,501	0,3	0,10	0,12	0,5	0,2	
<b>virt. Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	2,6	3,6	3,3	3,1	5,4	<b>3,6</b>	1,07	1,32	<b>4,9</b>	<b>2,3</b>	36,7
<b>Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,119	0,128	0,127	0,138	0,147	<b>0,1316</b>	0,0109	0,0135	<b>0,1451</b>	<b>0,1181</b>	10,3
Ausschaltintegral	kA²s	10,94	11,64	11,11	12,79	13,30	12,0	1,04	1,29	13,3	10,7	
<b>virt. Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,117	0,125	0,119	0,137	0,143	<b>0,1284</b>	0,0114	0,0141	<b>0,1425</b>	<b>0,1142</b>	11,0
t <sub>Anf.Schlagst.Bew.-Stromende</sub>	ms	75	84	90	94		86	8	13	99	73	
t <sub>Anf.Schlagst.Bew., Dauer</sub>	ms	3	3	3	3		3	0	0	3	3	
<b>Auslösezeit Schlagstift</b>	<b>s</b>	0,044	0,044	0,037	0,044		<b>0,042</b>	0,004	0,006	<b>0,048</b>	<b>0,036</b>	13,5
Prüfling-Nr.		16	18	19	20	21						
Strom	A	410,0	409,0	409,0	409,0	410,0	409,4					
<b>Schmelzzeit</b>	<b>s</b>	0,049	0,042	0,044	0,046	0,047	<b>0,0457</b>	0,0027	0,0034	<b>0,0491</b>	<b>0,0423</b>	7,5
Schmelzintegral	kA²s	8,22	6,64	7,17	7,99	8,11	7,63	0,69	0,86	8,48	6,77	
<b>Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	7,14	4,73	3,65	2,26	9,27	<b>5,4</b>	2,80	3,48	<b>8,9</b>	<b>1,9</b>	64,3
Löschintegral	kA²s	0,601	0,509	0,527	0,242	0,382	0,5	0,14	0,18	0,6	0,3	
<b>virt. Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	3,6	3,0	3,2	1,4	2,3	<b>2,7</b>	0,84	1,05	<b>3,7</b>	<b>1,7</b>	38,8
<b>Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,056	0,047	0,048	0,049	0,056	<b>0,0511</b>	0,0048	0,0059	<b>0,0571</b>	<b>0,0452</b>	11,6
Ausschaltintegral	kA²s	8,82	7,15	7,70	8,23	8,49	8,08	0,66	0,82	8,90	7,26	
<b>virt. Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,052	0,043	0,046	0,049	0,051	<b>0,0482</b>	0,0039	0,0048	<b>0,0530</b>	<b>0,0434</b>	9,9
t <sub>Anf.Schlagst.Bew.-Stromende</sub>	ms	39	25	24	32	27	30	7	9	39	21	
t <sub>Anf.Schlagst.Bew., Dauer</sub>	ms	3	3	3	3	3	3	0	0	3	3	
<b>Auslösezeit Schlagstift</b>	<b>s</b>	0,017	0,022	0,024	0,017	0,029	<b>0,022</b>	0,005	0,006	<b>0,028</b>	<b>0,015</b>	29,9
<b>cosφ = 0,83</b>												
Prüfling-Nr.		6	7	8	9	10						
Strom	A	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0					
<b>Schmelzzeit</b>	<b>s</b>	0,751	0,743	0,913	0,831	0,780	<b>0,8036</b>	0,0702	0,0872	<b>0,8908</b>	<b>0,7164</b>	10,8
Schmelzintegral	kA²s	33,1	32,8	40,3	36,7	34,3	35,4	3,12	3,87	39,3	31,6	
<b>Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	13,8	21,8	12,7	14,4	5,63	<b>13,7</b>	5,75	7,14	<b>20,8</b>	<b>6,5</b>	52,2
Löschintegral	kA²s	0,301	0,320	0,330	0,316	0,340	0,3	0,01	0,02	0,3	0,3	
<b>virt. Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	6,8	7,2	7,4	7,1	7,6	<b>7,2</b>	0,33	0,41	<b>7,6</b>	<b>6,8</b>	5,7
<b>Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,765	0,765	0,926	0,845	0,786	<b>0,8173</b>	0,0690	0,0857	<b>0,9030</b>	<b>0,7316</b>	10,5
Ausschaltintegral	kA²s	33,40	33,12	40,63	37,02	34,64	35,8	3,13	3,88	39,6	31,9	
<b>virt. Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,750	0,744	0,913	0,831	0,778	<b>0,8032</b>	0,0702	0,0872	<b>0,8904</b>	<b>0,7161</b>	10,9
t <sub>Anf.Schlagst.Bew.-Stromende</sub>	ms	670	673	831	748	694	723	68	84	808	639	
t <sub>Anf.Schlagst.Bew., Dauer</sub>	ms	3	3	3	3	3	3	0	0	3	3	
<b>Auslösezeit Schlagstift</b>	<b>s</b>	0,095	0,092	0,095	0,097	0,092	<b>0,094</b>	0,002	0,003	<b>0,097</b>	<b>0,091</b>	3,2

**Tabelle 5A: Ermittlung der Sicherungskennlinien – HH-Teilbereichssicherung  
– Hersteller I, Bemessungsstrom 31,5 A, Bemessungsspannung 24 kV, Charge 2**

							Mittelwert	Standardabweichung	95%-Vertrauensbereich			Unsicherheit in % vom Zeitmittelwert
									Unsicherheit	Grenzen		
										obere	untere	
<b>cosφ = 0,2</b>												
Prüfling-Nr.		1	3	5	6	7						
Strom	A	210,0	211,0	211,0	211,0	211,0	210,8					
<b>Schmelzzeit</b>	<b>s</b>	0,556	0,258	0,415	0,634	0,693	<b>0,5112</b>	0,1757	0,2182	<b>0,7294</b>	<b>0,2930</b>	42,7
Schmelzintegral	kA²s	24,6	11,4	18,4	28,1	30,6	22,6	7,77	9,64	32,3	13,0	
<b>Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	21,1	10,1	12,7	12,7	5,6	<b>12,4</b>	5,64	7,00	<b>19,4</b>	<b>5,4</b>	56,3
Löschintegral	kA²s	0,46	0,22	0,35	0,22	0,25	0,3	0,10	0,13	0,4	0,2	
<b>virt. Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	10,4	5,0	7,8	5,0	5,7	<b>6,8</b>	2,35	2,92	<b>9,7</b>	<b>3,9</b>	43,0
<b>Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,577	0,268	0,428	0,647	0,699	<b>0,5236</b>	0,1754	0,2178	<b>0,7415</b>	<b>0,3058</b>	41,6
Ausschaltintegral	kA²s	25,06	11,62	18,75	28,32	30,85	22,9	7,77	9,65	32,6	13,3	
<b>virt. Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,568	0,261	0,421	0,636	0,693	<b>0,5159</b>	0,1750	0,2173	<b>0,7332</b>	<b>0,2986</b>	42,1
t <sub>Anf.Schlagst.Bew.-Stromende</sub>	ms		166	313	525	593	399	196	312	711	87	
t <sub>Anf.Schlagst.Bew., Dauer</sub>	ms		3	3	3	3	3	0	0	3	3	
<b>Auslösezeit Schlagstift</b>	<b>s</b>		0,102	0,115	0,122	0,106	<b>0,111</b>	0,009	0,014	<b>0,125</b>	<b>0,097</b>	12,7
Prüfling-Nr.		8	9	10	11	12						
Strom	A	305,0	304,0	305,0	304,0	304,0	304,4					
<b>Schmelzzeit</b>	<b>s</b>	0,096	0,104	0,113	0,111	0,104	<b>0,1056</b>	0,0067	0,0083	<b>0,1139</b>	<b>0,0973</b>	7,9
Schmelzintegral	kA²s	8,81	9,52	10,3	10,1	9,39	9,62	0,59	0,74	10,36	8,89	
<b>Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	11,2	4,31	4,95	15,7	3,94	<b>8,0</b>	5,22	6,48	<b>14,5</b>	<b>1,5</b>	80,8
Löschintegral	kA²s	0,476	0,371	0,443	0,670	0,341	0,5	0,13	0,16	0,6	0,3	
<b>virt. Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	5,1	4,0	4,8	7,2	3,7	<b>5,0</b>	1,40	1,74	<b>6,7</b>	<b>3,2</b>	34,9
<b>Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,11	0,108	0,118	0,127	0,108	<b>0,1136</b>	0,0085	0,0106	<b>0,1242</b>	<b>0,1031</b>	9,3
Ausschaltintegral	kA²s	9,286	9,89	10,74	10,77	9,73	10,1	0,65	0,81	10,9	9,3	
<b>virt. Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,100	0,107	0,115	0,117	0,105	<b>0,1088</b>	0,0071	0,0088	<b>0,1176</b>	<b>0,1000</b>	8,1
t <sub>Anf.Schlagst.Bew.-Stromende</sub>	ms	73	74	91	89		82	10	15	97	67	
t <sub>Anf.Schlagst.Bew., Dauer</sub>	ms	3	3	3	3		3	0	0	3	3	
<b>Auslösezeit Schlagstift</b>	<b>s</b>	0,034	0,034	0,027	0,038		<b>0,033</b>	0,005	0,007	<b>0,041</b>	<b>0,026</b>	21,7
Prüfling-Nr.		13	15	16	17							
Strom	A	410,0	408,0	408,0	408,0		408,5					
<b>Schmelzzeit</b>	<b>s</b>	0,039	0,038	0,044	0,042		<b>0,0407</b>	0,0028	0,0045	<b>0,0452</b>	<b>0,0362</b>	11,1
Schmelzintegral	kA²s	6,99	6,53	6,99	6,72		6,81	0,22	0,36	7,16	6,45	
<b>Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	18,7	9,80	3,49	6,17		<b>9,5</b>	6,63	10,55	<b>20,1</b>	<b>0,0</b>	110,6
Löschintegral	kA²s	0,955	0,869	0,572	0,784		0,8	0,16	0,26	1,1	0,5	
<b>virt. Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	5,7	5,2	3,4	4,7		<b>4,8</b>	0,97	1,54	<b>6,3</b>	<b>3,2</b>	32,4
<b>Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,058	0,047	0,047	0,048		<b>0,0502</b>	0,0053	0,0084	<b>0,0586</b>	<b>0,0418</b>	16,7
Ausschaltintegral	kA²s	7,95	7,40	7,56	7,50		7,6	0,24	0,38	8,0	7,2	
<b>virt. Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,047	0,044	0,045	0,045		<b>0,0456</b>	0,0012	0,0019	<b>0,0475</b>	<b>0,0436</b>	4,2
t <sub>Anf.Schlagst.Bew.-Stromende</sub>	ms	41	31	24	32		32	7	11	43	21	
t <sub>Anf.Schlagst.Bew., Dauer</sub>	ms	3	3	3	3		3	0	0	3	3	
<b>Auslösezeit Schlagstift</b>	<b>s</b>	0,017	0,016	0,023	0,016		<b>0,018</b>	0,004	0,006	<b>0,024</b>	<b>0,013</b>	31,0
<b>cosφ = 0,83</b>												
Prüfling-Nr.		18	19	20	21	22						
Strom	A	211,0	211,0	212,0	212,0	212,0	211,6					
<b>Schmelzzeit</b>	<b>s</b>	0,454	0,239	0,513	0,703	0,503	<b>0,4824</b>	0,1659	0,2060	<b>0,6884</b>	<b>0,2764</b>	42,7
Schmelzintegral	kA²s	20,1	10,5	22,8	31,2	22,4	21,4	7,41	9,20	30,6	12,2	
<b>Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	10,9	16,6	12,7	13,5	12,8	<b>13,3</b>	2,08	2,58	<b>15,9</b>	<b>10,7</b>	19,4
Löschintegral	kA²s	0,221	0,389	0,275	0,291	0,251	0,3	0,06	0,08	0,4	0,2	
<b>virt. Lichtbogenzeit</b>	<b>ms</b>	5,0	8,7	6,1	6,5	5,6	<b>6,4</b>	1,44	1,79	<b>8,2</b>	<b>4,6</b>	28,0
<b>Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,465	0,256	0,526	0,717	0,516	<b>0,4957</b>	0,1648	0,2046	<b>0,7003</b>	<b>0,2911</b>	41,3
Ausschaltintegral	kA²s	20,32	10,89	23,08	31,49	22,65	21,7	7,37	9,15	30,8	12,5	
<b>virt. Ausschaltzeit</b>	<b>s</b>	0,456	0,245	0,513	0,701	0,504	<b>0,4838</b>	0,1630	0,2024	<b>0,6862</b>	<b>0,2814</b>	41,8
t <sub>Anf.Schlagst.Bew.-Stromende</sub>	ms	336	148	444	633	425	397	176	219	616	178	
t <sub>Anf.Schlagst.Bew., Dauer</sub>	ms	3	3	3	3	3	3	0	0	3	3	
<b>Auslösezeit Schlagstift</b>	<b>s</b>	0,129	0,108	0,082	0,083	0,091	<b>0,099</b>	0,020	0,025	<b>0,123</b>	<b>0,074</b>	25,0

## A.2 Ermittlung der Öffnungszeiten der Lastschalter bei Schlagstiftbetätigung

**Tabelle 6A: Ermittlung der Öffnungszeiten der Lastschalter bei Schlagstiftbetätigung – Bemessungsspannung 12 kV, Hersteller A, Isolierung offen in Luft**

Lastschalter	A											
	II					1 + 2						
Hersteller												
Charge	12											
U <sub>r</sub>	63											
I <sub>n</sub>												
Sicherung im Leiter	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>			
Zuschaltung	L <sub>3</sub> ca. 5 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>2</sub> (symmetrisch)											
Leistungsfaktor cos φ des Prüfkreises	0,23					0,25					0,23	
Ausschaltströme	L <sub>1</sub>	706	710	709	600	600	600	600	606	301	303	303
	L <sub>2</sub>	704	707	704	598	597	597	597	601	299	300	301
	L <sub>3</sub>	703	710	706	598	600	600	604	604	301	302	302
Mittelwert	A	704	709	706	599	599	599	604	604	300	302	302
Schaltspannung	L <sub>1</sub>	15,4	12,2	12	14,9	11,8	11,8	18,6	18,6	21,6	22,1	18,5
	L <sub>2</sub>	12,3	18,5	12	10,3	19	19	12,6	12,6	17,6	17,4	20,8
	L <sub>3</sub>	12,2	12,3	15,4	12,3	12	12	16,8	16,8	12,5	22,3	22,4
wiederkehrende Spannung	L <sub>1</sub>	7,20	7,24	7,22	6,98	6,99	6,99	7,05	7,05	6,96	6,98	6,99
	L <sub>2</sub>	7,23	7,3	7,29	7,03	7,04	7,04	7,09	7,09	7,1	7,15	7,16
	L <sub>3</sub>	7,20	7,24	7,22	6,98	6,99	6,99	7,02	7,02	7,02	6,98	7,00
Mittelwert	KV	7,21	7,26	7,24	7	7,01	7,01	7,05	7,05	7,03	7,04	7,05
Sicherung	Schmelzzeit	57,3	63,1	56	96,6	95,1	95,1	86,5	86,5			
	Schmelzintegral	28,6	30,3	28,3	34,6	33,5	33,5	31,9	31,9			
	Lichtbogenzeit	11,2	10,7	10,1	10,7	10,0	10,7	10,7	10,7			
	Löschintegral	2,88	2,20	2,11	1,73	2,41	2,41	2,51	2,51			
	Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung nach [5]	68,6	69,4	68,7	69,1	77,5	77,5	87,6	87,6			
Lastschalter	Öffnungszeit bei Auslöserbetätigung											
	Öffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung <sup>1)</sup>	63,1	59,9	61,9	69,8	75,3	75,3	80,1	80,1	75,2	79,0	79,0
Abschaltung durch	Leiter L <sub>1</sub>	Sicherung	Lastschalter	Lastschalter	Sicherung	Lastschalter	Sicherung	Lastschalter	Lastschalter	Lastschalter		
	Leiter L <sub>2</sub>	Lastschalter	Sicherung	Lastschalter	Lastschalter	Sicherung	Lastschalter	Sicherung	Sicherung	Lastschalter		
	Leiter L <sub>3</sub>											
<b>Zusammenfassung für einen Strom von 601 A bis 706 A</b>												
	Mittelwert	Standardabweichung		Unsicherheit		untere Grenze		obere Grenze				
Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung nach [5]	73,5 ms	7,72 ms		8,10 ms		65,4 ms		81,6 ms				
Öffnungszeiten ab Schlagstiftbetätigung	70,0 ms	7,93 ms		8,32 ms		61,7 ms		78,3 ms				

<sup>1)</sup> berechnet aus Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung, Schmelzzeit und Kennlinie Auslösezeit Schlagstift

Osziogramm in Bild 14

**Tabelle 7A: Ermittlung der Öffnungszeiten der Lastschalter bei Schlagstiftbetätigung  
– Bemessungsspannung 24 kV, Hersteller C, Isolierung offen in Luft**

Lastschalter	C									
	Hersteller	I			L <sub>3</sub> ca. 5 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>2</sub> (symmetrisch)			0,27		
Sicherung	Hersteller	1 + 2								
	Charge	24								
Sicherung im Leiter	U <sub>i</sub>	31,5								
	I <sub>n</sub>									
Zuschaltung	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>				
Leistungsfaktor cos φ des Prüfkreises	0,23			0,23						
Ausschaltströme	L <sub>1</sub>	352	348	349	317	317	318	149	149	149
	L <sub>2</sub>	350	346	346	315	315	316	148	148	148
	L <sub>3</sub>	351	348	348	317	318	318	149	149	149
Schaltspannung	Mittelwert	351	347	348	316	317	317	149	149	149
	L <sub>1</sub>	41,2	22,3	23,7	53,1	22,6	24,3	22,6	22,7	22,7
	L <sub>2</sub>	24,3	44,0	22,8	24,2	40,6	23,5	40,8	40,8	40,6
wiederkehrende Spannung	L <sub>3</sub>	22,6	24,0	43,6	22,5	24,2	38,1	30,5	33,6	26,9
	L <sub>1</sub>	14,0	13,7	13,9	13,9	13,9	13,9	13,8	13,9	13,8
	L <sub>2</sub>	14,1	14,0	14,0	14,2	14,2	14,3	14,2	14,2	14,2
Sicherung	Mittelwert	14,1	13,9	13,9	14,0	14,0	14,0	13,9	13,9	13,9
	Schmelzzeit	63,0	78,3	64,0	94,4	99,4	90,7			
	Schmelzintegral	7,71	9,10	7,66	9,39	9,57	9,17			
Lastschalter	Lichtbogenzeit	5,87	6,99	4,35	4,57	6,43	6,77			
	Löschintegral	0,666	0,574	0,645	0,543	0,650	0,663			
	Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung nach [5]	32,9	24,9	30,9	11,7	11,9	14,2			
Abschaltung durch	Öffnungszeit bei Auslöserbetätigung									
	Öffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung <sup>1)</sup>	68,6	74,8	66,9	71,6	76,3	70,7	72,7	72,9	72,7
	Leiter L <sub>1</sub>	Sicherung	Lastschalter	Lastschalter	Sicherung	Lastschalter	Lastschalter	Lastschalter		
Zusammenfassung für einen Strom von 317 A bis 349 A	Leiter L <sub>2</sub>	Lastschalter	Sicherung	Sicherung	Lastschalter	Sicherung	Lastschalter	Lastschalter		
	Leiter L <sub>3</sub>	Lastschalter	Sicherung	Sicherung	Lastschalter	Sicherung	Lastschalter	Lastschalter		
	Mittelwert	29,6 ms	4,16 ms	10,34 ms	19,2 ms	39,9 ms	39,9 ms			
Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung nach [5]	12,6 ms	1,39 ms	3,45 ms	9,1 ms	16,1 ms	16,1 ms				
Öffnungszeiten ab Schlagstiftbetätigung	71,5 ms	3,60 ms	6,71 ms	64,8 ms	78,2 ms	78,2 ms				

<sup>1)</sup> berechnet aus Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung, Schmelzzeit und Kennlinie Auslösezeit Schlagstift

**Tabelle 8A: Ermittlung der Öffnungszeiten der Lastschalter bei Schlagstiftbetätigung  
– Bemessungsspannung 12 kV, Hersteller B, Isolierung SF<sub>6</sub>**

Lastschalter	B											
	I					L <sub>3</sub> ca. 5 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>2</sub> (symmetrisch)						
Hersteller												
Charge												
U <sub>i</sub>	12											
I <sub>n</sub>	50											
Sicherung im Leiter	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>						
Zuschaltung												
Leistungsfaktor cos φ des Prüfkreises	0,24					0,23					0,25	
Ausschaltströme	L <sub>1</sub>	968	975	984	984	984	599	597	597	499	499	500
	L <sub>2</sub>	968	961	984	984	984	596	594	593	497	497	497
	L <sub>3</sub>	968	975	947	947	947	596	596	594	498	498	499
	Mittelwert	968	970	972	972	972	597	596	595	498	498	499
Schaltspannung	L <sub>1</sub>	20,1	11,4	11,5	11,5	11,5	21,0	11,1	11,2	11,3	11,3	11,4
	L <sub>2</sub>	11,7	17,9	11,5	11,5	11,5	17,5	19,2	11,3	20,7	20,7	20,8
	L <sub>3</sub>	11,4	11,8	15,2	15,2	15,2	11,5	11,2	18,2	14,2	11,9	12,2
	L <sub>1</sub>	7,06	7,08	7,08	7,08	7,08	6,98	6,96	6,96	7,02	7,01	7,01
	L <sub>2</sub>	7,07	7,10	7,10	7,10	7,10	7,04	7,01	7,00	7,06	7,06	7,06
	L <sub>3</sub>	7,01	7,05	7,05	7,05	7,05	6,97	6,95	6,94	7,00	6,99	7,00
	Mittelwert	7,05	7,08	7,08	7,08	7,08	7,00	6,97	6,97	7,03	7,02	7,02
Sicherung	Schmelzzeit	17,0	22,3	16,0	16,0	16,0	67,4	69,2	66,6			
	Schmelzintegral	15,9	17,9	15,7	15,7	15,7	24,2	23,0	23,8			
	Lichtbogenzeit	3,17	3,78	9,67	9,67	9,67	10,6	5,87	10,3			
	Löschintegral	2,88	3,84	2,80	2,80	2,80	2,29	1,46	1,91			
	Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung nach [5]	39,2	30,6	38,4	38,4	38,4	28,7	23,6	18,1			
Lastschalter												
	Öffnungszeit bei Auslöserbetätigung											
	Öffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung	27,3	28,2	28,7	28,7	28,7	36,7	29,9	27,3	43,2	42,9	43,1
Abschaltung durch	Leiter L <sub>1</sub>	Sicherung	Lastschalter	Lastschalter	Lastschalter	Sicherung	Sicherung	Lastschalter	Lastschalter			
	Leiter L <sub>2</sub>	Lastschalter	Sicherung	Sicherung	Sicherung	Lastschalter	Lastschalter	Sicherung	Sicherung			
	Leiter L <sub>3</sub>	Lastschalter	Lastschalter	Sicherung	Sicherung	Lastschalter	Lastschalter	Sicherung	Sicherung	Lastschalter		
Zusammenfassung für einen Strom von 596 A bis 970 A												
	Mittelwert	Standardabweichung	Unsicherheit	untere Grenze	obere Grenze							
bei 970 A	36,1 ms	4,75 ms	11,80 ms	24,3 ms	47,9 ms							
bei 596 A	23,5 ms	5,30 ms	13,17 ms	10,3 ms	36,6 ms							
<b>Öffnungszeiten ab Schlagstiftbetätigung</b>	<b>29,7 ms</b>	<b>3,57 ms</b>	<b>3,75 ms</b>	<b>25,9 ms</b>	<b>33,4 ms</b>							

**Tabelle 9A: Ermittlung der Öffnungszeiten der Lastschalter bei Schlagstiftbetätigung**  
 – Bemessungsspannung 24 kV, Hersteller D, Isolierung SF<sub>6</sub>

Lastschalter	D			I		
	Hersteller	Charge	U <sub>r</sub>	U <sub>r</sub>	I <sub>n</sub>	I <sub>n</sub>
Sicherung			kV	1 + 2	24	
Sicherung im Leiter			A	31,5		
Zuschaltung				L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>
Leistungsfaktor cos φ des Prüfkreises				L <sub>1</sub> ca. 4,5 ms nach L <sub>2</sub> und L <sub>3</sub> (symmetrisch)		
Ausschaltströme				0,23		
Schaltspannung						
wiederkehrende Spannung						
Sicherung						
Lastschalter						
Abschaltung durch						
<b>Zusammenfassung für einen Strom von 508 A</b>						
Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung nach [5]						
Öffnungszeiten ab Schlagstiftbetätigung						
) berechnet aus Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung, Schmelzzeit und Kenlinie Auslösezeit Schlagstift						

Osziogramm in Bild 15

Osziogramm in Bild 16

osziogramm

### A.3 Ausschaltversuche an Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen

**Tabelle 10.1A: Ausschaltversuche an der Lastschalter-Sicherungs-Kombination A/II-63 – Bemessungsspannung 12 kV – Isolierung offen in Luft**  
 – Lastschalter Hersteller A, Sicherungen Hersteller II  
 – Ausschaltstrom 399 A

Lastschalter	A											
	II											
Sicherung	12											
	63											
Leiter	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>
Zuschaltung	L <sub>3</sub> ca.5 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>2</sub> (symmetrisch)			L <sub>2</sub> ca.5 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>3</sub> (symmetrisch)			L <sub>1</sub> ca.5 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>2</sub> (symmetrisch)			L <sub>1</sub> ca.5 ms nach L <sub>2</sub> und L <sub>3</sub> (symmetrisch)		
Einzelwerte	399	399	398	400	399	399	400	399	399	400	400	400
Mittelwert	398,7			399,3			399,7			400,3		
Einzelwerte	15,5	12,4	22,0	14,3	17,4	20,2	18,8	22,0	19,3	19,1	18,8	17,9
Maximalwert	22,0			20,2			19,1			17,4		
Einzelwerte	6,96	7,01	6,99	6,96	7,02	7,03	6,97	7,03	7,03	6,97	7,05	7,02
Mittelwert	6,99			7,00			7,01			7,03		
geschmolzen	ja	nein	ja	nein	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja	ja
hat gelöscht	ja	nein	ja	nein	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja	ja
Stromfließdauer	396	395	338	365	369	336	357	336	356	390	335	384
Schmelzzeit	352	-	333	-	356	330	-	322	339	373	318	372
Schmelzintegral	55,8	-	52,8	-	55,8	52,1	-	51,4	54,4	57,5	50,5	58,0
Lichtbogenzeit	43,5	-	4,9	-	13,3	5,7	-	14,1	16,7	16,9	16,8	12,3
Löschintegral	2,14	-	0,87	-	1,08	1,09	-	1,45	1,31	1,35	1,72	0,90
Auslösung	ja	nein	ja	nein	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja	ja
Auslösezeit	L <sub>3</sub>			L <sub>3</sub>			L <sub>2</sub>			L <sub>3</sub>		
auslösender Schlagstift im Leiter												
1. Löserversuch nach Auslösung												
2. Löserversuch nach Auslösung												
Trennung ohne Last nach Auslös.				46,9			48,3					
Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung nach [5]												
Öffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung												
hat gelöscht	ja / nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Abschaltung durch Sicherung (Si) / Lastsch. (La)	Si-L <sub>1</sub>	Si	Si	Si-L <sub>2</sub>	Si	Si-L <sub>3</sub>	Si	Si-L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub>	Si	Si-L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub>	Si	Si
<b>Zusammenfassung für einen Strom von 399 A</b>												
100 %												
<b>Ausschaltanteile</b>												
Ausschaltung dreipolig durch Sicherungen												
<b>Ausschaltzeit</b>	Mittelwert	Standardabweichung		Unsicherheit		untere Grenze		obere Grenze				
<b>Auslösezeit Schlagstift Sicherung</b>	76,3 ms	2,44 ms		3,04 ms		73,3 ms		79,3 ms				
	30,8 ms	1,58 ms		2,51 ms		28,2 ms		33,3 ms				

) Sicherungen waren in Vorversuchen mit einem Strom von 530 A für eine Dauer von 103 ms beansprucht ohne das ein Ansprechen auftrat (keine Widerstandsänderung)



**Tabelle 10.3A: Ausschaltversuche an der Lastschalter-Sicherungs-Kombination A/II-63 – Bemessungsspannung 12 kV – Isolierung offen in Luft**  
 – Lastschalter Hersteller A, Sicherungen Hersteller II  
 – Ausschaltstrom 303 A

Lastschalter	A											
	II						63					
Sicherung	kV											
	A											
Leiter	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>
	L <sub>3</sub> ca.5 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>2</sub> (symmetrisch)			L <sub>1</sub> ca.5 ms nach L <sub>2</sub> und L <sub>3</sub> (symmetrisch)			L <sub>2</sub> ca.5 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>3</sub> (symmetrisch)			L <sub>3</sub> ca.5 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>2</sub> (symmetrisch)		
Ausschaltströme	301	300	301	305	303	304	304	303	304	304	303	304
Mittelwert	300,7			304,0			303,7			303,7		
Schaltspannung	15,1	13,9	18,5	22,4	18,6	21,3	17,4	11,3	22,5	23,4	19,2	12,7
Maximalwert	18,5			22,4			22,5			23,4		
wiederkehrende Spannung	6,90	7,12	6,97	6,97	7,21	7,03	6,97	7,20	7,01	6,96	7,20	7,02
	7,00			7,07			7,06			7,06		
geschmolzen	ja	nein	nein	nein	nein	ja	ja	nein	ja	ja	ja	nein
hat gelöscht	ja	nein	nein	nein	nein	ja	ja	nein	ja	ja	ja	nein
Stromflußdauer	760	826	821	778	782	775	804	798	760	748	784	778
Schmelzzeit	744	-	-	-	-	708	748	-	744	733	761	-
Schmelzintegral	67,7	-	-	-	-	66,3	70,1	-	69,5	68,4	69,8	-
Lichtbogenzeit	15,5	-	-	-	-	66,7	55,8	-	15,5	15,2	23,0	-
Löschintegral	1,37	-	-	-	-	2,58	1,91	-	1,27	1,38	1,40	-
Auslösung	ja	nein	nein	nein	nein	ja	ja	nein	ja	ja	ja	nein
Auslösezeit	749	-	-	-	-	713	-	-	749	738	-	-
auslösender Schlagstift im Leiter	L <sub>1</sub>			L <sub>3</sub>			L <sub>3</sub>			L <sub>1</sub>		
1. Lösversuch nach Auslösung	57,7			61,2						58,2		
2. Lösversuch nach Auslösung	67,5									68,0		
Trennung ohne Last nach Auslöb. ms										50,9		
Öffnungszeit bei Schlagstift-betätigung nach [5]	79,9			70,9						79,3		
Öffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung	77,2			70,6						77,4		
hat gelöscht	ja	nein	nein	ja	ja	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Sicherung (Si) / Lastsch. (La)	Si	La	La	La	La	Si	Si	Si-L <sub>1</sub>	Si	Si	Si-L <sub>2</sub>	Si

**Zusammenfassung für einen Strom von 303 A**

**Ausschaltanteile**

Ausschaltung dreipolig durch Sicherungen 40 %  
 Ausschaltung einpolig durch Sicherung und zweipolig durch Lastschalter 60 %

Ausschaltzeit	Mittelwert	Standardabweichung	Unsicherheit	untere Grenze	obere Grenze
Auslösezeit Schlagstift Sicherung	804 ms	20,8 ms	25,8 ms	778 ms	830 ms
Lastschalteröffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung	739 ms	15,1 ms	18,8 ms	720 ms	758 ms
	75,1 ms	3,87 ms	4,80 ms	70,3 ms	79,9 ms

Oszillogramm in Bild 19



**Tabelle 11.2A: Ausschaltversuche an der Lastschalter-Sicherungs-Kombination A/I-63 – Bemessungsspannung 12 kV – Isolierung offen in Luft**  
 – Lastschalter Hersteller A, Sicherungen Hersteller I  
 – Ausschaltstrom 666 A

Lastschalter	Hersteller	A						
		I						
Sicherung	Hersteller	KV	12			63		
			L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>
L <sub>3</sub> ca.5 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>2</sub> (symmetrisch)								
Zuschaltung	Einzelwerte	A	668	665	665	666	665	666
	Mittelwert	A	666,0					
Schaltspannung	Einzelwerte	KV	27,8	24,3	21,6	18,0	20,8	10,7
	Maximalwert	KV	27,8					
wiederkehrende Spannung	Einzelwerte	KV	6,95	7,02	6,97	6,93	6,99	6,98
	Mittelwert	KV	6,98					
Sicherung	geschmolzen hat gelöscht	ja / nein	ja	ja	ja	ja	nein	nein
	Stromflußdauer	ms	179	175	174	170	171	175
	Schmelzzeit	ms	172	171				
	Schmelzintegral	kA*s	76,5	74,3	75,7	75,6	74,7	75,6
	Lichtbogenzeit	ms	7,07	4,01				
	Löschintegral	kA*s	1,16	1,84				
Schlagstift Sicherung	Auslösung	ja / nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja
	Auslösezeit	ms	92,2					
Lastschalter	auslösender Schlagstift im Leiter		L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub> , L <sub>3</sub>					
	1. Lösversuch nach Auslösung	ms	59,5	65,8	62,7	58,5	55	61,7
	2. Lösversuch nach Auslösung	ms	69,5	76,0	72,7	68,5	64,7	71,6
	Trennung ohne Last nach Auslös.	ms	79,5		82,3			
	Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung nach [5]	ms	6,63					
Abschaltung durch	Öffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung	ms	87,4					
	hat gelöscht	ja / nein				ja	ja	ja
	Sicherung (Si) / Lastsch. (La)		Si-L <sub>1</sub> / La		La		La	
<b>Zusammenfassung für einen Strom von 666 A</b>								
<b>Ausschaltanteile</b>								
Ausschaltung einpolig durch Sicherung und zweipolig durch Sicherung und Lastschalter								
Ausschaltung dreipolig durch Lastschalter								
50 %								
50 %								
Ausschaltzeit	Mittelwert	Standardabweichung	Unsicherheit	untere Grenze	obere Grenze			
Auslösezeit Schlagstift Sicherung	177 ms	2,88 ms	25,9 ms	151 ms	203 ms			
Lastschalteröffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung	91,7 ms	3,70 ms	33,2 ms	58,5 ms	125 ms			
	83,2 ms	5,94 ms	53,4 ms	29,8 ms	137 ms			

**Bemerkungen**

Nach erster Ausschaltung wurden starke Abbrandspuren an den Seiten der Vorkontaktspitzen des Lastschalters festgestellt, die das einwandfreie Schließen des Lastschalters erschwerten. Die Spuren wurden vor dem zweiten Versuch weggeschliffen.

Nach der zweiten Ausschaltung wurden wieder gleiche Abbrandspuren festgestellt, die ebenfalls vor weiteren Versuchen beseitigt wurden.

**Tabelle 11.3A: Ausschaltversuche an der Lastschalter-Sicherungs-Kombination A/I-63 – Bemessungsspannung 12 kV – Isolierung offen in Luft**  
 – Lastschalter Hersteller A, Sicherungen Hersteller I  
 – Ausschaltstrom 349 A

Lastschalter	A		
	I	A	
Hersteller			
Hersteller			
U <sub>r</sub>	kV	12	
I <sub>n</sub>	A	63	
Zuschaltung		L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub> L <sub>3</sub>
		L <sub>3</sub> ca.5 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>2</sub> (symmetrisch)	
Ausschaltströme	A	350	349 348 350 349 348
Mittelwert	A	349,0	
Schaltspannung	kV	21,6	12,6 12,2 12,6 14,9 12,9
Maximalwert	kV	21,6 14,9	
wiederkehrende Spannung	kV	6,91	7,06 7,00 6,92 7,09 7,02
	kV	6,99 7,01	
geschmolzen	ja / nein	nein	nein nein nein nein
hat gelöscht	ja / nein	nein	nein nein nein nein
Stromflußdauer	ms	481	486 481 741 742 746
Schmelzzeit	ms		
Schmelzintegral	kA's		
Lichtbogenzeit	ms		
Löschintegral	kA's		
Schlagstift	ja / nein	nein	ja nein ja
Sicherung	ms	407	664 669
auslösender Schlagstift im Leiter		L <sub>2</sub>	L <sub>1</sub> , L <sub>3</sub>
1. Lösversuch nach Auslösung	ms	64,6	61,4 67,1 56,2 62,8 68,3
2. Lösversuch nach Auslösung	ms	71,2	65,3
Trennung ohne Last nach Auslös.	ms		
Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung nach [5]	ms		
Öffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung	ms	78,6	76,2
hat gelöscht	ja / nein	ja	ja ja ja ja ja ja
Abschaltung durch	Sicherung (Si) / Lastsch. (La)	La	La La La

**Zusammenfassung für einen Strom von 349 A**

Ausschaltanteile	Mittelwert	Standardabweichung	Unsicherheit	untere Grenze	obere Grenze
Ausschaltung dreipolig durch Lastschalter	100 %				
Ausschaltzeit	616 ms	184 ms			
Auslösezeit Schlagstift Sicherung	580 ms	150 ms	372 ms	208 ms	962 ms
Lastschalteröffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung	77,4 ms	1,70 ms	15,2 ms	62,2 ms	92,6 ms



**Tabelle 12.2A: Ausschaltversuche an der Lastschalter-Sicherungs-Kombination A/II-63 – Bemessungsspannung 12 kV – Isolierung offen in Luft**  
 – Lastschalter Hersteller A, 2 Sicherungen Hersteller I, 1 Sicherung Hersteller II  
 – Ausschaltstrom 623 A und 304 A

Lastschalter	Hersteller	A						
		I	II	I	I	II	I	
Sicherung	Hersteller							
	$U_r$	kV						12
Leiter	$I_n$	A						63
		L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	
Zuschaltung		L <sub>2</sub> ca.5 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>3</sub> (symmetrisch)						
Ausschaltströme	Einzelwerte	A	624	621	623	304	303	304
	Mittelwert	A	622,7					
Schaltspannung	Einzelwerte	kV	11,6	15,0	11,6	22,5	15,0	18,7
	Maximalwert	kV	15,0					
wiederkehrende Spannung	Einzelwerte	kV	6,99	7,07	7,00	6,97	7,18	7,01
	Mittelwert	kV	7,02					
Sicherung	geschmolzen		nein	ja	nein	nein	nein	nein
	hat gelöscht		ja / nein	ja	nein	nein	nein	nein
	Stromfließdauer	ms	169	106	169	717	722	722
	Schmelzzeit	ms	95,0					
	Schmelzintegral	kA <sup>2</sup> s	36,6					
	Lichtbogenzeit	ms	10,7					
	Löschintegral	kA <sup>2</sup> s	1,90					
	Auslösung	ja / nein	ja	ja	ja	nein	nein	ja
Schlagstift Sicherung	Auslösezeit	ms	103,2	100,0	103,2			643
	auslösender Schlagstift im Leiter		L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub> , L <sub>3</sub>					
Lastschalter	1. Lösversuch nach Auslösung	ms	56,5		56,5	55,0	62,0	57,8
	2. Lösversuch nach Auslösung	ms				64,1	71,8	68,3
	Trennung ohne Last nach Auslös.	ms						
	Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung nach [5]	ms	68,9					
	Öffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung	ms	65,7					
hat gelöscht	ja / nein	ja	nein	ja	ja	ja	ja	ja
Abschaltung durch	Sicherung (Si) / Lastsch. (La)		La			La		La
			Si					

**Tabelle 13.1A: Ausschaltversuche an der Lastschalter-Sicherungs-Kombination BI/I-50 – Bemessungsspannung 12 kV – Isolierung SF<sub>6</sub>**  
 – Lastschalter Hersteller B, Sicherungen Hersteller I  
 – Ausschaltstrom 602 A

Lastschalter	B											
	I					B						
Hersteller												
Hersteller												
Sicherung	KV											
U <sub>r</sub>	12											
I <sub>n</sub>	50											
Leiter	A											
Zuschaltung	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>
	L <sub>3</sub> ca. 4,8 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>2</sub> (symmetrisch)			L <sub>1</sub> ca. 4,8 ms nach L <sub>2</sub> und L <sub>3</sub> (symmetrisch)			L <sub>2</sub> ca. 4,8 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>3</sub> (symmetrisch)					
Ausschaltströme	604	601	602	604	601	602	604	601	602	604	601	601
Mittelwert	602,3			602,3			602,3			602,0		
Schaltspannung	KV			KV			KV			KV		
Einzelwerte	20,1	16,6	16,8	17,2	23,3	15,4	19,3	19,3	21,7	21,7	21,7	21,7
Maximalwert	20,1			23,3			23,3			21,7		
wiederkehrende Spannung	KV			KV			KV			KV		
Einzelwerte	5,94	7,04	6,95	6,93	7,00	6,99	6,94	7,01	6,96	6,97	6,97	6,97
Mittelwert	6,98			6,97			6,97			6,97		
geschmolzen hat gelöscht	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein	ja
Stromflußdauer	77,9	82,2	77,3	77,1	78,0	82,2	83,6	78,8	78,2	74,2	73,3	73,3
Schmelzzeit	71,6	76,6	70,5	71,0	74,8	77,6	74,2	-	73,3	-	-	26,5
Schmelzintegral	26,5	26,8	26,0	26,1	26,1	27,0	26,6	-	26,5	-	-	4,88
Lichtbogenzeit	6,33	5,58	6,84	6,14	3,21	4,61	9,35	-	4,88	-	-	1,33
Löschintegral	1,40	0,94	1,09	1,16	0,98	0,92	1,50	-	1,33	-	-	62,5
Auslösung	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Auslösezeit	55,6			61,2			62,5			62,5		
auslösender Schlagstift im Leiter	L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub> bzw. L <sub>3</sub>											
1. Lösversuch nach Auslösung	ms											
2. Lösversuch nach Auslösung	ms											
Trennung ohne Last nach Auslös.	ms											
Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung nach [5]	ms											
Öffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung	ms											
hat gelöscht	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Sicherung (Si) / Lastsch. (La)	Si	Si	Si-L <sub>2</sub> -L <sub>3</sub>	Si	Si	Si-L <sub>1</sub> -L <sub>3</sub>	Si-L <sub>1</sub>	Si	Si	Si-L <sub>1</sub>	Si	Si
<b>Zusammenfassung für einen Strom von 602 A</b>												
Ausschaltanteile												
Ausschaltung dreipolig durch Sicherungen												
100 %												
Ausschaltzeit	Mittelwert		Standardabweichung		Unsicherheit		untere Grenze		obere Grenze			
Auslösezeit Schlagstift Sicherung	82,6 ms	0,78 ms	1,94 ms	80,7 ms	84,6 ms	59,8 ms	3,67 ms	9,11 ms	50,7 ms	68,9 ms		

Osziogramm in Bild 21

**Tabelle 13.2A: Ausschaltversuche an der Lastschalter-Sicherungs-Kombination B/I-50 – Bemessungsspannung 12 kV – Isolierung SF<sub>6</sub>**  
 – Lastschalter Hersteller B, Sicherungen Hersteller I  
 – Ausschaltstrom 549 A

Lastschalter	B																
	I					L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub> bzw. L <sub>3</sub>											
Sicherung	Hersteller	U <sub>r</sub>	kV	I <sub>n</sub>	A	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>			
Zuschaltung						L <sub>3</sub> ca. 5,0 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>2</sub> (symmetrisch)	L <sub>1</sub> ca. 4,7 ms nach L <sub>2</sub> und L <sub>3</sub> (symmetrisch)	L <sub>2</sub> ca. 4,7 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>3</sub> (symmetrisch)	L <sub>1</sub> ca. 4,7 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>3</sub> (symmetrisch)	L <sub>2</sub> ca. 5,0 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>3</sub> (symmetrisch)	L <sub>3</sub> ca. 5,0 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>2</sub> (symmetrisch)	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>			
Ausschaltströme	Einzelwerte	A	549	547	547	550	547	548	550	546	548	552	549	551	553	550	552
	Mittelwert	A		547,7		548,3			548,0			550,7				551,7	
Schaltspannung	Einzelwerte	kV	16,6	22,9	13,1	18,8	15,9	21,1	23,3	13,9	19	20,6	21,2	12,6	19,4	17,7	20,1
	Maximalwert	kV				21,1			23,3			21,2				20,1	
wiederkehrende Spannung	Einzelwerte	kV	7,19	7,30	7,24	7,24	7,26	7,25	7,25	7,27	7,24	7,26	7,33	7,26	7,30	7,30	7,29
	Mittelwert	kV				7,24			7,25			7,28				7,30	
Sicherung	geschmolzen	ja / nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	teilw.	ja	ja	ja
	hat gelöscht	ja / nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Schlagstift Sicherung	Stromfußdauer	ms	100,9	95,3	95,9	94,8	99,4	95,3	94,8	94,7	99,5	91,1	94,3	89,4	98,8	95,7	93,7
	Schmelzzeit	ms	96,6	90,0	93,2	90,1	93,6	90,4	89,5	90,3	93,3	-	89,0	-	91,5	92,7	84,0
	Schmelzintegral	kA <sup>2</sup> s	33,20	25,60	27,70	27,00	27,00	25,90	26,00	26,60	27,20	-	25,70	-	27,70	26,80	25,30
	Lichtbogenzeit	ms	4,33	5,30	2,65	4,70	5,76	4,85	5,31	4,40	6,22	-	5,31	-	7,33	3,03	9,71
	Löschintegral	kA <sup>2</sup> s	1,18	1,36	0,489	0,950	1,14	1,17	1,52	0,892	1,15	-	1,11	-	1,41	0,612	1,48
Lastschalter	Auslösung	ja / nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
	Auslösezeit	ms	74,7				70,4		71,8		71,8	61,1					72,8
Abschaltung durch	auslösender Schlagstift im Leiter	ms				20,1						16,9	23,5	20,2			22,5
	1. Lösversuch nach Auslösung	ms															
	2. Lösversuch nach Auslösung	ms															
Ausschaltteilenteile	Trennung ohne Last nach Auslös.	ms															
	Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung nach [5]	ms															
	Öffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung	ms															
	hat gelöscht	ja / nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja					
Ausschaltzeit	Sicherung (Si) / Lastsch. (La)	ms				Si-L <sub>1</sub> -L <sub>3</sub>	Si-L <sub>1</sub> -L <sub>2</sub> / La	Si	Si	Si-L <sub>2</sub> -L <sub>3</sub>	La	Si-L <sub>2</sub> / La			Si-L <sub>1</sub> -L <sub>3</sub> / La		
	Standardabweichung	ms				2,52											
Auslösezeit Schlagstift Sicherung	Mittelwert	ms	98,6			70,2											
	obere Grenze	ms				5,30											
	untere Grenze	ms				63,6											
	Unsicherheit	ms				3,12											
	101,7 ms																
	76,7 ms																

Zusammenfassung für einen Strom von 549 A

- Ausschaltteilenteile
- Ausschaltung dreipolig durch Sicherungen 40 %
- Ausschaltung einpolig durch Sicherung und zweipolig durch Sicherung und Lastschalter 20 %
- Ausschaltung einpolig durch Sicherung und Lastschalter und zweipolig durch Sicherung und Lastschalter 20 %
- Ausschaltung einpolig durch Lastschalter und zweipolig durch Sicherung und Lastschalter 20 %

**Tabelle 13.3A: Ausschaltversuche an der Lastschalter-Sicherungs-Kombination B/I-50 – Bemessungsspannung 12 kV – Isolierung SF<sub>6</sub>**  
 – Lastschalter Hersteller B, Sicherungen Hersteller I  
 – Ausschaltstrom 502 A

Lastschalter	Hersteller B														
	I					12									
Sicherung	KV														
Leiter	A														
Zuschaltung	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>			
	L <sub>3</sub> ca. 4,9 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>2</sub> (symmetrisch)						L <sub>2</sub> ca. 4,9 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>3</sub> (symmetrisch)								
Ausschaltströme	502	500	501	504	502	503	504	502	502	504	501	502	503	500	501
Mittelwert	501,0						503,0						502,3		501,3
Schaltspannung	20,5	11,8	11,1	11,2	20,6	11,8	18	12,8	20,8	20,7	15,1	11,3	11,3	20,5	11,9
Maximalwert	20,5						20,6						20,7		20,5
wiederkehrende Spannung	7,09	7,16	7,10	7,11	7,19	7,12	7,14	7,21	7,15	7,11	7,18	7,12	7,14	7,21	7,14
Mittelwert	7,12						7,14						7,14		7,16
geschmolzen hat geüßcht	teilw.	nein	teilw.	nein	nein	nein	ja	nein	nein	nein	nein	ja	ja	nein	ja
Stromflußdauer	111	116	111	103	98	98	111	111	116	108	108	112	119	109	119
Schmelzzeit	-	-	-	-	-	-	111	-	-	-	-	112	119	-	119
Schmelzintegral	-	-	-	-	-	-	28,0	-	-	-	-	28,0	29,6	-	29,1
Lichtbogenzeit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Löschintegral	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Auslösung	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Auslösezeit	87,9			74,3					81,9	77,6		77,6	91,3		91,3
auslösender Schlagstift im Leiter	L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub> bzw. L <sub>3</sub>														
1. Lösversuch nach Auslösung		16,5				17,1	19,6	15,7	22,4	17,2	23,6	19,3			
2. Lösversuch nach Auslösung															
Trennung ohne Last nach Auslös.	ms														
Öffnungszeit bei Schlagstift-	ms														
betätigung nach [5]															
Öffnungszeit ab	ms	28,1			28,7				34,1			34,4		27,7	
Schlagstiftbetätigung	ja / nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
hat geüßcht	La	La	La	La	La	La	La	La	La	La	La	La	La	La	La
Abschaltung durch	Sicherung (Si) / Lastsch. (La)														
<b>Zusammenfassung für einen Strom von 502 A</b>															
<b>Ausschaltanteile</b>															
Ausschaltung dreipolig durch Lastschalter															
100 %															
<b>Ausschaltzeit</b>	Mittelwert	Standardabweichung					Unsicherheit	untere Grenze					obere Grenze		
<b>Auslösezeit Schlagstift Sicherung</b>	113,2 ms	6,22 ms					7,72 ms	105,5 ms					120,9 ms		
<b>Lastschalteröffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung</b>	82,6 ms	7,04 ms					8,74 ms	73,9 ms					91,3 ms		
	30,6 ms	3,35 ms					4,16 ms	26,4 ms					34,8 ms		

**Tabelle 13.4A: Ausschaltversuche an der Lastschalter-Sicherungs-Kombination B/I-50 – Bemessungsspannung 12 kV – Isolierung SF<sub>6</sub>**  
 – Lastschalter Hersteller B, Sicherungen Hersteller I  
 – Ausschaltstrom 443 A

Lastschalter	Hersteller	B																	
		I					L1					L2							
		U <sub>J</sub>	U <sub>N</sub>	U <sub>J</sub>	U <sub>N</sub>	U <sub>J</sub>	U <sub>N</sub>	U <sub>J</sub>	U <sub>N</sub>	U <sub>J</sub>	U <sub>N</sub>	U <sub>J</sub>	U <sub>N</sub>	U <sub>J</sub>	U <sub>N</sub>	U <sub>J</sub>	U <sub>N</sub>		
Sicherung		12																	
Leiter		50																	
Zuschaltung		L <sub>1</sub> ca. 4,9 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>2</sub> nach L <sub>1</sub> und L <sub>3</sub> (symmetrisch)																	
Ausschaltströme	Einzelwerte	442	441	439	443	442	441	441	443	443	443	443	444	444	444	446	445	444	
	Mittelwert	440,7																	
Schaltspannung	Einzelwerte	11,5	20,2	11,2	20,4	11,2	11,3	20,2	20,4	11,9	20,3	11,9	11,6	20,4	11,3	20,4	20,4	11,4	
	Maximalwert	20,4																	
wiederkehrende Spannung	Einzelwerte	7,00	7,05	7,05	7,04	7,11	7,07	7,05	7,09	7,10	7,05	7,12	7,09	7,06	7,15	7,11	7,11	7,11	
	Mittelwert	7,03																	
Sicherung	geschmolzen hat gelöscht	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	
	Stromflußdauer	133	133	133	141	141	146	138	138	143	131	136	131	141	141	141	146		
	Schmelzzeit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	Schmelzintegral	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	Lichtbogenzeit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	Löschintegral	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Schlagstift	Auslösung	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja		
Sicherung	Auslösezeit	113																	
	auslösender Schlagstift im Leiter	L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub> bzw. L <sub>3</sub>																	
	1. Lösversuch nach Auslösung						21,7	17,9	23,8	21		19,5	18,6				22,7		
	2. Lösversuch nach Auslösung																		
	Trennung ohne Last nach Auslös.																		
Lastschalter	Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung nach [5]																		
	Öffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung																		
	hat gelöscht	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja		
Abschaltung durch	Sicherung (Si) / Lastsch. (La)		La																
<b>Zusammenfassung für einen Strom von 443 A</b>																			
Ausschaltanteile																			
Ausschaltung dreipolig durch Lastschalter																			
100 %																			
Ausschaltzeit	Mittelwert	140,8 ms					5,97 ms					7,42 ms					148,2 ms		
Auslösezeit Schlagstift Sicherung		108,0 ms					3,45 ms					5,50 ms					113,5 ms		
Lastschalteröffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung		34,8 ms					3,50 ms					5,57 ms					40,3 ms		

**Tabelle 14.1A: Ausschaltversuche an der Lastschalter-Sicherungs-Kombination C/I-31,5 – Bemessungsspannung 24 kV – Isolierung offen in Luft**  
 – Lastschalter Hersteller C, Sicherungen Hersteller I  
 – Ausschaltstrom 355 A

	C																				
	I																				
	24																				
Lastschalter	Hersteller	Hersteller	kV	31,5									L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>						
				L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>									
L <sub>3</sub> ca. 5,0 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>2</sub> (symmetrisch)																					
Ausschaltströme	Einzelwerte	A	355	353	355	354	353	354	355	354	355	356	354	356	354	356					
	Mittelwert	A	354,3	353,7	354,7	355,3	354,3	355,3	354,3	355,3	354,3	355,3	354,3	355,3	354,3	355,3					
Schaltspannung	Einzelwerte	kV	48,8	43,6	24,0	42,5	38,8	46,7	41,4	47,1	28,2	45,4	45,3	36,8	46,2	39,7					
	Maximalwert	kV	48,8	46,7	47,1	47,1	46,7	47,1	47,1	47,1	47,1	47,1	45,4	45,4	46,2	46,2					
wiederkehrende Spannung	Einzelwerte	kV	14,3	14,2	14,1	14,3	14,2	14,1	14,4	14,3	14,1	14,4	14,3	14,1	14,4	14,3					
	Mittelwert	kV	14,2	14,2	14,3	14,3	14,2	14,1	14,4	14,3	14,1	14,4	14,3	14,1	14,4	14,3					
Sicherung	geschmolzen	ja / nein	ja	ja	ja	ja	teilw.	ja	nein												
	hat gelöscht	ja / nein	ja	ja	nein	ja	nein	ja	ja	ja	nein	ja	ja	nein	ja	ja					
	Stromflußdauer	ms	75,4	75,3	74,9	77,4	77,7	67,9	79,9	75,6	74,9	69,6	74,3	69,4	69,1	74,3					
	Schmelzeit	ms	70,9	69,7	-	67,6	-	64,8	68,2	71,0	-	65,9	68,3	-	64,5	67,6					
	Schmelzintegral	kA <sup>2</sup> s	8,34	8,24	-	8,59	-	8,13	8,80	8,38	-	8,27	8,25	-	7,98	8,24					
	Lichtbogenzeit	ms	4,49	5,64	-	9,83	-	3,14	11,7	4,58	-	3,71	5,98	-	4,61	6,68					
Schlagstift Sicherung	Löschintegral	kA <sup>2</sup> s	0,551	0,656	-	0,897	-	0,402	0,706	0,670	-	0,579	0,594	-	0,677	0,589					
	Auslösezeit )	ms	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja					
Lastschalter	auslösender Schlagstift im Leiter	ms	32,8	28,1	29,2	31,1	29,2	31,1	29,2	31,1	29,2	31,1	29,2	31,1	29,2	31,1					
	1. Lösversuch nach Auslösung	ms	L <sub>1</sub> bzw. L <sub>2</sub>																		
	2. Lösversuch nach Auslösung	ms	L <sub>1</sub> bzw. L <sub>2</sub>																		
	Trennung ohne Last nach Auslös.	ms	L <sub>1</sub> bzw. L <sub>2</sub>																		
	Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung nach [5]	ms	L <sub>1</sub> bzw. L <sub>2</sub>																		
	Öffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung	ms	L <sub>1</sub> bzw. L <sub>2</sub>																		
Abschaltung durch Sicherung (Si) / Lastsch. (La)	hat gelöscht	ja / nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein					
	Sicherung (Si) / Lastsch. (La)	Si / L <sub>1</sub>	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si					
<b>Zusammenfassung für einen Strom von 355 A</b>																					
Ausschaltanteile																					
Ausschaltung dreipolig durch Sicherungen																					
100 %																					
Ausschaltzeit	Mittelwert	76,3 ms	Standardabweichung													Unsicherheit		untere Grenze		obere Grenze	
	Auslösezeit Schlagstift Sicherung	30,8 ms	2,44 ms													3,04 ms		73,3 ms		79,3 ms	
1,58 ms																					
2,51 ms																					
28,2 ms																					
33,3 ms																					

Oszillogramm in Bild 20

**Tabelle 14.2A: Ausschaltversuche an der Lastschalter-Sicherungs-Kombination C/I-31,5 – Bemessungsspannung 24 kV – Isolierung offen in Luft**  
 – Lastschalter Hersteller C, Sicherungen Hersteller I  
 – Ausschaltstrom 318 A

Lastschalter	Hersteller	C												
		I												
		24												
Sicherung	U <sub>n</sub>	31,5												
Leiter	U <sub>n</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	
Zuschaltung		L <sub>1</sub> ca. 5,0 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>2</sub> ca. 5,0 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>3</sub> ca. 5,0 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>3</sub> (symmetrisch)												
Ausschaltströme	A	319	317	319	319	317	319	320	318	320	316	315	316	L <sub>1</sub> ca. 4,2 ms nach L <sub>2</sub> und L <sub>3</sub> (symmetrisch)
Schaltspannung	kV	33,8	25	22,9	58,3	34,2	40,6	38,5	26,5	43,7	23,3	41,3	25,4	316,3
wiederkehrende Spannung	kV	14,2	14,2	14,0	14,2	14,2	14,1	14,3	14,2	14,1	14,2	14,1	13,9	39,2
Sicherung	geschmolzen	ja	nein	nein	ja	teilw.	nein	ja						
	hat gelöscht	ja	nein	nein	nein	nein	nein	ja	nein	ja	nein	nein	nein	ja
	Stromflußdauer	ms	89,1	106,0	102,0	97,9	107,0	104,4	99,5	98,9	103,0	98,2	98,0	107,9
	Schmelzzeit	ms	83,6	-	-	90,6	101,0	98,2	95,7	-	91,7	-	-	101,0
	Schmelzintegral	kA <sup>2</sup> s	8,34	-	-	9,31	10,20	9,75	9,69	-	9,39	-	-	10,20
	Lichtbogenzeit	ms	5,50	-	-	-	-	8,70	-	7,17	-	-	-	6,85
	Löschintegral	kA <sup>2</sup> s	0,593	-	-	-	-	0,568	-	0,599	-	-	-	0,574
Schlagsstift Sicherung	ja / nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Auslösezeit	ms	34,8	-	-	-	-	31,7	35,0	35,0	35,0	30,6	36,4	36,4	
Lastschalter	auslösender Schlagsstift im Leiter	L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub> bzw. L <sub>3</sub>												
	1. Löserversuch nach Auslösung	ms	58,4	58,4	58,4	59,8	56,5	63,2	59,1	56,5	57,9	61,1	61,1	L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub> bzw. L <sub>3</sub>
	2. Löserversuch nach Auslösung	ms	-	-	-	65,4	65,9	63,3	-	-	-	-	-	61,4
	Trennung ohne Last nach Auslös.	ms	-	-	-	70,8	-	-	-	-	-	-	-	57,9
	Öffnungszeit bei Schlagsstiftbetätigung nach [5]	ms	22,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	61,1
	Öffnungszeit ab Schlagsstiftbetätigung	ms	68,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	67,3
Abschaltung durch	ja / nein	nein	ja											
Sicherung (Si) / Lastsch. (La)	Si	La	La	La	Si / La	Si / La	Si / La	Si / La	Si / La	Si	Si	La	La	Si / La

**Zusammenfassung für einen Strom von 318 A**

Ausschaltanteile	Mittelwert	Standardabweichung	Unsicherheit	untere Grenze	obere Grenze
Ausschaltung einpolig durch Sicherung und zweipolig durch Sicherung und Lastschalter	107,9 ms	6,40 ms	7,95 ms	99,9 ms	115,8 ms
Ausschaltung einpolig durch Sicherung und zweipolig durch Lastschalter	32,9 ms	3,70 ms	4,59 ms	28,3 ms	37,5 ms
Ausschaltung einpolig durch Sicherung und Lastschalter und zweipolig durch Sicherung und Lastschalter	69,9 ms	4,33 ms	5,38 ms	64,5 ms	75,3 ms
Ausschaltung dreipolig durch Lastschalter	-	-	-	-	-

**Tabelle 14.3A: Ausschaltversuche an der Lastschalter-Sicherungs-Kombination C/I-31,5 – Bemessungsspannung 24 kV – Isolierung offen in Luft**  
 – Lastschalter Hersteller C, Sicherungen Hersteller I  
 – Ausschaltstrom 276 A

Lastschalter	Hersteller	C								
		I								
Sicherung	KV	24								
		31,5								
Leiter	A	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>
Zuschaltung		L <sub>3</sub> ca. 5,0 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>2</sub> (symmetrisch)			L <sub>2</sub> ca. 5,0 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>3</sub> (symmetrisch)					
Ausschaltströme	Einzelwerte	277	275	277	277	275	277	276	275	276
	Mittelwert	276,3								
Schaltspannung	Einzelwerte	28,1	42,4	31,7	25,7	24,3	42,8	46,6	43,2	41,3
	Maximalwert	42,8								
wiederkehrende Spannung	Einzelwerte	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,1	14,0
	Mittelwert	14,0								
Sicherung	geschmolzen	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
	hat gelöscht	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
	Stromflußdauer	133	128	128	118	123	118	140	130	140
	Schmelzzeit	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Schmelzintegral	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Lichtbogenzeit	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlagstift Sicherung	Löschintegral	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Auslösung	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Lastschalter	Auslösezeit	58,0								
	auslösender Schlagstift im Leiter	L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub> bzw. L <sub>3</sub>								
Sicherung	1. Lösversuch nach Auslösung	60,7	57,3	64,0	56,6	63,4	60,0	57,8	64,3	61,0
	2. Lösversuch nach Auslösung				66,7			67,6		70,9
	Trennung ohne Last nach Auslös.									
	Öffnungszeit bei Schlagstift-									
	betätigung nach [5]									
	Öffnungszeit ab									
Abschaltung durch	Schlagstiftbetätigung	72,0								
	hat gelöscht	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Sicherung (Si) / Lastsch. (La)		La	La	La	La	La	La	La	La	La
		La	La	La	La	La	La	La	La	La

**Zusammenfassung für einen Strom von 276 A**

<b>Ausschaltanteile</b>		100 %	
Ausschaltung dreipolig durch Lastschalter			
<b>Ausschaltzeit</b>	Mittelwert	Standardabweichung	Unsicherheit
<b>Auslösezeit Schlagstift Sicherung</b>	131,6 ms	7,02 ms	8,72 ms
<b>Lastschalteröffnungszeit ab Schlagstiftbetätigung</b>	54,4 ms	5,44 ms	6,76 ms
	74,2 ms	3,53 ms	4,38 ms
		untere Grenze	obere Grenze
		122,9 ms	140,3 ms
		47,6 ms	61,1 ms
		69,9 ms	78,6 ms

**Tabelle 15.1A: Ausschaltversuche an der Lastschalter-Sicherungs-Kombination D/I-31,5 – Bemessungsspannung 24 kV – Isolierung SF<sub>6</sub>**  
 – Lastschalter Hersteller D, Sicherungen Hersteller I  
 – Ausschaltstrom ein Leiter 641 A und die beiden anderen 441 A bzw. 404 A

Lastschalter	D																			
	I																			
Sicherung	24																			
	31,5																			
Leiter	alle 3 Pole gleichzeitig																			
	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>								
Hersteller																				
Hersteller																				
U <sub>r</sub>	KV																			
I <sub>n</sub>	A																			
Zuschaltung																				
Ausschaltströme	Einzelwerte	640	397	441	641	411	436	642	406	430	638	402	466	646	437	412	437	642	399	435
	Mittelwert																			
Schaltspannung	Einzelwerte	41,4	21,6	44,4	41,2	23,2	22,9	42,4	26,2	41,8	38,8	34,2	44,2	41	40,8	47,8	38,6	22,7	36,4	
	Maximalwert																			
wiederkehrende Spannung	Einzelwerte	18,8	14,1	13,8	13,7	14,1	13,7	13,7	14,1	13,7	13,6	14	13,6	13,7	14,1	13,7	13,7	14,1	13,7	
	Mittelwert																			
Sicherung <sup>1)</sup>	geschmolzen	ja	nein	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja	ja	nein	ja	ja	nein	ja	ja	ja	nein	ja
	hat gelöscht	ja		ja	ja	nein	nein	ja	ja	ja	ja	nein	ja	ja	nein	nein	ja	ja	ja	ja
	Stromfließdauer	19,9	46,0	46,0	20,0	37,5	37,5	20,0	46,9	46,9	20,8	25,1	25,1	20,0	37,3	37,3	20,2	46,3	46,3	
	Schmelzeit	9,90	-	35,8	10,4	-	36,3	10,3	46,8	37,9	9,96	-	15,6	10,1	-	35,6	10,5	-	35,5	
	Schmelzintegral	4,05	-	6,96	4,27	-	6,89	4,24	7,70	7,02	4,05	-	3,39	4,21	-	6,79	4,33	-	6,71	
	Lichtbogenzeit	10,0	-	10,2	9,64	-	-	9,74	-	9,19	10,8	-	9,55	9,91	-	9,74	-	-	10,9	
	Löschintegral	1,52	-	0,924	1,26	-	-	1,33	-	1,09	1,38	-	0,802	1,34	-	1,22	-	-	1,03	
Schlagstift	Auslösung	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
Lastschalter	auslösender Schlagstift im Leiter	L <sub>1</sub>																		
	1. Lösversuch nach Auslösung	ms	35,7	35,7					38,7	38,7									38,6	38,6
	2. Lösversuch nach Auslösung	ms																		
	Trennung ohne Last nach Auslös.	ms																		
	Öffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung nach [5]	ms	35,7																	
Abschaltung durch	hat gelöscht	ja / nein	nein	nein	nein	ja	ja	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja	ja	nein	nein	nein	
	Sicherung (Si) / Lastsch. (La)	Si	Si-L <sub>3</sub> / La	Si	La	La	La	Si	Si-L <sub>3</sub> / La	Si	Si	Si-L <sub>3</sub>	Si	Si	La	La	Si	Si	Si-L <sub>3</sub> / La	
<b>Zusammenfassung für einen Strom von 641 A in einem Leiter und 441 A bzw. 404 A in den anderen Leitern</b>																				
<b>Ausschaltanteile</b>																				
Ausschaltung dreipolig durch Sicherungen																				
Ausschaltung einpolig durch Sicherung und zweipolig durch Sicherung und Lastschalter																				
Ausschaltung einpolig durch Sicherung und zweipolig durch Lastschalter																				
17 % 50 % 33 %																				
<b>Ausschaltzeit</b>	Mittelwert	40,4 ms																		
	Standardabweichung	8,36 ms																		
	Unsicherheit	8,78 ms																		
	untere Grenze	31,6 ms																		
	obere Grenze	49,2 ms																		

**Tabelle 15.2A: Ausschaltversuche an der Lastschalter-Sicherungs-Kombination D/I-31,5 – Bemessungsspannung 24 kV – Isolierung SF<sub>6</sub>**  
 – Lastschalter Hersteller D, Sicherungen Hersteller I  
 – Ausschaltstrom ein Leiter 364 A

Lastschalter	D																					
	I																					
Sicherung	24																					
	31,5																					
Leiter	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>							
Zuschaltung	alle 3 Pole gleichzeitig																					
Ausschaltströme	alle 3 Pole gleichzeitig																					
Schaltspannung	alle 3 Pole gleichzeitig																					
wiederkehrende Spannung	alle 3 Pole gleichzeitig																					
Sicherung	alle 3 Pole gleichzeitig																					
Schlagstift	alle 3 Pole gleichzeitig																					
Sicherung	alle 3 Pole gleichzeitig																					
Lastschalter	alle 3 Pole gleichzeitig																					
Abschaltung durch	alle 3 Pole gleichzeitig																					
Hersteller	D																					
Hersteller	I																					
U <sub>r</sub>	kV																					
I <sub>n</sub>	A																					
Einzelwerte	368	365	367	366	364	366	365	364	365	364	364	365	364	363	364	365	364	366				
Mittelwert	366,7			365,3			364,7			364,3			361,7			363,7						
Maximalwert	40,2	23,9	26,6	22,6	35,6	40,4	40,3	24,5	31,5	28	40,1	36,2	32,4	39,8	23,2	39,3	30,1	35,6	22,7	30,8	40,5	
Einzelwerte	13,8	14,1	13,8	13,7	14,1	13,8	13,7	14,1	13,7	13,7	14,1	13,7	13,7	14	13,7	13,7	14	13,7	13,7	14,1	13,8	
Mittelwert	13,9			13,9			13,8			13,8			13,8			13,8						
geschmolzen	teilw.	nein	nein	nein	ja	nein	nein	nein	teilw.	ja	ja	ja	nein	nein	nein	teilw.	nein	nein	ja	ja	nein	ja
hat gelöscht	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein												
Stromflußdauer	43,1	48,8	48,8	52,0	51,2	47,3	47,1	52,0	52,0	68,0	60,0	60,3	59,6	49,7	59,6	59,7	67,6	67,6	61,6	66,2	61,4	
Schmelzzeit	-	-	-	-	51,2	-	-	-	-	-	60,0	-	-	-	-	-	-	58,6	-	-	-	
Schmelzintegral	-	-	-	-	7,83	-	-	-	-	-	8,05	-	-	-	-	-	-	7,96	-	-	-	
Lichtbogenzeit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,97	-	-	-	-	-	-	9,11	-	-	-	
Löschintegral	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,571	-	-	-	-	-	-	0,670	-	-	-	
Auslösung	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
auslösender Schlagstift im Leiter																						
1. Löschversuch nach Auslösung	37,6	40,7	40,9	44,1	37,4	40,8	43,8	58	61,7	54,9	51,4	44,9	48,1	54,8	58,2	61,5	54,7	58,3				
2. Löschversuch nach Auslösung																						
Trennung ohne Last nach Auslös.																						
Öffnungszeit bei Schlagstift-betätigung nach [5]																						
hat gelöscht	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja													
Sicherung (Si) / Lastsch. (La)	La	La	La	La	La	La	La	La	La	Si-L <sub>2</sub> / La	La	La	La	La	Si-L <sub>3</sub> / La	La	La	La	La	La	La	

**Zusammenfassung für einen Strom von 364 A**

**Ausschaltanteile**  
 Ausschaltung einpolig durch Lastschalter und zweipolig durch Lastschalter und Sicherung 29 %  
 Ausschaltung dreipolig durch Lastschalter 71 %

<b>Ausschaltzeit</b>	Mittelwert	59,2 ms	Standardabweichung	8,26 ms	Unsicherheit	7,64 ms	untere Grenze	51,5 ms	obere Grenze	66,8 ms

**Tabelle 15.3A: Ausschaltversuche an der Lastschalter-Sicherungs-Kombination D/I-31,5 – Bemessungsspannung 24 kV – Isolierung SF<sub>6</sub>**  
 – Lastschalter Hersteller D, Sicherungen Hersteller I  
 – Ausschaltstrom ein Leiter 329 A

Lastschalter	D												
	I												
Sicherung	24												
Leiter	31,5												
Zuschaltung	L <sub>3</sub> ca. 4,4 ms nach L <sub>1</sub> und L <sub>2</sub> (symmetrisch)												
Ausschaltströme	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	
Einzelwerte	329	329	330	329	328	329	329	328	329	329	328	329	
Mittelwert	329,3												
Einzelwerte	22,4	39,1	22,5	38,6	23,8	23,5	38,8	23,8	23,4	22,6	29	39,4	
Maximalwert	39,1												
Einzelwerte	13,7	14,0	13,7	13,7	14,0	13,7	13,7	14,0	13,7	13,7	14,0	13,7	
Mittelwert	13,8												
geschmolzen	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	
hat gelöscht	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	
Stromfließdauer	75,7	71,2	71,5	67,8	72,6	68,3	68,0	72,6	68,2	69,4	69,4	60,1	
Schmelzeit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Schmelzintegral	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Lichtbogenzeit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Löschintegral	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Schlagstift Sicherung	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
auslösender Schlagstift im Leiter													
1. Lösversuch nach Auslösung	67,7		64,5		61,2	64,7	57,9	61,2	64,4	58,0	61,3	54,8	
2. Lösversuch nach Auslösung													
Trennung ohne Last nach Auslös.													
Öffnungszeit bei Schlagstift- betätigung nach [5]													
hat gelöscht	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
Sicherung (Si) / Lastsch. (La)				La		La							
<b>Zusammenfassung für einen Strom von 329 A</b>													
Ausschaltanteile													
Ausschaltung dreipolig durch Lastschalter													
100 %													
Ausschaltzeit													
				Mittelwert	Standardabweichung				Unsicherheit		untere Grenze		obere Grenze
				72,6 ms	2,23 ms				2,06 ms		70,5 ms		74,7 ms

 Oszillogramm in Bild 22