




Leistungsabgabe von NH-Sicherungen bei hohen Frequenzen

Abschlussbericht 	Datum: 21.12.2010
	Version: V4.1
	Status: abgeschlossen 
Kunde: NH/HH-Recycling e. V.	Bearbeiter: Michael Hausmann
Projekt: Sicherung	Email: Michael.Hausmann@ohm-hochschule.de
Auftr. Nr. 080225	Tel.: +49(911)5880-1815

Verteiler:



Name	Firma	Abteilung	Email	Telefon
Bessei Herbert	FuseXpert		Herbert.Bessei@t-online.de	+49 (671) 9201164
Graß Norbert	ELSYS	Fakultät efi	Norbert.Graß@ohm-hochschule.de	+49 (911)58801392

Inhalt:

1. Ausgangssituation	2
2. Theoretische Betrachtungen der Stromverdrängung in der Sicherung	3
2.1. Der Skin-Effekt	3
2.2. Der Proximity-Effekt	5
2.3. Einfluss der parallelen Schmelzleiteranordnung auf die Wärmeableitfähigkeit der Sicherung.....	8
3. Durchgeführte Messreihen	10
3.1. Beschreibung des Versuchsaufbaus.....	10
3.2. Versuchsdurchführung bei Belastung der Sicherung mit Nennstrom	12
3.2.1. Vergleichsmessungen von Jean Müller	13
3.2.2. Messungen ELSYS	16
3.3. Versuchsdurchführung bei Belastung der Sicherung mit 1,6 fachen Nennstrom.....	18
3.4. Versuchsdurchführung bei Belastung der Sicherung mit dem 2,5-fachen Nennstrom.....	20
4. Auswertung der Messergebnisse	21
5. Zusammenfassung	32
6. Formelzeichen	33
7. Tabellenverzeichnis	33
8. Abbildungsverzeichnis	34
9. Literaturverzeichnis	36
10. Anhang A.....	36

1. Ausgangssituation

Die charakteristischen Eigenschaften von NH-Sicherungen werden üblicherweise für den in Stromversorgungsnetzen üblichen Frequenzbereich von 50 und 60 Hz angegeben. Grundlage für die Definition der Sicherungseigenschaften und deren Nachweis ist die Internationale Norm IEC 60269. Der vermehrte Einsatz von Betriebsmitteln mit nichtsinusförmiger Stromaufnahme (z. B. Netzteile mit ungesteuerten Brückengleichrichtern) führt in den Netzen heute zu entsprechend hohen Oberschwingungsanteilen in den Strömen. Es kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass die bei Netzfrequenz ermittelten, für die Anwendungen wichtigen technischen Daten, wie:

- Zeit/Strom-Kennlinie,
- Leistungsabgabe und
- Schaltvermögen

auch bei höheren Frequenzen unverändert gelten. Durch Stromverdrängungseffekte (Skineneffekt, Proximityeffekt) ist eine Widerstandserhöhung und damit einhergehende Verlagerung der Schmelzzeit-Kennlinien und Erhöhung der Leistungsabgabe der Sicherung zu erwarten. Die nach dem Schalten der Sicherung schneller ansteigende wiederkehrende Spannung kann Wiederzündungen hervorrufen und die Lichtbogendauer verlängern, was wiederum das Ausschaltvermögen der Sicherung beeinflussen kann. In Fachkreisen geht man deshalb davon aus, dass bei höheren Frequenzen Reduktionsfaktoren für Dauerbetriebsströme zu berücksichtigen sind und sich das Schaltverhalten dem Gleichstromschaltverhalten nähert. Verlässliche Anwendungsrichtlinien für den Einsatz von Normsicherungen für Anwendungen in Wechselstromkreisen mit höheren Frequenzen gibt es bisher jedoch nicht. Eine diesbezügliche Ergänzung der Anwendungsrichtlinie IEC 60269-5 ist derzeit noch nicht vorhanden

In der durchgeführten Untersuchung wurde das Verhalten von Sicherungen mit parallel angeordneten Schmelzleitern näher betrachtet. Dabei kann angenommen werden, dass ein Schmelzleiter für eine Strombelastung von 100 A ausgelegt ist und für die Sicherungen mit höherem Nennstrom mehrere Schmelzleiter parallel angeordnet wurden. Bei der Untersuchung wurden Sicherungen mit 1, 2, 3 und 4 identischen parallelen Schmelzleitern untersucht. Bei den untersuchten Sicherungen ist anzumerken, dass nur der Einfluss eines höheren Stromflusses auf parallele Schmelzleiter untersucht werden sollte. Der Aufbau der Testsicherungen unterscheidet sich jedoch von dem Aufbau von Normsicherungen, bei denen die Schmelzleiter bei Parallelschaltung anders dimensioniert sind. So erwärmt sich die Sicherung mit den parallel angeordneten Schmelzleitern anders (siehe Abbildung 8 und Abbildung 9) als entsprechende Normsicherungen. Die durch den elektrischen Widerstand des Schmelzleiters hervorgerufene Erwärmung in den mittleren Leitern kann nicht hinreichend abgeführt werden. Somit erwärmt sich der mittlere Schmelzleiter der Sicherung stärker als ein äußerer Leiter. Dieser Effekt wird in der nachfolgenden Untersuchung im Punkt 2.3 noch genauer betrachtet werden. In der nachfolgenden Untersuchung wurde gezielt der Einfluss von höherfrequenten Strömen auf Sicherungen mit parallel angeordneten Schmelzleitern untersucht.

2. Theoretische Betrachtungen der Stromverdrängung in der Sicherung

In einem Leiter, der von Wechselstrom durchflossen wird bildet sich stets ein magnetisches Wechselfeld aus. Dieses magnetische Feld wirkt sowohl im inneren des Leiters, als auch außerhalb des Stromleiters. Dabei induziert dieses magnetische Wechselfeld einen Strom, der seiner Ursache entgegenwirkt. Bei einer Sicherung, mit nur einem Leiter, ist der Anteil der im Leiter selbst induziert wird von Bedeutung. Der Strom der durch das magnetische Feld induziert wird, hat eine Erhöhung des Widerstandes des Schmelzleiters zur Folge. Die Stromverdrängung eines Schmelzleiters auf sich selbst wird auch als Skin-Effekt bezeichnet, da der Strom im Leiter an die Leiterhaut verdrängt wird.

Der Einfluss des induzierten Stromes auf einen parallelen Leiter bezeichnet man als Proximityeffekt. Diese Effekte wurden in [1] und [2] untersucht, wobei dort die auftretenden Effekte erst bei höheren Frequenzen betrachtet wurden. Auch wurde dort die Beeinflussung der Sicherung durch den Rückleiter des Stromes genauer betrachtet. Die Beeinflussung des Stromflusses in der Sicherung mit parallel angeordneten Schmelzleitern wurde dort nicht weiter behandelt. Es ist auch noch anzumerken, dass die dargestellten Effekte nur simuliert und nicht in genaueren Messungen dargestellt wurden.

2.1. Der Skin-Effekt

Durch die Lösung der Maxwell'schen Gleichungen kann man die Stromverdrängung in einem Leiter entsprechend beschreiben.

$$J(r) = \frac{I_0}{2 \cdot \pi \cdot R} \cdot \vartheta \cdot \frac{J_0 \cdot (\vartheta \cdot r)}{J_1 \cdot (\vartheta \cdot R)} \quad (1.1)$$

Dabei beschreibt die Formel (1.1) die Stromdichte eines Rundleiters über seinen Radius. Bei der Formel (1.1) ist I_0 der Gesamtstrom durch den Leiter, R der Radius des Leiters und $\vartheta = \frac{(1-j)}{\delta}$ eine Konstante. Wobei δ in der Konstante die Eindringtiefe des Stromes in den Leiter beschreibt. Darüber hinaus sind die Konstanten J_0 und J_1 als Besselfunktionen für die Stromdichte definiert. Bei einer weiteren Umformung und Vereinfachung der Formel (1.1) für einen Rundleiter erhält man für die Eindringtiefe des Stromes Gleichung (1.2) (siehe auch [3]).

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \kappa}} \quad (1.2)$$

Die Eindringtiefe δ kennzeichnet die Dicke der Strom führenden Schicht eines Rundleiters in Abhängigkeit der Materialeigenschaften und der Frequenz. Für die Berechnung der Stromdichte eines rechteckförmigen Leiters kann mit der Formel (1.3) berechnet werden.

$$J_x(z) = \frac{I_0}{2 \cdot b} \cdot \gamma \cdot \frac{\cosh(\gamma \cdot z)}{\sinh\left(\gamma \cdot \frac{d}{2}\right)} \quad (1.3)$$

Die Formel (1.3) beschreibt die Stromdichte über die Dicke eines flachen Leiters. Bei der Formel ist zu beachten, dass die Leiterdicke d klein gegenüber der Leiterbreite b sein muss. Eine Beeinflussung des Stromes durch den Leiter tritt nur dann auf, wenn die Eindringtiefe $d > 2 \cdot \delta$ ist und wenn der Leiter dicker als zwei Mal die Eindringtiefe

ist. Dieser Effekt tritt bei hohen Frequenzen des Stromes durch den Leiter auf. Ist die Eindringtiefe größer als die Leiterdicke verteilt sich der Strom gleichmäßig über die Dicke des Leiters.

Um die Stromverteilung in einem Schmelzleiter der Sicherung und dessen Beeinflussung durch den Skin Effekt darzustellen wurde eine „Finite Elemente“ Simulation mit dem Simulationstool Maxwell erstellt.

Bei der Simulation wurde ein rechteckförmiger Leiter zwischen zwei definierten Flächen von einem Strom durchflossen. Der Strom durch den Leiter wurde in zwei Simulationsdurchläufen in seiner Frequenz von 100 Hz auf 1000 Hz erhöht. In der Mitte des Schmelzleiters wurde die Stromdichte über die Leiterbreite aufgezeichnet. In Abbildung 1 ist die Wechselstromdichte auf die Stromdichte eines mit Gleichstrom durchflossenen Leiters normiert, bei dem überall im Leiter die Stromdichte gleich ist. Da die Verdrängung des Stromes im Leiter von der Frequenz und nicht von der Höhe des Stromes abhängig ist, kann mit der Normierung die Stromverdrängung in Abhängigkeit der Frequenz allgemein dargestellt werden.

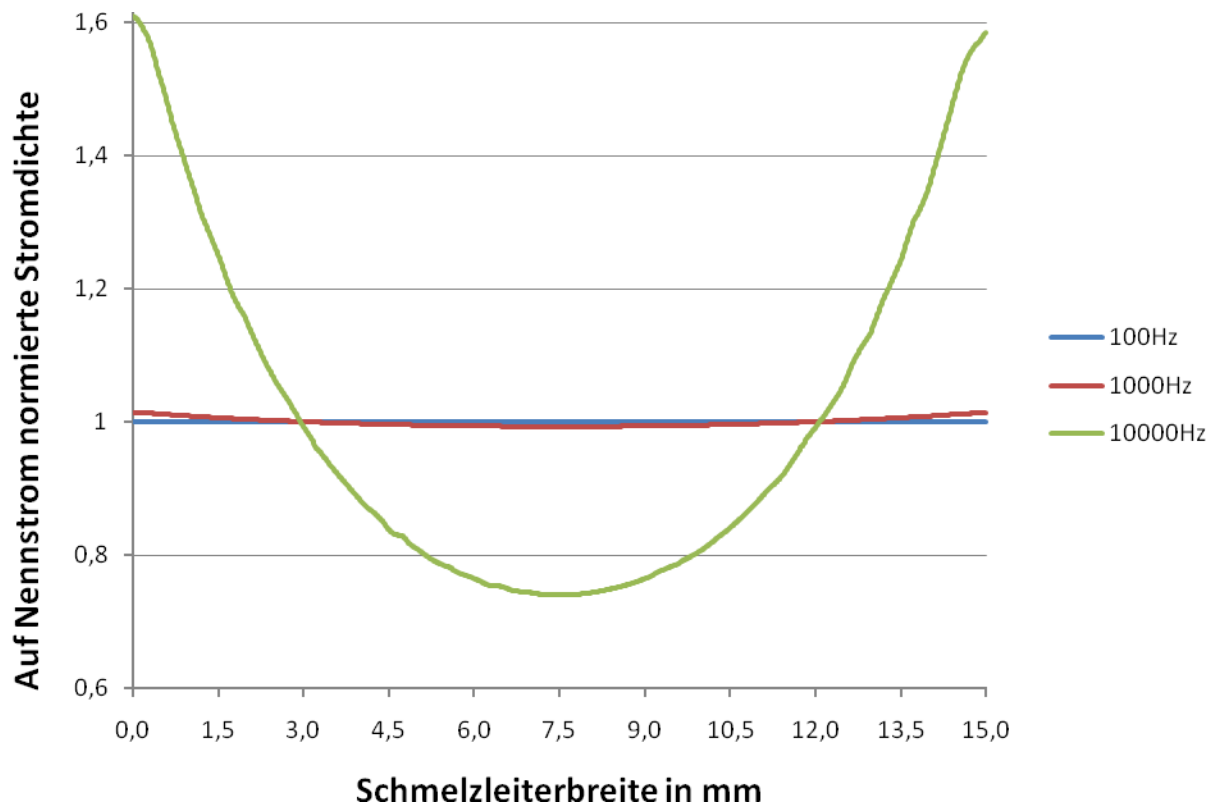


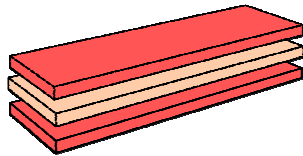
Abbildung 1: Skin Effekt eines rechteckförmigen Leiters bei einem Strom mit 100 Hz, 1000 Hz und 10000 Hz

In Abbildung 1 ist eine höhere Stromdichte am Rand des Rechteckleiters zu erkennen. Diese Verdrängung ist bei einer Frequenz von 1000 Hz deutlich stärker erkennbar, als bei 100 Hz. In der vorangegangenen Simulation wurde gezeigt, dass die Verdrängung des Stromes in einem Rechteckleiter frequenzabhängig ist und auch schon bei niedrigen Frequenzen auftritt.

2.2. Der Proximity-Effekt

Der Proximityeffekt beschreibt die gegenseitige Beeinflussung paralleler Strom durchflossener Leiter. Hierbei beeinflusst das magnetische Feld eines Leiters den Stromfluss im zweiten Leiter. Dieser Effekt ist sehr stark von der geometrischen Anordnung der Schmelzleiter zueinander abhängig und kann dadurch nicht hinreichend analytisch erfasst werden. Es kann dennoch vorausgesagt werden, dass bei einer parallelen Anordnung der Schmelzleiter zueinander durch den Proximityeffekt in den mittleren Schmelzleitern weniger Strom fließt als in den äußeren Leitern (siehe Abbildung 2).

Legende:



- Starker Strom fließt
- Schwacher Strom fließt

Abbildung 2: Theoretische Stromverteilung in der Sicherung

Um den Proximityeffekt für verschiedene Frequenzen des Stromes durch die Leiteranordnung darstellen zu können wurde, wie schon für den Skineneffekt, eine Finite Elemente Simulation mit dem Simulationstool Maxwell erstellt.

In dem nachgebildeten Modell der Sicherung (siehe Abbildung 3) wird an die Messer der Sicherung eine Stromquelle geschaltet. Mit dieser Quelle kann nun in die Sicherung ein Strom mit verschiedenen Frequenzen eingespeist werden. Das Simulationsprogramm berechnet die auftretenden magnetischen Felder und die Beeinflussung der Leiter untereinander.

Für ein möglichst ähnliches Verhalten des Modells zu einer realen Schmelzsicherung wurde, wie in Abbildung 3 dargestellt, in die Schmelzleiter die typischen Aussparungen eines Sicherungsschmelzleiters eingefügt. Bei der Simulation wird die Stromdichte im Schmelzleiter über die Leiterbreite gerechnet. Die Rechnung wird in der Mitte jedes Schmelzleiters durchgeführt. Da sich in der Mitte der Schmelzleiter auch die Aussparungen befinden, hat dies einen Einfluss auf die Stromdichtewerte. Diese Kurven der Stromdichten von Abbildung 4 bis Abbildung 6 sind nun nur noch in den Engstellen vorhanden. Dies führt zu den in den Abbildungen dargestellten Säulen für die Stromdichte, da in den Aussparungen kein Strom fließt.

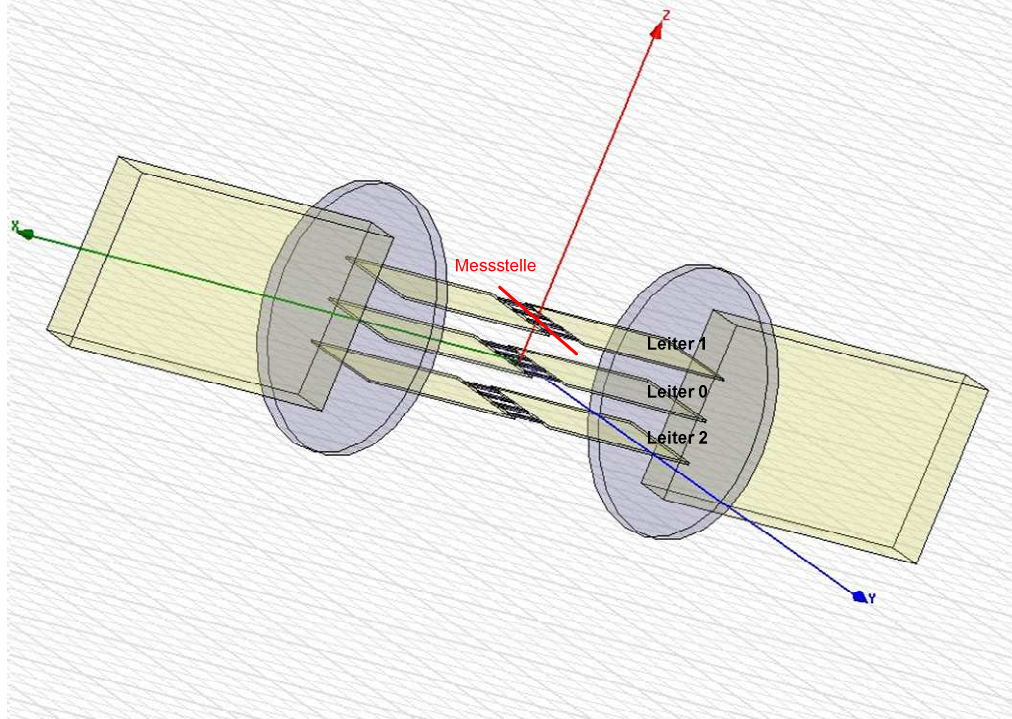


Abbildung 3: Aufbau der Sicherung mit 3 parallelen Schmelzleitern in Maxwell 3D

Für die Untersuchung des Proximityeffektes wurden Sicherungen mit 1, 3 und 4 parallelen Schmelzleitern modelliert und jeweils mit Grund- und Oberschwingungen des Stromes simuliert. Bei den Simulationen stellte sich heraus, dass die Oberschwingungen des Stromes (siehe Abbildung 14) einen nicht zu vernachlässigenden Anteil zur Stromverdrängung in der Sicherung beitragen. Um bei der Versuchsdurchführung den Einfluss der Oberschwingungen nachprüfen zu können, wurde für jeden Arbeitspunkt das Frequenzspektrum des Stromes mit Hilfe einer Fouriertransformation ermittelt. Anschließend wurden alle Teilfrequenzen mit ihren entsprechenden Amplituden mit in die Simulation aufgenommen. Dadurch kann die Stromverdrängung in der Sicherung, wie sie bei den durchgeführten Versuchen auftritt, nachgebildet werden.

Stromverdrängung über den Leiter bei 1000Hz Grundschwingung und Oberschwingungen

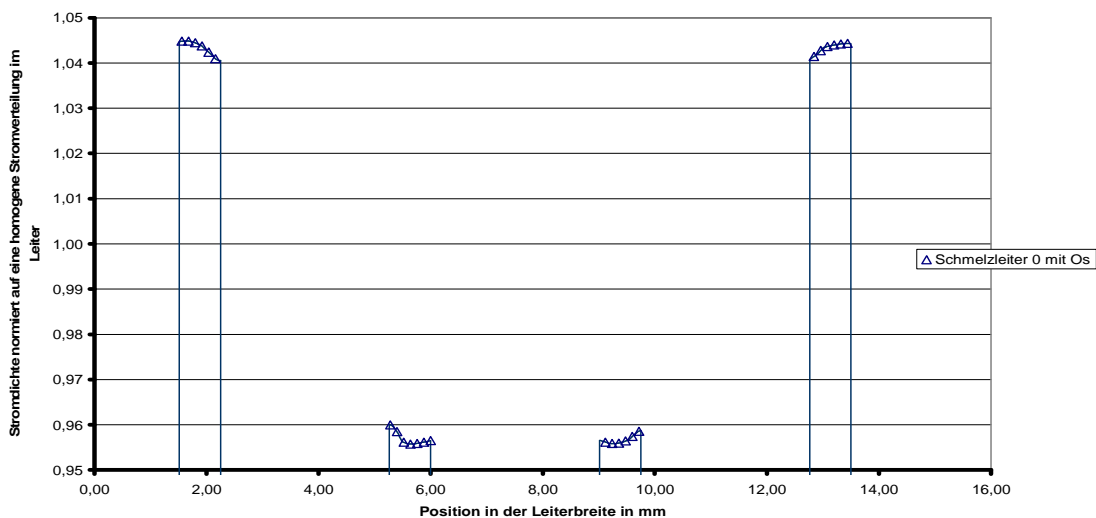


Abbildung 4: Stromverdrängung über einen Leiter bei 1000 Hz

In Abbildung 4 und den nachfolgenden Diagrammen, kennzeichnen die Säulen die Stromdichte in den Engstellen in der Mitte der Sicherung (siehe Abbildung 3). Dabei wurden die Ströme auf eine homogene Stromverteilung im Leiter normiert. Dies bedeutet, dass beispielsweise bei einer Sicherung mit einem Schmelzleiter der Strom auf einen homogenen Stromfluss von 100 A normiert wurde. Bei der in Abbildung 4 dargestellten Stromverteilung ist noch kein Proximityeffekt zu erkennen, da bei einer Sicherung mit einem Schmelzleiter keine Beeinflussung der Leiter zueinander auftreten kann.

Bei einer Simulation der Sicherungen mit 3 und 4 Schmelzleitern ist deutlich der Einfluss des Proximityeffektes zu erkennen. Hierbei ist wie in Abbildung 5 zu erkennen, dass im mittleren Schmelzleiter grundsätzlich ein niedriger Strom fließt als in den Äußeren. Zusätzlich ist in jedem Leiter der Einfluss des Skineffektes zu erkennen durch den, wie schon bei der Simulation mit nur einem Schmelzleiter zu erkennen war, der Strom mehr in den Rändern des Leiters fließt als in der Mitte. Bei den nachfolgenden Simulationsergebnissen wurde der Strom wieder auf einen homogen verteilten Nennstrom normiert.

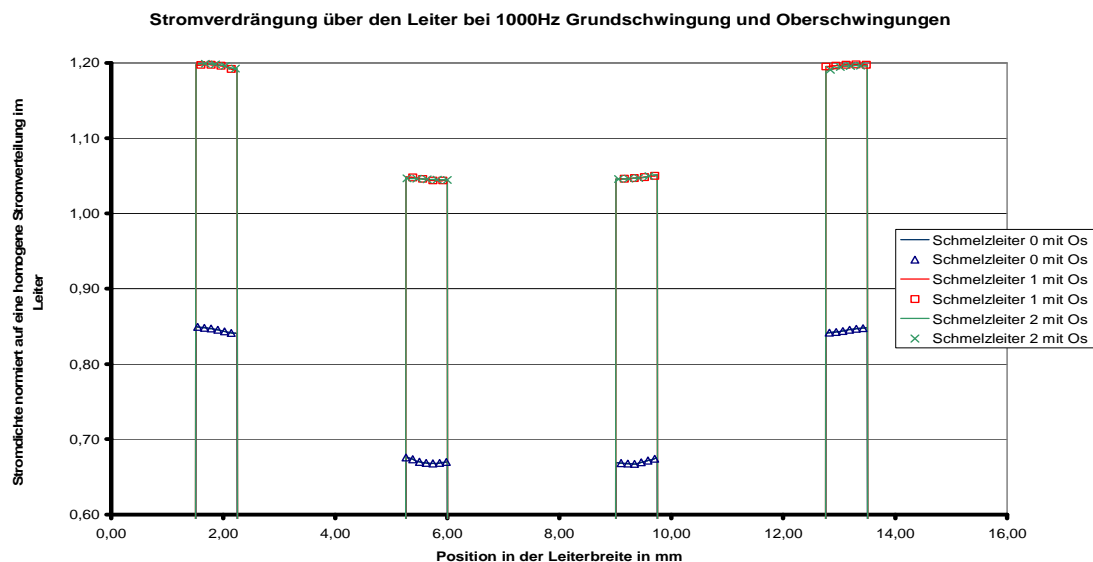


Abbildung 5: Stromverdrängung über drei Leitern bei 1000 Hz

In Abbildung 5 erkennt man die Stromdichte in den einzelnen Schmelzleitern. Hierbei ist zu beachten, dass der Schmelzleiter 0 der mittlere Schmelzleiter ist. Die Schmelzleiter 1 & 2 liegen jeweils ober- und unterhalb des Schmelzleiters 0. Es ist Anhand des Diagramms zu erkennen, dass die Stromdichte des Schmelzleiters 0, im Diagramm blau dargestellt, niedriger ist als die Stromdichte der beiden äußeren Leiter 1 & 2 (im Diagramm grün und rot). Diese Verdrängung des Stromes auf die beiden äußeren Schmelzleiter kann auf den Proximityeffekt zurückgeführt werden. Da in der Simulation alle Leiter den gleichen Abstand zu einander haben, parallel verlaufen und den gleichen Widerstandswert haben, ist die Stromdichte in den Schmelzleitern 1 & 2 identisch.

Der Effekt der Stromverdrängung ist auch in der Sicherung mit 4 parallelen Schmelzleitern zu erkennen. In Abbildung 6 ist wieder die gleiche Stromverdrängung in den Leitern zu erkennen. Hier fließt in den mittleren Schmelzleitern (Schmelzleiter 0 blau und Schmelzleiter 1 grün) weniger Strom, als in den beiden äußeren Leitern (Schmelzleiter 2 rot und Schmelzleiter 3 lila). Da die Schmelzleiter wieder gleiche

Eigenschaften aufweisen und mit den gleichen Abständen parallel verlaufen sind die Stromdichten im Schmelzleiter 0 & 1 und 2 & 3 identisch.

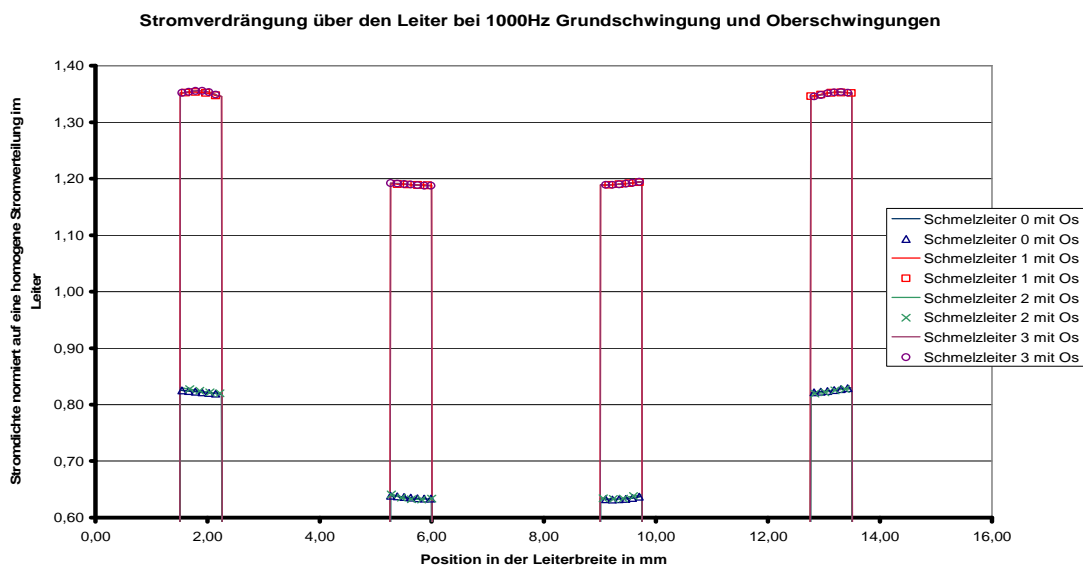


Abbildung 6: Stromverdrängung über vier Leitern bei 1000 Hz

Mit Hilfe der Simulation konnte die Stromverteilung in einem einzelnen Schmelzleiter, sowie bei mehreren Schmelzleitern dargestellt werden. Bei den simulierten Sicherungsmodellen wurden Schmelzleiter eingebaut, die Engstellen in der Mitte des Schmelzleiters aufwiesen. An diesen Punkten wurde anschließend auch die Stromverdrängung dargestellt. Es ist jedoch anzumerken, dass in einem realen Schmelzleiter einer Sicherung mehrere in Längsrichtung verteilte Engstellen vorhanden sind. Eine Betrachtung des Schmelzleiters mit allen Engstellen würde aber hier keine zusätzlichen Erkenntnisse bringen, da die Stromdichte genau in der Mitte des Schmelzleiters berechnet und somit die eingefügten Aussparungen berücksichtigt wurden.

2.3. Einfluss der parallelen Schmelzleiteranordnung auf die Wärmeableitfähigkeit der Sicherung

Um die verminderte Wärmeableitfähigkeit einer Sicherung mit parallelen Schmelzleitern zu untersuchen, wurde das Gehäuse einer Sicherung mit 3 Schmelzleitern geöffnet und anschließend in ein vorher präpariertes Sicherungsgehäuse in einen waagrecht stehenden Sicherungshalter eingebaut (siehe Abbildung 7). Zur Aufzeichnung der Temperaturen im gesamten Sicherungsaufbau wurde eine Infrarotkamera der Firma FLIR i60 eingesetzt. Bei dem Versuchsaufbau wurde der waagrecht eingebaute Sicherungseinsatz zur Hälfte mit Quarzsand gefüllt, um eine minimale, möglichst praxisnahe Wärmeableitung zu erreichen. Bei der direkten Messung mit der Infrarotkamera an der Sicherung ergibt sich durch die unterschiedlichen Emissionsgrade ε_n der einzelnen Materialien der Sicherung ein großer Messfehler. Eine genaue Messung kann durch ein Einsprühen der Sicherung mit einem Kreidespray (Entwickler U89 Nordtest) erreicht werden. Hier legt sich auf die verschiedenen Materialien der Sicherung ein dünner Kreidefilm mit dem man einen einheitlichen Emissionsgrad auf der Sicherung erreicht.



Abbildung 7: Versuchsaufbau der Wärmebildkameramessungen

Bei den Messungen wurde die Sicherung nicht mit ihrem Nennstrom belastet, da bei der geöffneten Sicherung ein Auslösen dieser auf jeden Fall verhindert werden sollte. Die Sicherungen wurden nur mit einem Strom von ca. einem Drittel des Nennstromes durchflossen.

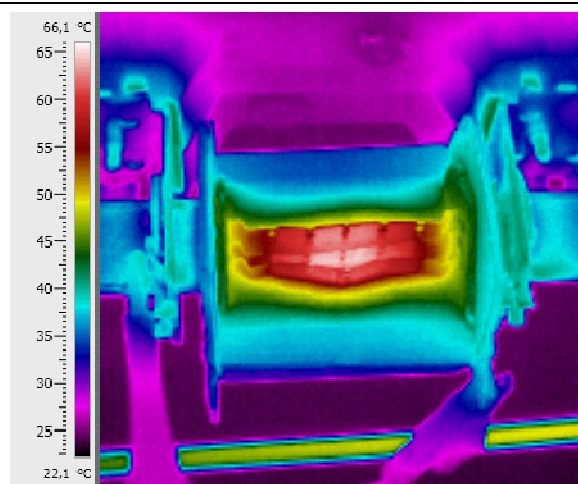


Abbildung 8: Aufnahme der Sicherung mit der Wärmebildkamera

Effektivstrom: 156 A, Frequenz: 50 Hz

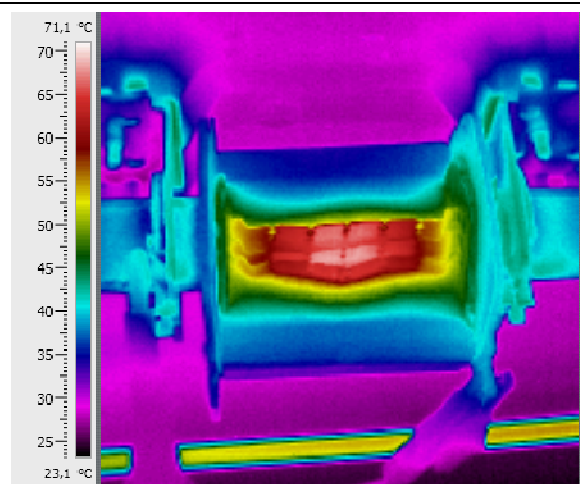


Abbildung 9: Aufnahme der Sicherung mit der Wärmebildkamera

Effektivstrom: 159 A, Frequenz: 1000 Hz

Anhand der Wärmebildaufnahmen (siehe Abbildung 8 und Abbildung 9) erkennt man, dass der mittlere Schmelzleiter sich deutlich mehr erwärmt als die äußeren. Es ist auch zu erkennen, dass sich der mittlere Schmelzleiter bei einer Frequenz des Stromes von 50 Hz genauso erwärmt wie bei einer Frequenz von 1000 Hz. Dies ist auf die schlechte Wärmeabgabemöglichkeit des mittleren Schmelzleiters zurückzuführen. Die im Schmelzleiter entstehende Wärme kann nicht, wie bei einem äußeren Leiter, in eine Richtung abfließen. Dadurch erwärmt sich die Umgebung des Schmelzleiters immer mehr. Da zwar wie in Kapitel 2.2 gezeigt wurde, im mittleren Leiter weniger Strom fließt als in den äußeren, hilft dieser Effekt dem Schmelzleiter. Dennoch ist die Erwärmung des Leiters nicht zu vernachlässigen. Bei einer angestellten Vergleichsmessung, bei der die Sicherung mit ihrem Nennstrom bei

einer reinen 50 Hz Schwingung beaufschlagt wurde, konnte auch gezeigt werden, dass die Sicherung nach einer bestimmten Betriebszeit auslöst (siehe Abbildung 18). Dieser Effekt würde bei einer Normsicherung nicht auftreten, da bei dieser die Schmelzleiter entsprechend stärker dimensioniert sind.

3. Durchgeführte Messreihen

Im Nachfolgenden wurden praktische Messungen an den NH-Schmelzsicherungen mit parallel angeordneten Schmelzleitern vorgenommen. Dabei unterteilen sich die Messungen in Erwärmungstests, bei denen die Sicherungen mit Nennstrom belastet wurden, und Schmelztests, die mit einem Vielfachen des Nennstroms durchgeführt wurden.

Um einen entsprechenden sinusförmigen Strom einzustellen, wurde ein Spannungszwischenkreisumrichter aufgebaut und eine Zweipunktstromregelung realisiert. Die Frequenz war in festen Schritten (50 Hz, 400 Hz und 1000 Hz) verstellbar und die Stromstärke konnte nahezu stufenlos eingestellt werden.

3.1. Beschreibung des Versuchsaufbaus

Für die durchzuführenden Messungen wurde ein Aufbau erstellt, wie in Abbildung 10 dargestellt. Die einzelnen Sicherungshalter wurden mit den jeweiligen Leiterquerschnitten an zwei Stromschienen angebunden. Während der Durchführung der Versuche wurde immer nur die zu testende Sicherung in der Halter gesteckt. Die anderen Sicherungshalter waren während des Versuchs leer.

Ein genauerer Aufbau des Versuches im Schaltschrank ist in Abbildung 11 und der Spannungszwischenkreisumrichter in Abbildung 12 zu erkennen

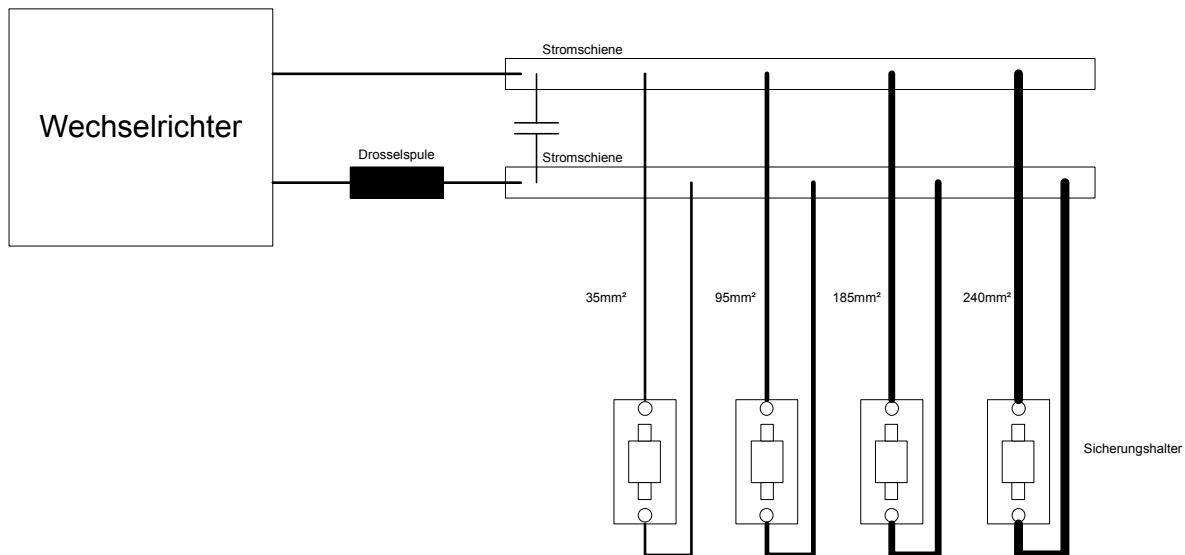


Abbildung 10: Aufbau des Sicherungstests

Mit diesem Aufbau ist es möglich jede Sicherung zwischen den Versuchen schnell zu tauschen. Die unterschiedlichen Kabelquerschnitte dienen nicht nur dem Stromfluss, sondern auch zur Kühlung der Sicherung.

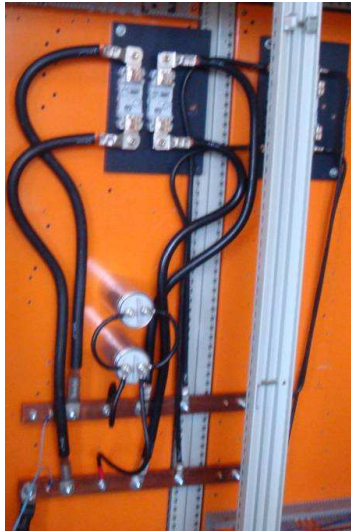


Abbildung 11: Versuchsaufbau im Schaltschrank

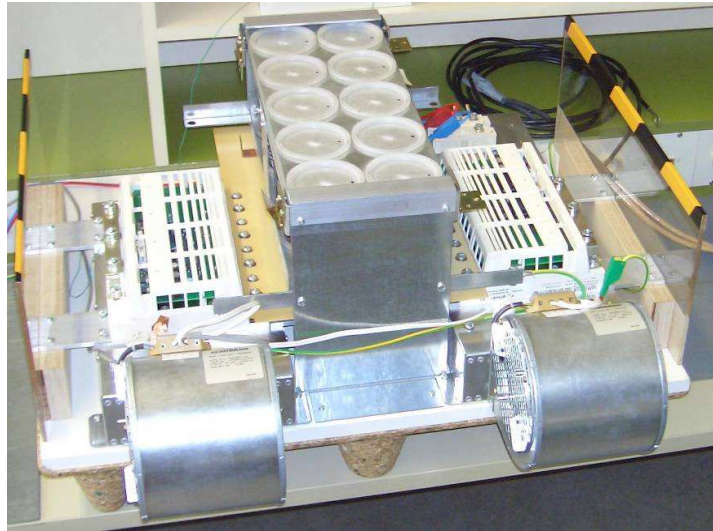


Abbildung 12: Aufbau des Zwischenkreisumrichters

Um die Schaltspannungen des IGBT-Umrichters über der Sicherung zu dämpfen, und die umrichterbedingten Stromverzerrungen zu minimieren, wurde eine Kapazität von 10 μF parallel zur Sicherung geschaltet.

Beim Einspeisen in die Sicherung wurde der Stromverlauf mit einem Pearsonstromwandler und mit Hilfe eines Fluke-Oszilloskops der Baureihe 196C nachgemessen und an den PC übertragen. Abbildung 13 zeigt den Verlauf des sinusförmigen Stromes über der Zeit.

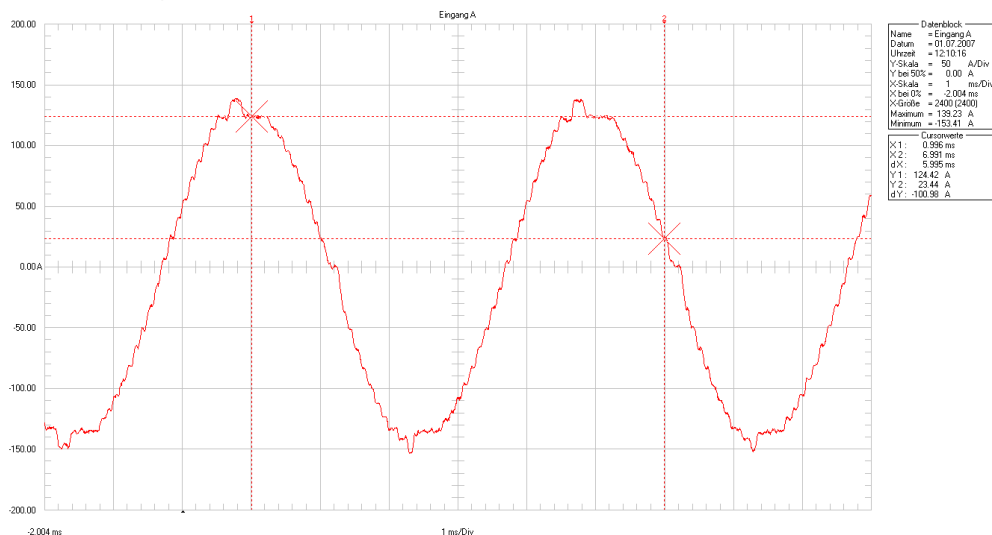


Abbildung 13: $I_{\text{eff}} = 100 \text{ A}$ Frequenz = 200 Hz CH1: Strom durch die Spule

Mit Hilfe des Spektrums des Sinussignals kann man die Frequenzverteilung des Stromes erkennen. Dabei wird die Grundschiwingung im vorliegenden Fall sehr gut nachgebildet. Außerdem erkennt man, dass die Oberschwingungen sehr gering sind.

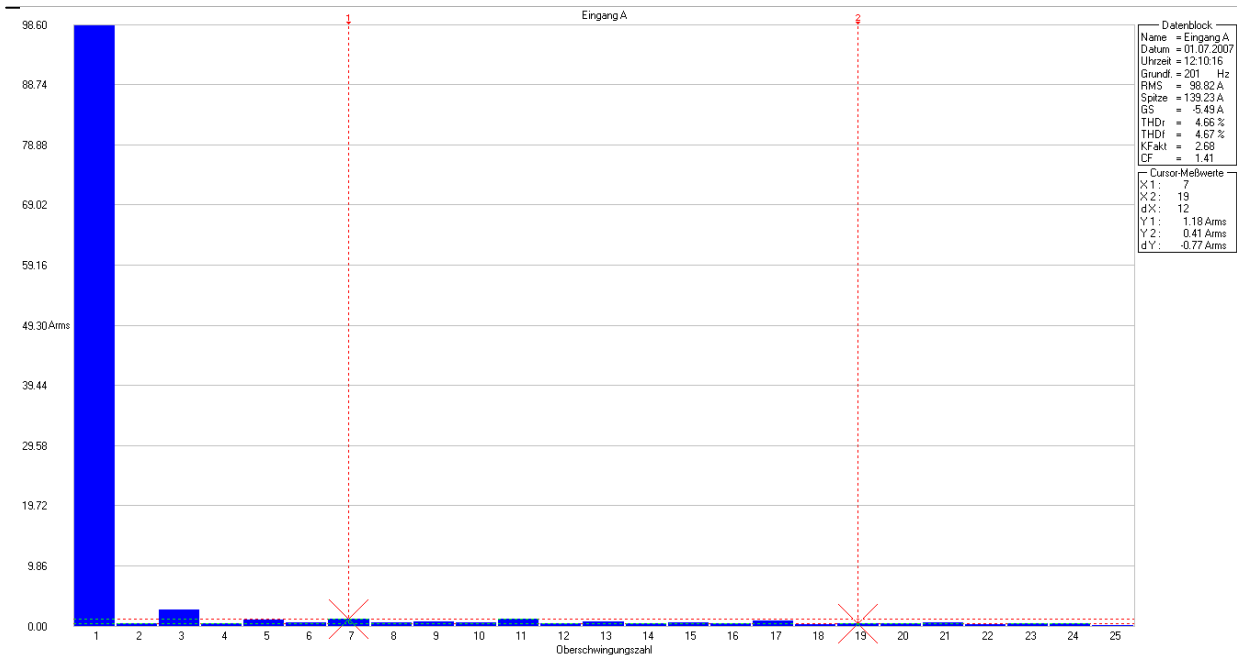


Abbildung 14: $I_{eff} = 100 \text{ A}$, Frequenz = 200 Hz Spektrum des Stromes

Während der Durchführung der Versuche wurden die Spannungen an der Sicherung und der Strom durch die Sicherung über mehrere Perioden aufgezeichnet. Da diese Messungen in regelmäßigen Abständen erledigt werden mussten, wurde diese Funktion automatisiert. Dabei beträgt die technisch bedingte maximale Übertragungsrate etwa 3 Sekunden für ein Oszilloskopbild.

Zur Ausblendung von Störimpulsen aufgrund der Schaltvorgänge im Umrichter und der geringen Spannung über der Sicherung wurde die jeweilige Spannung über der Sicherung mit Hilfe eines Filters mit einer Grenzfrequenz von 10 kHz am Oszilloskop gefiltert. Aus diesen Daten wurden daraufhin in Abhängigkeit der eingestellten Frequenz die Effektivwerte für die Spannung und den Strom errechnet. Um nun die Leistung über der Sicherung zu bestimmen, wurden die Effektivwerte des Stromes und der Spannung multipliziert. Die so erhaltenen Leistungspunkte über der Zeit bilden die Erwärmungskennlinie bzw. Auslösekennlinie.

Zusätzlich zur Leistung über der Sicherung wurde die Temperatur der Sicherungsmesser und des Sicherungsgehäuses mit Hilfe von Eisen-Zink-Messfühlern aufgezeichnet. Außerdem wurde die Temperatur im Schaltschrank, in dem die Sicherung getestet wurde, aufgenommen. Der zeitliche Abstand zwischen den Temperaturaufzeichnungen entspricht dem der Oszilloskopbilder. Mit Hilfe dieser zeitsynchronen Messwerte können die Temperaturen den umgesetzten Leistungen zugeordnet werden.

3.2. Versuchsdurchführung bei Belastung der Sicherung mit Nennstrom

In der nachfolgenden Messreihe wurden die jeweiligen Sicherungen bei der entsprechenden Frequenz mit Nennstrom belastet. Da diese Messungen bis zu 3 Stunden dauerten, wurde die automatische Messwertaufzeichnung auf 1 Minute eingestellt.

Nennstrom der Sicherung Anzahl der Schmelzleiter	Frequenz		Prüflinge je Sicherungsausführung			
			100 A	200 A	300 A	400 A
			I	II	III	IIII
Erwärmung und Leistungsabgabe bei Bemessungsstrom (Dauer je ca. 3 h)	50 Hz	Erwärmung	1	1	1	1
	400 Hz		1	1	1	1
	1000 Hz		1	1	1	1

Erwärmung und Leistungsabgabe	
----------------------------------	--

Tabelle 1: Tabelle der durchgeführten Versuch bei Nennstrombelastung

Um die durchgeführten Sicherungstests vergleichbar zu halten, wurden zunächst Versuchsmessungen bei Jean Müller mit sinusförmigen, überschwingungsfreien Strömen mit Netzfrequenz durchgeführt. Anschließend wurden die Sicherungstests bei ELSYS mit dem Umrichter mit Zweipunktstromregelung realisiert, bei denen systembedingt Überschwingungen auftreten.

3.2.1. Vergleichsmessungen von Jean Müller

Bei den Sicherungstests bei Jean Müller wurde die Effektivspannung über der Sicherung mit dem Effektivwert des Stromes multipliziert. Da diese Methode der Leistungsberechnung identisch mit der von uns ausgewählten Form der Leistungsberechnung ist, sind die Messergebnisse vergleichbar.

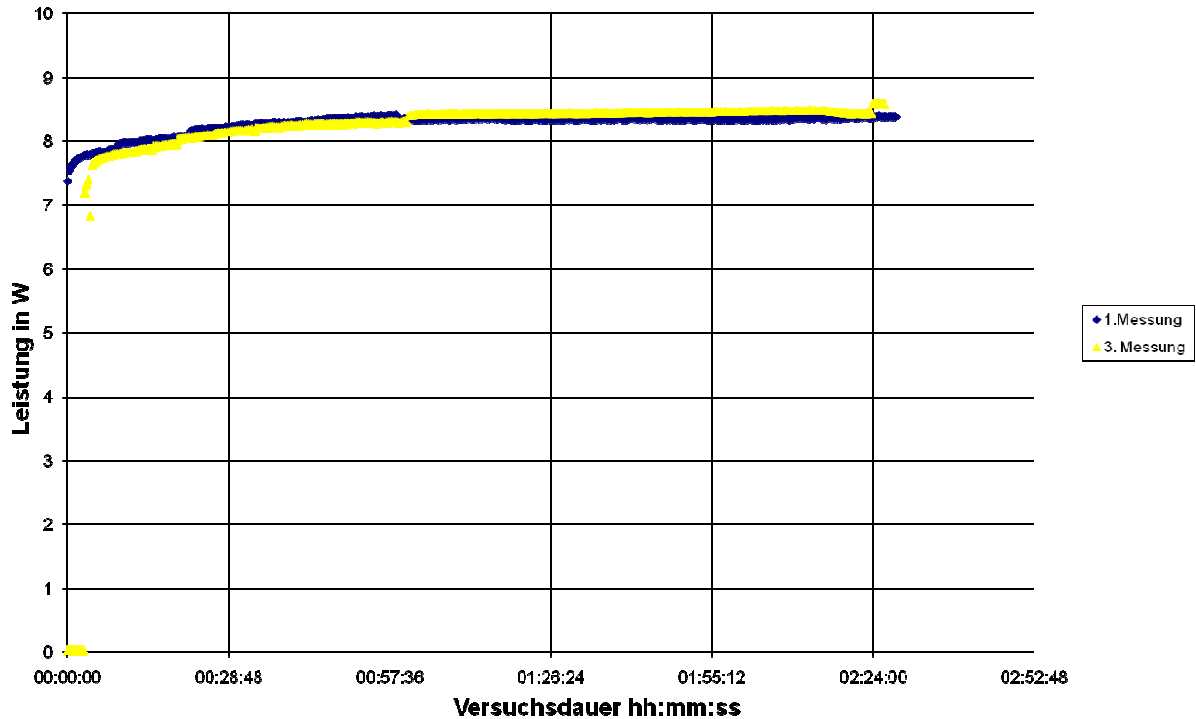


Abbildung 15: Leistungsabgabe bei $I = 100$ A und 50 Hz idealem Sinusstrom

Im thermisch eingeschwungenen Zustand beträgt die umgesetzte Leistung über der Sicherung in etwa 8,5 Watt.

200A Messungen

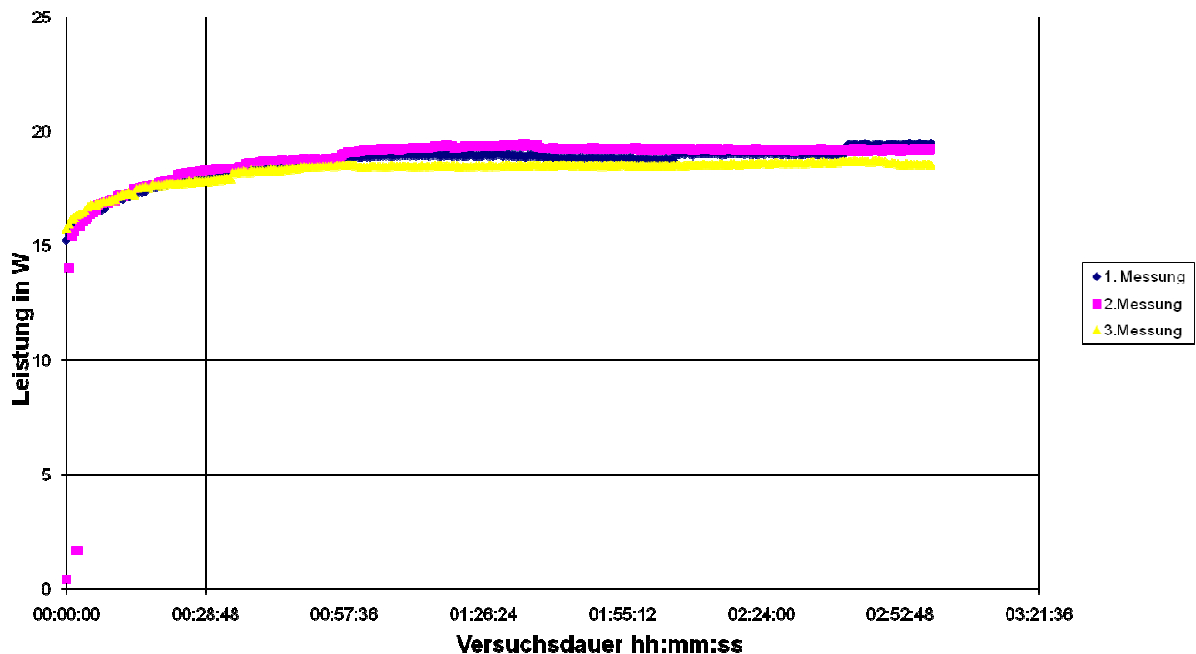


Abbildung 16: Leistungsabgabe bei $I = 200$ A und 50 Hz idealem Sinusstrom

Im thermisch eingeschwungenen Zustand beträgt die umgesetzte Leistung über der Sicherung in etwa 19 Watt.

300A Messungen

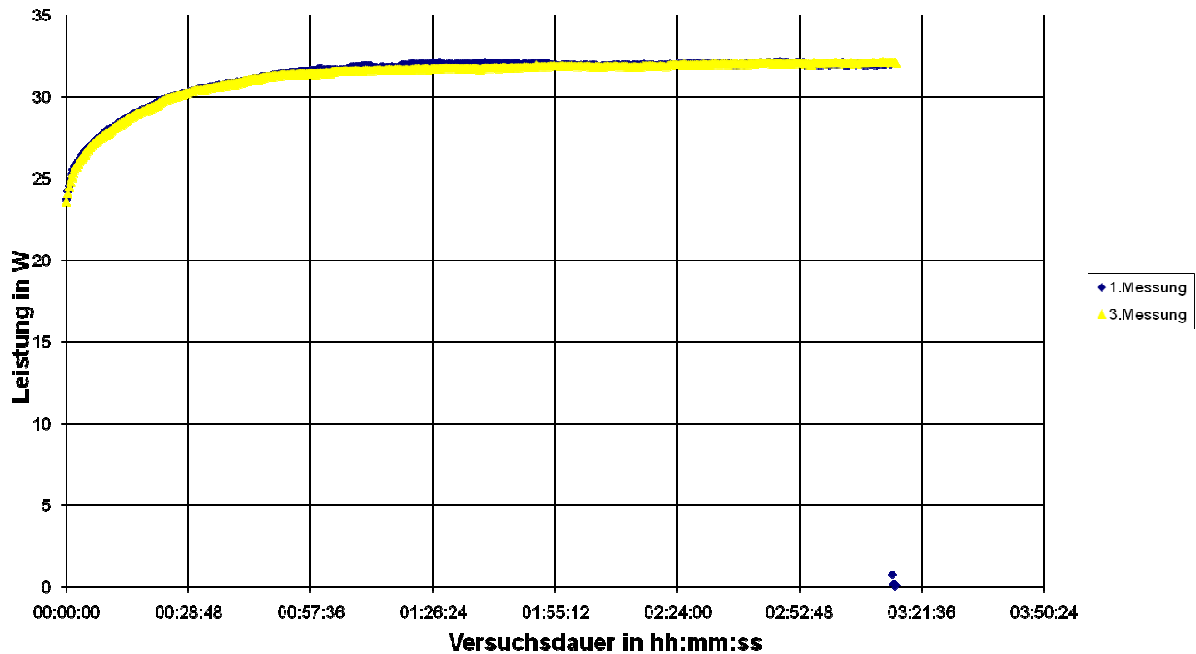


Abbildung 17: Leistungsabgabe bei $I = 300 \text{ A}$ und 50 Hz idealem Sinusstrom

Im thermisch eingeschwungenen Zustand beträgt die umgesetzte Leistung über der Sicherung in etwa 32 Watt.

400A Messung

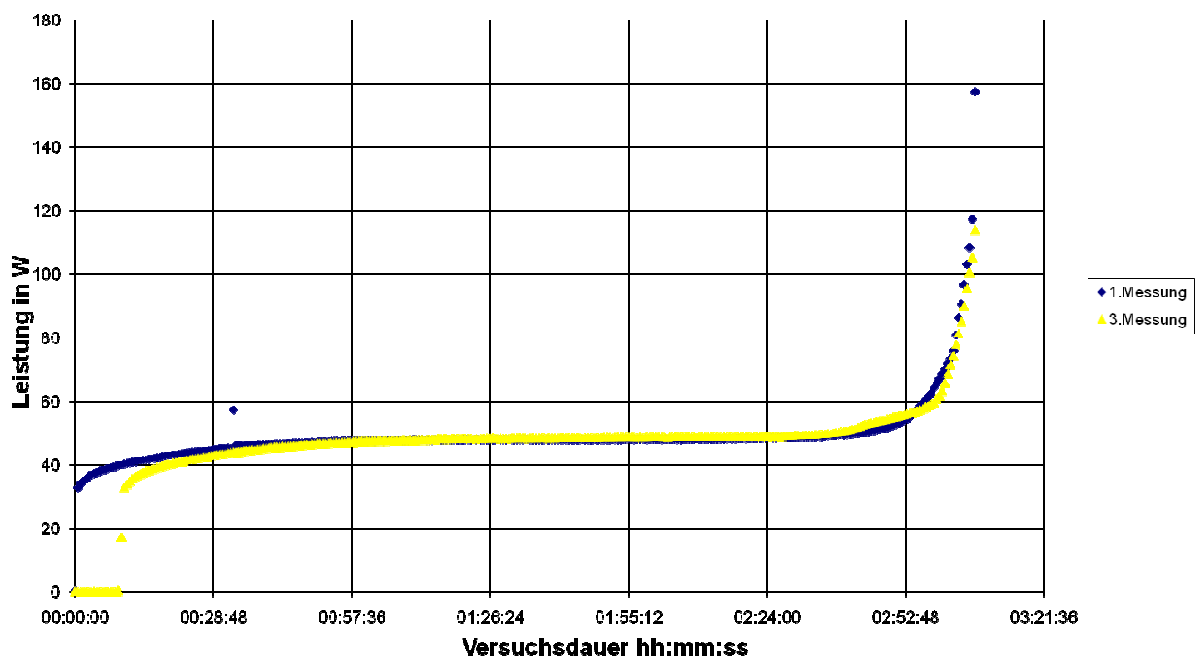


Abbildung 18: Leistungsabgabe bei $I = 400 \text{ A}$ und 50 Hz idealem Sinusstrom

Im thermisch eingeschwungenen Zustand beträgt die umgesetzte Leistung über der Sicherung in etwa 45 Watt. Man erkennt, dass die Sicherung mit 4 Schmelzleitern bereits bei Nennstrom nach ca. 3 Stunden auslöst. Dieses Verhalten bestätigt den in Kapitel 2.3 aufgegriffenen Punkt der unzureichenden Wärmeabfuhr der mittleren

Schmelzleiter der Sicherung aufgrund des internen Aufbaus mit parallelen Schmelzleitern.

3.2.2. Messungen ELSYS

In den nachfolgenden Abbildungen wurden jeweils Sicherungen mit den gleichen Schmelzleiteranordnungen mit Strömen unterschiedlicher Frequenzen durchflossen. Jede Abbildung stellt den Leistungsumsatz in einer Sicherung mit den unterschiedlich frequenten Strömen dar.

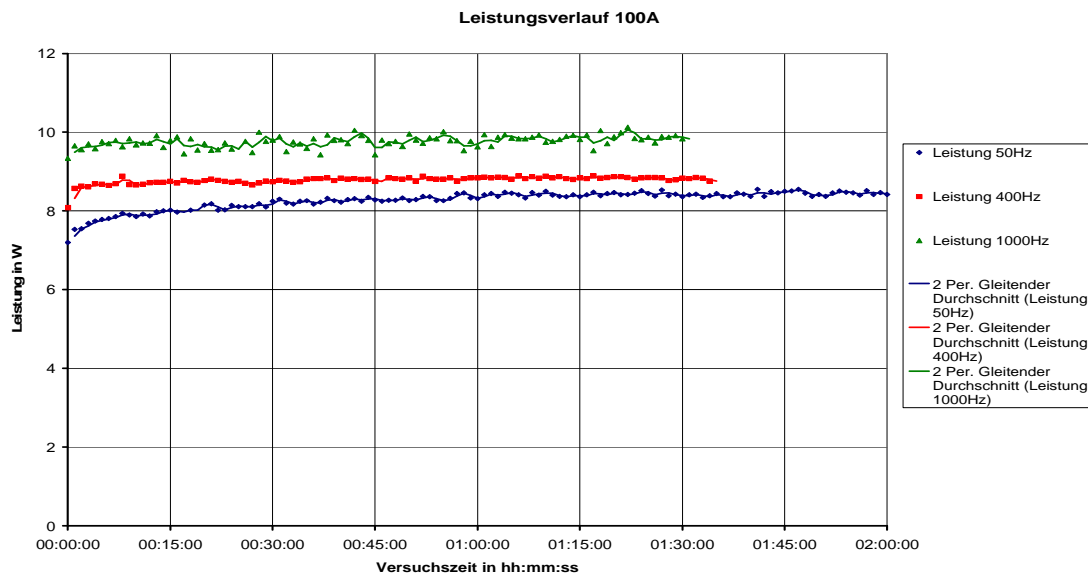


Abbildung 19: Vergleich der Leistungsverläufe bei 100 A

Bei den Leistungsverläufen bei 100 A Stromfluss ist noch kein starker Frequenzeinfluss zu erkennen. Hier enthält die Sicherung nur einen Schmelzleiter. Es ist ein leichter Anstieg der Leistung in der Sicherung zu sehen, der durch den Skineffekt hervorgerufen wird. Bei dieser Sicherung tritt aber kein Proximityeffekt.

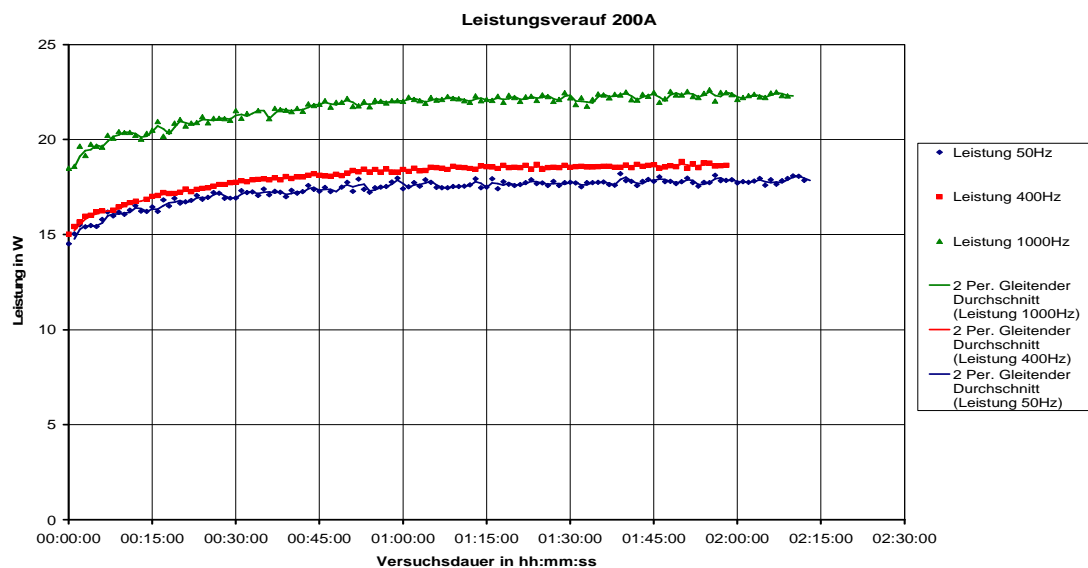


Abbildung 20: Vergleich der Leistungsverläufe bei 200 A

Bei den Messungen mit dem 200 A Sicherungstyp ist eine stärkere Abweichung der Leistung an der Sicherung bei höheren Frequenzen erkennbar. Da in der Sicherung

nun zwei Schmelzleiter parallel angeordnet sind, wird die Stromverteilung in der Sicherung durch den Proximityeffekt beeinflusst.

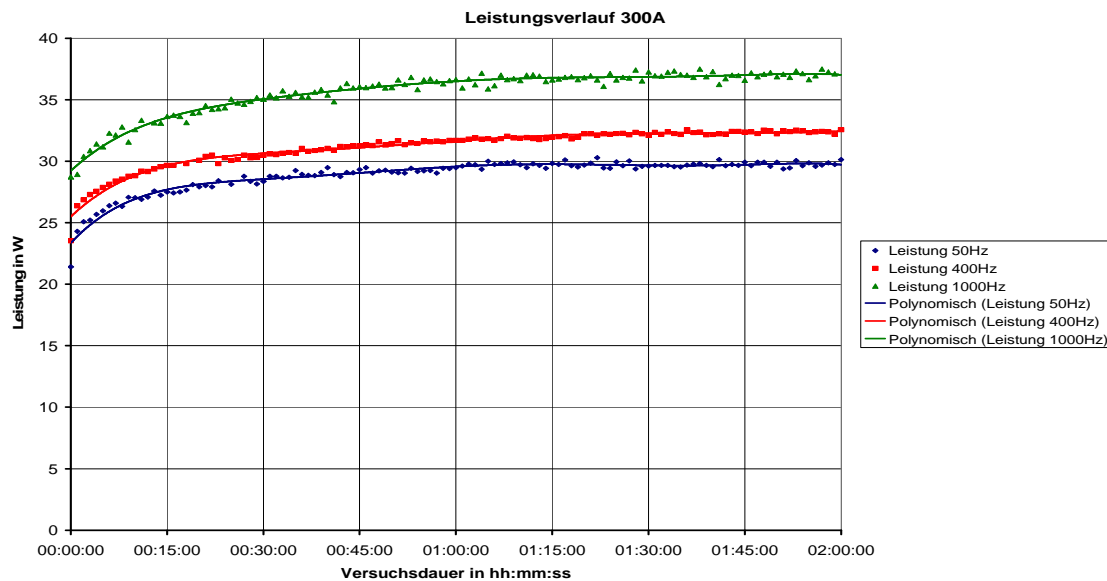


Abbildung 21: Vergleich der Leistungsverläufe bei 300 A

In den 300 A Sicherungstypen mit 3 parallelen Schmelzleitern sind die Auswirkungen einer höheren Frequenz des Stromes auf die in der Sicherung umgesetzte Leistung zu erkennen. Hier ist die Auswirkung des Proximityeffektes gut sichtbar da sich die Leistungsabgaben an der Sicherung stärker unterscheiden als bei Sicherungsprüflingen mit 1 oder 2 Schmelzleitern.

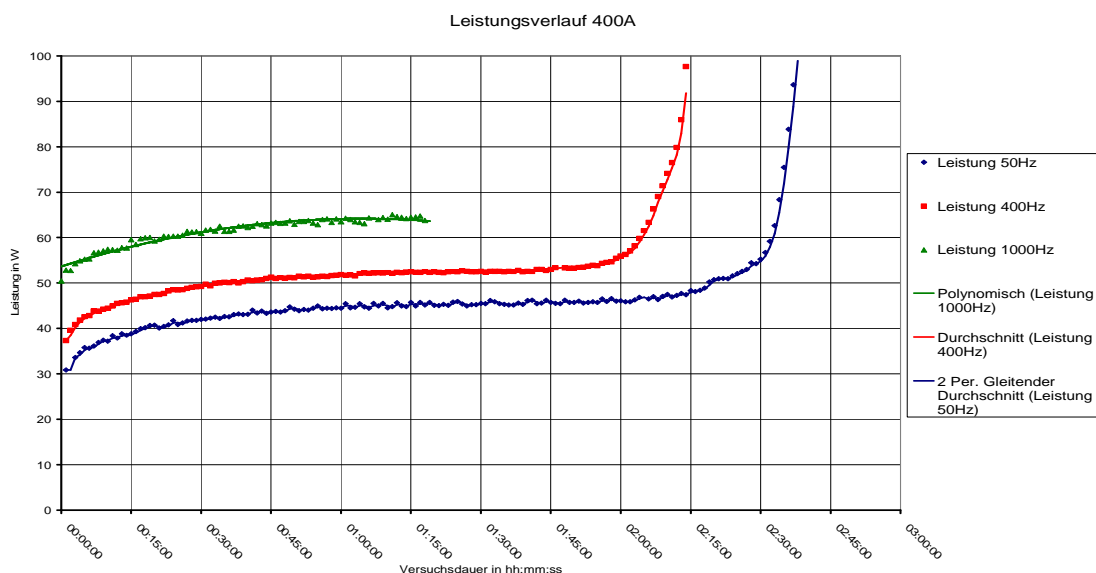


Abbildung 22: Vergleich der Leistungsverläufe bei 400 A

Bei den Sicherungstypen mit 4 parallelen Schmelzleitern ist der Proximityeffekt am deutlichsten erkennbar. Hier ist der Unterschied der einzelnen Messungen am stärksten sichtbar.

Bei diesen Versuchsreihen ist wieder das Auslösen der Sicherung nach einer bestimmten Versuchszeit erkennbar. Dies ist wiederum auf den in Kapitel 2.3 beschriebenen Effekt der Erwärmung der Sicherung zurückzuführen.

3.3. Versuchsdurchführung bei Belastung der Sicherung mit 1,6 fachen Nennstrom

	Frequenz		Prüflinge je Sicherungsausführung				Nennstrom der Sicherung	Anzahl der Schmelzleiter
			100A	200A	300A	400A		
			I	II	III	IIII		
Auslösekennlinie bei 1,6 fachen Nennstrom (Dauer je ca. 20min)	50Hz	Kennlinie	1	1	1	1		
	400Hz		1	1	1	1		
	1000Hz		1	1	1	1		

Tabelle 2: Auslösekennlinie Messung bei 1,6-fachen Nennstrom

Bei den durchgeführten Schmelztests wurden die Einzelmessungen der jeweiligen Leiteranordnung über der Frequenz eingetragen, um einen ersten Vergleich der Leistungen zu erhalten. Bei diesen Versuchsreihen wurde erwartet, dass die Sicherung in jedem Fall auslöst.

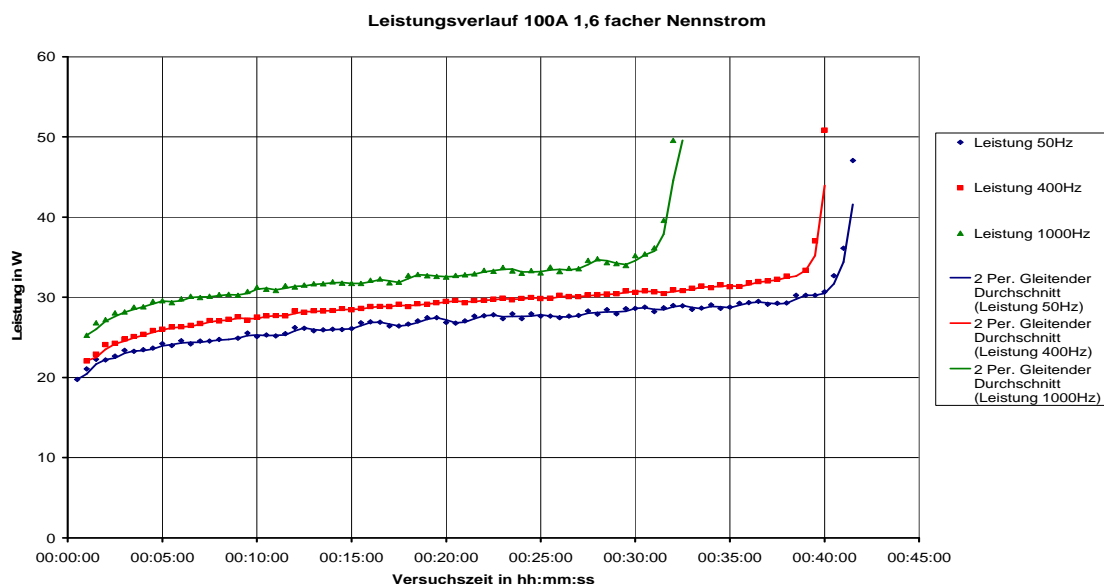


Abbildung 23: Auslösekennlinie bei 100A und 1,6-fachem Nennstrom

Bei diesen Auslösekennlinien ist der Skineffekt anhand der erhöhten Leistungsabgabe der Sicherung sichtbar. Durch die größere Leistungsabgabe in den Schmelzleitern löst die Sicherung bei hoher Frequenz schneller aus.

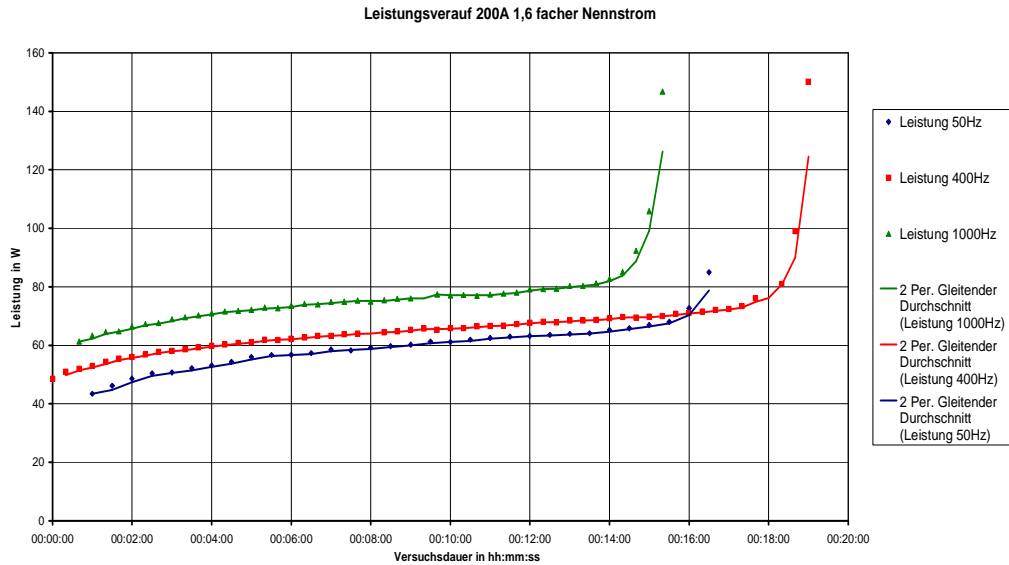


Abbildung 24 : Auslösekennlinie bei 200A und 1,6-fachem Nennstrom

Bei den Sicherungen mit zwei parallelen Leitern zeigen sich auch der Skin- und Proximityeffekt durch die erhöhte Leistungsabgabe der Sicherung.

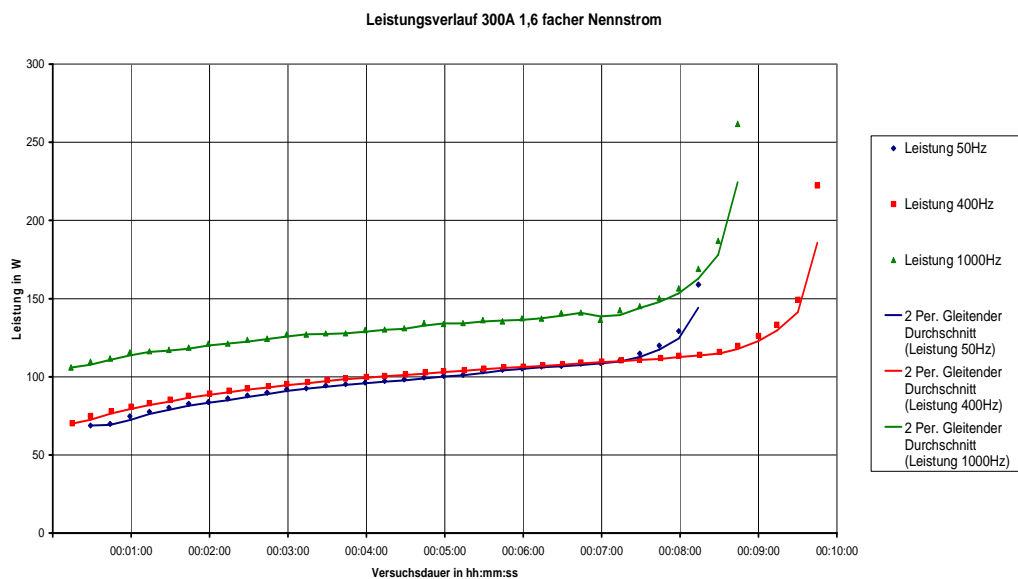


Abbildung 25: Auslösekennlinie bei 300 A 1,6-fachem Nennstrom

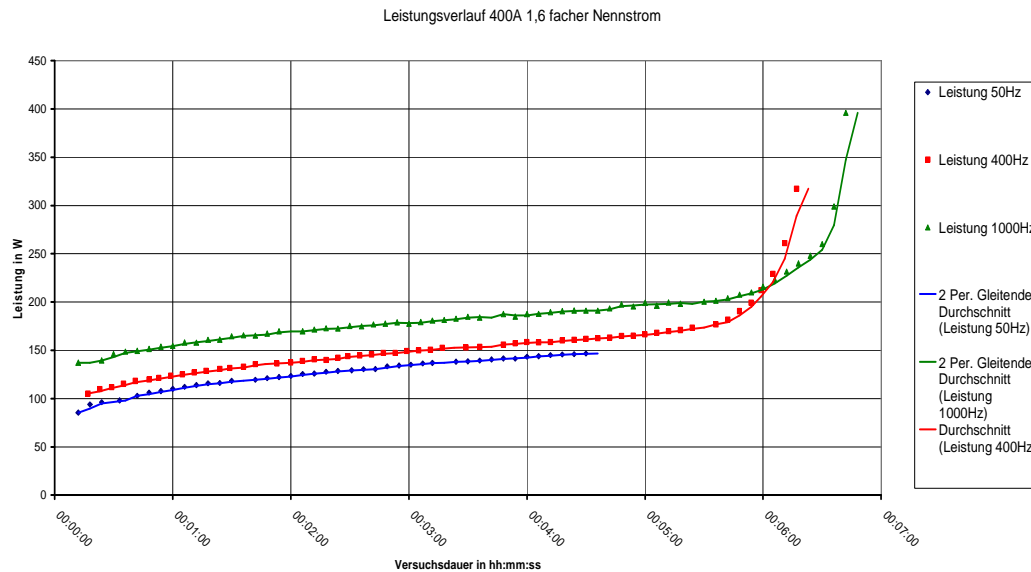


Abbildung 26: Auslösekennlinie bei 400 A und 1,6-fachem Nennstrom

Bei den durchgeführten Messungen an den Prüflingen mit 1,6-fachem Nennstrom ist wie bei den Erwärmungsmessungen eine Erhöhung der Leistung an der Sicherung bei steigender Frequenz des Stromes zu erkennen. Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass bei den Messungen, genau wie bei den vorangegangenen Versuchsreihen mit Nennstrom, eine Beeinflussung der Leistung an der Sicherung durch den Skin- und den Proximityeffekt auftritt.

3.4. Versuchsdurchführung bei Belastung der Sicherung mit dem 2,5-fachen Nennstrom

	Frequenz		Prüflinge je Sicherungsausführung				Nennstrom der Sicherung	Anzahl der Schmelzleiter
			100A	200A	300A	400A		
			I	II	III	IIII		
Auslösekennlinie bei 2,5-fachem Nennstrom (Dauer je ca. 1min)	50Hz	Kennlinie	1	1				
	400Hz		1	1				
	1000Hz		1	1				

Tabelle 3: Auslösekennlinie, Messung bei 2,5-fachem Nennstrom

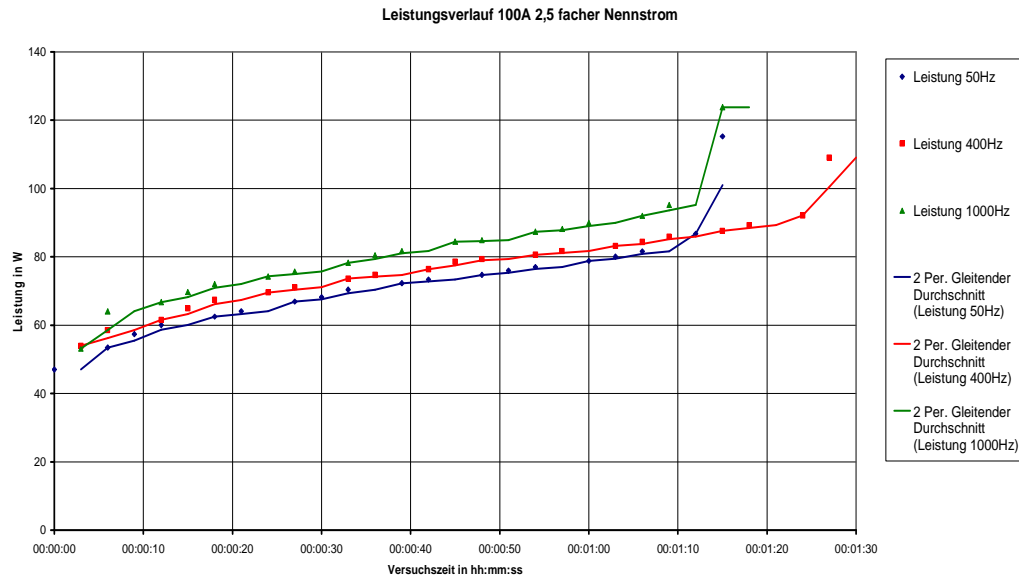


Abbildung 27: Auslösekennlinie bei 100 A und 2,5-fachem Nennstrom

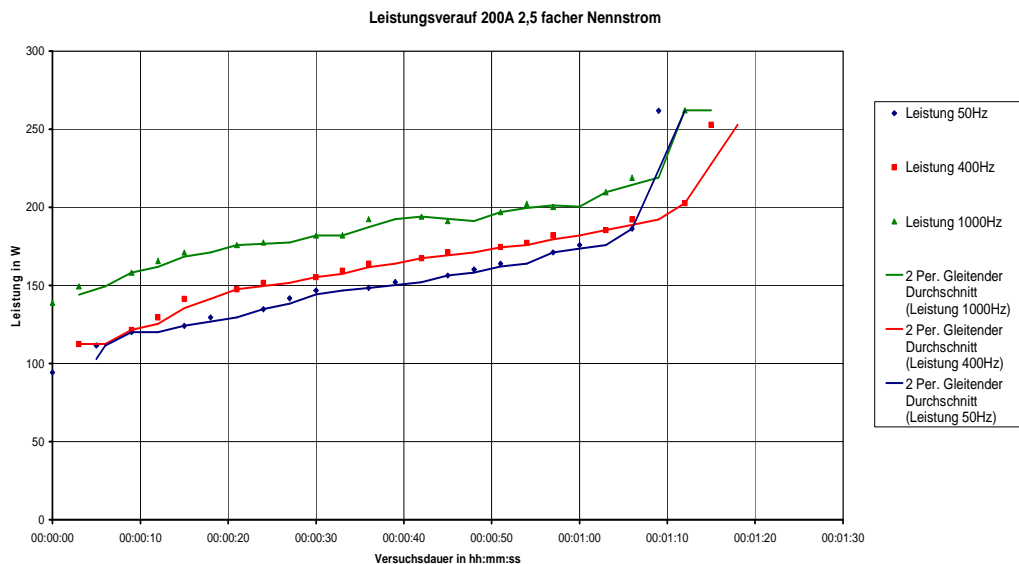


Abbildung 28: Auslösekennlinie bei 200 A und 2,5-fachem Nennstrom

4. Auswertung der Messergebnisse

In Abbildung 29 ist die mittlere Leistung in der Sicherung bei einer Belastung mit Nennstrom zu erkennen. Für die nachfolgenden Diagramme wurde der Mittelwert aus den Leistungen an den Sicherungen für den eingeschwungenen Zustand der Sicherung verwendet. Dieser Bereich der Leistung ist der Bereich der Kennlinie in dem sich die Leistung nur noch geringfügig ändert.

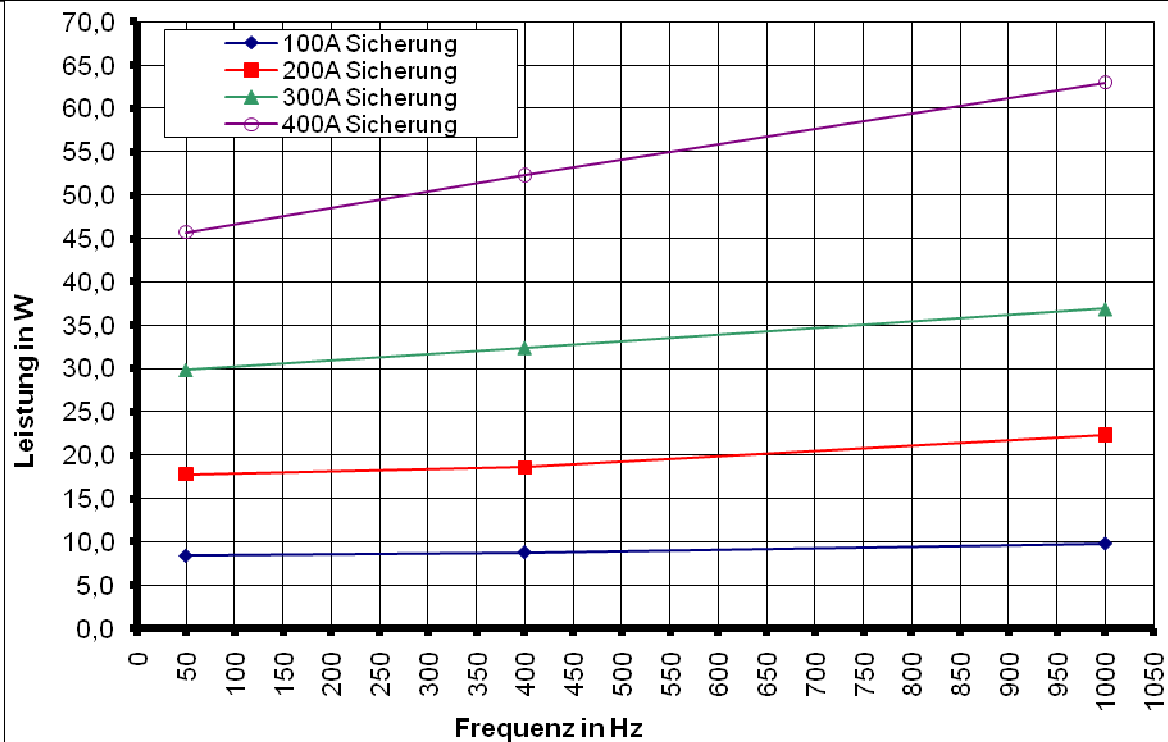


Abbildung 29: Vergleich von Leistung über Frequenz bei einer Belastung der Sicherung mit Nennstrom

In Abbildung 29 ist deutlich zu erkennen, dass sich mit steigender Frequenz auch die in der Sicherung anfallende Verlustleistung erhöht. Dieser Effekt ist bei höheren Nennströmen stärker sichtbar als bei niedrigen. Darüber hinaus ist auch noch zu erkennen, dass die Leistung annähernd linear ansteigt. Die Leistungsabgabe über der Sicherung ergibt sich bei einer rein ohm'schen Betrachtung der Sicherung. Wie in Gleichung (3.1) gezeigt ist die Leistung über einem Widerstand quadratisch abhängig vom Strom.

$$P = I^2 \cdot R \quad (3.1)$$

Dabei gilt Gleichung (3.1) für den Gleich- und für den Wechselstromwiderstand gleichermaßen [4]. Wie in [5] auf Seite 333 beschrieben, kann der Widerstandswert durch einen Leiter mit jeweils einem Korrekturfaktor für den Proximityeffekt und den Skineffekt beaufschlagt werden (siehe Gleichung (3.2))

$$R_{\sim} = R_{\sim} \cdot Y_{\text{Skin}} \cdot Y_{\text{Prox}} \quad (3.2)$$

Hierbei wirken sich die beiden Korrekturfaktoren so auf den gesamten Wechselstromwiderstand aus, dass sie ihn erhöhen. In den nachfolgenden Diagrammen (Abbildung 30 - Abbildung 33) sind die Leistungsverläufe für die einzelnen Sicherungen bei einer Erhöhung der Frequenz noch einmal einzeln dargestellt. Bei allen Messungen ist deutlich zu erkennen, dass sich die an der Sicherung anfallende Leistung annähernd linear mit der angelegten Frequenz erhöht. Dieser Zusammenhang deutet darauf hin, dass Faktoren berechnet werden können, die eine Aussage darüber geben, in wie weit der maximale Strom durch die Sicherung verringert werden muss, um wieder die gleichen Leistungsabgabe an ihr zu erreichen. Die Berechnung dieses Verringerungsfaktors soll nachfolgend am Beispiel der Verlustleistung einer Sicherung mit 50 und 1000 Hz gezeigt werden.

Es soll die Leistung an der Sicherung bei 1000 Hz genauso groß sein wie bei Betrieb mit 50 Hz, um ein annähernd gleiches Verhalten der Sicherung zu bekommen. Das bedeutet, wie in der Gleichung (3.3) gezeigt, dass die Leistung $P_{50\text{Hz}}$ gleich sein soll der Leistung P_v die bei 1000 Hz bei einem verringerten Strom durch die Sicherung I_v abfällt. Dabei ist noch zu beachten, dass es sich bei den Widerständen $R_{50\text{Hz}}$ und $R_{1000\text{Hz}}$ um Wechselstromwiderstände handelt die sich wie in Gleichung (3.2) beschrieben noch aus Faktoren für den Skin und Proximityeffekt ergeben.

$$P_{50\text{Hz}} = I^2 \cdot R_{50\text{Hz}} = P_v = I_v^2 \cdot R_{1000\text{Hz}} \quad (3.3)$$

Durch Umformung der Gleichung (3.3) erhält man Formel (3.4). Hier ist das Verhältnis der Ströme dargestellt mit dem der Strom I_v eingestellt werden muss um den gleichen Leistungsabgabe der an der Sicherung zu bekommen.

$$\begin{aligned} I_{50\text{Hz}}^2 \cdot R_{50\text{Hz}} &= I_v^2 \cdot R_{1000\text{Hz}} \\ \rightarrow \frac{I_{50\text{Hz}}}{I_v} &= \sqrt{\frac{R_{1000\text{Hz}}}{R_{50\text{Hz}}}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Nun sind für die Berechnung dieses Faktors noch die Wechselstromwiderstände der Sicherungen zu bestimmen. Aus den durchgeführten Messreihen sind jedoch die für die einzelnen Frequenzen auftretenden Leistungsabgaben bekannt. Damit ergibt sich die gemessene Leistungsabgabe für 1000 Hz an der Sicherung wie in Gleichung (3.5) gezeigt.

$$P_{1000\text{Hz}} = I^2 \cdot R_{1000\text{Hz}} \quad (3.5)$$

Die Gleichung (3.5) gilt sinngemäß auch für die Leistungsabgabe bei 50 Hz, wenn statt $R_{1000\text{Hz}}$ hier $R_{50\text{Hz}}$ eingesetzt wird. Nun können die beiden Verlustleistungsgleichungen nach ihren Wechselstromwiderständen aufgelöst werden und anschließend in die Gleichung (3.4) eingesetzt werden. Dabei kürzen sich die quadratischen Anteile der Ströme aus der Gleichung heraus, da sie ja bei allen Versuchsreihen gleich eingestellt wurden (beispielsweise auf den Nennstrom der Sicherung 100 A). Damit ergibt sich die Formel mit der ein Verhältnis k berechnet werden kann, über das der Strom verringert werden muss um den gleichen Leistungsabgabe über die Sicherung zu erreichen.

$$\frac{I_{50\text{Hz}}}{I_v} = \sqrt{\frac{P_{1000\text{Hz}}}{P_{50\text{Hz}}}} = \frac{1}{k} \quad (3.6)$$

So kann beispielsweise der Faktor k für die Stromverringern für eine 400 A Sicherung bei 50 und 1000 Hz wie in Abbildung 33 gezeigt berechnet werden.

$$\begin{aligned} \frac{I_{50\text{Hz}}}{I_v} &= \sqrt{\frac{P_{1000\text{Hz}}}{P_{50\text{Hz}}}} = \sqrt{\frac{63\text{W}}{45,7\text{W}}} = 1,174 = \frac{1}{k} \\ k &= 0,852 \end{aligned} \quad (3.7)$$

So dürfte mit dem in Gleichung (3.7) berechneten Korrekturfaktor nur noch der in Gleichung (3.8) berechnete Strom von 340,8 A durch die Sicherung fließen, wenn der Strom eine Frequenz von 1000 Hz hat.

$$I_v = I_{50\text{Hz}} \cdot k = 400\text{A} \cdot 0,852 = 340,8\text{A} \quad (3.8)$$

Der in Gleichung (3.7) berechnete Faktor kann anschließend auch rechnerisch überprüft werden (siehe Gleichung (3.9)).

$$P_v = P_{1000\text{Hz}} \cdot k^2 = 63\text{W} \cdot 0,852^2 = 45,7\text{W} \quad (3.9)$$

Die sich aus den Messungen ergebenden Korrekturfaktoren für die Ströme bei höheren Frequenzen sind in Tabelle 4 dargestellt.

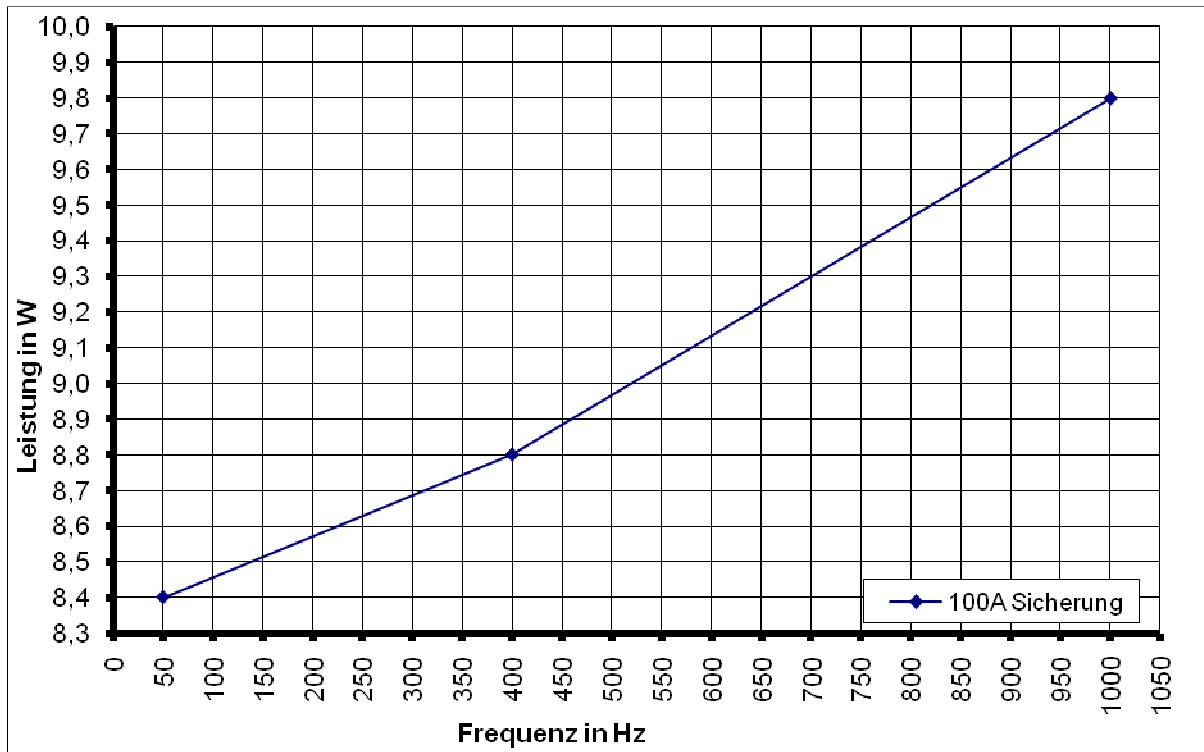


Abbildung 30: Leistungsanstieg über die Frequenz bei einer 100 A Sicherung bei Belastung mit Nennstrom

Um die Erhöhung der Leistungen bei Nennstrom durch die Sicherungen genauer analysieren zu können wurden diese in den Diagrammen von Abbildung 30 bis Abbildung 33 einzeln dargestellt und die Achsenskalierungen so angepasst, dass die Erhöhungen graphisch am besten sichtbar sind.

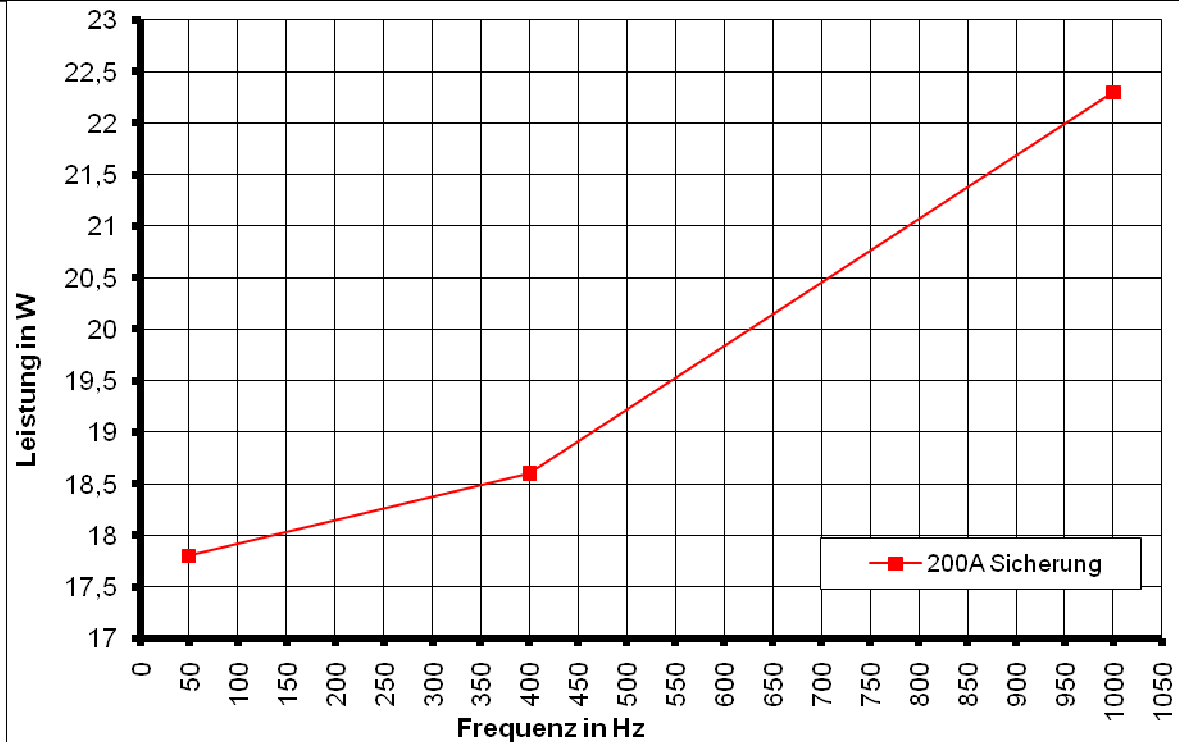


Abbildung 31: Leistungsanstieg über die Frequenz bei einer 200 A Sicherung bei Belastung mit Nennstrom

Die geringere Leistung bei 400 Hz bei den 100 und 200 A Sicherungen (Abbildung 31, Abbildung 30) können auf Unterschiede des Gleichstromwiderstandes der Sicherungen zurückgeführt werden. Für die Berechnung der Leistungsabgaben ergibt sich der Wechselstromwiderstand aus dem Gleichstromwiderstand multipliziert mit zwei Korrekturfaktoren, für den Skin- und den Proximityeffekt (siehe Gleichung (3.2)). Durch im Fertigungsprozess auftretende Materialstreuungen im Widerstand der Sicherung unterscheidet sich der Gleichstromwiderstand der Sicherungen leicht (siehe Anhang A). Dieser Unterschied trägt einen Teil der auftretenden Leistungsänderungen bei. Bei den Sicherungen mit den kleinen Strömen sind nur 1 bzw. 2 Schmelzleiter in der Sicherung vorhanden. Dadurch macht sich ein Unterschied im Gleichstromwiderstand der Sicherungen viel stärker bemerkbar, als bei den Sicherungen mit 3 oder 4 parallelen Schmelzleitern wo dieser Effekt durch die Parallelschaltung wieder weitgehend aufgehoben wird.

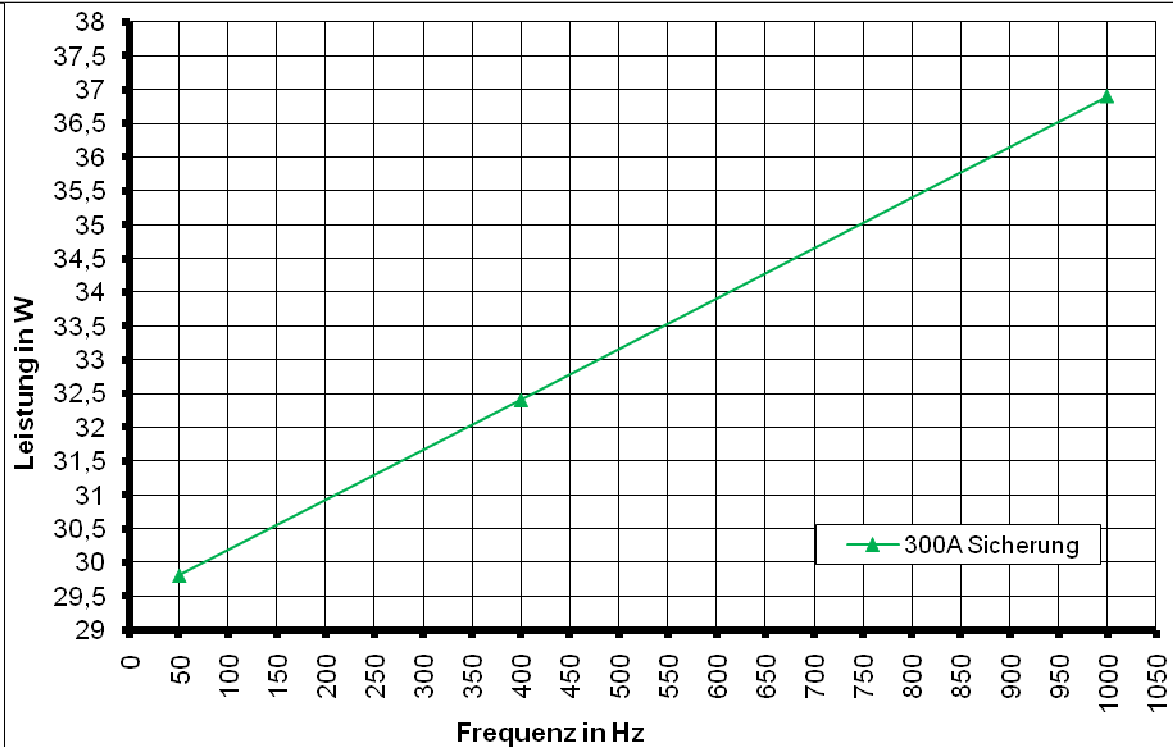


Abbildung 32: Leistungsanstieg über die Frequenz bei einer 300 A Sicherung bei Belastung mit Nennstrom

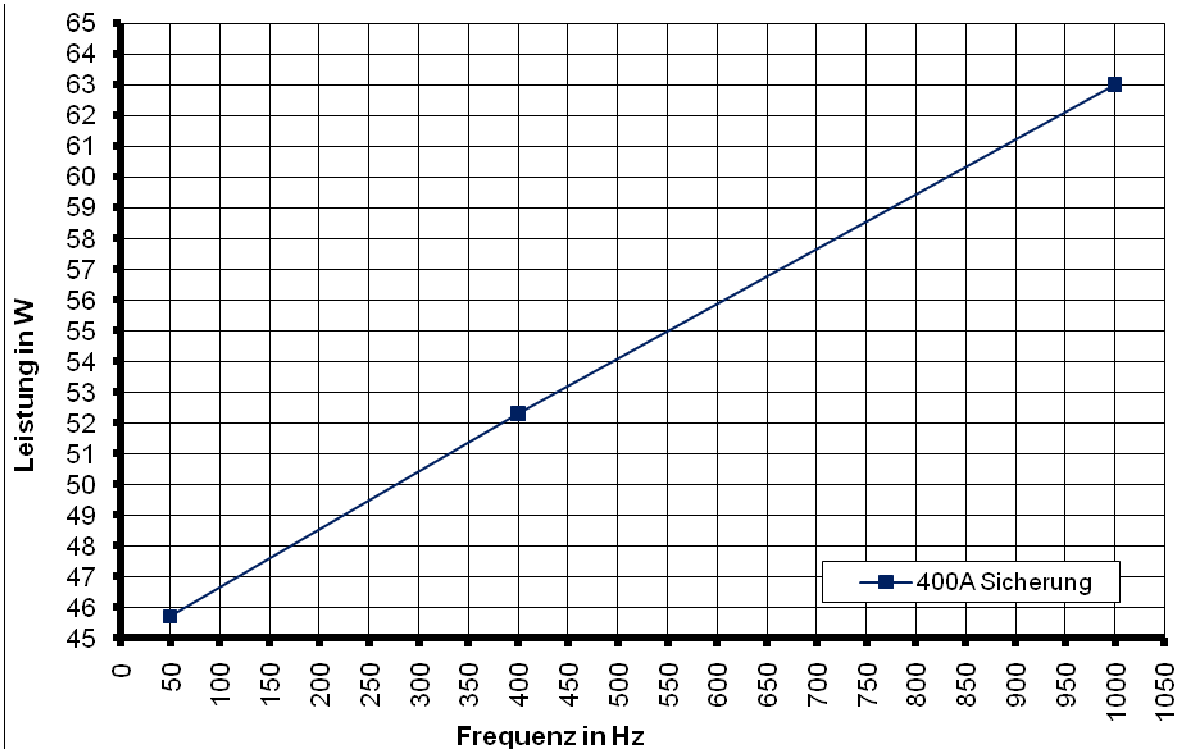


Abbildung 33: Leistungsanstieg über die Frequenz bei einer 400 A Sicherung bei Belastung mit Nennstrom

Für die Leistungen bei der Erhöhung der Ströme durch die Sicherung auf 1,6- bzw. 2,5-fachen Nennstrom konnte der eingeschwungene Zustand der Leistung an den Sicherungen nicht mehr eindeutig erkannt werden, da sich die Sicherung während

des Versuchsverlaufes immer mehr erwärmte und damit der von der Temperatur abhängige Gleichstromwiderstand R in der Sicherung immer weiter ansteigt. Damit aber auch über diese Messungen eine Auswertung über den Anstieg der Sicherungsleistung getroffen werden konnte wurde hier auch eine mittlere Leistung benötigt. Bei dem Leistungsverlauf in der Sicherung wie beispielsweise in Abbildung 24 ist aber dennoch ein annähernd linearer Bereich zu erkennen in dem die Leistung gleichmäßig ansteigt, bis die Sicherung dann auslöst und sich die Leistung an ihr drastisch erhöht. Um eine einheitliche Aussage über die Leistungen an den Sicherungen treffen zu können wurde bei den Auswertungen der Mittelwert der Leistungsverläufe im linear ansteigenden Bereich errechnet und für die weiteren Auswertungen benutzt. Damit ergeben sich die nachfolgend dargestellten Leistungskennlinien für die mit 1,6- bzw. 2,5-fachem Nennstrom belasteten Sicherungen (siehe Abbildung 34 ,Abbildung 35).

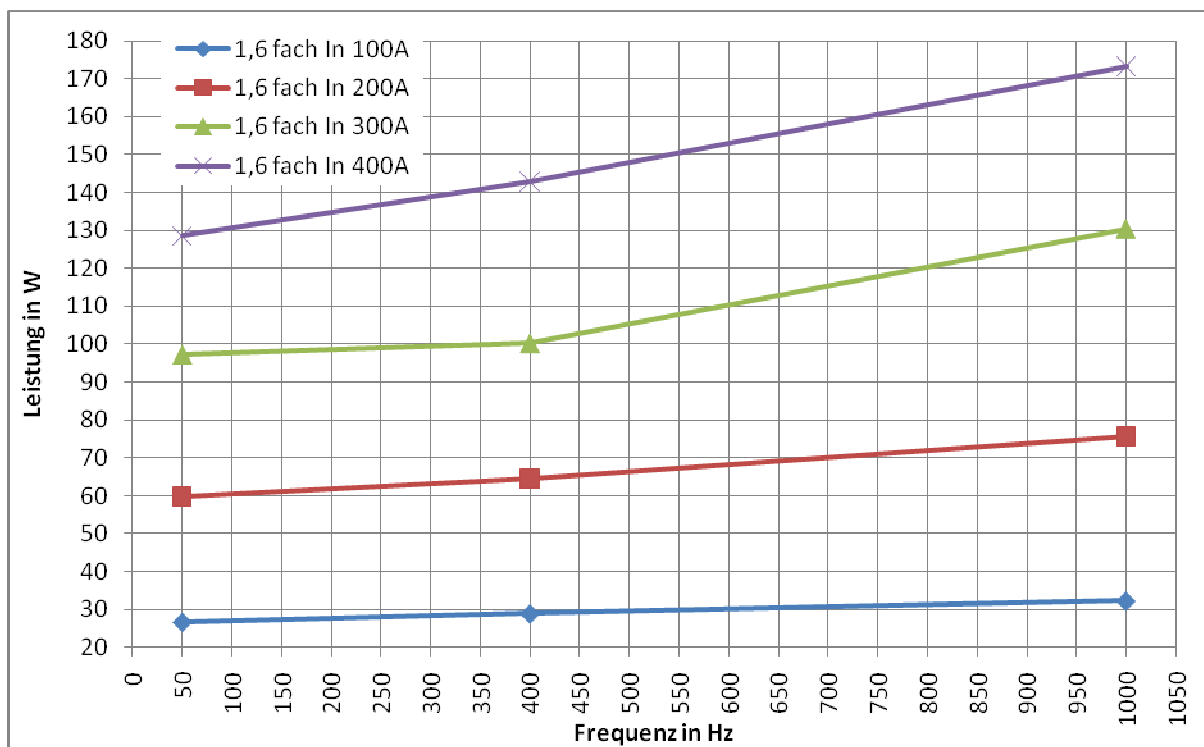


Abbildung 34: An der Sicherung mit 1,6-fachem Nennstrom abfallende Leistungsabgabe

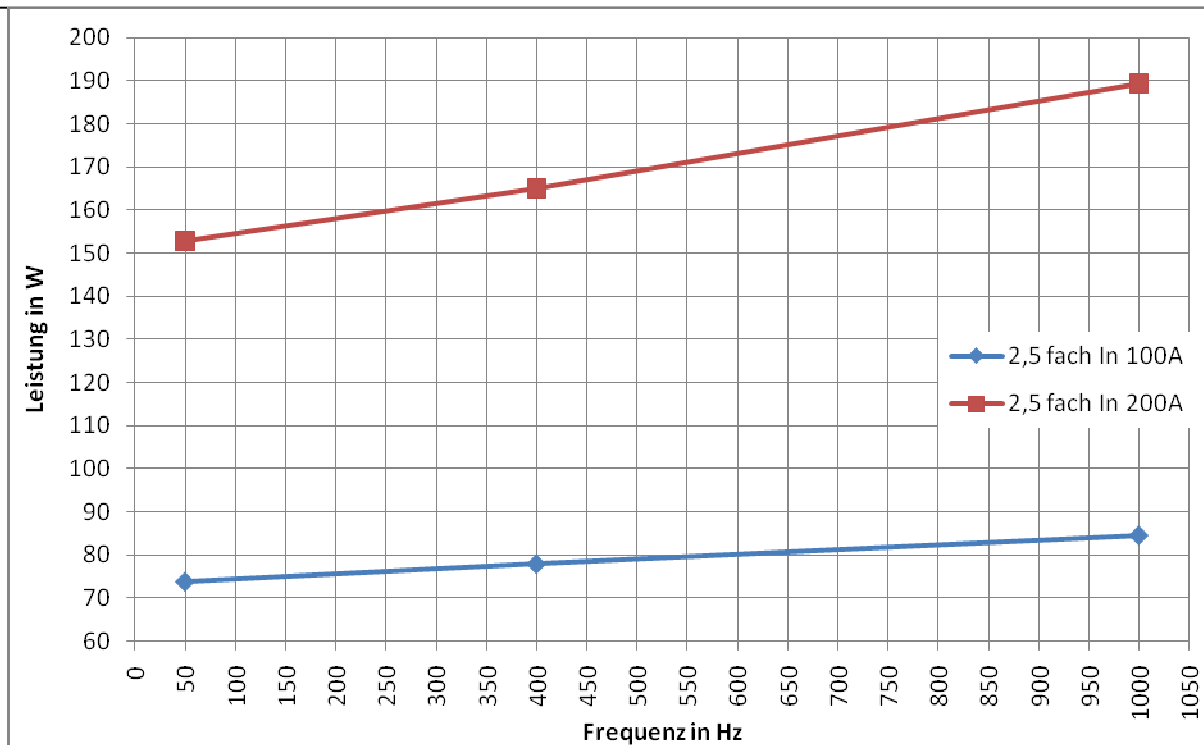


Abbildung 35: Verlustleistung der Sicherung mit 2,5-fachem Nennstrom

Auch bei den in Abbildung 34 und Abbildung 35 dargestellten Leistungsverläufen ist der Anstieg der Leistung bei höheren Frequenzen deutlich zu erkennen. Darüber hinaus kann auch festgestellt werden, dass der Anstieg der Sicherungsleistungen wieder annähernd linear verläuft. Von daher kann davon ausgegangen werden, dass hier auch Korrekturfaktoren berechnet werden können. Es ist aus den Messungen auch zu erkennen, dass die Korrekturfaktoren für den Nennstrom, den 1,6-fachen Nennstrom und den 2,5-fachen Nennstrom annähernd gleich sind (siehe Tabelle 4). Dies war auch zu erwarten, da es sich ja um die gleiche Sicherung handelt. Die Streuungen in den Korrekturfaktoren können wieder auf Messungenauigkeiten und auf den Versuchsaufbau zurückgeführt werden. So treten bei einem höheren, durch den Spannungszwischenkreisumrichter erzeugten Strom auch höhere Oberschwingungen im Strom auf. Diese Oberschwingungen beeinflussen anschließend wieder den Stromverlauf durch die Sicherung. Durch die oben beschriebenen Skin- und Proximityeffekte wird sich die Verteilung des Stromes in der Sicherung verändern und somit auch eine leicht andere Leistung erreicht werden. Dennoch halten sich diese Effekte derart in Grenzen, dass die Ähnlichkeit in den Korrekturfaktoren erkannt werden kann.

Korrekturfaktoren für gleiche Leistungsabgabe

		400Hz	1000Hz
I_n	100A	0,9770	0,9258
	200A	0,9783	0,8934
	300A	0,9590	0,8987
	400A	0,9348	0,8517
$1,6 I_n$	100A	0,9610	0,9095
	200A	0,9616	0,8887
	300A	0,9848	0,8628
	400A	0,9490	0,8614
$2,5 I_n$	100A	0,9738	0,9352
	200A	0,9624	0,8981

Tabelle 4: Korrekturfaktoren für die Ströme für einen Leistungsabgabe an der Sicherung wie bei 50Hz

Ströme durch die Sicherungen für gleiche Leistung

	50 Hz	400 Hz	1000 Hz
I_n in A	100	97,70	92,58
	200	195,65	178,68
	300	287,71	269,60
	400	373,91	340,68
$1,6 I_n$ in A	100	153,76	145,52
	200	307,70	284,38
	300	472,71	414,13
	400	607,35	551,32
$2,5 I_n$ in A	100	243,46	233,81
	200	481,20	449,05

Tabelle 5: Maximal zulässige Stromwerte für die Belastung der Sicherungen mit höherfrequenten Strömen

Die in Tabelle 5 berechneten Ströme müssten eingestellt werden um das gleiche Verhalten der Sicherung zu erreichen wie bei einem Stromfluss bei 50 Hz. Wenn nun Sicherungen mit höheren Frequenzen betrieben werden, kann anhand der Tabelle leicht bestimmt werden welcher maximale Strom dann noch durch die Sicherung fließen darf. Anhand dieser Korrekturfaktoren kann leicht bestimmt werden mit welchem maximalen Strom die Sicherung belastet werden darf wenn sie mit einem Strom einer höheren Frequenz durchflossen wird.

Auswertung der Schmelzzeiten der Sicherungsmuster

In den nachfolgenden Abbildungen wurden die bei den Tests gemessenen Schmelzzeiten und Ströme dargestellt.

Die nachfolgend gezeigten Veränderungen der Schmelzkennlinien durch einen Stromfluss durch die Sicherung mit höherer Frequenz beinhalten noch verschiedene Betrachtungen auf die nachfolgend noch eingegangen werden soll.

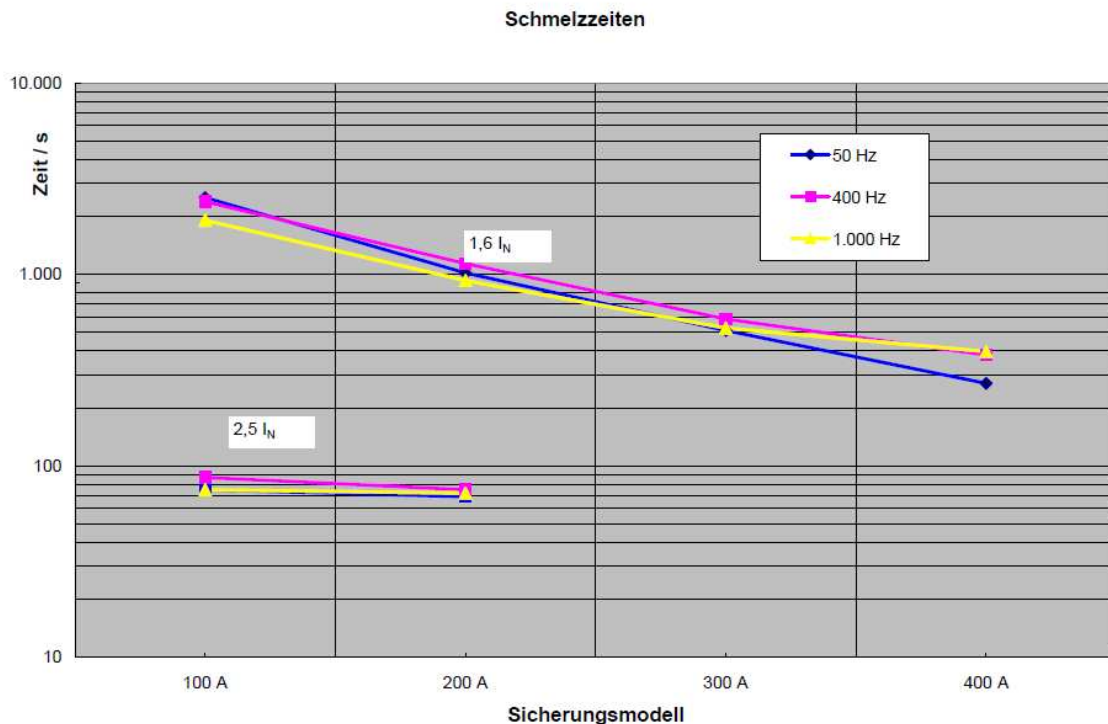


Abbildung 36: Darstellung der Schmelzzeiten der Sicherungsprüflinge

Um die Messergebnisse praktisch anwenden zu können, muss die Beeinflussung der Schmelzleiter durch die höherfrequenten Ströme, in eine Zeit/Strom-Kennlinie (siehe Abbildung 38) eingetragen werden. Dabei ist zu beachten, dass bei den Messungen Sicherungsprüflinge mit gleichen parallelen Schmelzleitern verwendet wurden, die nicht dem Aufbau und der Auslegung einer Normsicherung entsprechen, die Zeit/Strom-Kennlinien aber nur für Normsicherungen existieren.

Erkennbar ist das an der höheren Verlustleistung der verwendeten Sicherungsprüflinge mit gleichen parallelen Schmelzleitern. Die Sicherungsprüflinge sind zu Normprüflingen thermisch unterdimensioniert. Das bedeutet, die Sicherung kann nicht den mehrfachen Nennstrom entsprechend der Schmelzleiterzahl tragen.

Eine Sicherung mit zwei parallelen Schmelzleitern setzt nicht genau die doppelte Verlustleistung um, wie eine mit nur einem Schmelzleiter sondern mehr.

Um die anfallenden Auslösezeiten dennoch in eine Zeit/Strom-Kennlinie einzeichnen zu können, wurden die Stromtragfähigkeit der Sicherung mit ihrer Verlustleistung normiert. Das bedeutet, wenn beispielsweise die Sicherung mit zwei parallelen Schmelzleitern eine Verlustleistung von 20 W besitzt und eine mit nur einem Schmelzleiter eine von 8,4 W, müsste die richtig dimensionierte Sicherung mit zwei parallelen Schmelzleitern einen linearen Anstieg Sicherungsverlustleistung aufweisen. Das bedeutet die Sicherung mit zwei parallelen Schmelzleitern müsste eine Verlustleistung von $2 \times 8,4 \text{ W} = 16,8 \text{ W}$ umsetzen. Somit ist die Verlustleistung an der im Versuch verwendenden Sicherung um 19 % erhöht. Die gemessene

Leistungsabgabe entspricht somit einem um 9 % höheren Strom, der als Basis der Kennlinien aus Abbildung 38 verwendet wurde. Eine genaue Beschreibung der verschiedenen Korrekturfaktoren der Stromwerte ist in Abbildung 37 abzulesen.

Unter Berücksichtigung dieser Korrekturfaktoren liegen die gemessenen Schmelzzeiten recht gut im Bereich der Zeit/Strom-Kennlinie der 100 A Sicherung nach Herstellerangaben, die für 50 Hz Wechselstrom gilt. Die Abweichungen bis 1000 Hz liegen nicht nur innerhalb der Normgrenzen von $\pm 20\%$ sondern auch innerhalb einer üblichen Fertigungstoleranz von $\pm 10\%$ in Richtung der Stromachse.

Umrechnung der Stromwerte

		I	II	III	IIII	
P_N	50 Hz	8,4	20,00	33,00	48,00	W
P_N	Faktor	1	1,19	1,31	1,43	W
I_N	Faktor	1	1,09	1,14	1,20	A

P_N	400 Hz	9,5	25,50	38,50	55,00	W
P_N	Faktor	1	1,34	1,35	1,45	W
I_N	Faktor	1	1,16	1,16	1,20	A

P_N	1000 Hz	9,25	25,00	50,00	85,00	W
P_N	Faktor	1	1,35	1,80	2,30	W
I_N	Faktor	1	1,16	1,34	1,52	A

Abbildung 37: Korrektur der Ströme und Verlustleistungen für die Zeit/Strom-Kennlinie

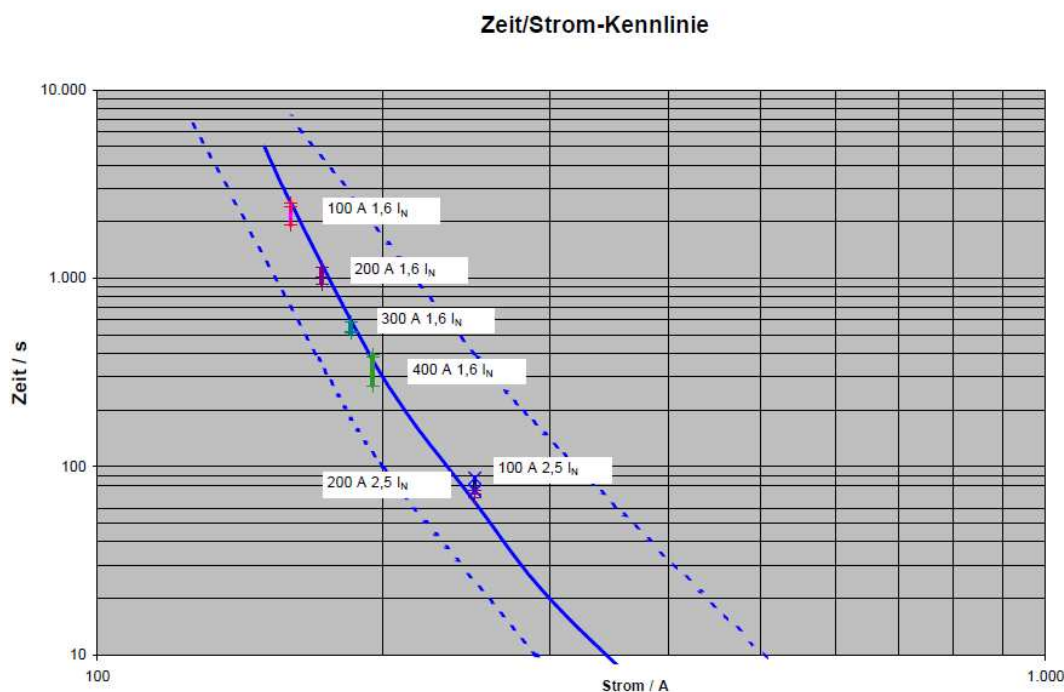


Abbildung 38: Frequenzeinfluss bis 1000 Hz auf die Zeit/Strom-Kennlinien
(Normgrenzen gestrichelt eingezeichnet)

5. Zusammenfassung

In der oben beschriebenen Untersuchung wurden Sicherungen mit parallel angeordneten Schmelzleitern auf ihr Verhalten bei Strömen mit Frequenzen oberhalb der Netzfrequenz (50 Hz) untersucht. Dabei wurde mit Hilfe eines Spannungszwischenkreisumrichters, der mit einer Zweipunktstromregelung arbeitet, ein nahezu sinusförmiger Strom erzeugt. Der Leistungsabgabe und die Temperatur an den Sicherungen wurden bei einer Frequenz des Stromes von 50 Hz, 400 Hz und 1000 Hz untersucht. Hierbei wurden bis zum thermischen Einschwingen bzw. zum Auslösen der Sicherung die Leistung und Temperatur ermittelt. Mit Hilfe dieser aufgezeichneten Daten konnte das Verhalten der Sicherung bei 400 und 1000 Hz mit dem von 50 Hz verglichen werden. Für die bei den Frequenzen anfallenden Leistungen wurde ein Korrekturfaktor berechnet mit dem ein identisches Verhalten der Sicherung hervorgerufen werden kann wie bei einem Strom mit 50 Hz durch die Sicherung. Die Leistungskurven wurden für Nennstrom, 1,6- und 2,5-fachen Nennstrom aufgenommen und bei den Auswertungen hat sich gezeigt, dass die Korrekturfaktoren für die einzelnen Sicherungen annähernd gleich sind. Damit kann die Aussage getroffen werden, dass die errechneten Korrekturfaktoren auch das Verhalten der Sicherungen in ihren Überlastungszuständen richtig abbilden. Es ist zu beachten, dass durch die verschiedenen Einflüsse der höherfrequenten Ströme auf die Sicherungen die in den Messungen bestimmten Korrekturfaktoren nicht direkt auf Normsicherungen übertragen werden können. Die Verlustleistungsmessungen wurden nur für speziell angefertigte Sicherungen, mit parallel angeordneten Schmelzleitern, durchgeführt. Für Normsicherungen, die einen anderen geometrischen Aufbau haben, werden sich andere Korrekturfaktoren ergeben. Diese Faktoren sind abhängig von Skin- und Proximityeffekt und diese beiden Effekte sind wie in den Kapiteln 2.1 und 2.2 beschrieben sehr stark abhängig vom geometrischen Aufbau der Sicherung. Solche Korrekturfaktoren können für verschiedene Typen von Sicherungen nun mit den in diesem Bericht beschriebenen Methoden bestimmt werden.

6. Formelzeichen

R_{\sim}	Wechselstromwiderstand
R_{\sim}	Gleichstromwiderstand
$R_{50\text{Hz}}$	Wechselstromwiderstand bei 50 Hz
$R_{1000\text{Hz}}$	Wechselstromwiderstand bei 1000 Hz
$P_{50\text{Hz}}$	Leistung bei 50 Hz
$P_{1000\text{Hz}}$	Leistung bei 1000 Hz
I_v	Verringerter Strom
I	Strom
Y_{Skin}	Korrekturfaktor des Wechselstromwiderstandes durch den Skineffekt
Y_{Prox}	Korrekturfaktor des Wechselstromwiderstandes durch den Proximityeffekt
J	Stromdichte
δ	Eindringtiefe des Stromes beim Skineffekt
b	Breite des Schmelzleiters
d	Dicke des Schmelzleiters
z	Position in der Dicke des Schmelzleiters vom Mittelpunkt aus
r	Innerer Radius des Schmelzleiters
R	Äußerer Radius des Schmelzleiters
I_0	Gleichstrom durch den Schmelzleiter
μ	Permeabilität
ω	Kreisfrequenz $2 \cdot \pi \cdot f$
κ	spezifische Leitfähigkeit
j	Imaginäre Einheit

7. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Tabelle der durchgeführten Versuch bei Nennstrombelastung	13
Tabelle 2: Auslösekennlinie Messung bei 1,6-fachen Nennstrom	18
Tabelle 3: Auslösekennlinie, Messung bei 2,5-fachem Nennstrom	20
Tabelle 4: Korrekturfaktoren für die Ströme für einen Leistungsabgabe an der Sicherung wie bei 50Hz	29
Tabelle 5: Maximal zulässige Stromwerte für die Belastung der Sicherungen mit höherfrequenten Strömen.....	29

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Skin Effekt eines rechteckförmigen Leiters bei einem Strom mit 100 Hz, 1000 Hz und 10000 Hz.....	4
Abbildung 2: Theoretische Stromverteilung in der Sicherung.....	5
Abbildung 3: Aufbau der Sicherung mit 3 parallelen Schmelzleitern in Maxwell 3D ...	6
Abbildung 4: Stromverdrängung über einen Leiter bei 1000 Hz	6
Abbildung 5: Stromverdrängung über drei Leitern bei 1000 Hz	7
Abbildung 6: Stromverdrängung über vier Leitern bei 1000 Hz	8
Abbildung 7: Versuchsaufbau der Wärmebildkameramessungen	9
Abbildung 8: Aufnahme der Sicherung mit der Wärmebildkamera	9
Abbildung 9: Aufnahme der Sicherung mit der Wärmebildkamera	9
Abbildung 10: Aufbau des Sicherungstests	10
Abbildung 11: Versuchsaufbau im Schaltschrank.....	11
Abbildung 12: Aufbau des Zwischenkreisumrichters	11
Abbildung 13: $I_{\text{eff}} = 100 \text{ A}$ Frequenz = 200 Hz CH1: Strom durch die Spule.....	11
Abbildung 14: $I_{\text{ff}} = 100 \text{ A}$, Frequenz = 200 Hz Spektrum des Stromes	12
Abbildung 15: Leistungsabgabe bei $I = 100 \text{ A}$ und 50 Hz idealem Sinusstrom.....	14
Abbildung 16: Leistungsabgabe bei $I = 200 \text{ A}$ und 50 Hz idealem Sinusstrom.....	14
Abbildung 17: Leistungsabgabe bei $I = 300 \text{ A}$ und 50 Hz idealem Sinusstrom.....	15
Abbildung 18: Leistungsabgabe bei $I = 400 \text{ A}$ und 50 Hz idealem Sinusstrom.....	15
Abbildung 19: Vergleich der Leistungsverläufe bei 100 A	16
Abbildung 20: Vergleich der Leistungsverläufe bei 200 A	16
Abbildung 21: Vergleich der Leistungsverläufe bei 300 A	17
Abbildung 22: Vergleich der Leistungsverläufe bei 400 A	17
Abbildung 23: Auslösekennlinie bei 100A und 1,6-fachem Nennstrom	18
Abbildung 24 : Auslösekennlinie bei 200A und 1,6-fachem Nennstrom	19
Abbildung 25: Auslösekennlinie bei 300 A 1,6-fachem Nennstrom	19
Abbildung 26: Auslösekennlinie bei 400 A und 1,6-fachem Nennstrom	20
Abbildung 27: Auslösekennlinie bei 100 A und 2,5-fachem Nennstrom	21
Abbildung 28: Auslösekennlinie bei 200 A und 2,5-fachem Nennstrom	21
Abbildung 29: Vergleich von Leistung über Frequenz bei einer Belastung der Sicherung mit Nennstrom	22
Abbildung 30: Leistungsanstieg über die Frequenz bei einer 100 A Sicherung bei Belastung mit Nennstrom	24
Abbildung 31: Leistungsanstieg über die Frequenz bei einer 200 A Sicherung bei Belastung mit Nennstrom	25
Abbildung 32: Leistungsanstieg über die Frequenz bei einer 300 A Sicherung bei Belastung mit Nennstrom	26
Abbildung 33: Leistungsanstieg über die Frequenz bei einer 400 A Sicherung bei Belastung mit Nennstrom	26
Abbildung 34: An der Sicherung mit 1,6-fachem Nennstrom abfallende Leistungsabgabe	27

Abbildung 35: Verlustleistung der Sicherung mit 2,5-fachem Nennstrom.....	28
Abbildung 36: Darstellung der Schmelzzeiten der Sicherungsprüflinge	30
Abbildung 37: Korrektur der Ströme und Verlustleistungen für die Zeit/Strom-Kennline	31
Abbildung 38: Frequenzeinfluss bis 1000 Hz auf die Zeit/Strom-Kennlinien (Normgrenzen gestrichelt eingezeichnet)	31

9. Literaturverzeichnis

1. Gheisari, A.H., E. Farjah, and H. Abiri. *An electrothermal model for investigation of harmonic effects produced by power electronic devices on protection elements*. in *Compatibility and Power Electronics, 2009. CPE '09*. 2009.
2. Howe, A.F. and C.M. Jordan, *Derating of semiconductor fuselinks for use in high-frequency applications*. Electric Power Applications, IEE Proceedings B, 1982. **129**(3): p. 111-116.
3. Henke, H., *Elektromagnetische Felder*. 2007. **3. Auflage**.
4. A. Keil, W.A.M., E. Vinaricky, *Elektrische Kontakte und ihre Werkstoffe*. 1983.
5. D. Oeding, B.R.O., *Elektrische Kraftwerke und Netze*. 2004.

10. Anhang A

Vom Sicherungshersteller gemessene Widerstandswerte für die Sicherungsprüflinge.

Anzahl Schmelzleiter	Laufende Nr.	Ri mΩ
1	1	0,693
	2	0,688
	3	0,697
	4	0,698
	5	0,698
	6	0,689
	7	0,690
	8	0,687
	9	0,684
	10	0,695
	11	0,686
	12	0,695
	13	0,693
	14	0,693
	15	0,684

Anzahl Schmelzleiter	Laufende Nr.	Ri mΩ
2	16	0,362
	17	0,359
	18	0,363
	19	0,359
	20	0,362
	21	0,354
	22	0,358
	23	0,360
	24	0,364
	25	0,365
	26	0,366
	27	0,356
	28	0,358
	29	0,351
	30	0,358

Anzahl Schmelzleiter	Laufende Nr.	Ri mΩ
3	31	0,250
	32	0,247
	33	0,250
	34	0,251
	35	0,250
	36	0,250
	37	0,257
	38	0,243
	39	0,248
	40	0,246
	41	0,247
	42	0,249
	43	0,251
	44	0,250
	45	0,252

Anzahl Schmelzleiter	Laufende Nr.	Ri mΩ
4	46	0,201
	47	0,195
	48	0,201
	49	0,199
	50	0,203
	51	0,196
	52	0,201
	53	0,204
	54	0,204
	55	0,197
	56	0,197
	57	0,197
	58	0,201
	59	0,195
	60	0,198

