

Schutz vor den Wirkungen von Blitzströmen in einer Niederspannungsverteilung und Koordination von Überspannungs- schutzeinrichtungen in einem TT-NETZ.

Dipl.-Ing. Christof Drilling*, Dipl.-Ing. Markus Droidner*, Ing.(grad) Ernst Günther Jordan*.
Prof. Dr.-Ing. Jan Meppelink**.

*BET Blitzschutz und EMV Technologiezentrum GmbH, 58710 Menden

** Universität GH Paderborn Abt. Soest FB 16 59494 Soest

Copyright: Alle Rechte vorbehalten. Prof. Dr.Ing. J. Meppelink

1. Einleitung

Der zunehmende Einsatz elektronischer Geräte in Industrie, Verwaltung und Haushalten führt zu einer zunehmenden Schadenshäufigkeit durch Überspannungen. Die Ursachen dieser Schäden sind meist auf Überspannungen als Wirkung von Blitzeinschlägen in ein Gebäude oder in die Nähe eines Gebäudes oder in eine angeschlossene Leitung zurückzuführen. Die elektrischen Parameter der Blizentladung, die Wirkungen von Blizentladungen und Schutzkonzepte für den äußeren und inneren Blitzschutz sind weitgehend bekannt und in der Normung festgehalten. Bild 1 zeigt die in den Normen festgelegten Bedrohungswerte für bestimmte Blitzschutzklassen.

Die Vielfalt der Netzformen in Deutschland erfordert jedoch ein selektives Vorgehen bei der Auswahl und der Installation von Überspannungsschutzeinrichtungen. Der Überspannungsschutz ist aus der Geschichte der Elektrotechnik mit der Energieübertragung verbunden. Dabei wurden insbesondere Blitzeinschläge in die Freileitung als Ferneinschlag behandelt und die dadurch hervorgerufenen Überspannungen mit Überspannungsableitern begrenzt. Erst mit dem Einzug der Elektrotechnik in Gebäude wurde neben der äußeren Blitzschutzanlage auch der transiente Blitzschutz-Potentialausgleich der Niederspannungsanlage erforderlich. Damit existieren zwei Begriffe, der **Überspannungsableiter** und der **Blitzstromableiter**, die in diesem Beitrag am Beispiel des TT-Netzes besonders behandelt werden. Dazu wurde der Überspannungsschutz in einem Drehstromsystem für das TT-Netz mit den zugehörigen Überspannungsableitern und Blitzstromableitern modelliert und für eine Computersimulation vorbereitet. Vorab werden jedoch die Überspannungsbeanspruchungen in einem Niederspannungsnetz aufgezeigt und die Isolationskoordination erläutert. An einem Beispiel werden die Vorgänge in der elektrischen Installation bei einem Blitzeinschlag in ein Gebäude beschrieben. Daraus werden die Grundfunktionen von Blitzstromableitern und Überspannungsableitern erklärt. Eine Computersimulation zeigt alle relevanten Effekte wie Überspannungen, Koordination und die Energieaufnahme der einzelnen Geräte.

2. Überspannungen in Niederspannungsnetzen

Überspannungen in Niederspannungsnetzen haben meist folgende Ursachen:

- Schaltüberspannungen durch das Abschalten von Sicherungen und Abschalten von induktiven Verbrauchern.
- Blitzüberspannungen durch Ferneinschläge und direkte Blitzeinschläge in die äußere Blitzschutzanlage oder in die Erde in der Nähe eines Gebäudes mit elektrischen Installationen.

In Bild 2 sind die Größenordnungen der auftretenden Überspannungen in Niederspannungsnetzen dargestellt. Es ist zu beachten, dass diese Überspannungen unterschiedlichen statistischen Verteilungen unterliegen. Den größten Wert erreichen die Blitzüberspannungen. Sie treten aber in der Regel weitaus seltener auf, als die Schaltüberspannungen. Überspannungen überschreiten allerdings die Nennsteh-Blitzstoßspannungen für die Niederspannungsinstallation, vergl. Kap. 3.

Die Impulsenergie von Überspannungen ist in Bild 3 dargestellt. Die Impulsenergie ist die Energie, die bei Anlegen der Spannung $u(t)$ an einen Widerstand in diesem umgesetzt wird und ist folgendermaßen definiert:

$$W * R = \int_0^{\infty} u^2(t) dt$$

Auch hier nehmen die Blitzüberspannungen den größten Wert an.

3 Überströme in Niederspannungsnetzen

Neben den in Kapitel 2 beschriebenen Überspannungen wird eine Niederspannungsschaltanlage auch durch Überströme infolge von Kurzschlüssen, Erdschlüssen und Blitzströmen beansprucht. Überspannungsschutzgeräte, deren Funktion später beschrieben wird, werden von Teil-Blitzströmen durchflossen und müssen im Falle von Blitzstromableitern auf Funkenstreckenbasis den Netzfolgestrom führen und löschen. Daher sind in Bild 4 und 5 Parameter von netzfrequenten Kurzschlussströmen und Blitzströmen dargestellt. Bild 4 zeigt die Stromscheitelwerte. Dabei fällt auf, dass die Blitzströme hier den größten Scheitelwert erreichen. Die Kurzschlussströme hängen ab vom Fehlerort, der Impedanz der Verbindung zum Transformator und von der eingespeisten Leistung und erreichen unter ungünstigen Umständen auch Werte bis zu 20-30 kA. Die Blitzströme von Ferneinschlägen sind durch den Leitungswellenwiderstand der Leitung begrenzt und erreichen nur kleine Werte. Bei den Direkteinschlägen in die äußere Blitzschutzanlage oder in deren Nähe werden in der Niederspannungsanlage sehr hohe Blitzströme wirksam. Das Grenzlastintegral (spezifische Energie) ist definiert als die in einem Widerstand R umgesetzte Energie beim Durchfluss eines Impulsstromes $i(t)$.

$$\frac{W}{R} = \int_0^{\infty} i^2(t) dt$$

Die Grenzlastintegrale der Überströme sind in Bild 5 dargestellt. In Bild 5 wird aber deutlich, dass auch die Kurzschlussströme ein Grenzlastintegral in der Größe der Blitzströme aufweisen.

4 Isolationskoordination in Niederspannungsnetzen

In einem Niederspannungsnetz ist zwischen den Beanspruchungen durch Überspannungen und den Kosten zur Beherrschung dieser Überspannungen durch Isolation ein technisch und wirtschaftliches Optimum zu finden. Die Nennspannungen liegen durch die VDE Normen fest /4.1/. Die Belastung durch Überspannungen wurde in Abschnitt 2 beschrieben. Die Norm /4.1/ legt die Bemessungs-Stoßspannung $1,2/50 \mu s$ als Grundlage zur Bemessung der Isolation von Niederspannungsschaltanlagen und Hausinstallationen fest. Tabelle 1 zeigt Auszüge aus /4.1/ für ein 230/400 Volt Drehstromnetz.

Nennspannung des Stromversorgungssystems	Bemessungsstoßspannung für:			
	Betriebsmittel an der Einspeisung der Installation (Überspannungskategorie IV)	Betriebsmittel als Teil der festen Installation (Überspannungskategorie III)	Betriebsmittel zum Anschluß an die feste Installation (Überspannungskategorie II)	Besonders geschützte Betriebsmittel (Überspannungskategorie I)
230/400 V 277/480 V	6 kV	4 kV	2,5 kV	1,5 kV

Tabelle 1 Bemessungs-Stoßspannung für Betriebsmittel nach VDE 0110-1, Isolationskoordination für elektrische Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen.

Die Bemessungs-Stoßspannung ist also die Festigkeit der Anlagen gegen Beanspruchung durch Blitzüberspannungen. Die Beanspruchung durch die Blitzströme wird in dieser Norm nicht behandelt. Da bei einem Blitzeinschlag Überspannungen auftreten, die weit über der Bemessungs-Stoßspannung liegen, müssen durch geeignete Maßnahmen wie z.B. Überspannungsableiter die Spannungen auf Werte unterhalb der Bemessungs-Stoßspannung reduziert werden. Ergänzend zur Überspannungskoordination ist die Tatsache zu berücksichtigen, dass bei einem direkten Blitzeinschlag in eine externe Blitzschutzanlage sehr hohe Impulsströme in der Niederspannungsanlage auftreten, deren Wirkungen (Kräfte, Erwärmung, Schmelzen von Metallen, z.B. in Kontakten, Induzierte Überspannungen, Spannungsabfälle an den Erdverbindungen) zu berücksichtigen sind.

5 Überspannungsschutzstrategie

Bei der Konzeption einer wirksamen Überspannungsschutzschaltung sind sowohl isolationstechnische als auch betriebliche Aspekte zu berücksichtigen. Zwei Konzepte lassen sich formulieren:

1. **Vom Standpunkt der EMV** sollen alle elektrischen Einrichtungen in der elektromagnetischen Umgebung von Blitzen zuverlässig funktionieren. Dazu gehört auch, dass das Versorgungsnetz bei und nach einem Blitzeinschlag ununterbrochen verfügbar ist.
2. **Vom Standpunkt der Wirtschaftlichkeit** sollen lediglich keine elektrischen Anlagen zerstört werden. Eine Störung der Stromversorgung oder ein Ausfall des Netzes werden akzeptiert.

Als Nebenaspekte sind zu berücksichtigen:

Wird eine Isolation durch Blitzüberspannungen geschwächt und fällt diese im späteren Dauerbetrieb aus? Werden Sicherungen durch Blitzstoßströme vorgeschädigt, so dass die Wahrscheinlichkeit eines plötzlichen Ausfalls im Dauerbetrieb steigt? Welche elektrischen und mechanischen Wirkung zeigen Blitzströme an Kontakten von Schaltern, an Klemmleisten, an Elektrizitätszählern?

Während in industriellen Bereichen und in der Verwaltung die Variante 1 zu bevorzugen ist, kann von Fall zu Fall z.B. im Wohngebäudebereich aus Kostengründen die Variante 2 bevorzugt werden.

6 Vorgänge beim Blitzeinschlag in ein Gebäude

Ein Gebäude kann zum Schutz gegen direkten Blitzeinschlag mit einer äußeren Blitzschutzanlage versehen werden. Diese Entscheidung erfolgt durch den Eigner oder ist in anderen Fällen gesetzlich geregelt. Der Aufbau einer solchen Anlage und deren Wirksamkeit ist in der Norm /6.1/ beschrieben.

6.1 Gebäude mit einer äußeren Blitzschutzanlage

Bei einem Blitzeinschlag in ein Gebäude mit einer äußeren Blitzschutzanlage wird der Blitzstrom von den Ableitungen der Blitzschutzanlage direkt in das Erdreich abgeführt. Die Bilder 6a,b,c, zeigen schematisch die Vorgänge. Der Trend zur Verwendung von Kunststoffrohren für Gas, Wasser und Abwasser führt in den letzten Jahren zu einer Verschlechterung der Erdungsverhältnisse insbesondere in den Neubaugebieten. Daher wird bei einem Blitzstrom von z.B. 200 kA in einen Erder mit einem Erdungswiderstand von 5 Ohm ein Potential von 500 kV am Erder¹ und damit an der Potentialausgleichsschiene auftreten. Das hohe Potential an der PAS führt dann zu einem Überschlag zu den spannungsführenden Leitern der Stromversorgung, Bild 6b. Der Blitzstrom teilt sich gemäß der schematischen Darstellung in Bild 6c entsprechend der Erdungswiderstände und der Impedanzen der Zuleitung auf. In der Praxis wird mit einer Aufteilung 50/50% in den Betriebserder und den Anlagenerder gerechnet.

¹ Hier wird von einer Stromaufteilung zu 50% in die Erdung und zu 50% in die übrigen Leitungen ausgegangen.

Der in Bild 6 b dargestellte Überschlag in die Leiter der Stromversorgung muss durch den Blitzschutzpotentialausgleich vermieden werden. Das ist ein Potentialausgleich, wie bereits von den Schutzmaßnahmen aus VDE 0100 bekannt, jedoch kann dieser Blitzschutzpotentialausgleich nur transient erfolgen, d.h. über eine Funkenstrecke oder einen Blitzstromableiter mit Varistor mit ausreichendem Energieabsorptionsvermögen. Bild 7 zeigt schematisch den Einsatz einer Funkenstrecke als Blitzstromableiter im Hausanschlusskasten. (HK).

Die Funkenstrecke zündet bei einem Blitzeinschlag aufgrund der Überspannung und führt dann den Blitzstrom ab und erzeugt natürlich einen Kurzschluss für die Netzspannung. Daher fließt nach Abführen des Blitzstromes der Netzfolgestrom, der von der Funkenstrecke unterbrochen werden muss.

Alternativ kann gemäß Bild 8 ein Blitzstromableiter mit Varistor eingesetzt werden. Wegen der Kennlinie des Varistors fließt kein Netzfolgestrom.

6.2 Gebäude ohne externe Blitzschutzanlage

Bei einem Blitzeinschlag z.B. in ein Objekt in der Nähe eines Gebäudes fließt lokal ein ebenso großer Blitzstrom in das Erdreich wie im Falle 6.1. Es hängt von mehreren Parametern ab, welcher Blitz-Teilstrom schließlich nach dem in Kap. 6.1 beschriebenen Mechanismus über die Potentialausgleichsschiene PAS in die Niederspannungsanlage hineinfließt. In jedem Fall ist die Bedrohung jedoch kleiner. Als Schutzmaßnahmen gelten hier die in Kap. 6.1 beschriebenen Maßnahmen zum Blitzschutzpotentialausgleich.

6.3 Schlussfolgerungen für den Überspannungsschutz

Direkte Blitzeinschläge können zunächst nicht vermieden werden. Der Blitz kann in eine beliebige Stelle des Gebäudes einschlagen bzw. in eine vorhandene Fangeinrichtung der äußeren Blitzschutzanlage.

Bei der Analyse der Vorgänge beim direkten oder indirekten Blitzeinschlag wurde festgestellt, dass der Blitzschutzpotentialausgleich notwendig ist. Diese Maßnahme dient dazu, den Blitzstrom ohne Überschlag in das Netz abzuführen und dabei das Potential in der Niederspannungsverteilung auszugleichen. So befindet sich die gesamte Installation in einem Gebäude kurzzeitig auf einem Potential von einigen 10 bis zu einigen 100 kV, je nach Höhe des Blitzstromes. Beim Blitzschutzpotentialausgleich kommt es also darauf an, hohe Blitzströme zu beherrschen. Andererseits müssen die in /4.1/ vorgegebenen Bemessungs-Stoßspannungen eingehalten werden.

Mit einem Blitzstromableiter als Funkenstrecke wird ein Blitzstoßstrom bis zu höchsten Werten problemlos abgeleitet. Die Ansprechspannung einer Funkenstrecke ist jedoch größer als die für die Überspannungskategorie I vorgegebenen Werte, vergl. Tabelle 1. Bei einem Blitzstromableiter mit Varistor ist dessen Restspannung größer als der Wert der Bemessungs-Stoßspannung für die Überspannungskategorie I. Daraus folgt, dass die Ansprechspannung der Funkenstrecke eines **Blitzstromableiters** bzw. die Restspannung eines Blitzstromableiters mit Varistor zu groß ist und eine Überspannung in der Niederspannungsanlage erzeugt.

Es sind daher weitere Maßnahmen zur Begrenzung dieser Überspannungen zu treffen. Diese Begrenzung auf Werte unterhalb der in Tabelle 1 angegebenen Bemessungs-Stoßspannungen kann nun mit **Überspannungsableitern** erfolgen. Da die Überspannungsableiter aber eine

kleinere Restspannung gegenüber der Ansprechspannung der Funkenstrecke eines Blitzstromableiters bzw. der Restspannung eines Blitzstromableiters mit Varistor haben, besteht die Gefahr, dass die Überspannungsableiter den Blitzstrom führen und dabei zerstört werden.

Bei der Auswahl der Überspannungsableiter und deren räumlicher Anordnung ist daher auf die energetische Koordination zu achten. Die Überspannungsableiter reagieren in jedem Fall wegen ihrer geringen Restspannung zuerst und es ist durch geeignete Entkopplung über Netzimpedanzen oder separate Entkopplungsspulen zu gewährleisten, dass die Blitzstromableiter möglichst schnell reagieren und den größten Anteil des Blitzstromes übernehmen. Diese Vorgänge sind in Kap. 7 dargestellt.

7 Blitzstromableiter und Überspannungsableiter für den inneren Blitzschutz und deren Betriebsverhalten in der Computersimulation von Blitzströmen und Überspannungen.

7.1 Blitzstromableiter

Blitzstromableiter sind für höchste Stoßströme (bis 125 kA_{10/350 µs} für N-PE Funkenstrecken) ausgelegt. Sie sind für diesen Zweck meist als Funkenstrecke mit Löscheinrichtung für den Netzfolgestrom ausgelegt. Dabei wird der Lichtbogen bei älteren Modellen, z.B. LA 60 B aus dem Gehäuse ausgeblasen. Neuere Entwicklungen haben zu einem geschlossenen Blitzstromableiter MC 50-B /7.1/ geführt, der nicht mehr ausbläst. Die Ansprech-Blitzstoßspannung der Funkenstrecke beträgt einige kV. Damit ist aber sichergestellt, dass die Funkenstrecke nicht durch Schaltüberspannungen zündet.

Bei geringeren Anforderungen an die Versorgungssicherheit (höheres Risiko eines Netzausfalls) kann alternativ für den Einsatz in Netzen mit geringem Erdungswiderstand bzw. in stark vernetzten Erdungssystemen in Großstädten und bei Gebäuden ohne äußere Blitzschutzanlage ein energetisch ausreichend dimensionierter Metalloxidvaristor /7.2/ eingesetzt werden. Dann entfällt die Ansprechspitze und der Folgestrom entfällt ebenfalls. Blitzstromableiter mit Metalloxidvaristoren müssen, wie von Überspannungsableitern bereits bekannt, gegen thermische Überlastung gesichert werden.

Die Grundfunktion eines Blitzstromableiters mit Funkenstrecke zeigt Bild 9. Der Blitzstromableiter wird zwischen eine Phase und PE angeschlossen. Die Modellierung für eine Computersimulation dieses Falles zeigt Bild 10 für den Fall, dass ein Blitz mit der Impulsform 10/350 µs mit einem Scheitelwert von 200 kA in die Erdungsanlage einschlägt. Anlagenerder und Betriebserder des speisenden Netzes V1 sind dabei beispielhaft so gewählt, dass ein Stoßstrom von 50 kA in den Blitzstromableiter fließt. Bild 11 zeigt das Ergebnis der Simulation:

Die Funkenstrecke im Blitzstromableiter des Typs MC 50-B zündet bei 2 kV Blitzstoßspannung 1,2/50 µs. Der Blitzstromableiter übernimmt den vollen Blitzstrom von 50 kA. Nach Abklingen des Blitzstromes bildet sich ein Netzfolgestrom aus, der noch vor dem natürlichen Nulldurchgang gelöscht wird. Mit einem Blitzstromableiter allein kann daher die Überspannung nicht auf den geforderten Wert von 1,5 kV in der Überspannungskategorie I begrenzt werden, da die Ansprechspitze der Funkenstrecke zu groß ist. Diese muss nun durch einen Überspannungsableiter herabgesetzt werden.

7.2 Überspannungsableiter parallel zu einem Blitzstromableiter.

Überspannungsableiter werden heute mit Metalloxidvaristoren aufgebaut. Sie haben dadurch keine Ansprechspitze, und erzeugen keinen Netzfolgestrom. Überspannungsableiter mit Metalloxidvaristoren müssen gegen thermische Überlastung gesichert werden.

7.2.1 **Falsche Installation** durch direktes Parallelschalten.

Die Bilder 12 und 13 zeigen die direkte Parallelschaltung eines Überspannungsableiters zu einem Blitzstromableiter; ein Fall der keinen Schutz gewährleistet und den Überspannungsableiter zerstören würde. Wie in den Ergebnissen der Simulation in Bild 14 zu erkennen ist, führt nun der Überspannungsableiter den gesamten Blitzstrom und nimmt dabei etwa die dreifache Energie auf wie der Blitzstromableiter, vergl. Bild 11. Der Überspannungsableiter würde thermisch zerstört. Weiterhin erkennt man, dass der Überspannungsableiter keinen Netzfolgestrom erzeugt.

7.2.2 **Richtige Installation** durch Entkopplung der Parallelschaltung mittels einer Spule oder einer Zuleitung.

Die Bilder 15 und 16 zeigen die Parallelschaltung eines Überspannungsableiters zu einem Blitzstromableiter mit Entkopplung durch eine Spule. Wie in den Ergebnissen der Simulation in Bild 17 und mit höherer Zeitauflösung in Bild 18 zu erkennen ist, führt nun der Überspannungsableiter nur einen kleinen Teilstrom und zündet durch den Spannungsabfall an der Spule binnen einiger μs die Funkenstrecke des Blitzstromableiters. Der Blitzstromableiter übernimmt dann den gesamten Blitzstrom. Die Spannung wird am Ort des Überspannungsableiters auf lediglich 700 Volt ansteigen. Ein Wert weit unterhalb der Bemessungs-Stoßspannung in der Überspannungskategorie I. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt man, wenn statt der Spule eine Zuleitung mit äquivalenter Impedanz (Induktivität) zwischen Blitzstromableiter und Überspannungsableiter geschaltet wird. Dies ist in der Praxis oft durch die Abstände zwischen Hauseinspeisung und Unterverteilungen gegeben.

7.3 Schlussfolgerungen

Blitzstrom-und Überspannungsableiter erfüllen als Einzelgeräte bestimmte Aufgaben. Der Blitzstromableiter zündet bei 2 kV, führt hohe Blitzströme und löscht den Netzfolgestrom. Der Überspannungsableiter reagiert ohne Zündspitze und erzeugt keinen Netzfolgestrom. Der Überspannungsableiter darf nicht direkt parallel zum Blitzstromableiter geschaltet werden, sondern muss über eine Entkopplung mittels Spule oder Zuleitung parallel geschaltet werden.

8 Überspannungsschutzkonzept für ein TT-Netz

Der Überspannungsschutz im TT-Netz erfordert besondere Sorgfalt wegen der Erdungsverhältnisse. Blitzstromableiter und Überspannungsableiter mit Varistoren dürfen nicht direkt zwischen den Leitungen L1-L3 und PE geschaltet werden, da bei einem defekten Ableiter kein Kurzschlussstrom fließen würde, sondern nur ein Erdschlussstrom. Blitzstromableiter und Überspannungsableiter müssen daher zwischen L1..L3 und N geschaltet und über Trennfunkstrecken zwischen N und PE angekoppelt werden. Bild 19 zeigt die wesentlichen Elemente des Überspannungsschutzes in einem TT-Netz, wobei Sicherungen aus Platzgründen nicht dargestellt sind /8.1/. In Bild 19 sind im oberen Teil auch die Bemessungs-Stoßspannungen in den Bereichen der Installation gezeigt und dazu die durch die Ableiter begrenzten Werte der Restspannungen. Bild 20 zeigt die Anordnung und den Anschluss von B-Ableitern mit Funkenstrecke und N-PE-Funkenstrecke im TT-Netz als beispielhafte Installation auf einem Panel für das Blitzschutz-Netzmodell, vergl. Kap.9. Bild 21 zeigt sinngemäß einen C-Ableiter mit Varistoren und einer N-PE-Funkenstrecke. Bild 22 zeigt den D-Schutz für bewegliche Verbraucher.

Die Schaltung in Bild 19 wurde mit Hilfe der Computersimulation /8.2/ auf ihr Betriebsverhalten untersucht. Bild 23 zeigt die Schaltung der Computersimulation. Der Erdungswiderstand des Anlagenerders wurde mit 5 Ohm gewählt, der Betriebserder mit 2 Ohm. Damit werden die Besonderheiten des TT-Netzes sichtbar. In den Anlagenerder wird ein Blitzstoßstrom von 200 kA eingespeist. Die Berechnung der Ströme und Spannungen zeigt Bild 24 und Bild 25. Bild 24 zeigt die Vorgänge bei der Einkopplung eines Blitzstromes in den Anlagenerder mit hoher Zeitauflösung, damit die Kommutierungsvorgänge sichtbar werden.

Wie bereits beschrieben, soll ja die Überspannung am Endgerät, also im Bereich D-Schutz unterhalb der Bemessungs-Stoßspannung liegen. Daher sind die Ableiter im D-Schutz dementsprechend ausgelegt und werden als erste einen Teil-Blitzstrom führen und danach sukzessive die anderen Ableiter in Aktion versetzen. In Bild 24 zündet zu dem mit **1** markierten Zeitpunkt als erste die N-PE-Funkenstrecke im D-Schutz, gefolgt vom Blitzstrom im D-Schutz. Dieser Blitzstrom fließt durch die Ableiter des D-Schutz, und durch die Impedanz der Zuleitung zwischen C- und D-Schutz, vergl. Bild 19. Der Spannungsfall an der Impedanz der Zuleitung addiert sich zur Restspannung der N-PE Funkenstrecke und zündet zum mit **2** markierten Zeitpunkt die N-PE-Funkenstrecke des C-Schutzes. Jetzt fließt ein Teilblitzstrom durch die C-Ableiter und die Entkoppelinduktivität, vergl. Bild 19. Der Spannungsabfall an der Entkoppelinduktivität addiert sich nun zur Restspannung der N-PE-Funkenstrecke des C-Ableiters und zündet zu dem mit **3** markierten Zeitpunkt die N-PE-Funkenstrecke des B-Ableiters. Zum Zeitpunkt **3** sind die Funkenstrecken des B-Ableiters noch nicht gezündet. Der Spannungsverlauf in Bild 24 zeigt zum markierten Zeitpunkt **4** die Zündung der Funkenstrecken des B-Ableiters gefolgt vom Blitzstrom im B-Ableiter.

Damit ist die Kommutierung in der Simulation nachgewiesen, die vom Ableiter mit der kleinsten Rest- bzw. Ansprechspannung zum Ableiter mit der höchsten Rest- bzw. Ansprechspannung in einer Zeit von etwa 3-4 μs erfolgt.

Die gleichen Vorgänge zeigt Bild 25 in einem gedehnten Zeitbereich von 5 ms. In diesem Zeitbereich ist auch die Größenordnung der Teil-Blitzströme gut zu erkennen. Mit dem Ansprechen der Funkenstrecken beginnt der Stromfluss. Der Strom im B-Ableiter zwischen L1 und N in Bild 25 $i(\text{BL1})$ beträgt ca. 30 kA und damit auch in den anderen Phasen L2 und L3 auch 30 kA. Die drei Phasen führen damit in dem Bereich der Einspeisung rund 90 kA Blitzstrom. Der Neutralleiter führt allerdings 56 kA Blitzstrom. Der sich anschließende

Netzfolgestrom ist hier in der Skalierung nicht zu erkennen, er verläuft, wie in Bild 11 dargestellt. Der C-Ableiter führt in der Phase L1 den Strom $i(\text{CL1})$ von ca. 3kA. Die gesamte Relation der Ströme in den Phasen, Neutralleiter, Anlagen- und Betriebserder für die hier verwendeten Daten zeigt im Detail Bild 25c.

Von Interesse ist die Beanspruchung der N-PE-Funkenstrecken. Die N-PE-Funkenstrecke wird im B-Bereich mit 125 kA und die N-PE-Funkenstrecke im C-Bereich mit 20 kA beansprucht. Die Stromaufteilung auf den Anlagen- und Betriebserder, bzw. auf den Anlagenerder und das Netz beträgt mehr als 50 % : 142 kA fließen in das Netz und damit in den Betriebserder ab und 58 kA fließen in den Anlagenerder.

Schlussfolgerung:

Die Simulation in dem als Beispiel gewählten TT-Netz wurde unter der Annahme des größten anzunehmenden Blitzstoßstromes von 200 kA mit einem Erdungswiderstand von 5 Ohm für den Anlagenerder und einem guten Wert von 2 Ohm für den Betriebserder durchgeführt. Diese Bedingungen zeigen jedoch auf, welche Belastungen die Ableiter und Funkenstrecken im TT-Netz maximal zu ertragen haben. Im TT-Netz werden daher die extremsten Beanspruchungen auftreten. Die Simulation hat jedoch die Möglichkeit der Analyse der einzelnen Vorgänge bis in den μs -Bereich gezeigt. Mit der Computersimulation ist es möglich, die Induktivität für die Entkopplung zwischen B- und C-Ableiter zu ermitteln oder die kritische Leitungslänge zwischen C-Schutz und D-Schutz zu ermitteln. Die Stromaufteilung in den N-PE Funkenstrecken lässt sich mit den Modellen der N-PE-Funkenstrecken gut nachbilden. Die Simulation zeigt auch, dass die Überspannungen auf Werte weit unterhalb der Bemessungs-Stoßspannung reduziert werden. Weiterhin lassen sich die in den Funkenstrecken und Varistoren umgesetzten Energien bestimmen, die zu einer richtigen und zuverlässigen Dimensionierung der Elemente führen.

9 Energieaufnahme der Blitzstrom- und Überspannungsableiter

Wie aus den Berechnungen in Bild 24-25 hervorgeht, fließt der überwiegende Teil des eingepprägten Blitzstromes durch die Blitzstromableiter im B-Bereich. Welche Energiebeträge nun tatsächlich in diesen Funkenstrecken bzw. Metalloxidvaristoren umgesetzt werden, zeigen die folgenden Untersuchungen.

Die tatsächliche lokal in einem Ableiter oder in einem Varistor umgesetzte Energie errechnet sich aus der Spannung $u(t)$ am Ableiter (Varistor) und dem Strom $i(t)$ im Varistor wie folgt.

$$W = \int_0^{\infty} u(t) \cdot i(t) dt$$

Für die Dimensionierung der Ableiter ist jedoch die spezifische Energie W/R eines Stoßstromimpulses von Bedeutung, die sich aus dem Stromverlauf $i(t)$ ergibt:

$$W / R = \int_0^{\infty} i^2(t) dt$$

Eine Funkenstrecke mit geringer Restspannung kann daher eine große spezifische Energie passieren lassen, ohne selbst eine große Energie in der Funkenstrecke umzusetzen. Ein Varistor

liegt hingegen ständig an Spannung und seine Restspannung bestimmt sich durch die dauernd zulässige Wechselspannung und ist höher als die Restspannung einer Funkenstrecke bei gleichem Stoßstrom. Daher ist eine Relation der im Ableiter umgesetzten Energie zur spezifischen Energie des Stromimpulses von Interesse. Dieser Vergleichswert K zeigt die Fähigkeit eines Ableiters, große spezifische Energie durchzulassen in Relation zu der im Ableiter umgesetzten Energie.

Bild 26 (oberes Bild) zeigt die absolute Aufteilung der Energien auf die in Schaltung Bild 23 eingesetzten Ableiter in einer logarithmischen Skalierung der y-Achse. Es zeigt sich, dass die N-PE-Funkenstrecken den größten Energiebetrag in der Reihenfolge B-C-D übernehmen, da dort der gesamte Strom auftritt. Auch die Ableiter zwischen den Phasen und dem Neutralleiter nehmen einen Energiebetrag in der Reihenfolge B-C-D auf.

In Bild 26 (unteres Bild) wird deutlich, dass der B Ableiter den größten Anteil am Energieumsatz zeigt. Bei der spezifischen Energie überwiegt allerdings der Anteil der B-NPE-Funkenstrecke. In der relativen Betrachtung zeigt der B-Ableiter den kleinsten Wert, d.h. er transportiert eine große spezifische Energie und nimmt dabei nur relativ wenig Energie selber auf.

10 Prüfungen mit dem Stoßstromgenerator

Trotz der Modelle für die Computersimulation ist die Bestätigung der Funktion der Überspannungsableiter und Blitzstromableiter im Labor für Entwicklungsversuche und Typenprüfungen unerlässlich. Das BET (Blitzschutz-und EMV Technologiezentrum GmbH) in Menden verfügt über einen der leistungsfähigsten Stoßstromgeneratoren /10.1/. Bild 27 zeigt diesen Generator, der neben dem Blitzstrom 10/350µs auch weitere Impulse, z.b. für die Luft und Raumfahrtprüfungen bis 200 kA erzeugen kann. Der große Vorteil dieses Generators ist eine Aufladezeit von 37 Sekunden für die gesamte Kapazität von 50 µF auf 100 kV. Dadurch ist eine große Zahl von Prüfungen pro Tag möglich und damit eine kostengünstige Prüfung.

11 Netzmodell für Überspannungsschutz

Der Blitz- und Überspannungsschutz in Niederspannungsanlagen ist technisch auf einem hohen Entwicklungsstand angelangt und wird durch breite Aktivitäten in der Normung begleitet. Die richtige Auswahl und die Anordnung von Überspannungsschutzgeräten wie Blitzstrom- und Überspannungsableiter erfordert jedoch ein breites Wissen, das über die Kenntnisse der 50 Hz – Wechselstromtechnik hinausgeht. Hilfreich sind die Seminare zahlreicher Hersteller von Geräten. Planungshilfen auf CD-ROM erleichtern die Planung und die Auswahl der Geräte /11.1/. Die in Deutschland übliche Vielfalt von verschiedenen Netzformen erfordert jedoch eine gründliche Ausbildung. Im BET wurde ein Netzmodell entwickelt, das den Anwendern gestattet, die Blitzschutzkomponenten ausgehend von der äußeren Blitzschutzanlage über die Blitzstrom- und Überspannungsableiter bis hin zu Datenleitungsschutzgeräten direkt in der ihnen vertrauten Umgebung der Niederspannungsinstallation zu erproben. Bild 28 zeigt das Modell. Jede Komponente einer Niederspannungsanlage wird als Steckbrett in das Netzmodell eingelegt und dann mit den Blitzstrom- und Überspannungsableitern von Hand verschaltet. Beispiele zeigen die Bilder 21-23. Alle Komponenten sind voll funktionsfähige Geräte. In das Netzmodell wird mit dem in Bild 27 dargestellten Stoßstromgenerator /10.1/ ein Blitzstoßstrom eingeprägt, dabei

bleibt das Netzmodell direkt am 50 Hz Netz. Ströme und Spannungen sind mit Hilfe von portablen und batteriebetriebenen Oszilloskopen messbar, so dass die Funktion der Geräte in der Ausbildung direkt erkennbar ist. Alle Blitzschutzkomponenten wurden für die Berechnung mit einem Netzwerkanalyseprogramm modelliert. Damit ist parallel zu den Experimenten im Labor auch die Berechnung der Überspannungen und Stoßströme bei einem Blitzeinschlag für alle Netzformen und Konfigurationen möglich.

Konzept und Aufbau

Bild 27 zeigt den Aufbau des Netzmodells. Bei der Konzeption wurden folgende Anforderungen gestellt:

- Direkte Ankopplung an das Netz
- Nachbildung eines typischen Versorgungstransformators mit 630 kVA Nennleistung
- Nachbildung der Zuleitung von einer Transformatorstation zur Einspeisung in ein Gebäude
- Nachbildung der Betriebs- und Anlagenerder Direkte Einkopplung von Blitzströmen
- Blitzstromtragfähige Steckverbindungen
- Messung der Ströme und Spannungen
- Personensicherheit

12 Zusammenfassung

Im vorliegenden Aufsatz werden die Bedrohungsdaten für Blitzeinwirkungen und Überspannungsparameter zusammengestellt, welche die Grundlage für den Blitz- und Überspannungsschutz bilden. Ausgehend von diesen Daten ergibt sich für Niederspannungsanlagen die Forderung nach Beherrschung von Blitzströmen und Überspannungen. Für die Lösung dieser Forderung werden in der Niederspannungsanlage Blitzstromableiter für den Blitzschutzpotentialausgleich eingesetzt und für den Überspannungsschutz Überspannungsableiter eingesetzt. Wegen der unterschiedlichen Aufgaben und deren technischer Lösung mit Funkenstrecken für Blitzstromableiter und Varistoren für Überspannungsschutz ist eine Koordination der Ableiter erforderlich, so dass der Blitzstromableiter den größten Teil des Blitzstromes abführt und die Überspannungsableiter mit den Varistoren thermisch nur gering belastet werden. Für die Funkenstrecken wurden eigene Modelle, für die Varistoren vorhandene Modelle verwendet und in einer Computersimulation wurde die Funktion des dreistufigen Schutzkonzepts aus D.-C- und B-Ableitern analysiert.

Die Simulationen zeigen, daß die vorgegebenen Bemessungs-Stoßspannungen mit einem guten Sicherheitsabstand eingehalten werden, so dass bei vorschriftsmäßiger Installation keine Schäden durch Überspannungen zu erwarten sind.

Im TT-Netz ist jedoch besondere Sorgfalt auf die NPE-Funkenstrecken und deren Koordination zu legen. Die (3+1)-Schaltung bietet Vorteile aus der Sicht der EMV.

13 Literatur

/4.1/ DIN VDE 0110-1:04.1997 Isolationskoordination für elektrische Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen.

/6.1/ DIN V ENV 61024-1 Blitzschutz baulicher Anlagen. Teil 1 allgemeine Grundsätze.

/7.1/ C. Drilling, M. Droidner, E. Jordan, J. Meppelink, J. Trinkwald: Geschlossene blitzstromableiter mit erweitertem Betriebsbereich. etz Elektrotechnik +Autom. Heft 7-8/2000, Seite 32-34

/7.2/ OBO Bettermann: Überspannungsschutz. Neue Überspannungsschutzgeräte für den Netz- und Telekommunikationsbereich. OBO Bettermann GmbH & Co. Postfach 1120 Menden. <http://www.obo-bettermann.de>

/8.1/ VDEW Richtlinie 1998
Überspannungsschutzeinrichtungen der Anforderungsklasse B. Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke m.b.H.-VDEW

/8.2/ Microcap 6.0 Electronic circuit Analysis Program. Spectrum Software. www.spectrum-soft.com.

/10.1/ / C. Drilling, M. Droidner, E. G. Jordan, J. Meppelink, : Blitzschutzeinrichtungen auf dem Prüfstand. etz Elektrotechnik +Autom. 119 (1998) H. 3-4, S. 68-69.

/11.1/ OBO Construct ÜSS Planungshilfe zum Erstellen einer Blitzstrom- und Überspannungsschutzanlage für das TN-, TT- und IT Netz. OBO Bettermann GmbH & Co. <http://www.obo-bettermann.de>

Adressen der Autoren :

Christof Drilling und Markus Droidner sind Mitarbeiter, Ernst Günther Jordan ist Geschäftsführer der BET Blitzschutz und EMV Technologiezentrum GmbH in Menden.

Tel: 02373 89 1602

Fax: 02373 89 1610

E-mail info@BET-menden.de

Internet. <http://www.bet-menden.de>

Dr.-Ing. Jan Meppelink ist Professor für Hochspannungstechnik an der Universität GH Paderborn, Abt. Soest, FB 16 und wissenschaftlicher Berater im BET.

Tel: 02921 378 272

Fax: 02921 378 271

E-Mail: Meppelink@t-online.de

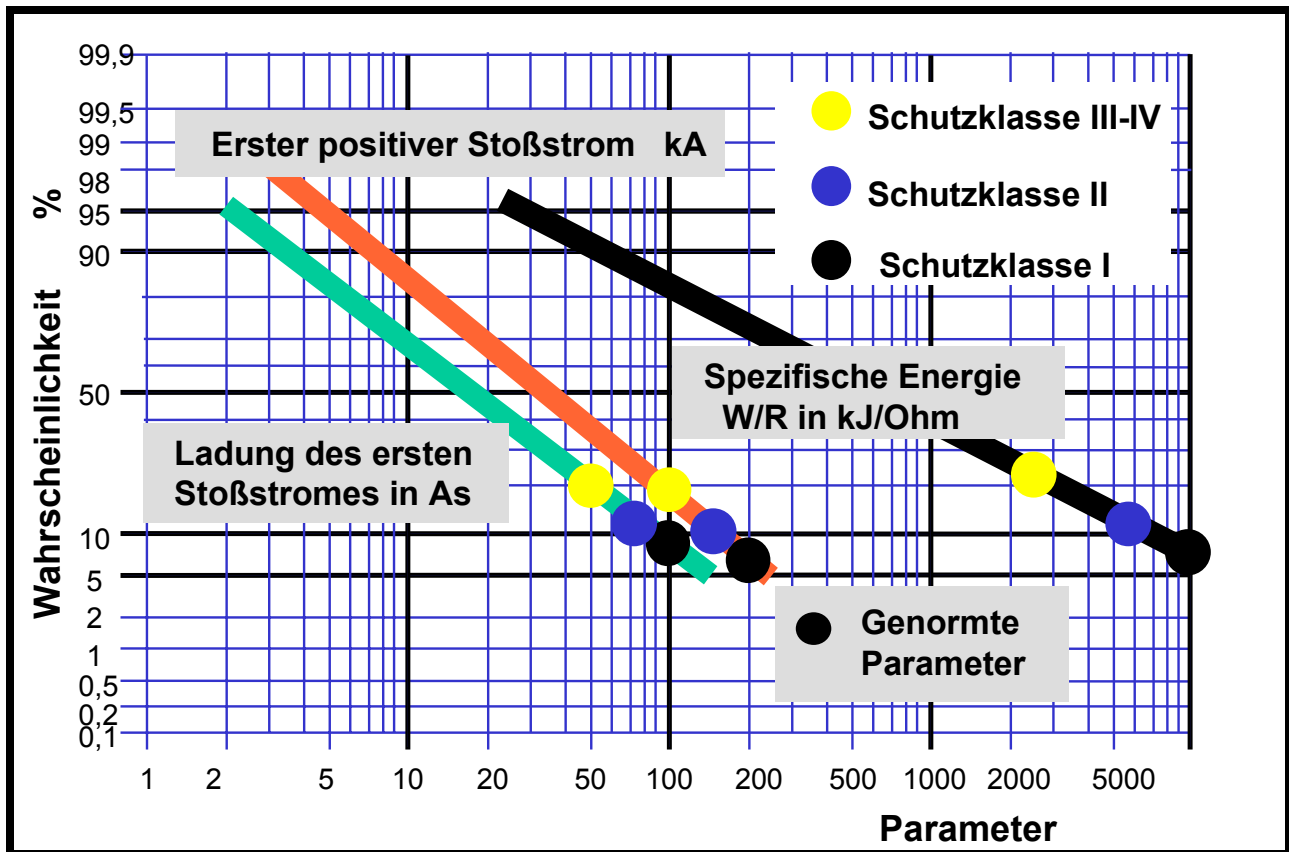


Bild1 Parameter der Bedrohungswerte von Blitzentladungen und die zugehörigen Blitzschutzklassen nach VDE 0185 Teil 100

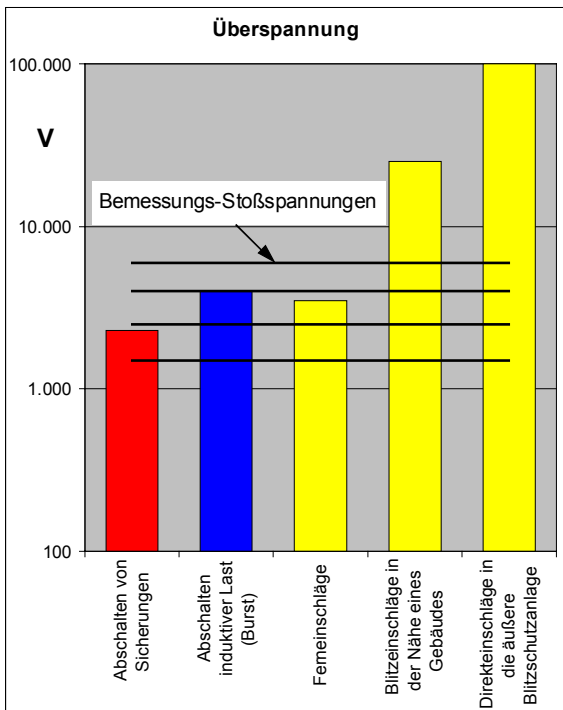


Bild 2 Größenordnungen der Überspannungen in Niederspannungsanlagen. Die Größe der Bemessungs-Stoßspannungen ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Höhe der Überspannung ergibt sich aus den Blitzströmen in Bild 4 und einem Erdungswiderstand von 1 Ohm. (Details sind in Anhang 1 beschrieben)

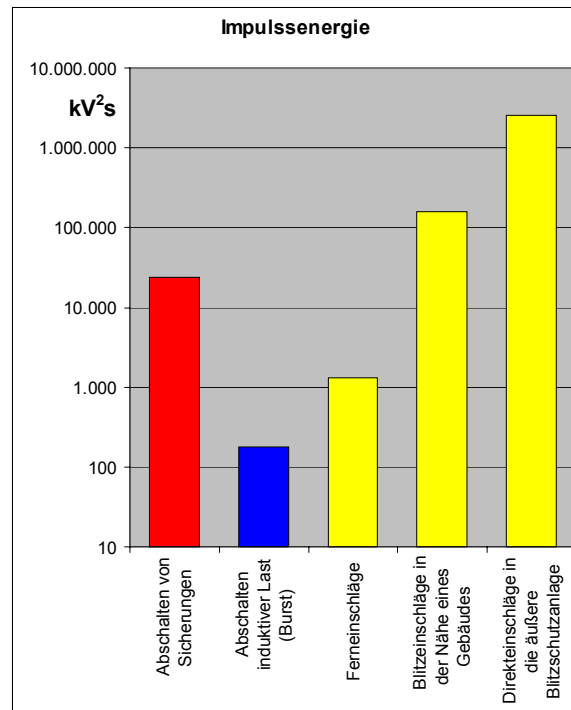


Bild 3 Größenordnungen der Impulsenergien von Überspannungen in Niederspannungsanlagen. Die Impulsenergie ergibt sich aus den Überspannungen nach Bild 2. (Details sind in Anhang 1 beschrieben)

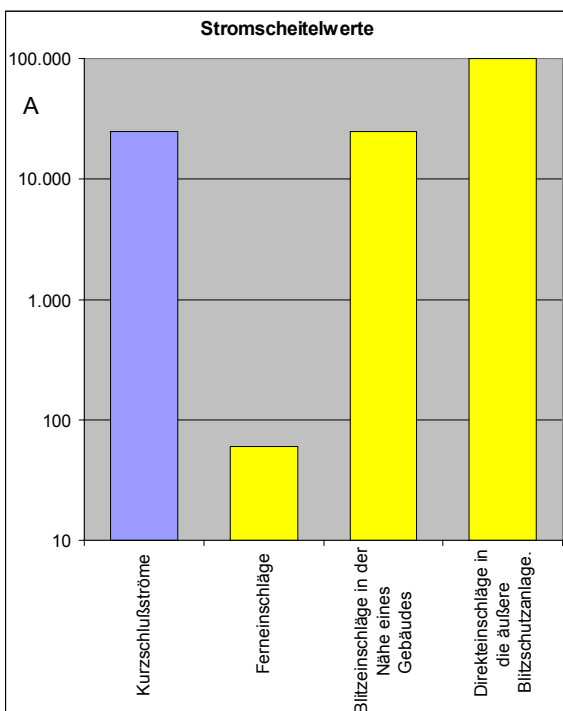


Bild 4 Größenordnung der Stromscheitelwerte bei Kurzschlüssen und Blitzeinwirkungen in Niederspannungsanlagen.

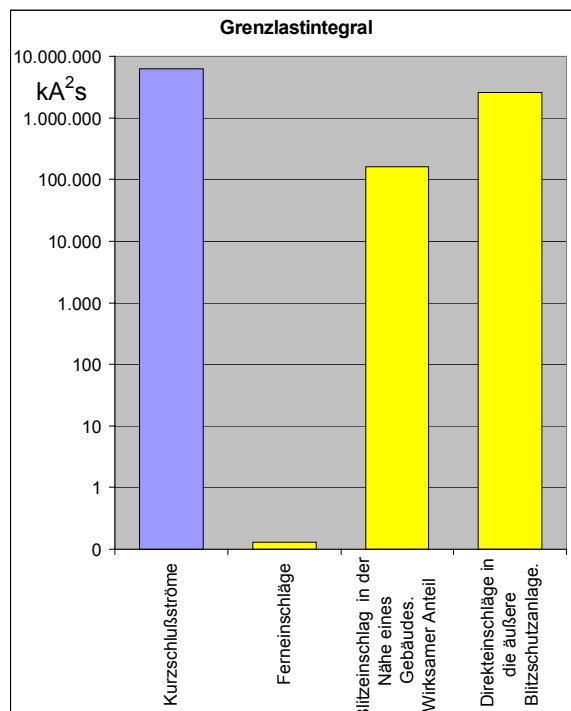


Bild 5 Größenordnung der Grenzlastintegrale von Kurzschlussströmen und Blitzströmen in Niederspannungsanlagen.

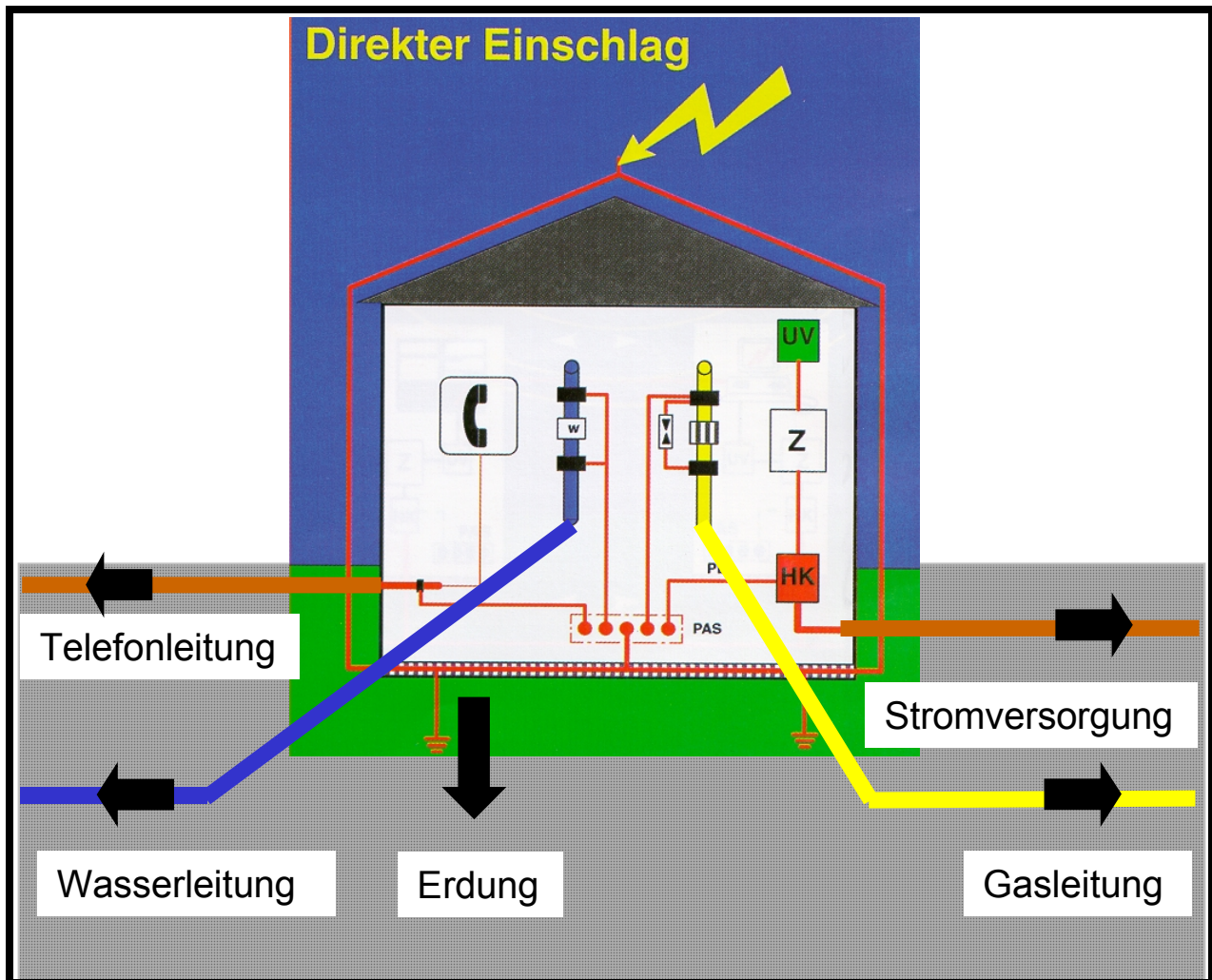


Bild 6 a . Blitzeinschlag in ein Gebäude mit äußerer Blitzschutzanlage .

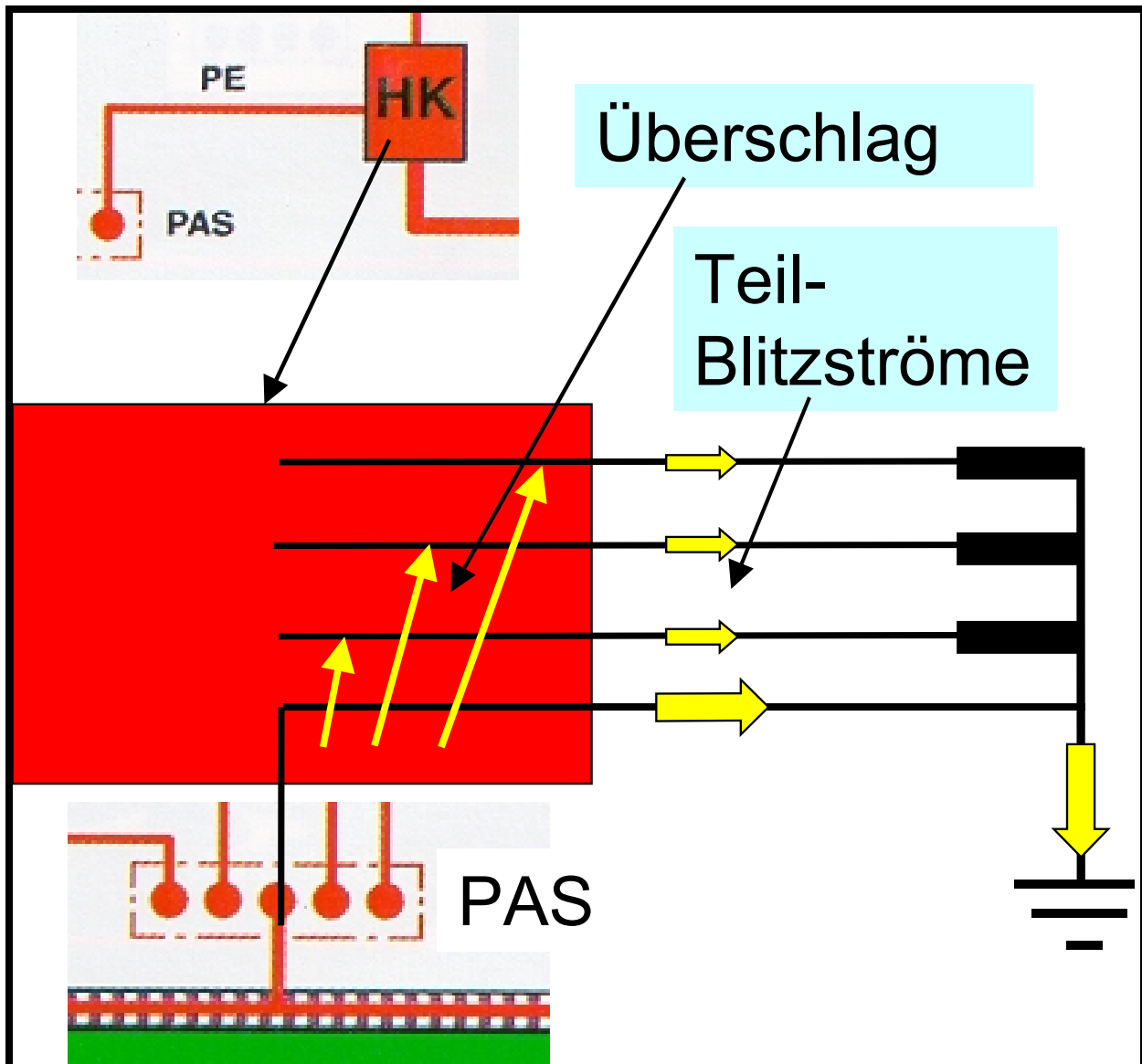


Bild 6 b Überschlüge von der Potentialausgleichsschiene PAS in die Zuleitungen der Stromversorgung.

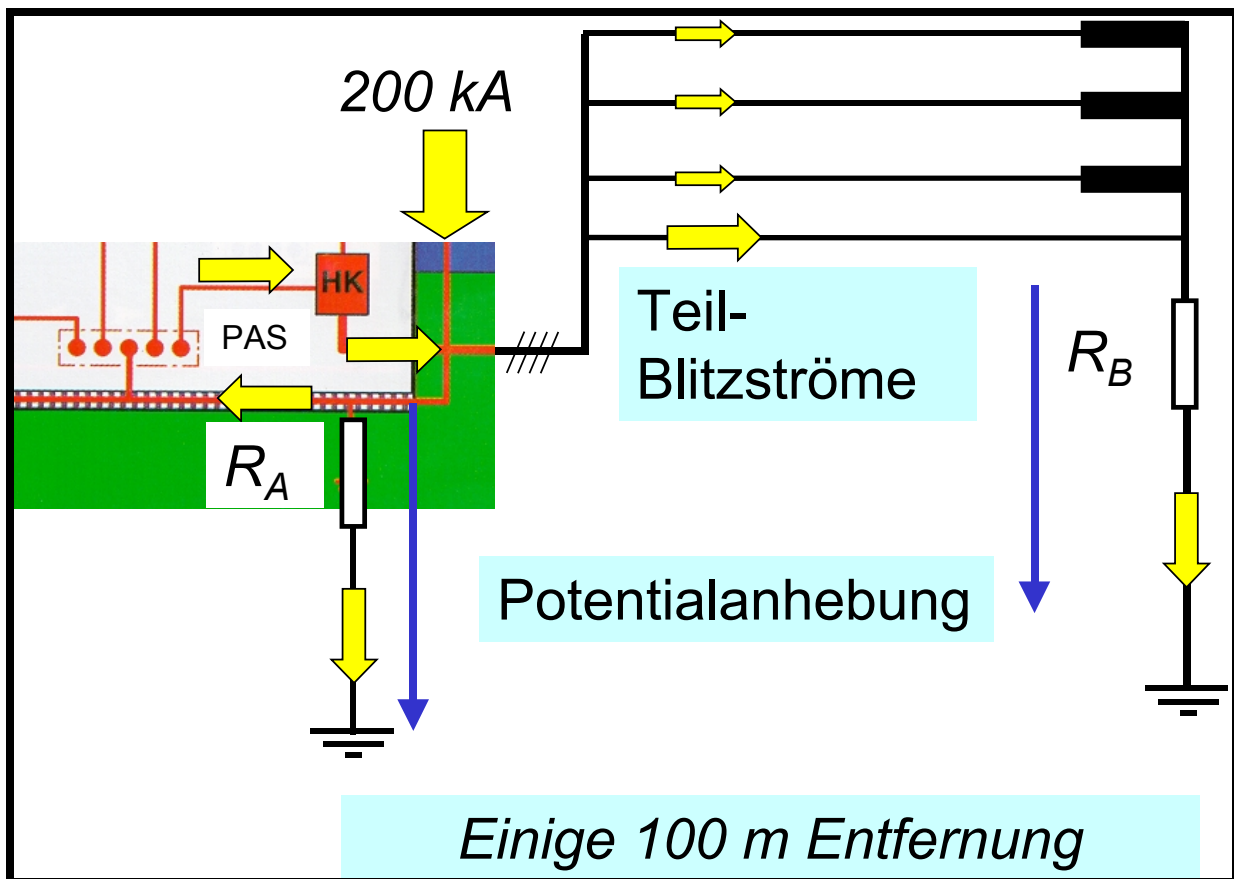


Bild 6 c Aufteilung des Blitzstromes über den Anlagenerder R_A und den Betriebserder R_E des einspeisenden Transformators.

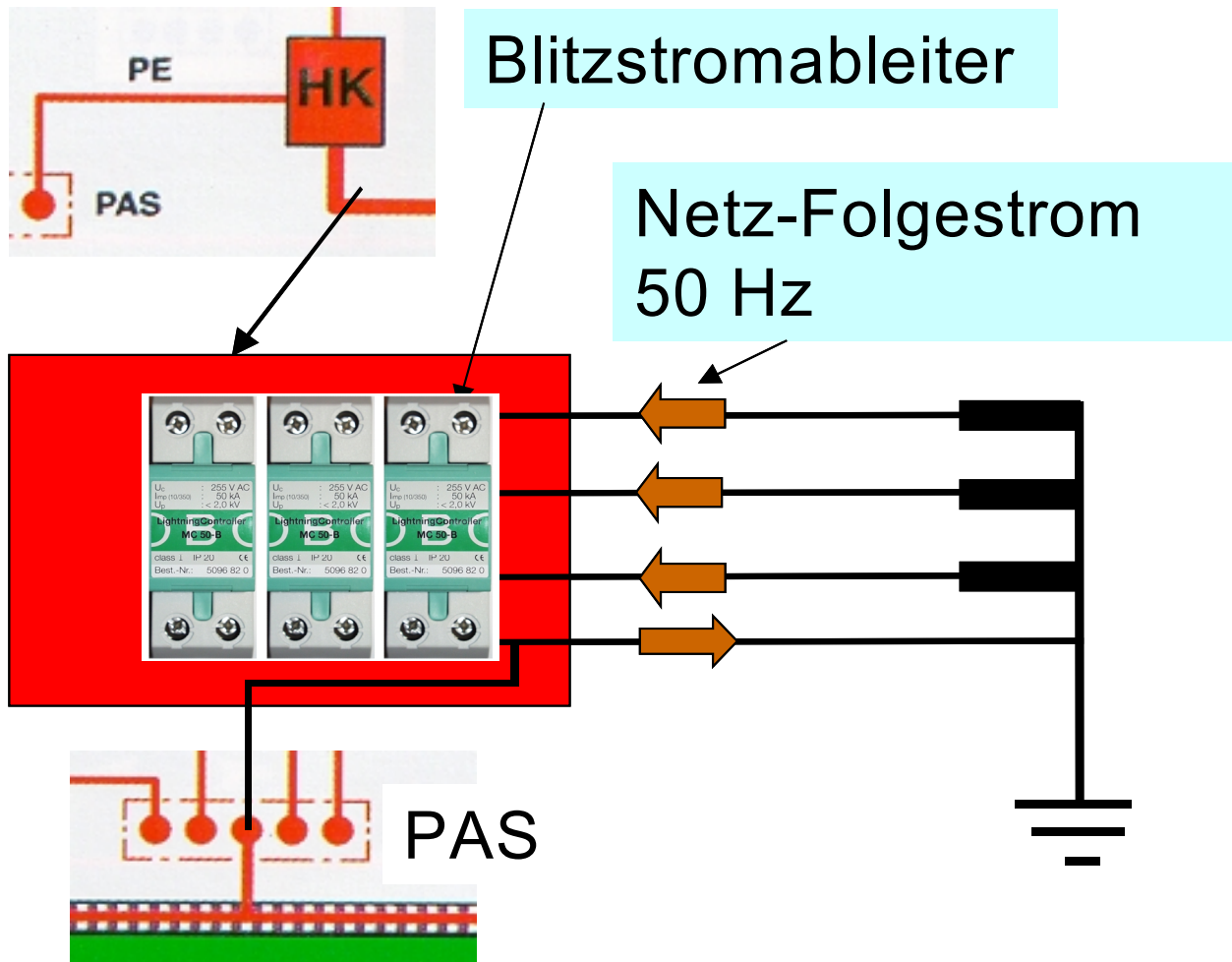


Bild 7 Einsatz von Blitzstromableitern MC 50-B zum Blitzschutzpotentialausgleich.

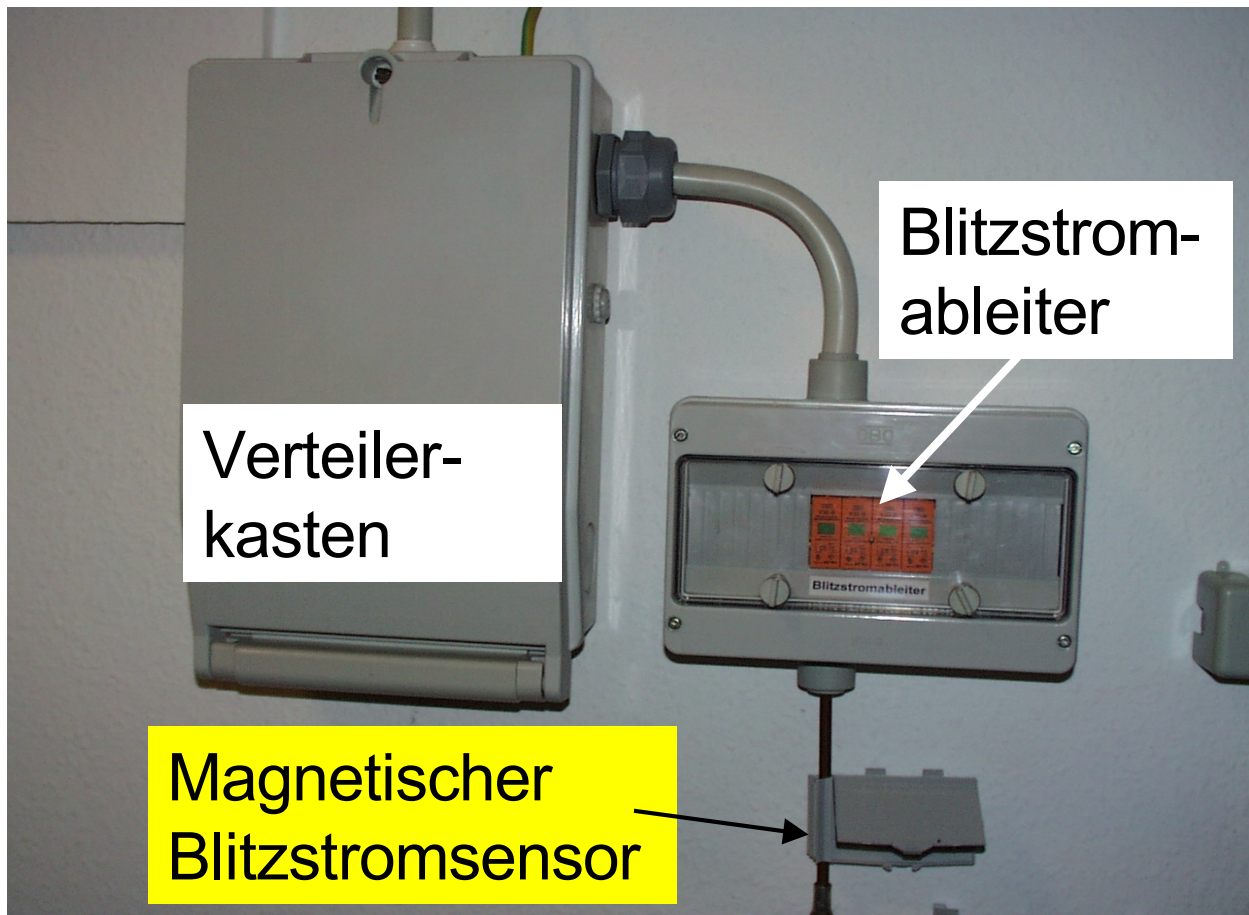


Bild 8 Blitzstromableiter als Varistor an einem Hausanschlusskasten mit einem magnetischen Blitzstromsensor.

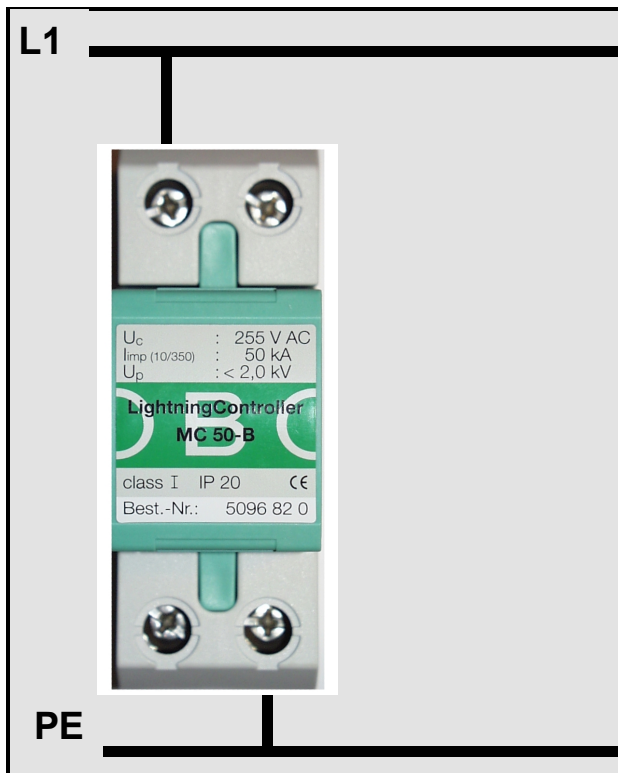


Bild 9 Blitzstromableiter MC 50-B zwischen L1 und PE eines Drehstromnetzes geschaltet.

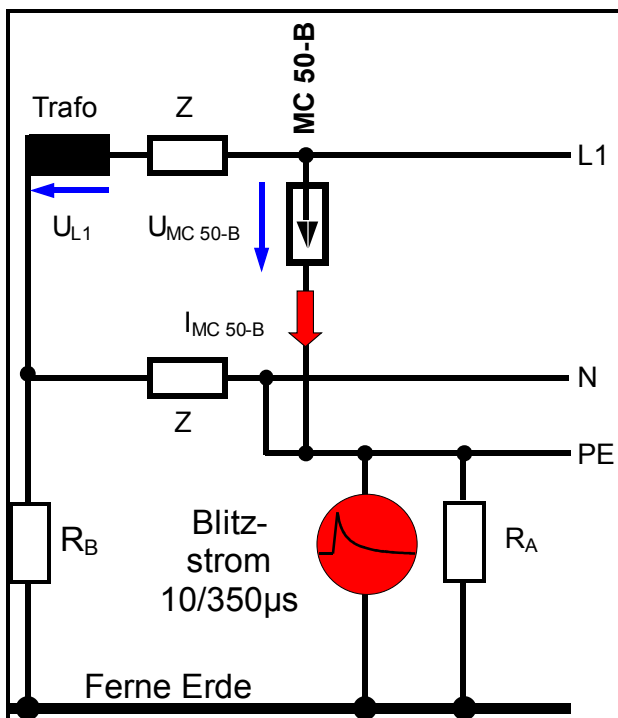


Bild 10 Ersatzschaltbild.

R_A : Anlagenerde, R_B : Betriebserde,
 Z : Impedanz der Zuleitung 70 mm^2 .

U_{L1} : Spannungsquelle, hier ein 650 kVA-Verteiltransformator.

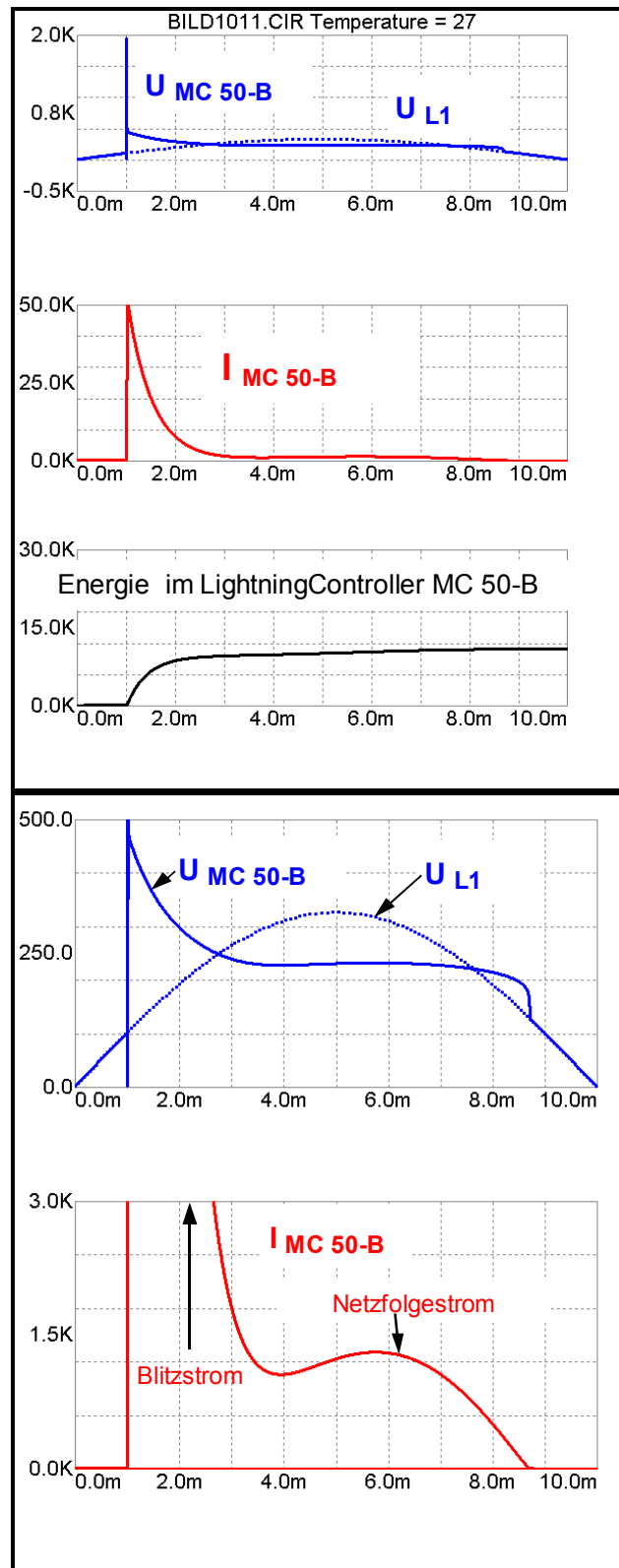


Bild 11 Ergebnisse der Simulation von Bild 10.

Ergebnis: Der Blitzstromableiter MC 50-B übernimmt den vollen Blitzstrom. Es bildet sich ein Netzfolgestrom aus, der noch vor dem natürlichen Nulldurchgang gelöscht wird. Die gepunktete Linie ist eine Halbwelle der Netzspannung.

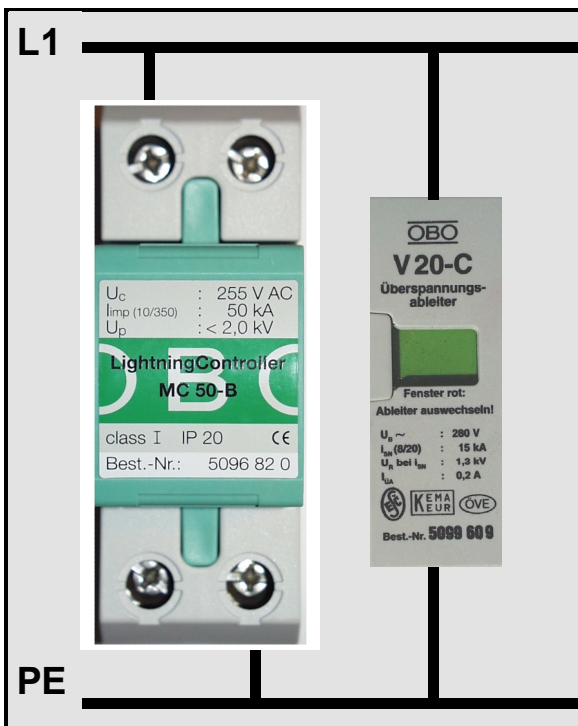


Bild 12 Blitzstromableiter MC 50-B mit parallel geschaltetem Überspannungsableiter V20C, zwischen L1 und PE eines Drehstromnetzes geschaltet. (**Falsche Installation!!!**)

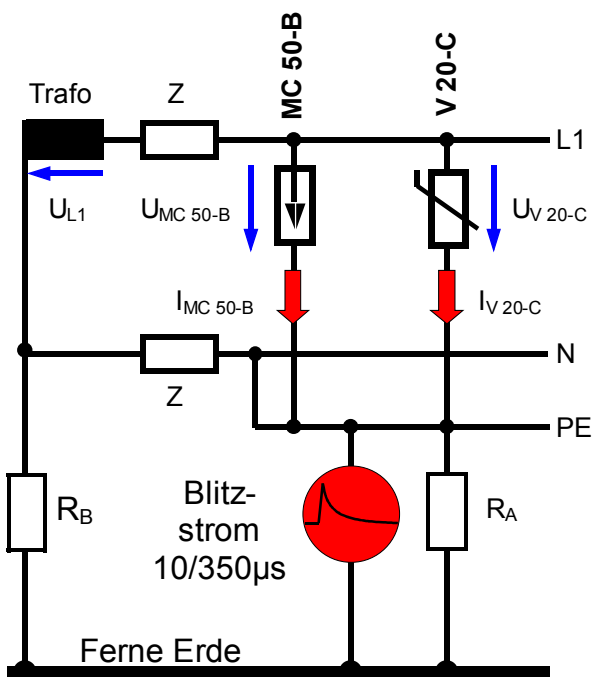


Bild 13 Ersatzschaltbild.

R_A: Anlagenerd, R_B: Betriebserd,
Z: Impedanz der Zuleitung 70 mm².
U_{L1}: Spannungsquelle, hier ein 650 kVA-
Verteiltransformator.

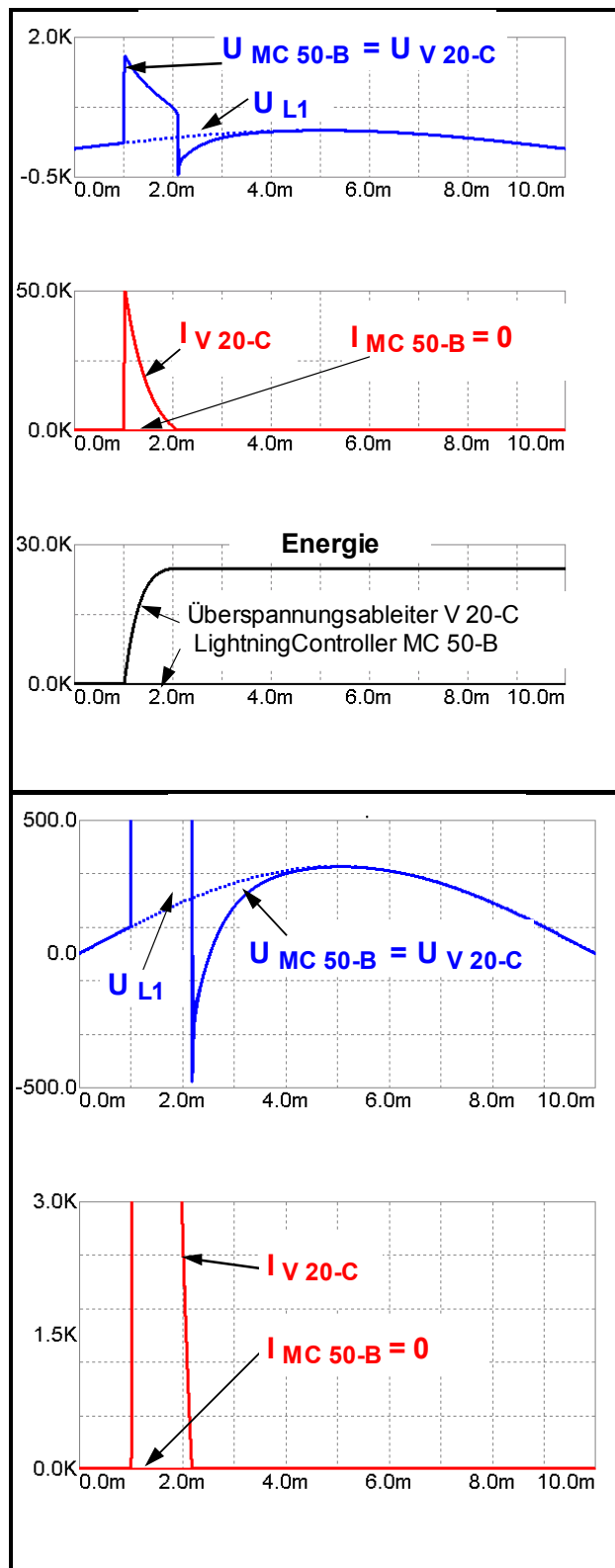


Bild 14 Ergebnisse der Simulation von Bild 13.
Ergebnis: Der Überspannungsableiter V20C übernimmt den vollen Blitzstrom und würde dabei zerstört wegen des falschen Einbaus parallel zum Blitzstromableiter ohne Entkopplung. Die gepunktete Linie ist eine Halbwelle der Netzspannung.



Bild 15 Blitzstromableiter MC 50-B, Entkopplungsspule und Überspannungsableiter V20C zwischen L1 und PE eines Drehstromnetzes geschaltet.

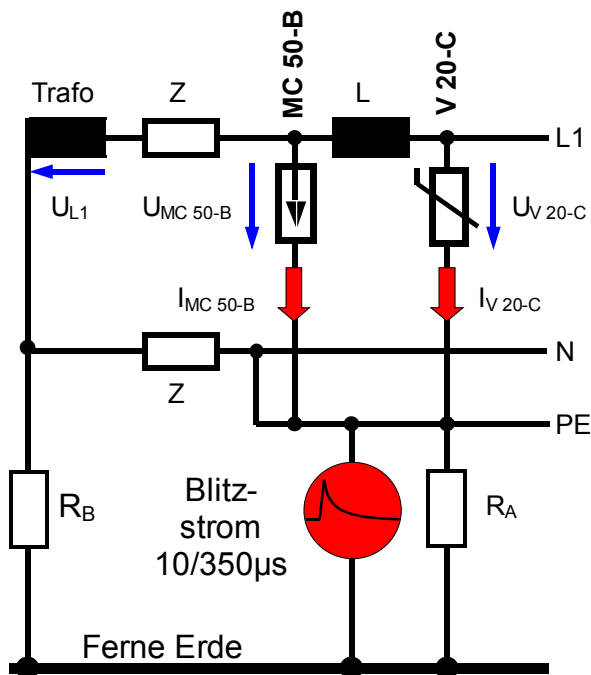


Bild 16 Ersatzschaltbild.
 R_A : Anlagenerder, R_B : Betriebserder,
 Z : Impedanz der Zuleitung 70 mm^2 .
 U_{L1} : Spannungsquelle, hier ein 650 kVA-Verteiltransformator.
 L : Entkopplungsspule

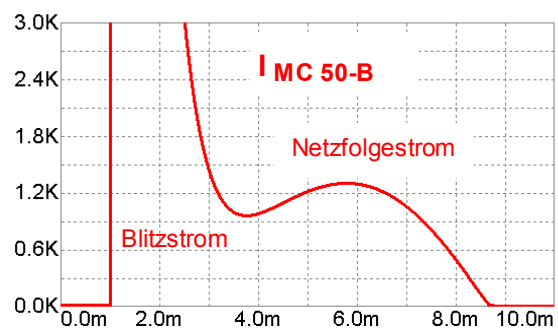
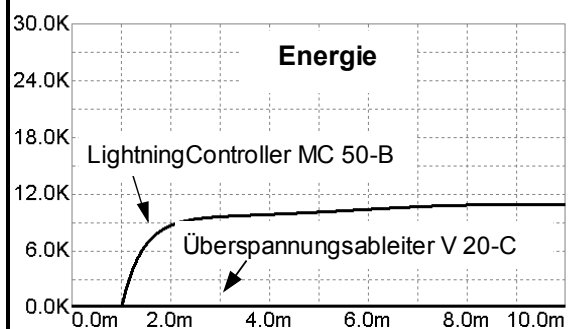
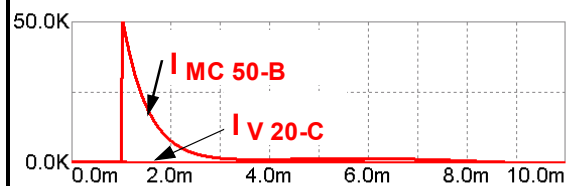
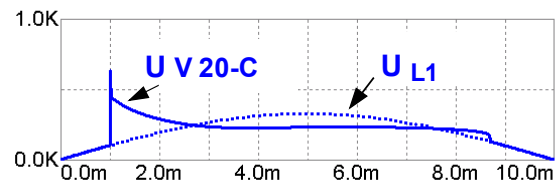
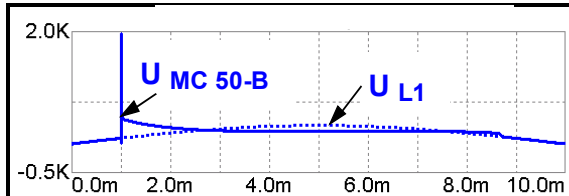


Bild 17 Ergebnisse der Simulation von Bild 16.
 Ergebnis: Der Überspannungsableiter V20C übernimmt einen Teilblitzstrom und löst die Funkenstrecke des Blitzstromableiters LA60-B aus, der nahezu die gesamte Energie übernimmt. Details der Kommutierung siehe Bild 18. Die gepunktete Linie ist eine Halbwelle der Netzspannung.

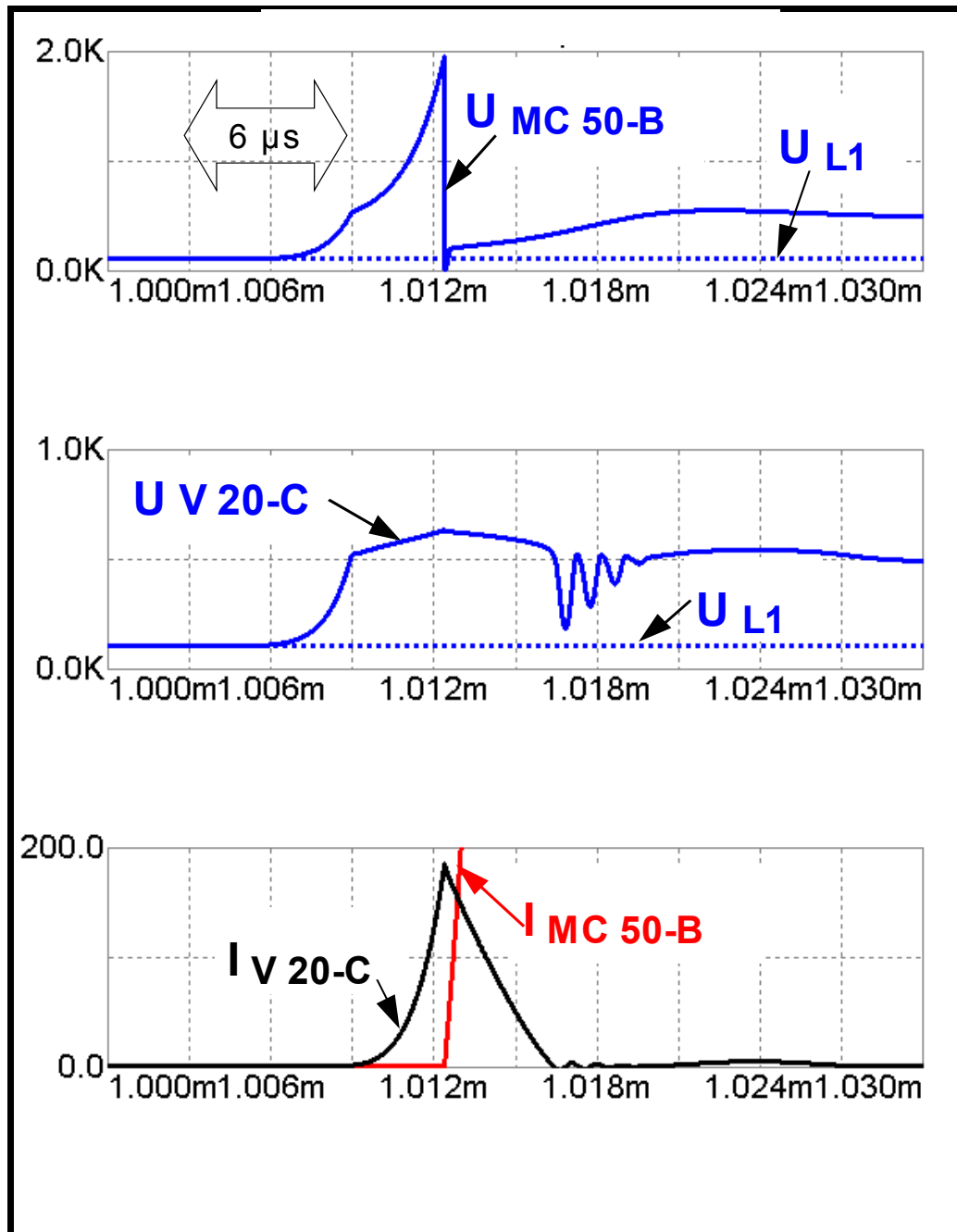


Bild 18 Details aus Bild 17 mit höherer Zeitauflösung.

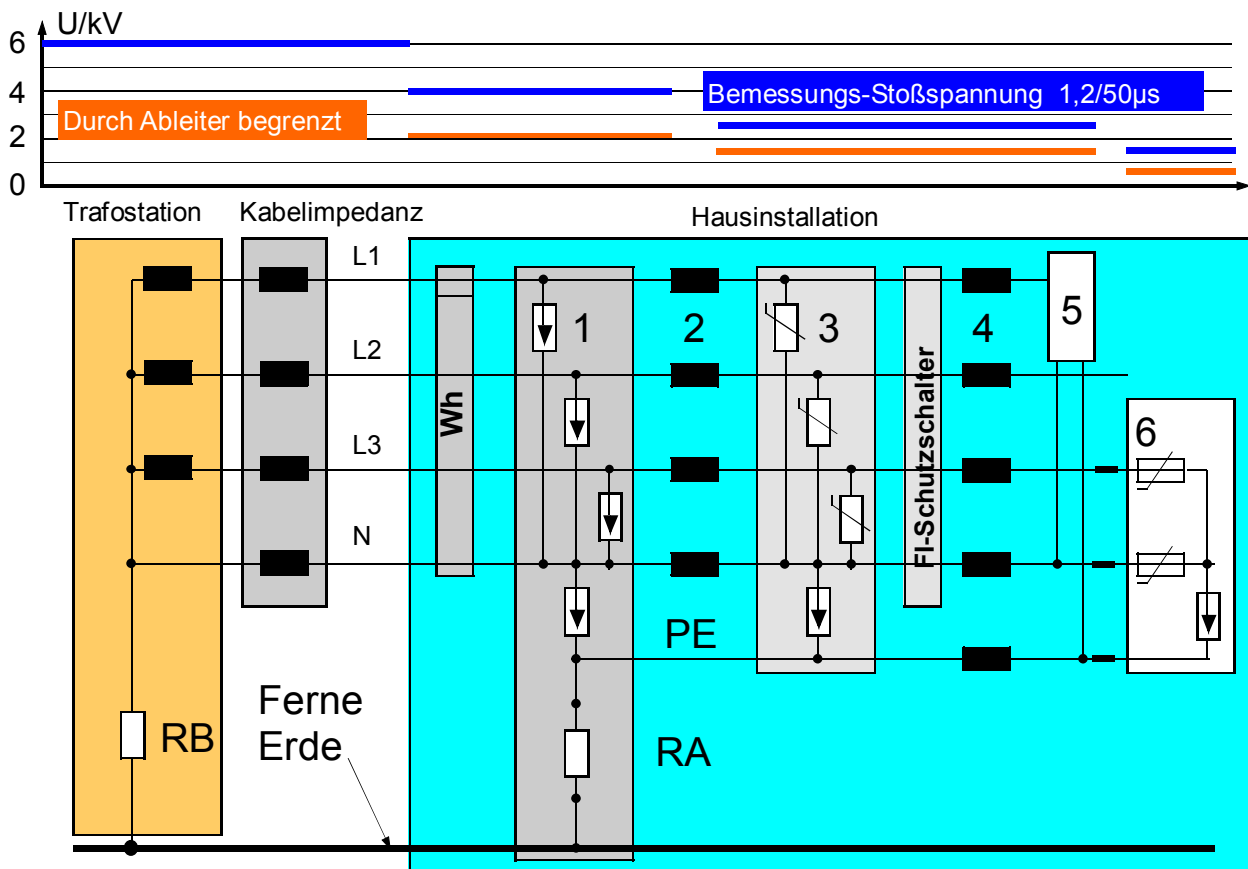


Bild 19 a Blitzstrom- und Überspannungsableiter in einem TT-Netz als 3+1 Schaltung. 1: B-Schutz mit Blitzstromableitern mit Funkenstrecken. 2 : Entkoppelpulen. 3 : C-Schutz mit Varistoren und N-PE-Funkenstrecke. 4 : Impedanz der Leitung. 5 : Fest installierte Verbraucher. 6 : D-Schutz für bewegliche Verbraucher.

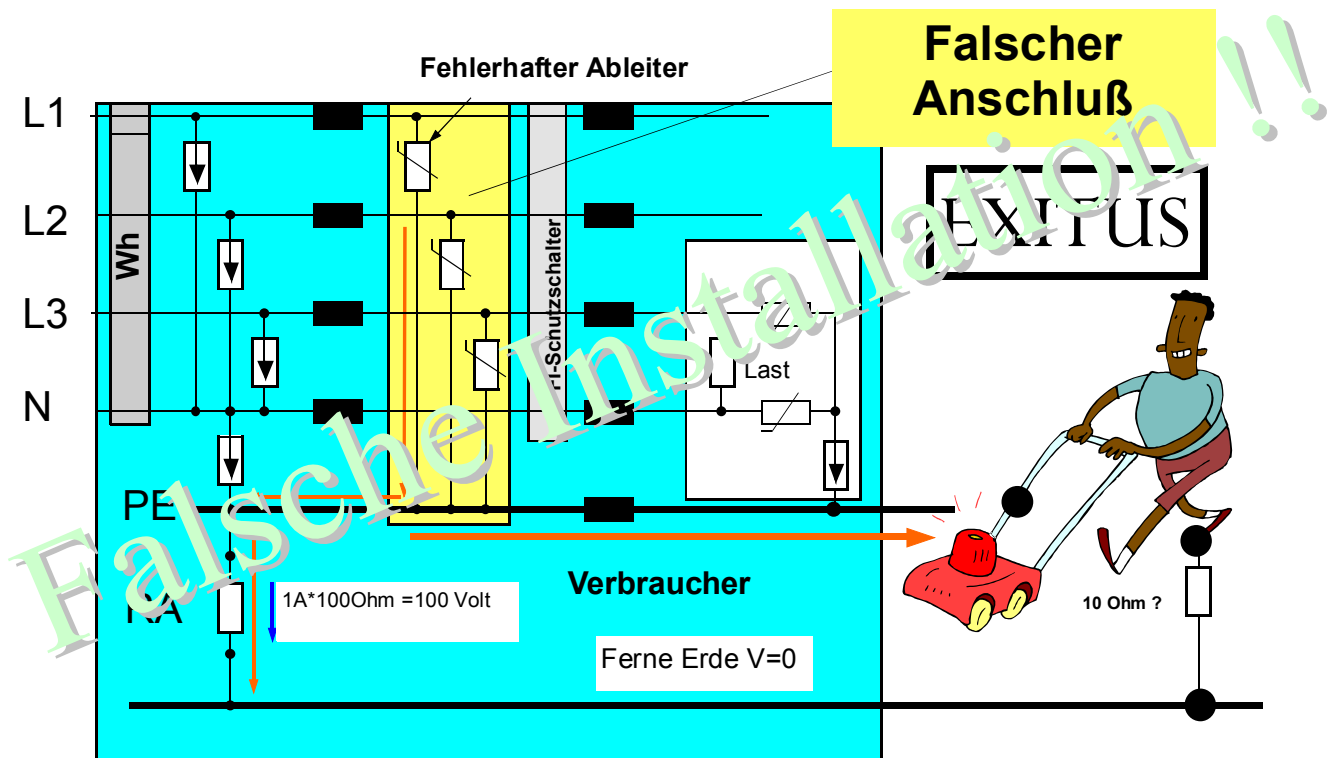


Bild 19 b . Gefahren, die Entstehen, wenn Ableiter in einem TT-Netz **falsch installiert** werden und ein fehlerhafter Ableiter einen Ableitstrom gegen Erde führt.

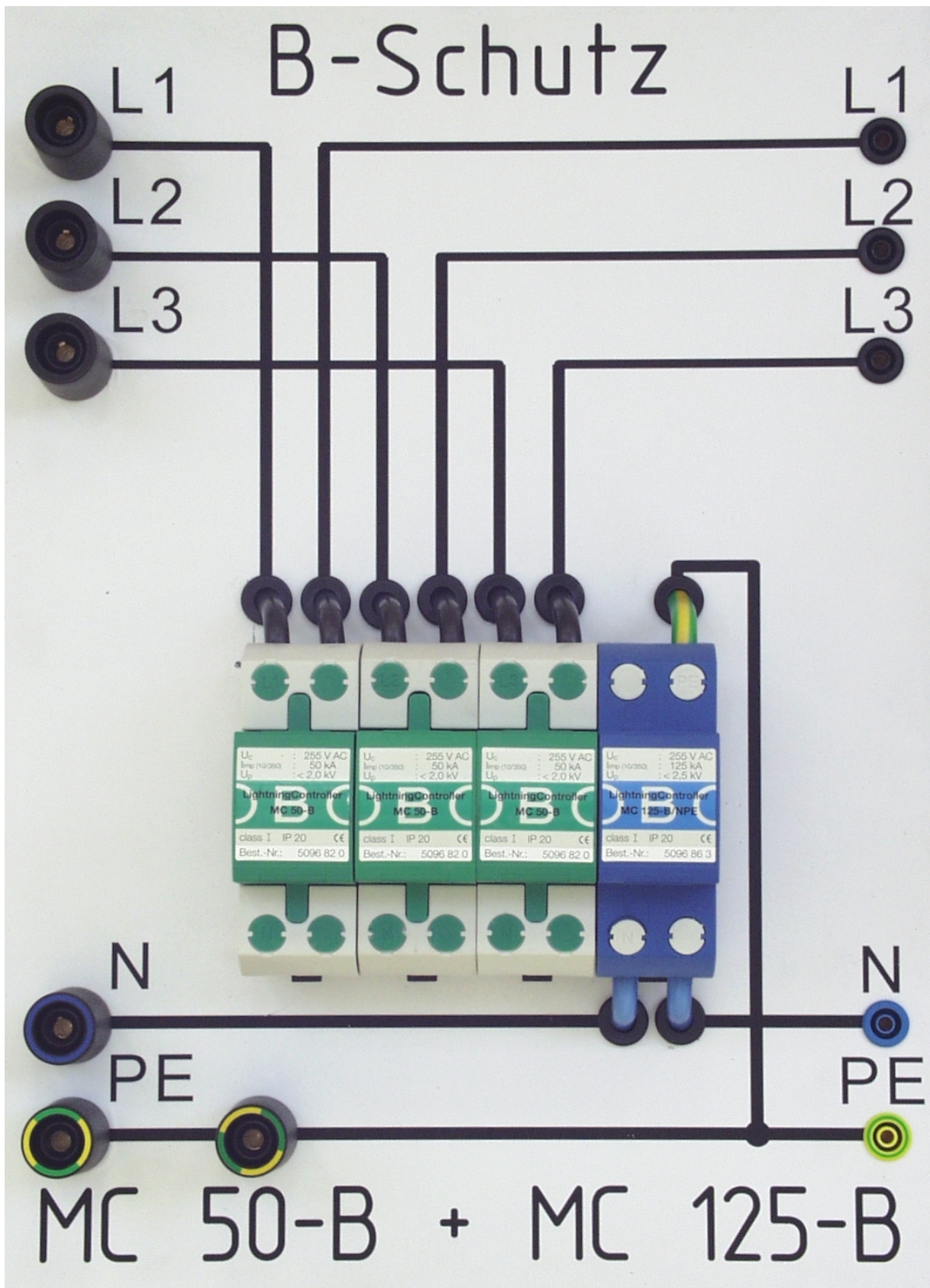


Bild 20 (3+1)-Installation B-Schutz im TT-Netz.

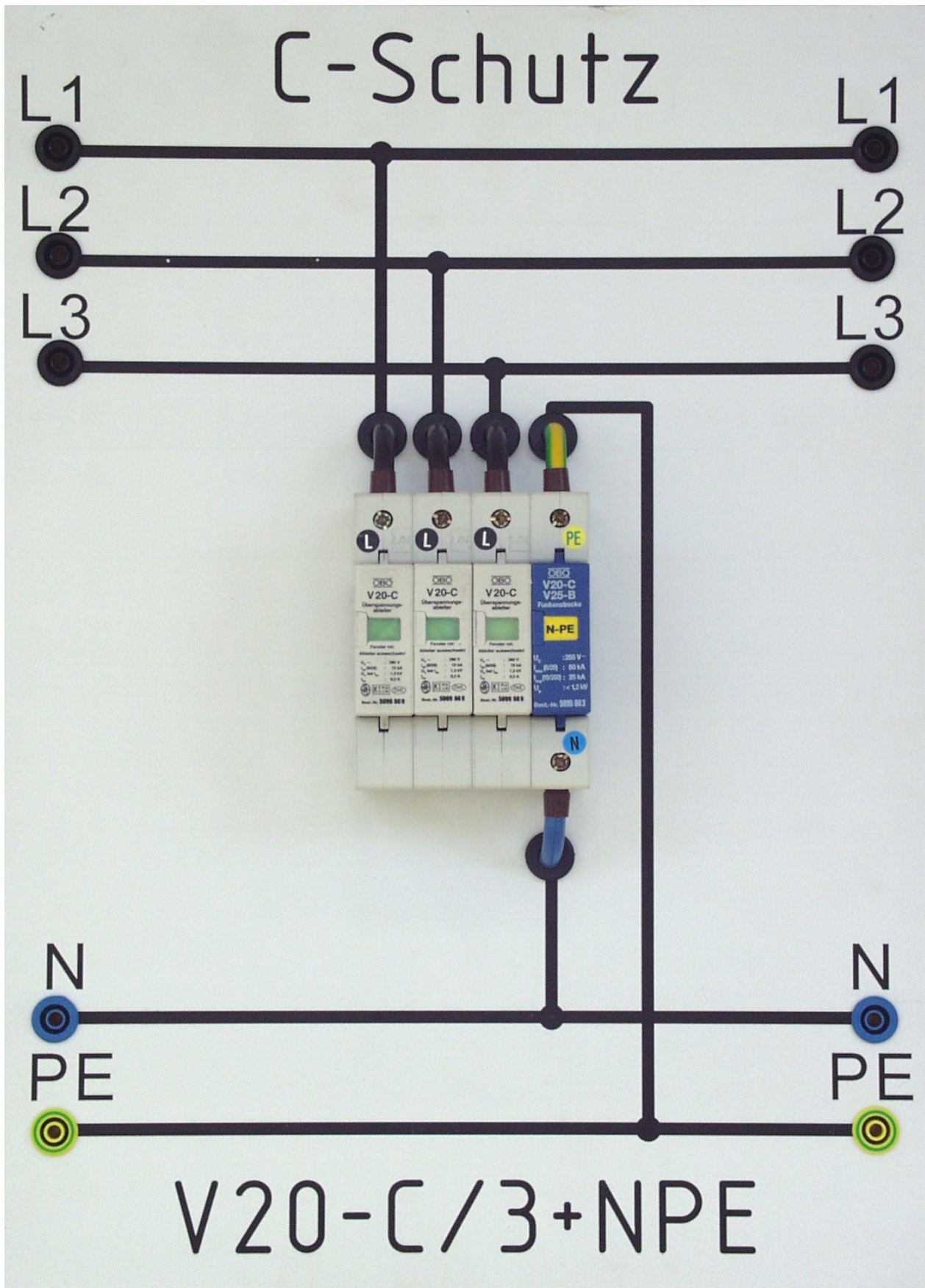


Bild 21 (3+1) Installation C-Schutz im TT-Netz.

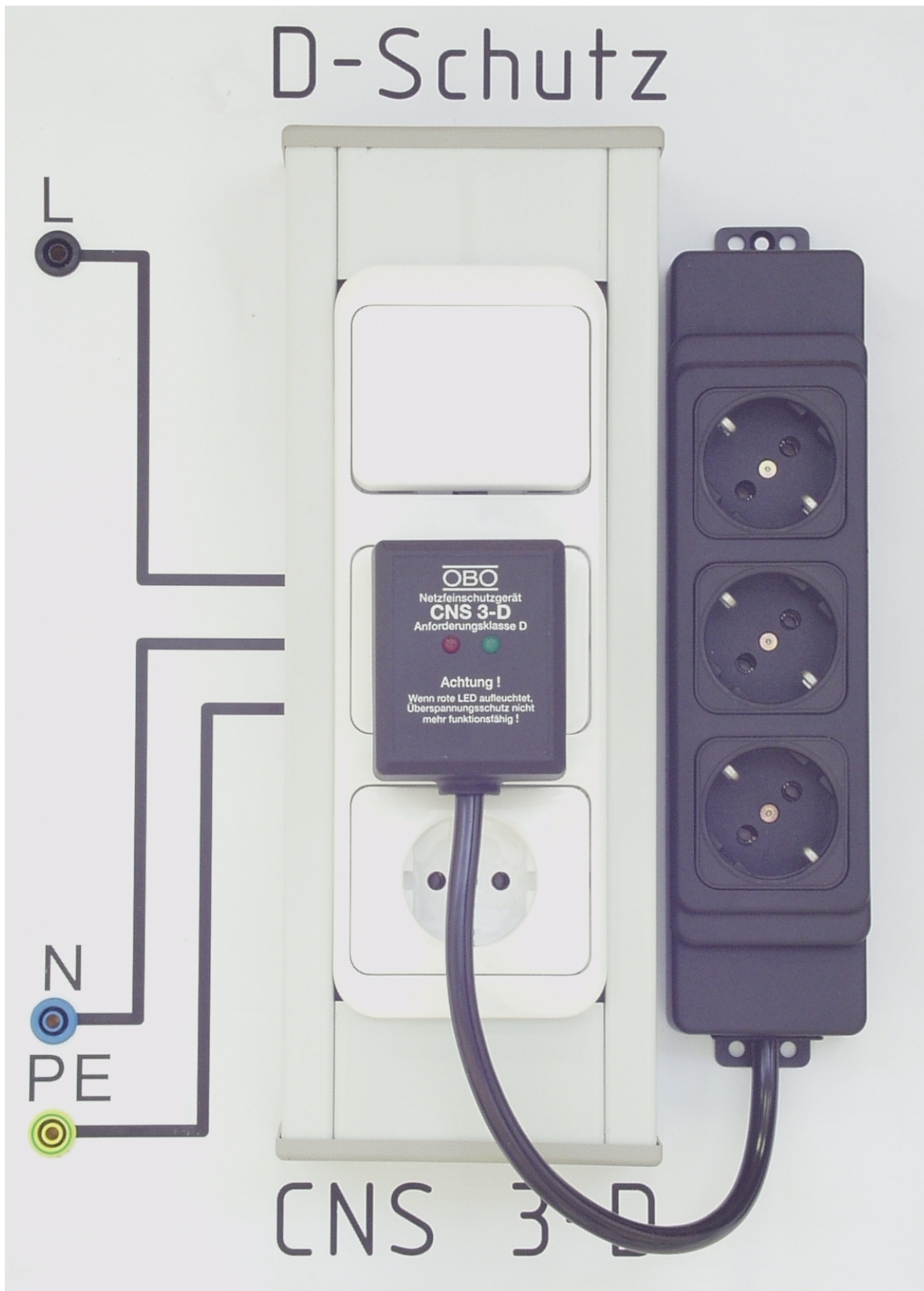


Bild 22 Installation D-Schutz im TT-Netz.

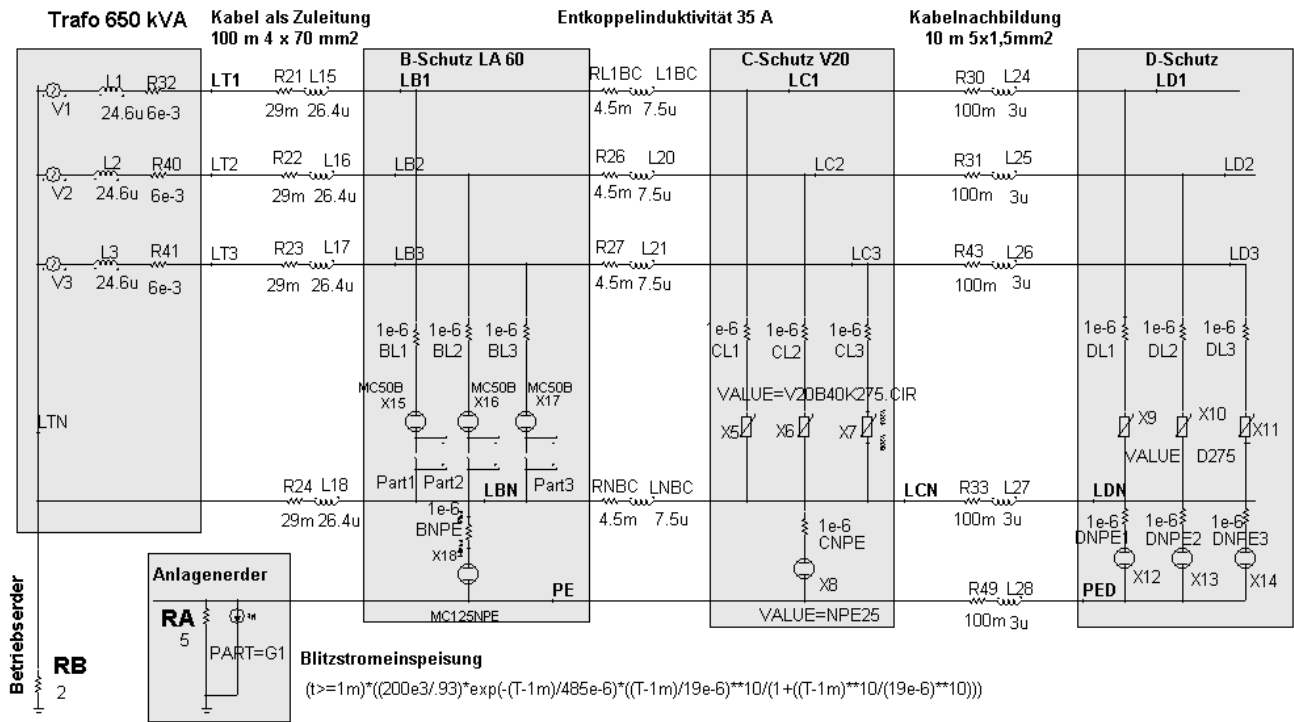


Bild 23 Schaltung für die Computersimulation mit Microcap 6.

Die Transformatorleistung beträgt 630 kVA. Der Erdungswiderstand im TT-Netz ist rein Ohmsch mit 5 Ohm simuliert. Der Betriebserder des Transformators ist rein ohmsch mit 2 Ohm simuliert. Die Blitzstromableiter und die N-PE-Funkenstrecken sind durch Makromodelle repräsentiert. Die Varistoren sind durch Modelle aus den Bibliotheken des Simulationsprogramms repräsentiert.

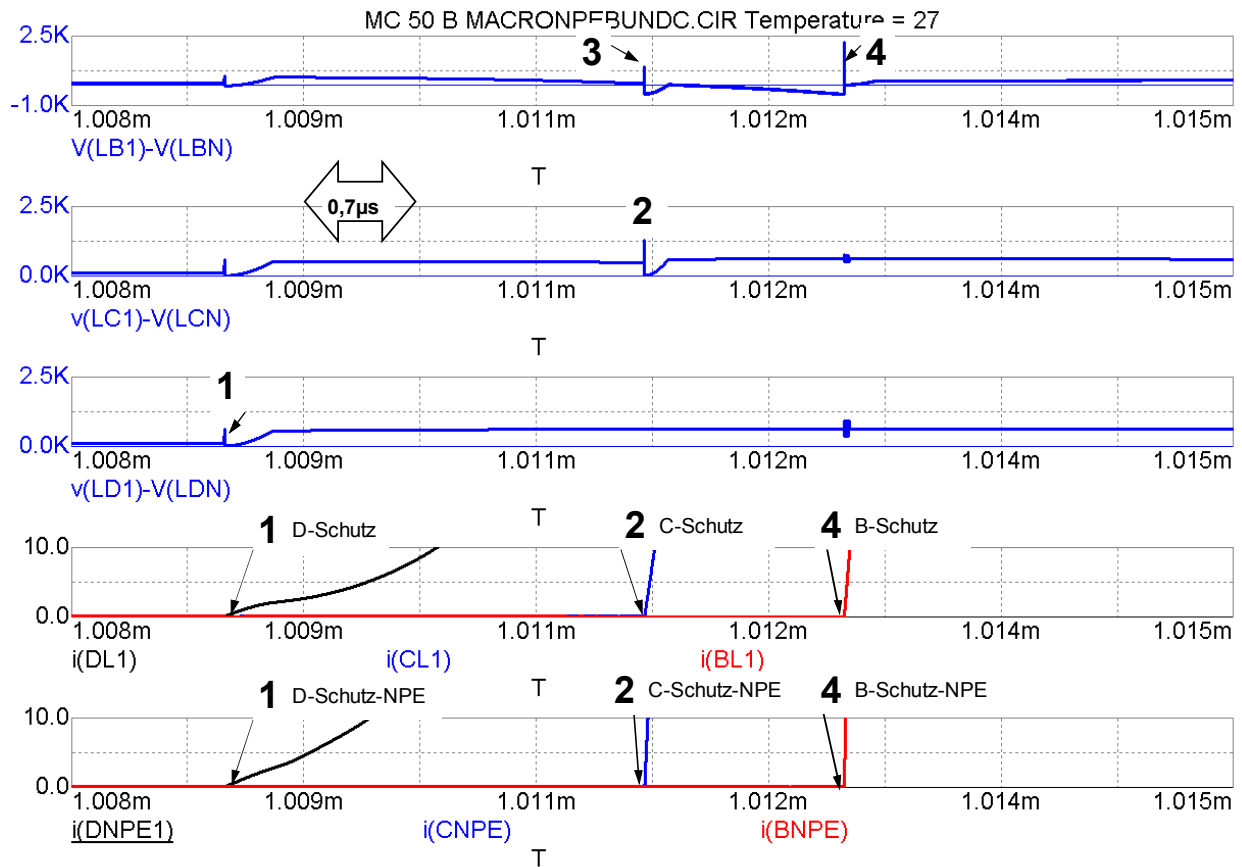


Bild 24: Ergebnis der Simulation der Schaltung in Bild 23:
Kommutierung der Blitzstromableiter und Überspannungsableiter in der Reihenfolge D-C-B.

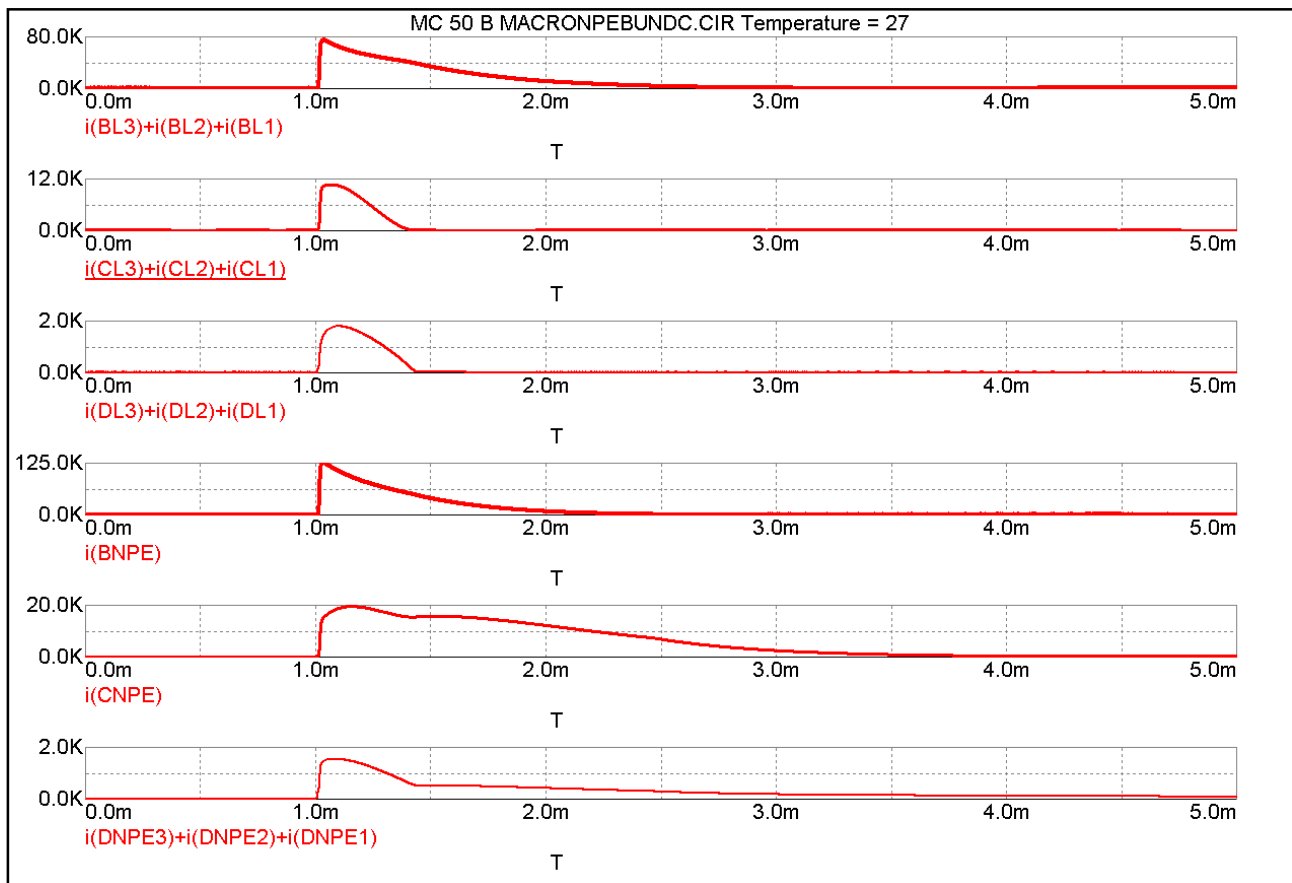


Bild 25a Ergebnis der Simulation der Schaltung in Bild 23 :
Stromverteilung in den einzelnen Blitzstrom- und Überspannungsableitern.
Anlagenerder 5 Ohm , Betriebserder 2 Ohm

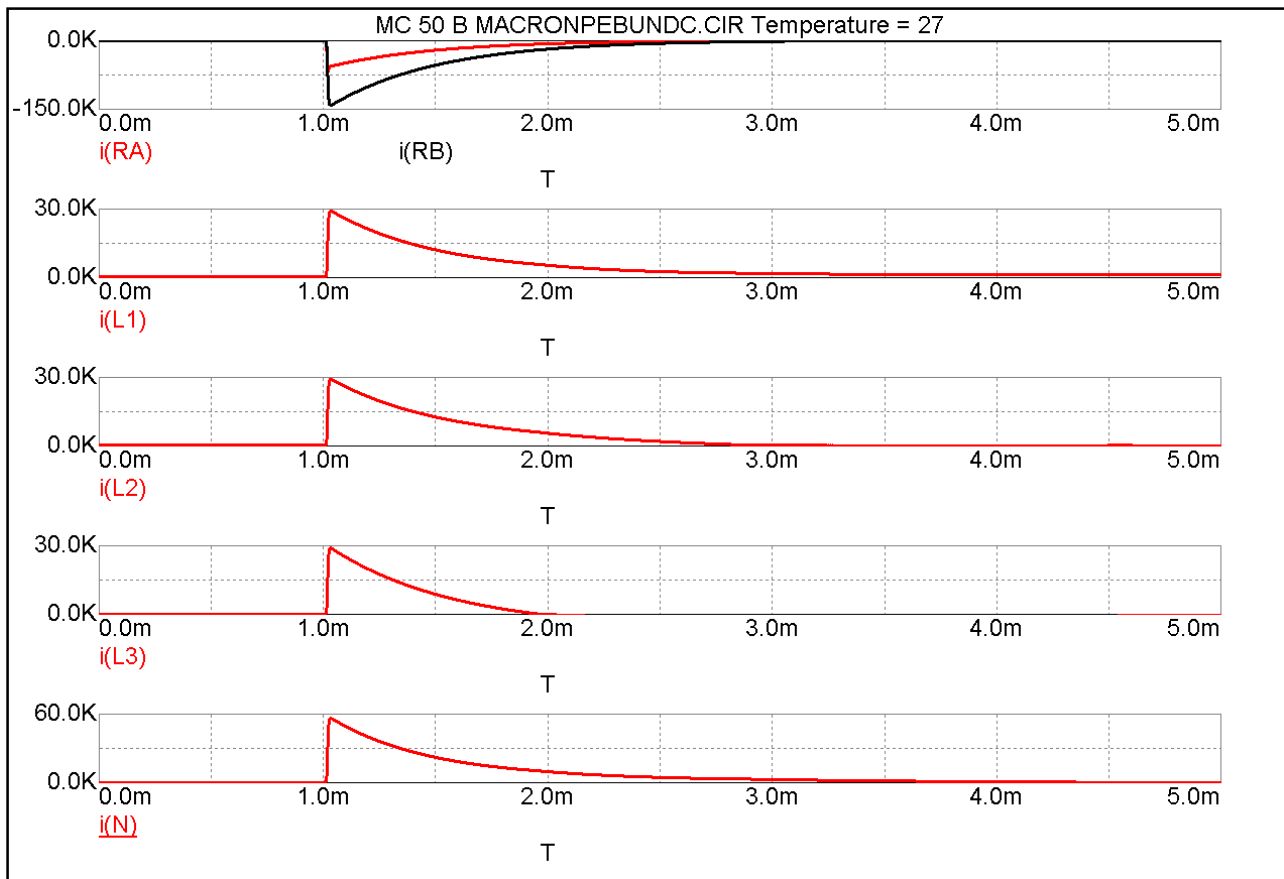


Bild 25b Ergebnis der Simulation der Schaltung in Bild 23 :
 Stromverteilung in den einzelnen Phasen und im Neutralleiter.
 Anlagenserder 5 Ohm , Betriebserder 2 Ohm

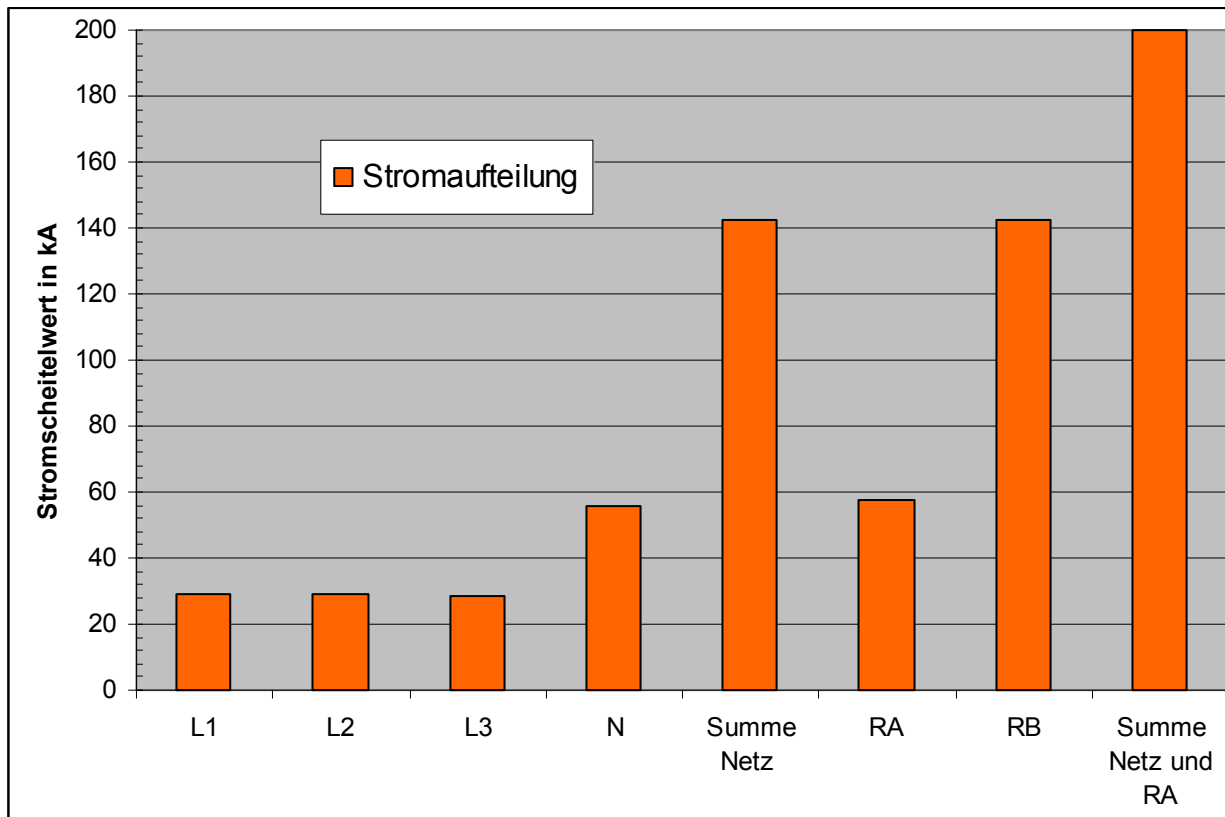


Bild 25c Analyse der Stromanteile aus Bild 25 b
Anlagenerder 5 Ohm , Betriebserder 2 Ohm

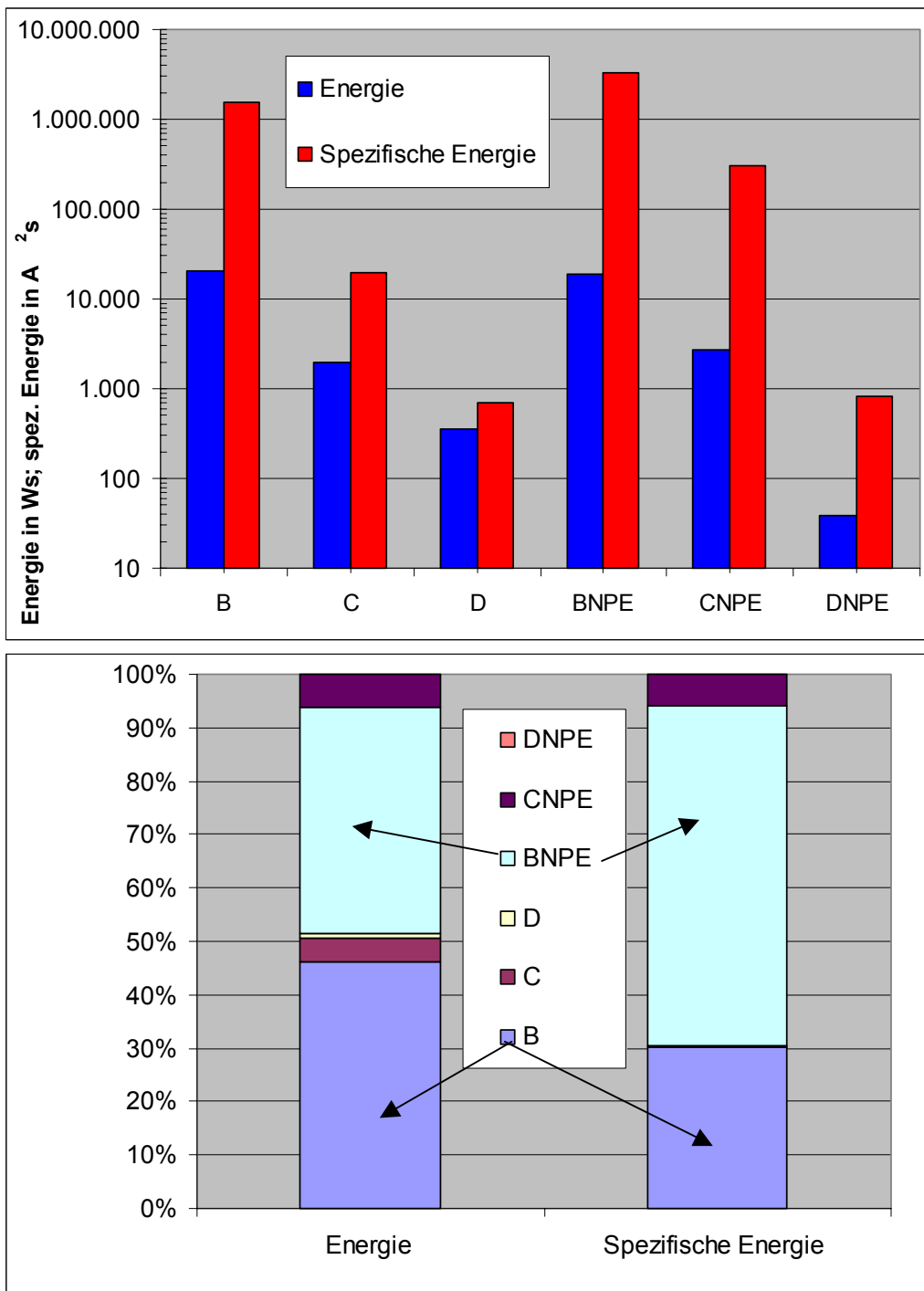


Bild 26 a Energetische Analyse der Energieaufnahme in den 3 Ableitern der Phasen und in den N-PE Funkenstrecken bei einem 200 kA 10/350µs-Impuls, 5 Ohm Erdungswiderstand im TT-Netz und 2 Ohm im Betriebserder. Oben: absolute Werte in Ws bzw. kA²s, unten relative Darstellung.

B: 3 Funkenstrecken MC 50-B im B-Bereich

C: 3 Varistoren V20-C

D: 3 D-Schutz Varistoren

BNPE: Eine NPE-Funkenstrecke MC 125 -B/NPE im B-Bereich

CNPE: Eine NPE-Funkenstrecke im C-Bereich

DNPE: Eine NPE-Funkenstrecke im D-Bereich

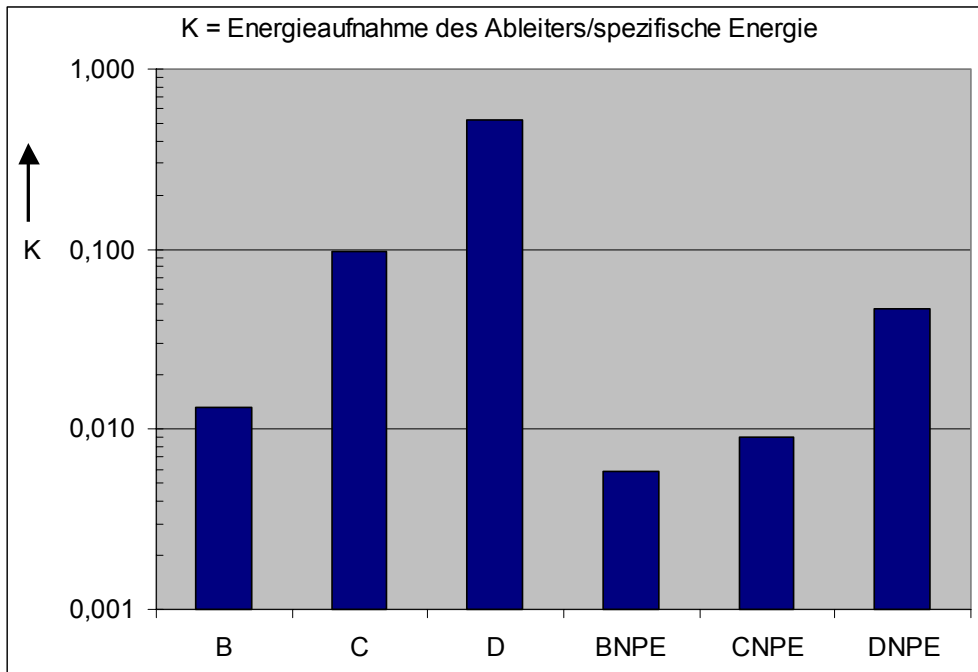


Bild 26 b Relative Energiedarstellung. Daten wie Bild 26 a



Bild 27 Blitzstromsimulator im BET. 200 kA 10/350 μ s und andere Impulse. 50 μ F und 100 kV Ladespannung.

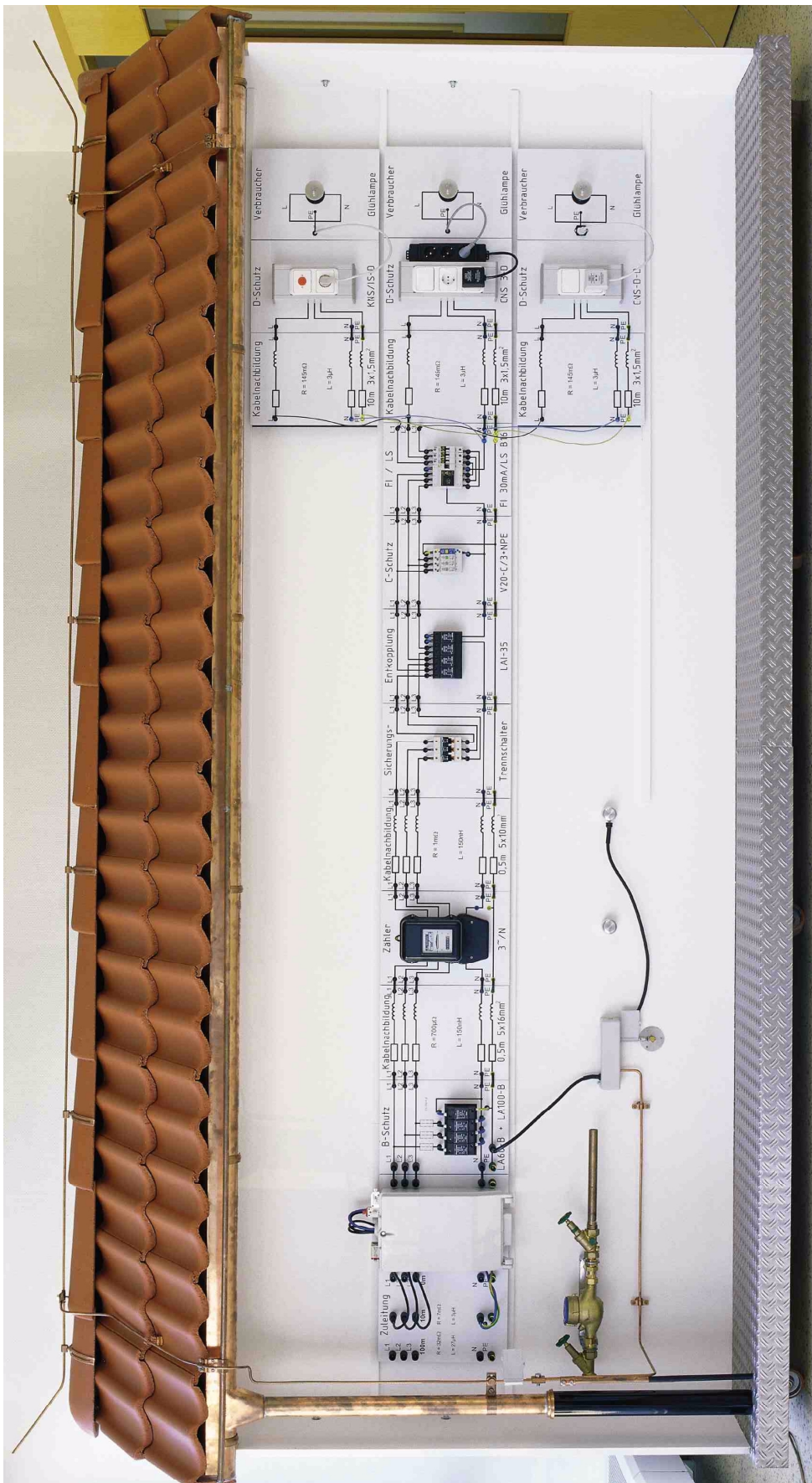


Bild 28 Netzmodell für den Blitz- und Überspannungsschutz im BET (Blitzschutz- und EMV Technologiezentrum GmbH), Menden