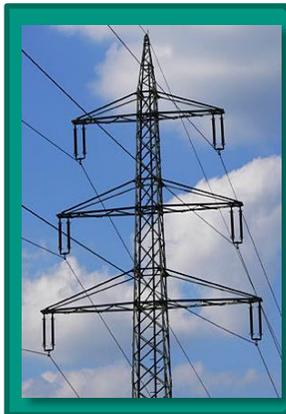


Vorlesung Praxis Leistungselektronischer Systeme

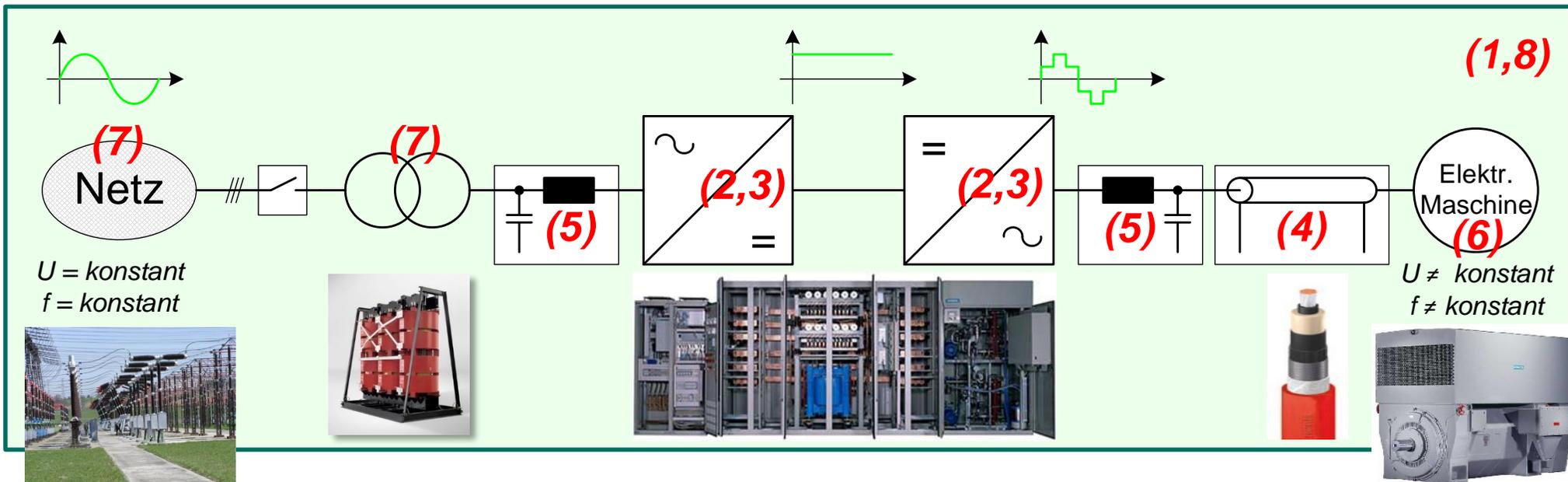
WS2017/18

Elektrotechnisches Institut (ETI) – Leistungselektronische Systeme



Vorlesungsinhalte

- Kapitel 0: Einleitung
- Kapitel 1: Systemübersicht
- Kapitel 2: Stromrichterauslegung**
- Kapitel 3: Halbleiterauslegung
- Kapitel 4: Kabel
- Kapitel 5: Filter
- Kapitel 6: Wechselwirkung Umrichter/Maschine
- Kapitel 7: Netz
- Kapitel 8: Systembetrachtungen



Gliederung

Stromrichterauslegung

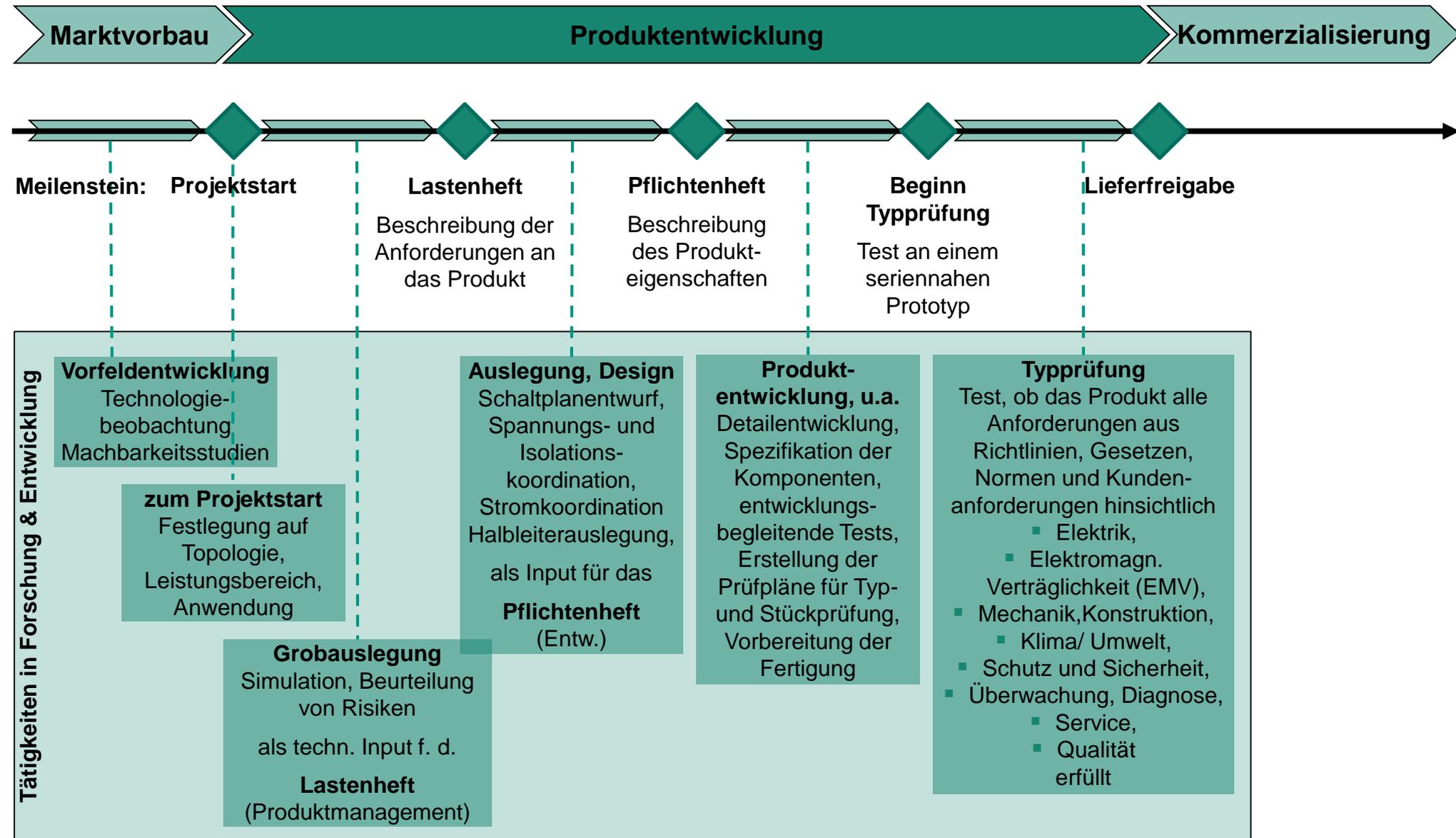
1. Isolationskoordination
2. Lichtbogenfestigkeit
3. Strom- und Spannungscoordination
4. Zusammenfassung

Gliederung

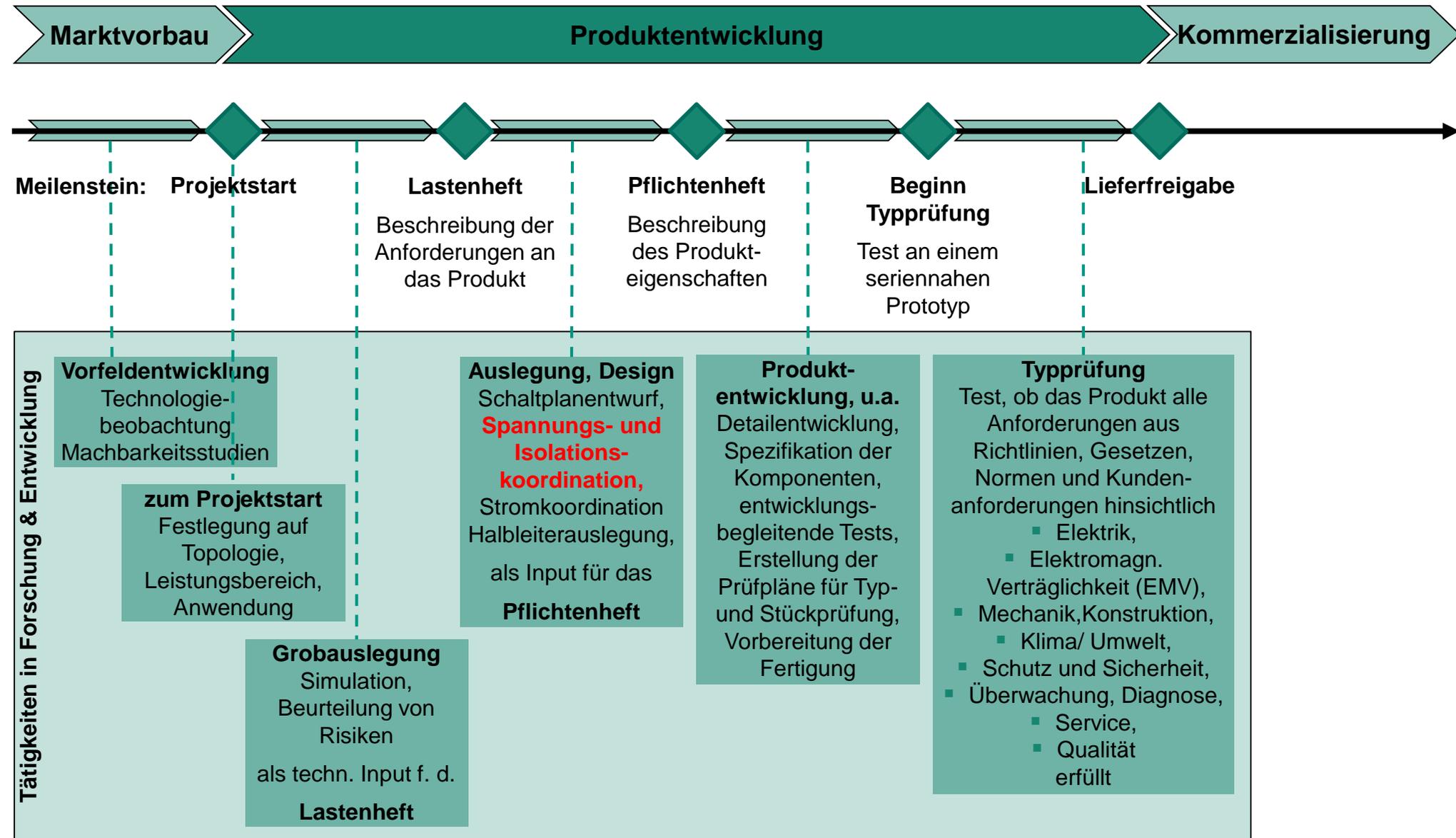
Stromrichterauslegung

1. **Isolationskoordination**
2. Lichtbogenfestigkeit
3. Strom- und Spannungscoordination
4. Zusammenfassung

1. Isolationskoordination – Bedeutung im Entwicklungsprozess



1. Isolationskoordination – Bedeutung im Entwicklungsprozess



1. Isolationskoordination - Grundlagen

Warum benötigt man eine Isolationskoordination?

Vermeidung von

- **Funktionsstörungen** und
- **Gefährdung von Personen**

in einem elektrischen Betriebsmittel (hier: Stromrichter) durch

- Überschläge an **Luftstrecken**,
- unzulässig hohe Kriechströme oder Überschläge an **Kriechstrecken**,
- Isolationsversagen von **festen Isolierstoffen**

um die Sicherheit

- bei der Errichtung,
- bei bestimmungsgemäßen Betriebsbedingungen und
- bei der Instandhaltung

während der erwarteten Lebensdauer des PDS (Power Drive System) sicherzustellen.

Außerdem wird die Verringerung von Gefahren durch „vernünftigerweise vorhersehbaren“ Fehlgebrauch betrachtet.

Die Angaben der Isolationskoordination dienen als **Spezifikationsvorgaben** und **Design-Richtlinien** für die Konstruktion eines Stromrichters, sowie für sehr viele Komponenten und elektronische Baugruppen.

1. Isolationskoordination - Grundlagen

Was leistet eine Isolationskoordination?

Dimensionierung von

- **Isolierstrecken**, d.h.
 - Luftstrecken,
 - Kriechstrecken,
 - feste Isolierstoffe

gemäß den in der Applikation zu erwartenden Spannungsbelastungen.

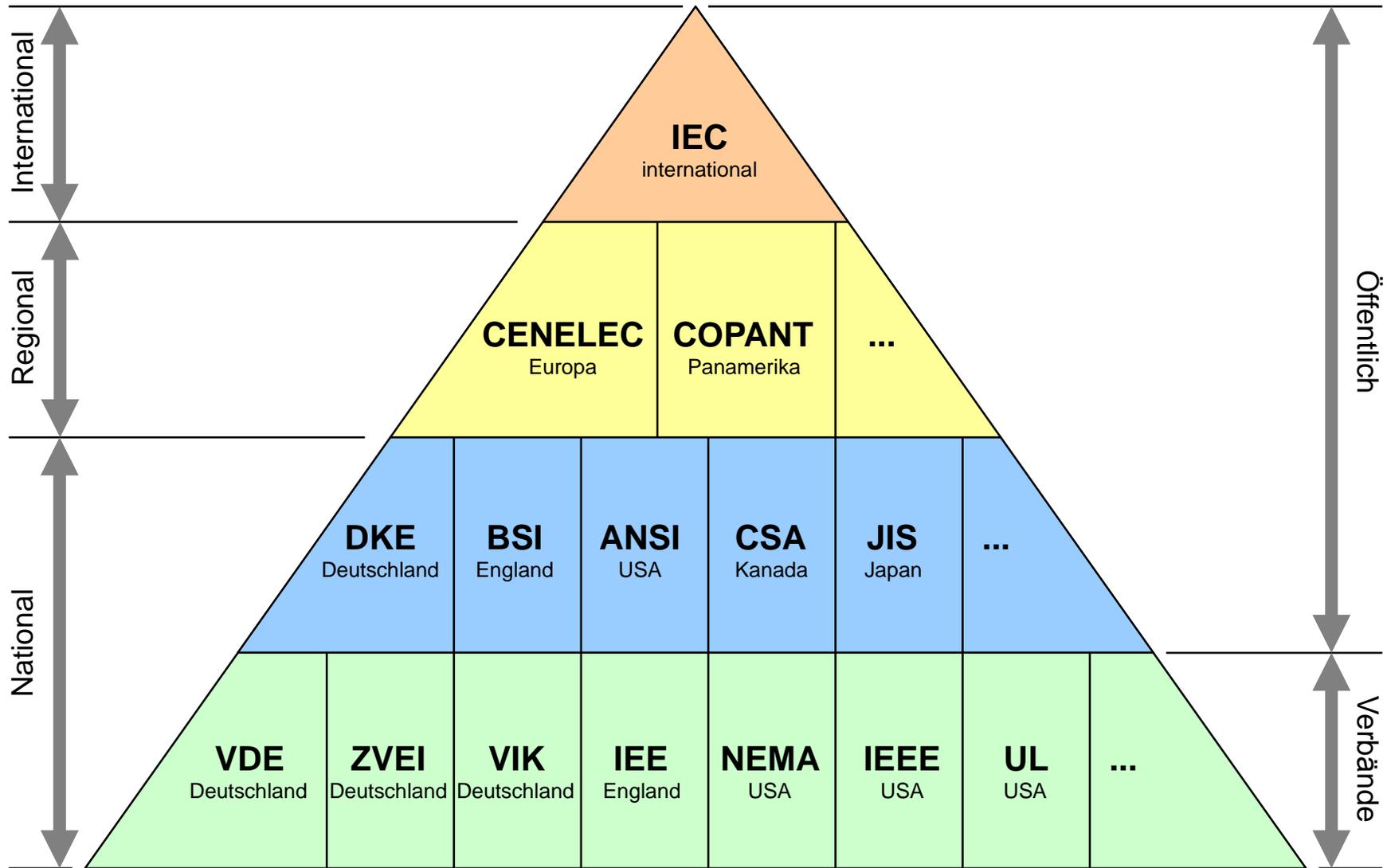
Außerdem: Festlegung der

- **Prüfspannungen** und **Prüfdauern** in
 - **Typprüfung**,
 - **Stückprüfung** von **Einzelkomponenten**,
 - **Stückprüfung** des **Gesamtgeräts**

um eine ausreichende Fertigungsqualität gewährleisten zu können.

Generell: Normen geben Mindestwerte für die o.g. Größen an. Angemessene Anpassungen nach oben sind möglich (abhängig von Erfahrungen, Kundenwünschen etc.).

1. Isolationskoordination - Normen



1. Isolationskoordination - Normen



Die IEC (International Electrotechnical Commission) ist eine internationale überstaatliche Normungsorganisation im Bereich der Elektrotechnik und Elektronik. Ihre Standards dienen als Basis für regionale (z.B. Europäische) und nationale Normen. Die IEC wurde 1906 in London gegründet. Hauptsitz ist heute Genf in der Schweiz. Mitglieder bei der IEC können nur Nationalstaaten werden, keine Einzelpersonen oder Organisationen. Aktuell sind 162 Staaten in der IEC organisiert (davon 81 als Mitglieder und 81 als Beobachter). Sie haben bei allen Beschlüssen und Abstimmungen eine gleichwertige Stimme.

Die Vorbereitung der Arbeit bei der IEC wird in nationalen Komitees durchgeführt (in Deutschland nimmt der VDE mit der DKE diese Aufgabe wahr). Es gibt über 6000 Standards im IEC-Katalog, die von über 1000 Arbeitsgruppen bearbeitet und laufend aktualisiert werden. Die Arbeitsgruppen (Working Groups) sind in technischen Komitees (TCs) organisiert, wovon es 174 gibt. Das TC2 beschäftigt sich mit Elektromotoren und wurde bereits 1910 gegründet. Themen der Leistungselektronik werden in TC22 bearbeitet.



CENELEC (Comité Européen de Normalisation Électrotechnique) ist in gewisser Weise ein europäisches Spiegelbild der IEC. Mitglieder sind derzeit 32 europäische Länder plus 11 Beobachter aus angrenzenden Regionen. Auch bei CENELEC gibt es Arbeitsgruppen TC2 und TC22 für Motoren und Leistungselektronik, die allerdings wenig eigene Standards erstellen, sondern im Wesentlichen die IEC Normen übernehmen – gelegentlich mit leichten Anpassungen.



Die DKE (Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE) ist die nationale deutsche Organisation für die Erarbeitung von Normen im Bereich der Elektrotechnik. Sie ist das deutsche Mitglied in der IEC und bei CENELEC.

Die DKE ist in Fachbereiche unterteilt. Die Leistungselektronik wird im Fachbereich 2 bearbeitet (K226), die elektrischen Maschinen im Fachbereich 3 (K311). Für spezielle Themen gibt es eine Unterkommission (UK311.1 - Niederspannungsmotoren) und mehrere Arbeitskreise (AK311.0.x).

Insbesondere das K311 blickt auf eine lange Tradition zurück. Die ursprüngliche Kommission für elektrische Maschinen im VDE wurde bereits im Jahre 1900 gegründet, also einige Jahre vor der Gründung der IEC und des TC2.

1. Isolationskoordination - Normen

In Europa sind für die erforderliche **CE-Kennzeichnung** von Antriebssystemen folgende Richtlinien relevant:

- **Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU**
Betrifft die Sicherheit elektrischer Betriebsmittel zwischen 50 V bis 1000 V Bemessungsspannung.
- **Maschinenrichtlinie 2006/42/EG**
Betrifft alle Maschinen und Anlagen mit bewegten Teilen. Sie regelt ein einheitliches Schutzniveau zur Unfallverhütung für Maschinen beim Inverkehrbringen innerhalb des europäischen Wirtschaftsraumes.
- **EMV-Richtlinie 2004/108/EG**
Betrifft alle elektrischen Geräte, jedoch nicht Komponenten, die nicht allgemein erhältlich sind. Ziel der EMV-Richtlinie ist ganz allgemein eine Vermeidung einer elektromagnetischen Störung anderer Betriebsmittel durch ein Betriebsmittel.
- **ErP-Richtlinie 2009/125/EC** (Energy-related-Products = Öko-Design)
Betrifft derzeit nur Drehstrom-Asynchronmotoren zwischen 0,75 bis 375 kW – zukünftig auch Antriebssysteme (Motor, Umrichter, Pumpen).
- **ATEX-Richtlinie 94/9/EG**
Betrifft Geräte und Schutzsysteme zur Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen.

Der Hersteller ist verpflichtet, die Einhaltung der für sein Produkt zutreffenden Richtlinien selbst zu überprüfen und durch eine Konformitätsbewertung zu bescheinigen (Ausnahme ATEX-Richtlinie – hier ist ein Zertifikat einer Prüfbehörde erforderlich). Dies geschieht auf Basis von CENELEC- und CEN-Normen, die für die jeweiligen Richtlinien im Amtsblatt der EU gelistet werden. Wenn nach Meinung des Herstellers alle Anforderungen abgedeckt sind, darf er das Produkt mit einem CE-Kennzeichen versehen und auf den Markt bringen. Die sog. *Marktaufsicht*, eine Landesbehörde, prüft zu Kontrollzwecken regelmäßig zufällig ausgewählte Produkte (oder auf Hinweis von Industrieverbänden auch ganz bestimmte Produkte) auf ihre Richtlinienkonformität. Werden Missstände aufgedeckt, kann der Hersteller mit empfindlichen Geldstrafen belegt werden.

1. Isolationskoordination - Normen

Relevante Europäische Normen

Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU
Betrifft die Sicherheit elektrischer Betriebsmittel zwischen 50 V bis 1000 V
Bemessungsspannung

Maschinenrichtlinie 2006/42/EG
Betrifft alle Maschinen und Anlagen mit bewegten Teilen. Sie regelt ein
einheitliches Schutzniveau zur Unfallverhütung für Maschinen beim
Inverkehrbringen innerhalb des europäischen Wirtschaftsraumes.

Grundnormen

EN 61140 Schutz gegen elektrischen Schlag – Gemeinsame
Anforderungen für Anlagen und Betriebsmittel

...

Produktfamiliennormen

EN 60664-1 Isolationskoordination für elektrische Betriebsmittel in
Niederspannungsanlagen – Teil 1: Grundsätze,
Anforderungen und Prüfungen

...

Produktnormen

EN 61800-5-1 Elektrische Leistungsantriebssysteme mit einstellbarer Drehzahl – Teil
5-1: Anforderungen an die Sicherheit – Elektrische, thermische und
energetische Anforderungen

...

1. Isolationskoordination - Normen

Grundnorm: EN 61140 Schutz gegen elektrischen Schlag

Einleitung:

Diese Norm ist anzuwenden für den Schutz gegen elektrischen Schlag von Personen und Nutztieren. Mit dieser Norm ist beabsichtigt, Grundsätze und Anforderungen vorzugeben, die gemeinsam für elektrische Anlagen, Systeme und Betriebsmittel gelten oder die für deren Koordinierung notwendig sind.

Diese Norm ist eine **Sicherheitsgrundnorm**, die für die Verwendung durch technische Komitees bei der Erstellung von Normen vorgesehen ist. Die Anforderungen dieser Norm sind nur dann anzuwenden, wenn sie in andere Normen eingearbeitet sind oder wenn in diesen auf sie Bezug genommen wird. **Diese Norm kann daher nicht als eigenständige Norm angewendet werden.**

Anwendungsbereich:

Diese Norm wurde erstellt für elektrische Anlagen, Systeme und Betriebsmittel ohne Begrenzung der Spannung.

1. Isolationskoordination - Normen

Grundnorm: EN 61140 Schutz gegen elektrischen Schlag

Grundprinzip: Dem Schutz gegen elektrischen Schlag liegt folgendes Konzept zugrunde

- **Im fehlerfreien Zustand dürfen Teile der elektrischen Anlage, die eine für den Menschen gefährliche elektrische Spannung führen, nicht berührbar sein.**
- **Sollte jedoch ein Fehler auftreten, der zu einem für Menschen lebensgefährlichen elektrischen Schlag führen könnte, so muss eine geeignete Schutzmaßnahme dieses verhindern.**

1. Isolationskoordination - Normen

Grundnorm: EN 61140 Schutz gegen elektrischen Schlag

Grundprinzip: „Schutz gegen elektrischen Schlag“ besteht aus zwei Schutzebenen

- **Basisschutz** (Schutz gegen direktes Berühren, verhindert das direkte Berühren unter Spannung stehender (aktiver) Teile der elektrischen Anlage, z.B. durch Isolierung)
- **Fehlerschutz** (Schutz bei indirektem Berühren; verhindert, dass im Fehlerfall bei Versagen des Basisschutz eine gefährliche Berührungsspannung auftreten kann)

Schutzmaßnahme zum Schutz von Personen:

- **Geeignete Kombination** von zwei **unabhängigen** Schutzvorkehrungen, d.h.
 - einer Vorkehrung für den Basisschutz **und**
 - einer Vorkehrung für den Fehlerschutz.
- **Verstärkte Schutzvorkehrung**, die sowohl den Basis- als auch den Fehlerschutz bewirkt.

1. Isolationskoordination - Normen

Grundnorm: EN 61140 Schutz gegen elektrischen Schlag

Grundnorm EN 61140 (VDE 0140): **Schutz gegen elektrischen Schlag**

In dieser Norm werden grundsätzliche Dinge festgelegt wie z.B.

Die Spannungsbereiche:

	AC	DC
Kleinspannung(ELV):	$\leq 50V$	$\leq 120V$
Niederspannung(LV):	$> 50V \leq 1000V$	$> 120V \leq 1500V$
Hochspannung(HV):	$> 1000V$	$> 1500V$

1. Isolationskoordination - Normen

Produktnorm: DIN EN 61800 Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe

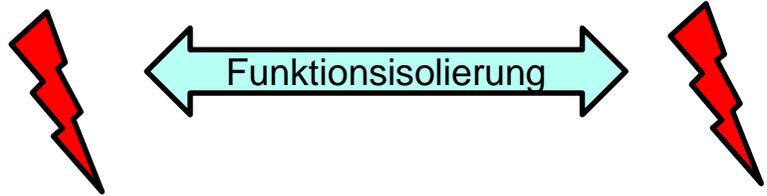
- DIN EN 61800-1 (VDE 0160-101), Teil 1: Allgemeine Anforderungen – Festlegungen für die Bemessung von **Niederspannungs-Gleichstrom-Antriebssystemen**
- DIN EN 61800-2 (VDE 0160-102), Teil 2: Allgemeine Anforderungen – Festlegungen für die Bemessung von **Niederspannungs-Wechselstrom-Antriebssystemen** mit einstellbarer Frequenz
- DIN EN 61800-3 (VDE 0160-103), Teil 3: **EMV-Anforderungen** einschließlich spezieller Prüfverfahren
- DIN EN 61800-4 (VDE 0160-104), Teil 4: **Allgemeine Anforderungen** – Festlegungen für die Bemessung von Wechselstrom-Antriebssystemen über 1000 VAC und höchstens 35 kV
- **DIN EN 61800-5-1 (VDE 0160-105-1), Teil 5-1: Anforderungen an die Sicherheit – Elektrische, thermische und energetische Anforderungen**
 - Gilt für elektrische Antriebssysteme mit einstellbarer Drehzahl, die die Energiewandlung, Antriebssteuerung und den Motor oder die Motoren einschließen.
 - Ausgeschlossen sind Bahnantriebe und elektrische Fahrzeugantriebe.

1. Isolationskoordination - Begriffe

Aufgabe	Art der Isolierung	Beschreibung
Funktion des Geräts	Funktionsisolierung / Betriebsisolierung	Isolierung zwischen leitfähigen Teilen innerhalb eines Stromkreises , die für die einwandfreie Funktion des Stromkreises (d.h. des Betriebsmittels) erforderlich ist, die aber keinen Schutz gegen elektrischen Schlag darstellt
Schutz gegen elektrischen Schlag (Personensicherheit, Berührungsschutz)	Basisisolierung	Isolierung, die als grundlegender Basisschutz gegen elektrischen Schlag auf aktive Teile aufgebracht ist
	Zusätzliche Isolierung	unabhängige Isolierung, die zusätzlich zur Basisisolierung angewendet wird, um einen Schutz gegen elektrischen Schlag im Fall eines Ausfalls der Basisisolierung zu bewirken ANMERKUNG: Basisisolierung und zusätzliche Isolierung liegen getrennt voneinander vor, jede ist für den Basisschutz gegen elektrischen Schlag bemessen .
	Doppelte Isolierung	Isolierung, die aus der Basisisolierung und der zusätzlichen Isolierung besteht ANMERKUNG: Basisisolierung und zusätzliche Isolierung liegen getrennt voneinander vor, jede ist für den Basisschutz gegen elektrischen Schlag bemessen .
	Verstärkte Isolierung	Einzelnes Isolationssystem, das bei aktiven Teilen angewendet wird und einen Schutzgrad gegen elektrischen Schlag liefert, der der doppelten Isolierung unter den Bedingungen gleichwertig ist , die in der entsprechenden IEC-Norm festgelegt sind.
	Sichere Trennung	Trennung zwischen Stromkreisen mittels Basis- und Zusatzschutz (Basisisolierung plus zusätzliche Isolierung oder Schutzschirmung) oder durch eine gleichwertige Schutzeinrichtung (z. B. verstärkte Isolierung)

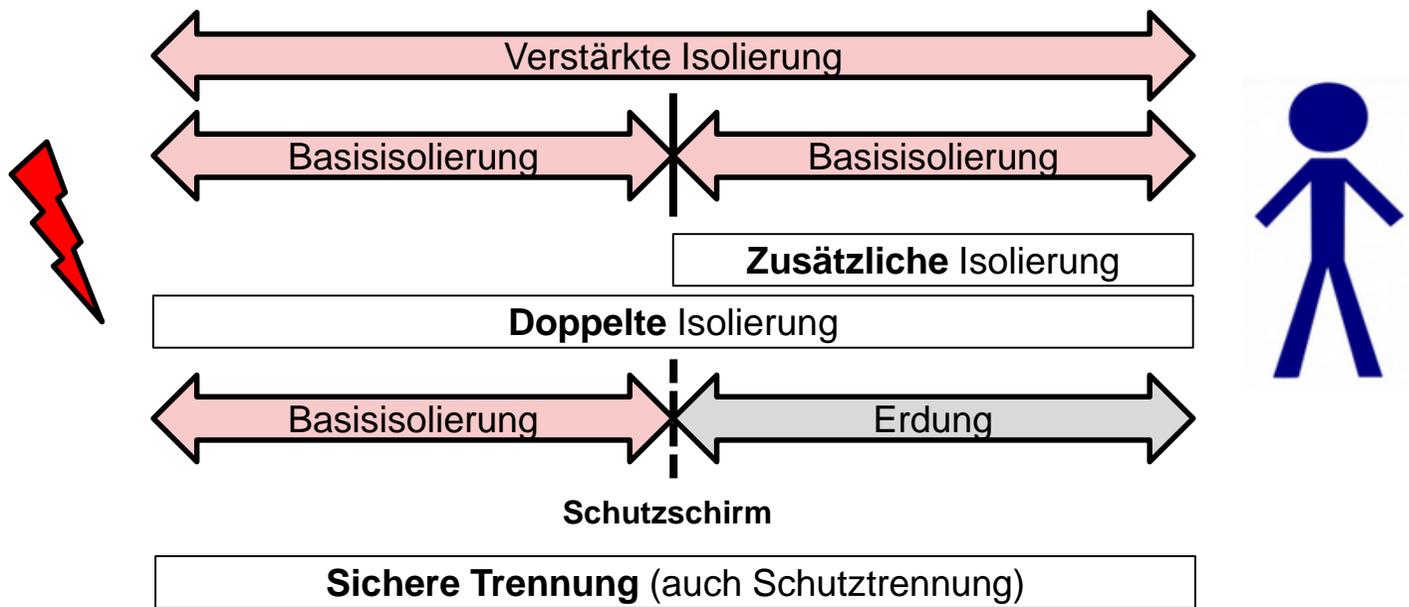
1. Isolationskoordination - Begriffe

**Funktionsisolierung
/ Betriebsisolierung**



**Schutz gegen
elektrischen
Schlag**

Doppelte Sicherheit



1. Isolationskoordination - Begriffe

Tabelle 3 – Zusammenfassung der Grenzwerte der *maßgeblichen Spannungsklassen*

DVC	Grenzwert der <i>Arbeitsspannung</i> V			Abschnitt
	Wechselspannung (Effektivwert) U_{ACL}	Wechselspannung (Scheitelwert) U_{ACPL}	Gleichspannung (Mittelwert) U_{DCL}	
A ^a	25	35,4	60	4.3.4.2, 4.3.4.4
ELV B	50	71	120	4.3.5.3.1 a), b)
LV C	1 000	4 500 ^b	1 500	
HV D	> 1 000	> 4 500 ^b	> 1 500	

^a Für Ausrüstungen mit nur einem Stromkreis mit *DVC* A betragen die Grenzwerte 30 V für den Effektivwert beziehungsweise 42,4 V für den Scheitelwert.

^b Der Wert 4 500 V ermöglicht es, dass [Tabelle 7](#) für sämtliche *Niederspannungs-PDS* gilt (mögliche Reflexionen bis $3 \times \sqrt{2} \times 1\,000\text{ V} = 4\,242\text{ V}$).

DVC
Arbeitsspannung

(engl.: decisive voltage class): maßgebliche Spannungsklasse
Spannung bei Bemessungs-Versorgungsbedingungen (ohne Grenzabweichungen) und ungünstigsten Betriebsbedingungen, die durch Auslegung in einem Stromkreis oder über der Isolierung auftritt

Tabelle 3 aus DIN EN 61800-5-1:2008-04

1. Isolationskoordination - Begriffe

Tabelle 4 – Schutzanforderungen für den betrachteten Stromkreis

	DVC des betrachteten Stromkreises	Schutz gegen direkte Berührung gefordert	Isolierung gegen geerdete Teile	Isolierung gegen ungeerdete leitfähige Teile	Isolierung gegen <i>angrenzende Stromkreise</i> der DVC:			
					A	B	C LV	D HV
	A	Nein	a*	a	f*	b	p‡	p
	B	Ja	b	p		b	p‡	p
LV	C	Ja	b	p			b	p
HV	D	Ja	b	p				b

^a Die Isolierung ist nicht aus Sicherheitsgründen erforderlich, sie kann aber aus Funktionsgründen erforderlich sein.

* Wenn der betrachtete Stromkreis als *SELV-Stromkreis* bezeichnet ist, ist gegen Erde und gegen *PELV-Stromkreise* *Basisisolierung* erforderlich.

f *Funktionsisolierung* für den Stromkreis mit der höheren Spannung.

b *Basisisolierung* für den Stromkreis mit der höheren Spannung.

p *Schutztrennung* für den Stromkreis mit der höheren Spannung.

‡ Es ist erlaubt, *Basisisolierung* für den Stromkreis mit der höheren Spannung zu verwenden, wenn Schutz gegen direktes Berühren des betrachteten Stromkreises sichergestellt ist durch Basis- oder zusätzliche Isolierung für den Stromkreis mit der höheren Spannung.

SELV
PELV

(engl.: safety extra low voltage) Sicherheitskleinspannungskreis, **nicht** geerdet
(engl.: protective extra low voltage) Schutzkleinspannungskreis, geerdet

Tabelle 3 aus DIN EN 61800-5-1:2008-04

1. Isolationskoordination - Begriffe

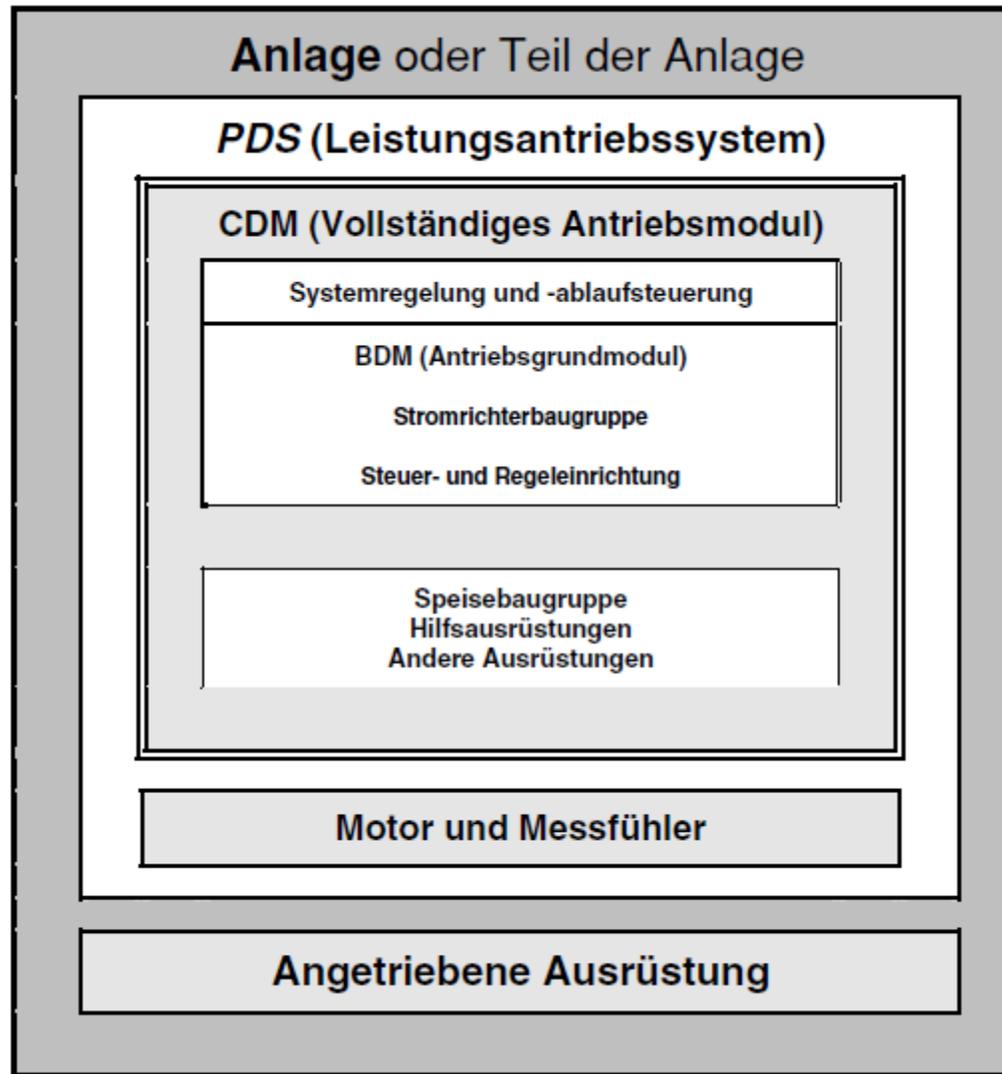


Bild 1 – Hardware-Konfiguration eines PDS in einer Anlage

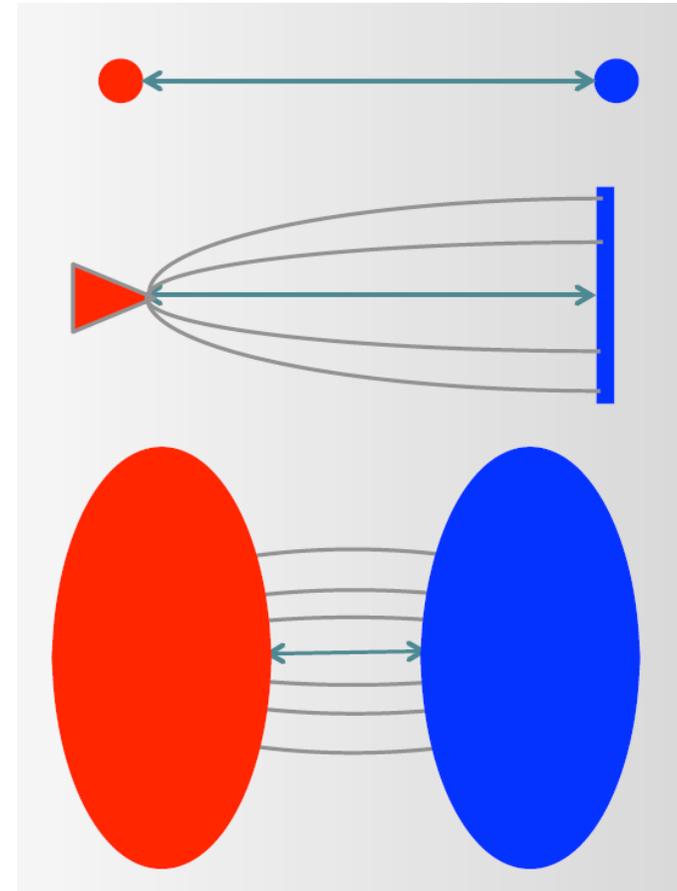
Bild 1 aus DIN EN 61800-5-1:2008-04

1. Isolationskoordination - Begriffe

Bemessung der **Luftstrecken** abhängig von

- Spannungshöhe
- Feldanordnung
- Relative Feuchte
- Höhe über NN (Luftdruck)

Höhe über NN in m	Multiplikationsfaktor für Luftstrecken nach DIN EN 60664-1:2008-01
2000	1,00
3000	1,14
4000	1,29
5000	1,48
...	...
10000	3,02
15000	6,67



1. Isolationskoordination - Begriffe

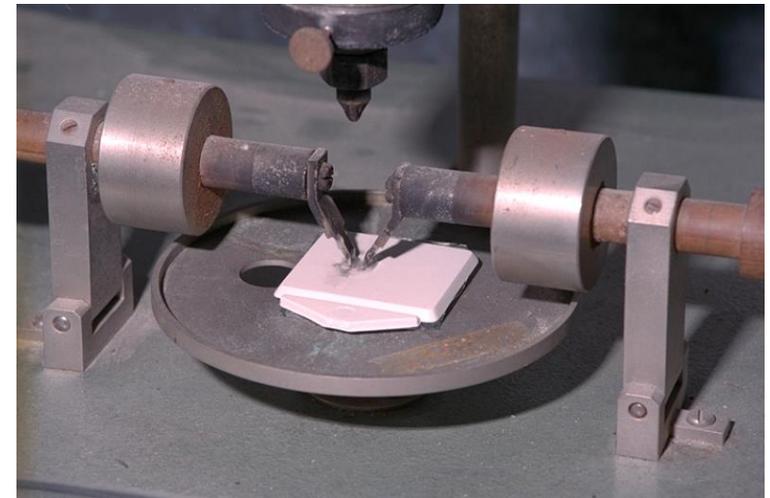
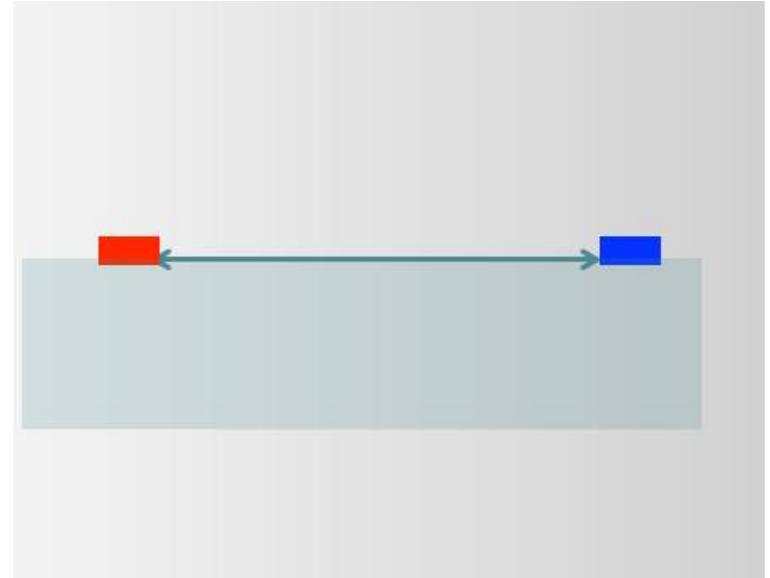
Bemessung der **Kriechstrecken** abhängig von

- **Kriechstromfestigkeit**, d.h. dem **CTI-Wert** (Comparative Tracking Index)

Isolierstoffklasse	CTI-Werte nach DIN EN 61800-5-1:2008-04
Isolierstoff der Gruppe I	CTI \geq 600
Isolierstoff der Gruppe II	600 > CTI \geq 400
Isolierstoff der Gruppe IIIa	400 > CTI \geq 175
Isolierstoff der Gruppe IIIb	175 > CTI \geq 100

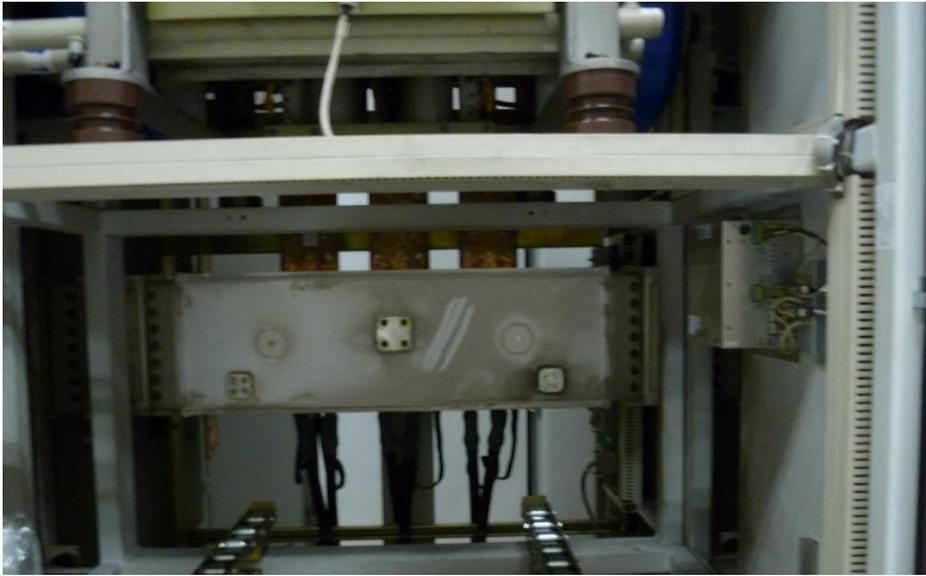
- **Verschmutzungsgrad**

V.-Grad	Beschreibung
1	Es tritt keine oder nur eine trockene, nicht leitfähige Verschmutzung auf. Die Verschmutzung hat keinen Einfluss.
2	Es tritt üblicherweise nur eine nicht leitfähige Verschmutzung auf. Gelegentlich muss jedoch eine kurzzeitige Leitfähigkeit durch Kondensation erwartet werden, wenn das PDS außer Betrieb ist.
3	Es tritt eine leitfähige oder trockene, nicht leitfähige Verschmutzung auf, die durch zu erwartende Kondensation leitfähig wird.
4	Die Verschmutzung erzeugt ständige elektrische Leitfähigkeit, die z.B. durch leitfähigen Staub, Regen oder Schnee verursacht wird.



Bestimmung der Kriechstromfestigkeit in der IEC 60112 geregelt.
Quelle: wikipedia.de

1. Isolationskoordination - Begriffe



Quelle: Siemens

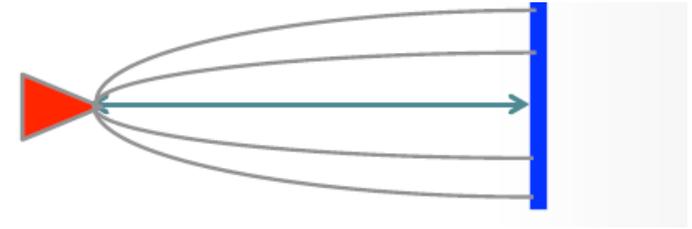
1. Isolationskoordination - Begriffe

Luftstrecke:

Schnelles Ansprechen von Sprühentladungen (EMV) und/oder Überschlag

Auslegungswert:

Transient auftretende Spitzenbelastung, d.h. **Scheitelwert** von transienten und dauerhaften Stoß-/Überspannungen



Kriechstrecke:

Langsames Ansprechen aufgrund von Ionenleitung in Feuchtigkeit und Schmutz (z.B. Schmutzansammlung über Monate und Jahre)

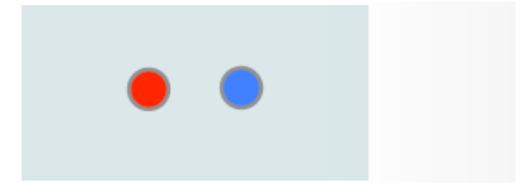
Auslegungswert:

Dauerhafter Effektivwert der Spannungsbelastung



Feste Isolation:

Bestimmend ist die Spannungsfestigkeit des Isolierstoffs. Nachweis durch Prüfung.



1. Isolationskoordination - Begriffe

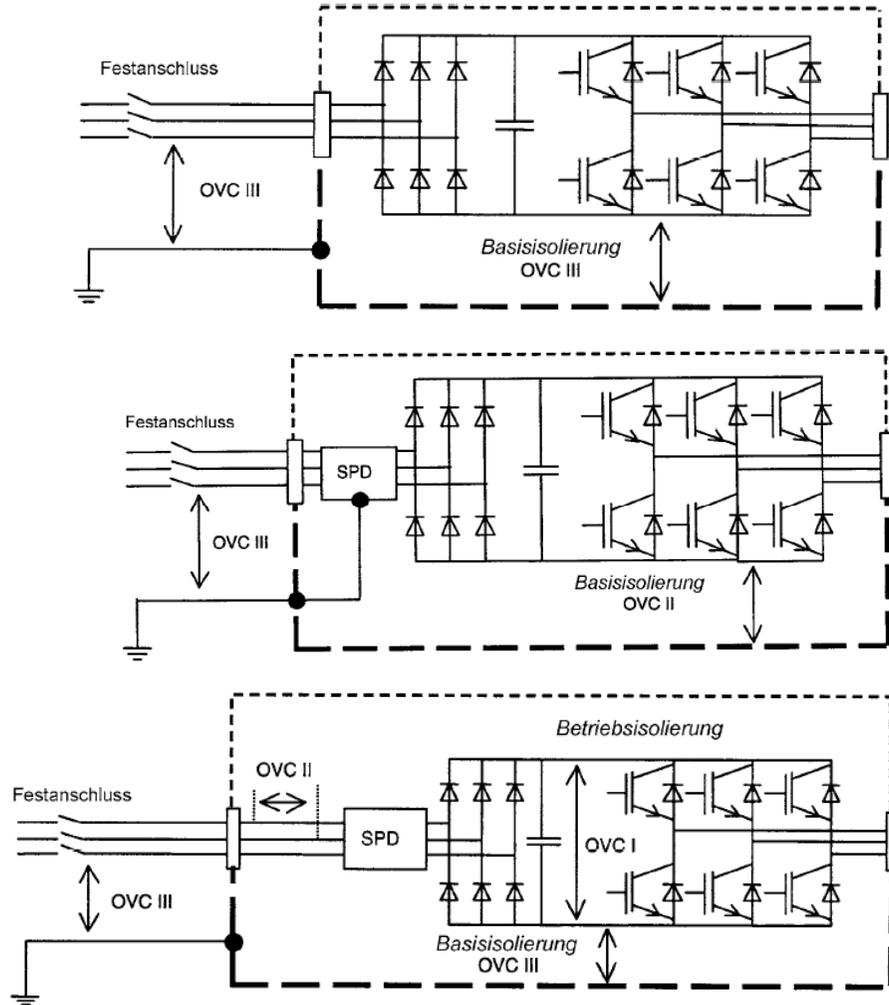
Überspannungskategorie	Beschreibung
IV	gilt für Ausrüstungen, die dauerhaft am Einspeisungspunkt einer Anlage angeschlossen sind (dem Hauptverteiler vorgeschaltet). Beispiele sind Elektrizitätszähler, primärseitige Überstromschutzanlagen und andere Ausrüstungen, die direkt an Freileitungen angeschlossen sind.
III	gilt für Ausrüstungen, die dauerhaft in ortsfesten Anlagen angeschlossen sind (einschließlich und nachgeschaltet dem Hauptverteiler). Beispiele sind Schaltanlagen und Ausrüstungen in einer Industrieanlage.
II	Kategorie II gilt für Ausrüstungen, die nicht dauernd an eine ortsfeste Anlage angeschlossen sind. Beispiele sind Betriebsmittel , ortsveränderliche Werkzeuge und andere Ausrüstungen mit Steckanschluss.
I	gilt für Ausrüstungen, die an einem Stromkreis angeschlossen sind, in dem Maßnahmen zur Verringerung von transienten Überspannungen auf einen niedrigen Pegel ergriffen wurden.

Festlegung der Überspannungskategorie (OVC, over voltage category) ist oft **interpretationsbedürftig.**

aus DIN EN 61800-5-1:2008-04

1. Isolationskoordination - Begriffe

Reduzierung der Überspannungskategorie

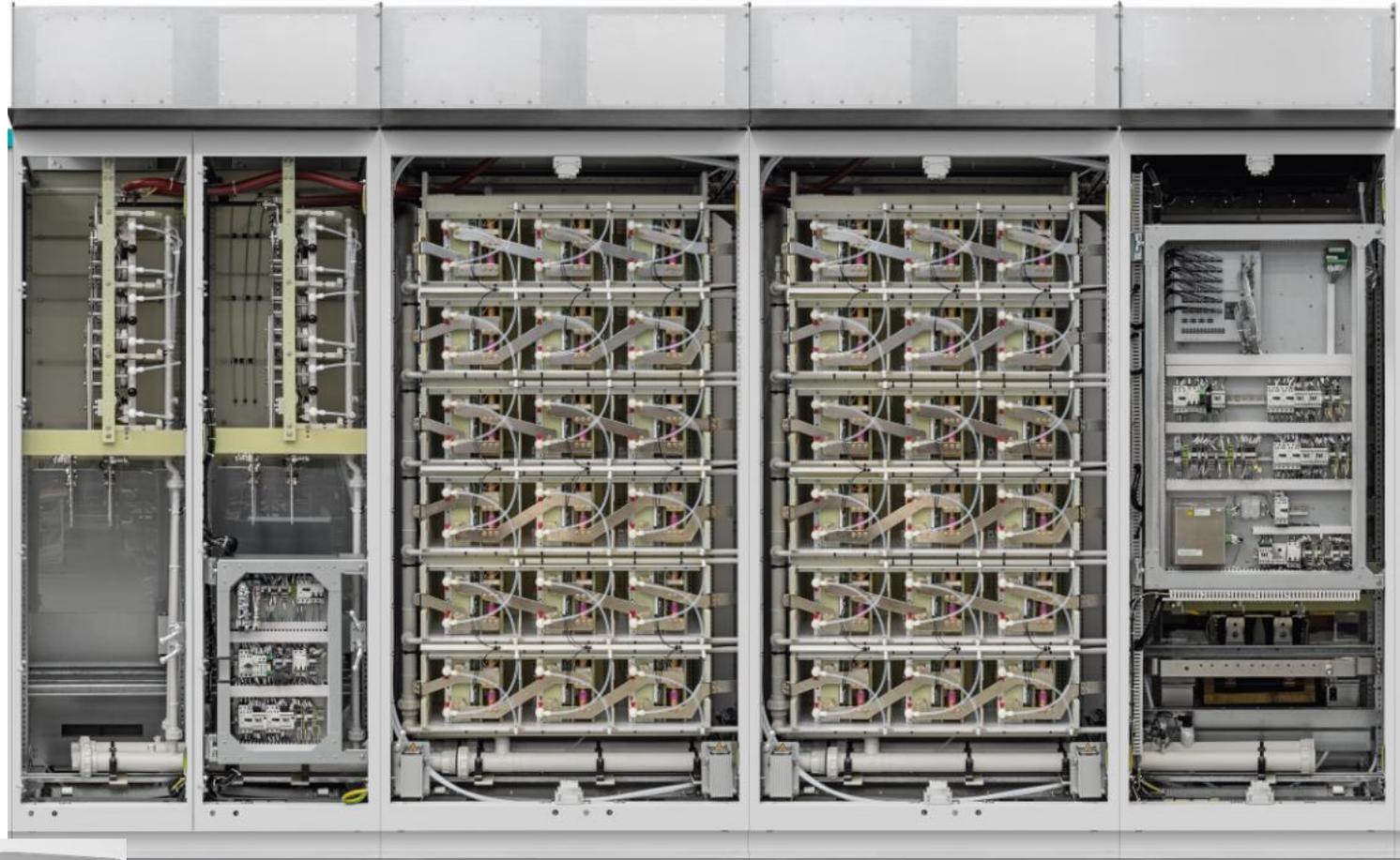


SPD: Überspannungsschutzeinrichtung (en: surge protection device), Maßnahme zur Verringerung transienter Überspannungen)

Anmerkung: Die SPD ist nicht mit Erdpotential verbunden und hat damit keine Auswirkung auf die Überspannungskategorie gegen das Erdpotential.

aus DIN EN 61800-5-1:2008-04

1. Isolationskoordination - Beispiel

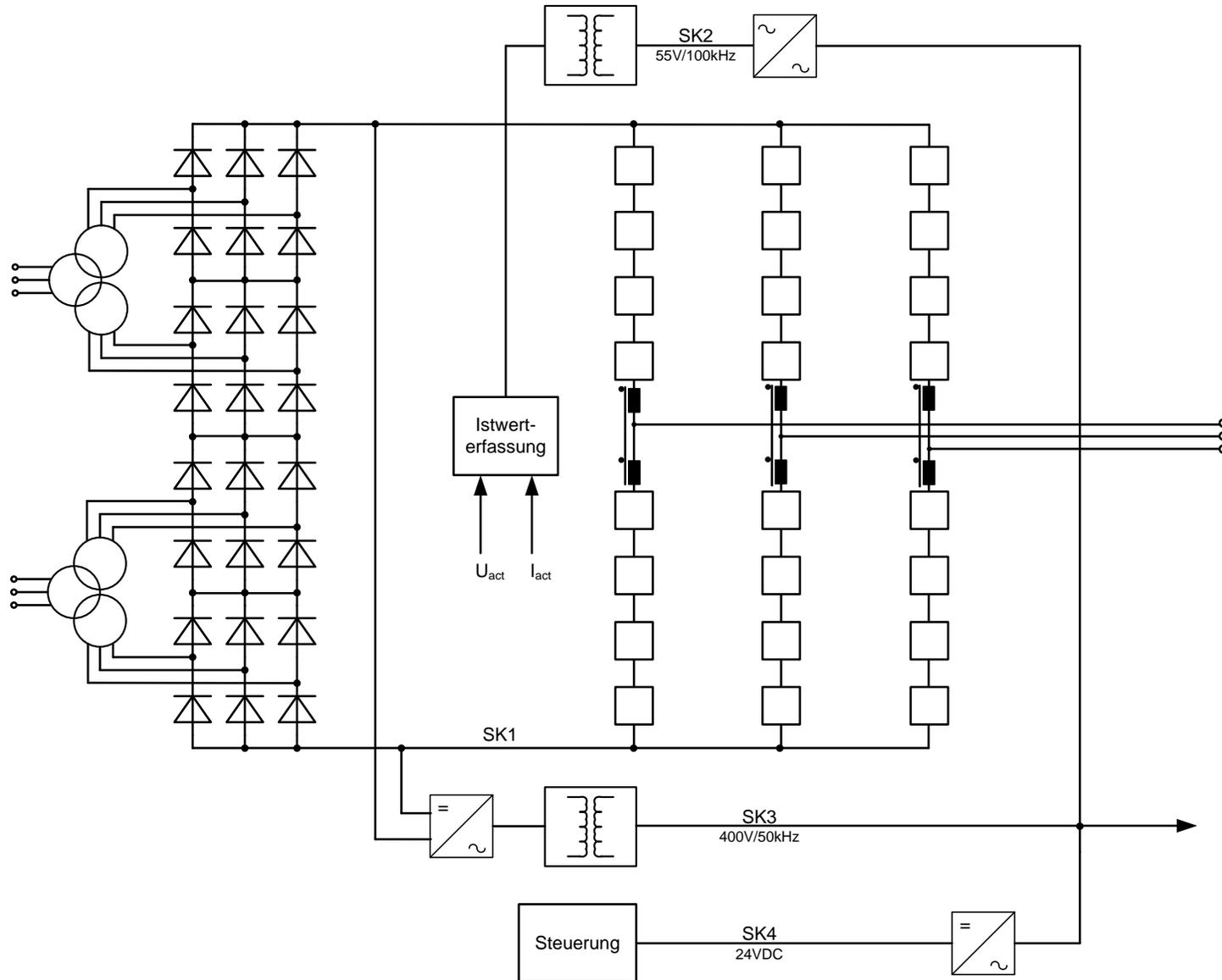


MMC Umrichter: 6,6kV, 1200A, 13,7MVA,
wassergekühlt (Siemens SINAMICS GH150)



Quelle: Siemens

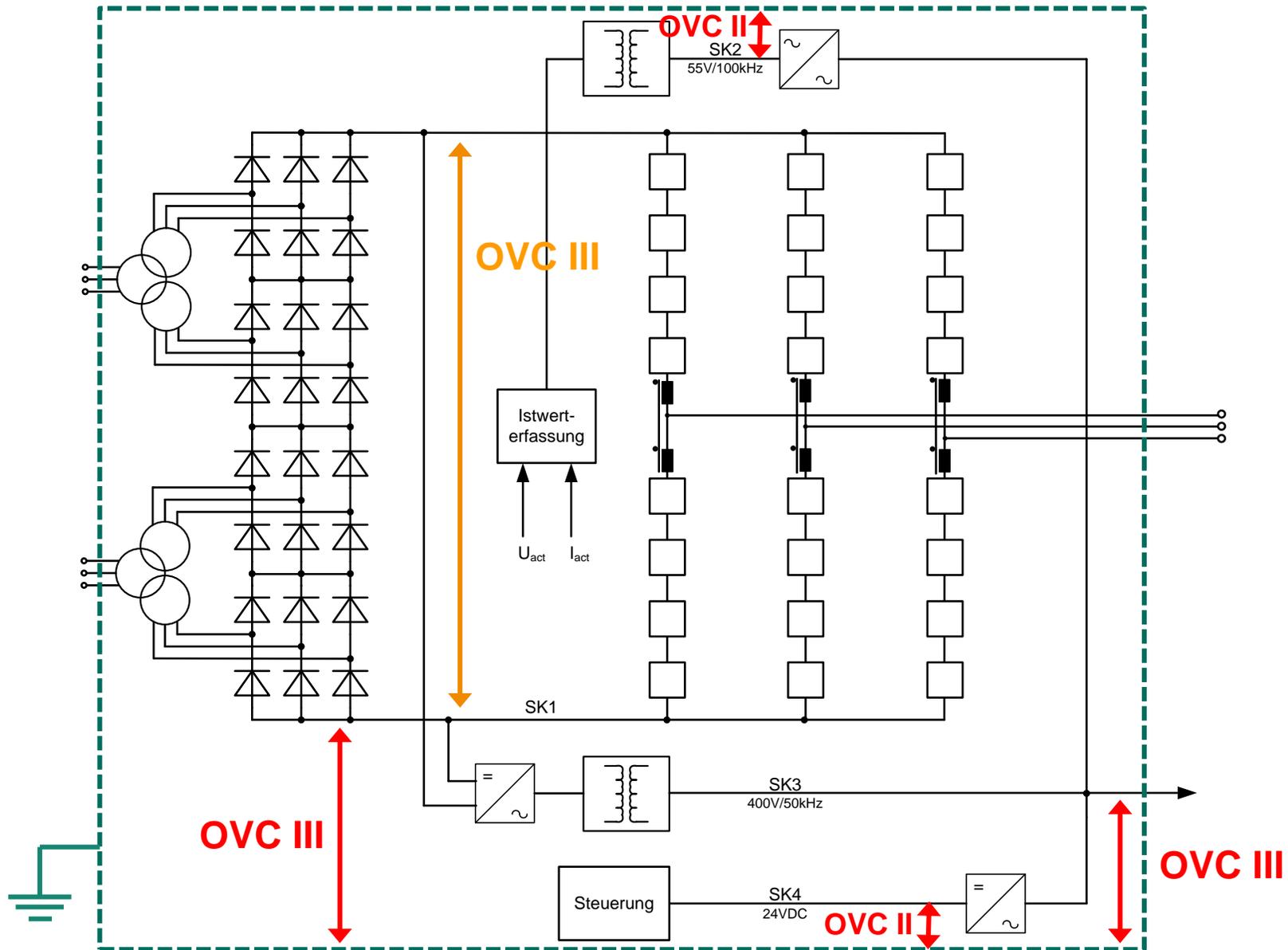
1. Isolationskoordination – Beispiel - Stromkreise



1. Isolationskoordination – Beispiel – Generelle Festlegungen

	Beschreibung
Relevante Produktnorm	DIN EN 61800-5-1: Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe
Überspannungskategorie	?
Verschmutzungsgrad	?
Isolierstoffgruppe	?
Max. Aufstellhöhe	?

1. Isolationskoordination – Beispiel – Generelle Festlegungen



1. Isolationskoordination – Beispiel – Generelle Festlegungen

	Beschreibung
Relevante Produktnorm	DIN EN 61800-5-1: Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe
Überspannungskategorie	III für Stromkreise SK1 (Leistungsteil), SK3 (400V) II für SK2 (55V/100kHz), SK4 (24VDC)
Verschmutzungsgrad	2 Es tritt üblicherweise nur eine nicht leitfähige Verschmutzung auf. Gelegentlich muss jedoch eine kurzzeitige Leitfähigkeit durch Kondensation erwartet werden, wenn das PDS außer Betrieb ist.
Isolierstoffgruppe	IIIa/b IIIa oder IIIb ergibt bei der Dimensionierung der Kriechstrecken bei Verschmutzungsgrad keinen Unterschied.
Max. Aufstellhöhe	3000m, d.h. mit Höhenkorrekturfaktor 1,14 für die Dimensionierung der Luftstrecken

1. Isolationskoordination – Begriffe – Spannungsklasse der Stromkreise

Tabelle 3 – Zusammenfassung der Grenzwerte der *maßgeblichen Spannungsklassen*

DVC	Grenzwert der <i>Arbeitsspannung</i> V			Abschnitt
	Wechselspannung (Effektivwert) U_{ACL}	Wechselspannung (Scheitelwert) U_{ACPL}	Gleichspannung (Mittelwert) U_{DCL}	
SK4 A^a	25	35,4	60	4.3.4.2, 4.3.4.4
B	50	71	120	4.3.5.3.1 a), b)
SK2,3 C	1 000	4 500 ^b	1 500	
SK1 D	> 1 000	> 4 500 ^b	> 1 500	

^a Für Ausrüstungen mit nur einem Stromkreis mit DVC A betragen die Grenzwerte 30 V für den Effektivwert beziehungsweise 42,4 V für den Scheitelwert.

^b Der Wert 4 500 V ermöglicht es, dass [Tabelle 7](#) für sämtliche *Niederspannungs-PDS* gilt (mögliche Reflexionen bis $3 \times \sqrt{2} \times 1\,000\text{ V} = 4\,242\text{ V}$).

DVC
Arbeitsspannung

(engl.: decisive voltage class): maßgebliche Spannungsklasse
Spannung bei Bemessungs-Versorgungsbedingungen (ohne Grenzabweichungen) und ungünstigsten Betriebsbedingungen, die durch Auslegung in einem Stromkreis oder über der Isolierung auftritt

Tabelle 3 aus DIN EN 61800-5-1:2008-04

1. Isolationskoordination – Begriffe – Isolation zwischen den Stromkreisen

Tabelle 4 – Schutzanforderungen für den betrachteten Stromkreis

DVC des betrachteten Stromkreises	Schutz gegen direkte Berührung gefordert	Isolierung gegen geerdete Teile	Isolierung gegen ungeerdete berührbare leitfähige Teile	Isolierung gegen <i>angrenzende Stromkreise</i> der DVC:			
				A	B	C	D
A	Nein	a ^a	a	f [*]	b	p‡	p
B	Ja	b	SK1 gegen Gehäuse: Basisisolation		b	p‡	p
C	Ja	b				b	p
D	Ja	b					b

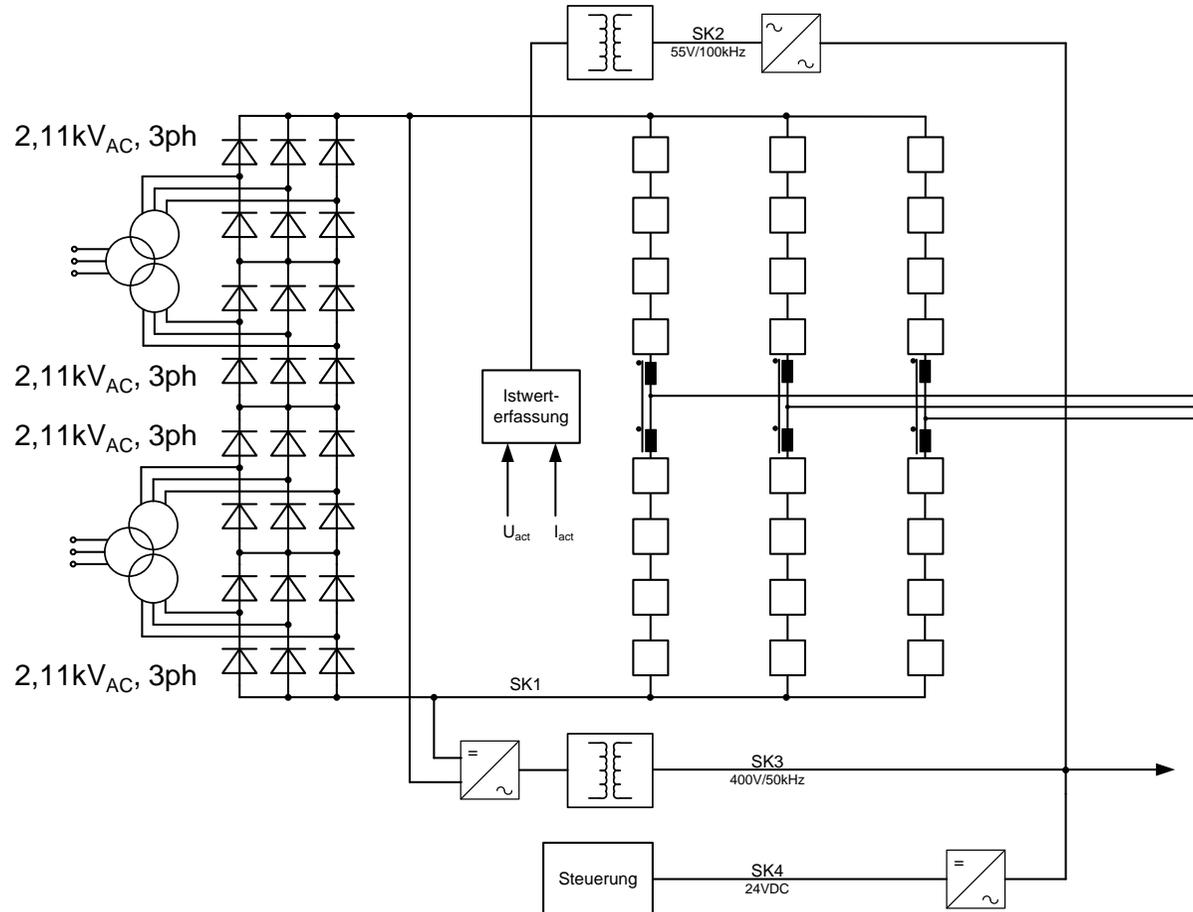
SK2,3,4
gegen
SK1:
Schutztrennung

- ^a Die Isolierung ist nicht aus Sicherheitsgründen erforderlich, sie kann aber aus Funktionsgründen erforderlich sein.
- ^{*} Wenn der betrachtete Stromkreis als *SELV-Stromkreis* bezeichnet ist, ist gegen Erde und gegen *PELV-Stromkreise* *Basisisolation* erforderlich.
- f* *Funktionsisolation* für den Stromkreis mit der höheren Spannung.
- b* *Basisisolation* für den Stromkreis mit der höheren Spannung.
- p* *Schutztrennung* für den Stromkreis mit der höheren Spannung.
- ‡ Es ist erlaubt, *Basisisolation* für den Stromkreis mit der höheren Spannung zu verwenden, wenn Schutz gegen direktes Berühren des betrachteten Stromkreises sichergestellt ist durch Basis- oder zusätzliche Isolierung für den Stromkreis mit der höheren Spannung.

Tabelle 3 aus DIN EN 61800-5-1:2008-04

1. Isolationskoordination – Beispiel - Systemspannung

SK1 (Leistungsteil)	
Systemspannung	$4 * 2,11\text{kV} * 1,1 = \mathbf{9,28\text{kV}}$ Maximale verkettete Außenleiterspannung inkl. 10% Netzspannungstoleranz



1. Isolationskoordination – Beispiel - Stoßspannung/Zeitweilige Überspg.

SK1 (Leistungsteil)	
Systemspannung	$4 * 2,11\text{kV} * 1,1 = \mathbf{9,28\text{kV}}$ Maximale verkettete Außenleiterspannung inkl. 10% Netzspannungstoleranz

Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise

Spalte 1	2	3	4	5	6
Systemspannung (4.3.6.2.1) V	Stoßspannung V				Zeitweilige Überspannung (Scheitelwert/Effektivwert) V
	Überspannungskategorie				
	I	II	III	IV	
> 1 000	4 000	6 000	8 000	12 000	4 250 / 3 000
3 600	9 000 ^a	16 000 ^a	20 000 ^b	40 000 ^b	14 150 / 10 000 ^b
7 200	17 500 ^a	29 000 ^a	40 000 ^b	60 000 ^b	28 300 / 20 000 ^b
12 000	29 000 ^a	42 500 ^a	60 000 ^b	75 000 ^b	39 600 / 28 000 ^b
17 500	40 000 ^a	55 000 ^a	75 000 ^b	95 000 ^b	53 750 / 38 000 ^b
24 000	52 000 ^a	75 000 ^a	95 000 ^b	125 000 ^b	70 700 / 50 000 ^b
36 000	75 000 ^a	95 000 ^a	125 000 ^b	145 000 ^b	99 000 / 70 000 ^b

9,28 kV
 48,8 kV
 33,2 kV / 23,5 kV

ANMERKUNG Interpolation ist zulässig.

^a Diese Werte wurden aus den Tabellen 4 und 5 von IEC 62103:2003 abgeleitet oder extrapoliert.

^b Diese Werte wurden aus Tabelle 2 von IEC 60071-1:2006 abgeleitet oder extrapoliert.

^c Dieser Wert wurde IEC 60146-1-1, 4. Ausgabe (in Vorbereitung), entnommen.

1. Isolationskoordination – Beispiel - Stoßspannung/Zeitweilige Überspg.

	SK1 (Leistungsteil)
Systemspannung	$4 * 2,11\text{kV} * 1,1 = \mathbf{9,28\text{kV}}$ inkl. 10% Netzspannungstoleranz
Stoßspannung	48,8kV Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise DIN EN 61800-5-1:2008-04
Zeitweilige Überspannung (Scheitelwert/Effektivwert)	33,2kV/23,5kV Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise DIN EN 61800-5-1:2008-04

4.3.6.2.2 Direkt am Versorgungsnetz angeschlossene Stromkreise

Die Isolierung zwischen Umgebungen und Stromkreisen, die direkt am Versorgungsnetz angeschlossen sind, muss nach der Stoßspannung, der *zeitweiligen Überspannung* oder der *Arbeitsspannung* bemessen werden, je nachdem, welcher Wert die schärfste Anforderung ergibt.

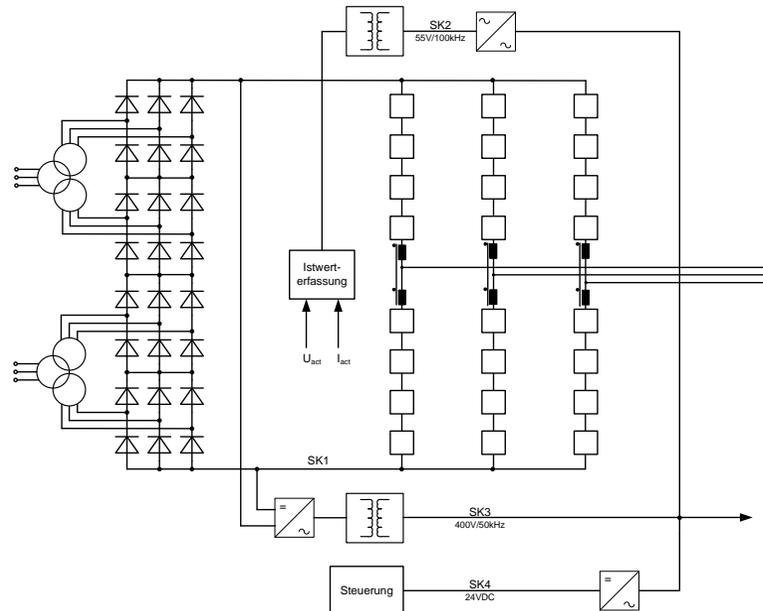
4.3.6.2.3 Stromkreise, die nicht direkt an das Versorgungsnetz angeschlossen sind

Die Isolierung zwischen Umgebungen und Stromkreisen, die von einem Transformator gespeist werden und dadurch vom Versorgungsnetz galvanisch getrennt sind, muss bemessen werden nach a) der Stoßspannung, die nach der Sekundärspannung des Transformators als die *Systemspannung* bestimmt wird, oder b) der *Arbeitsspannung*, je nachdem, welcher Wert die schärfere Anforderung ergibt.

aus DIN EN 61800-5-1:2008-04

1. Isolationskoordination – Beispiel - Arbeitsspannung

SK1 (Leistungsteil)	
Systemspannung	$4 * 2,11\text{kV} * 1,1 = \mathbf{9,28\text{kV}}$ inkl. 10% Netzspannungstoleranz
Stoßspannung	48,8kV Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise DIN EN 61800-5-1:2008-04
Zeitweilige Überspannung (Scheitelwert/Effektivwert)	33,2kV/23,5kV Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise DIN EN 61800-5-1:2008-04
Arbeitsspannung (periodischer Scheitelwert)	$9,28\text{kV} * \sqrt{2} + 1\text{kV} = \mathbf{14,13\text{kV}}$ Maximale DC-Spannung im DC-Zwischenkreis im Leerlauf inkl. Schaltüberspannung



1. Isolationskoordination – Beispiel - Luftstrecke Basis

Tabelle 9 – Luftstrecken

Spalte 1	2	3	4 5 6		
			Mindestluftstrecke mm		
			Verschmutzungsgrad		
V	V	V	1	2	3
N/A	≤ 110	≤ 71	0,01	0,20 ^a	0,80
N/A	225	141	0,01	0,20	0,80
330	340	212	0,01	0,20	0,80
500	530	330	0,04	0,20	0,80
800	700	440	0,10	0,20	0,80
1 500	960	600	0,50	0,50	0,80
2 500	1 600	1 000	1,5		
4 000	2 600	1 600	3,0		
6 000	3 700	2 300	5,5]		
8 000	4 800	3 000	8,0		
12 000	7 400	4 600	14		
20 000	12 000	7 600	14,13 kV		
40 000	26 000	16 000	25		
60 000	37 000	23 000	60		
75 000	48 000	30 000	90		
95 000	61 000	38 000	120		
125 000	80 000	50 000	160		
145 000	99 000	60 000	220		
			270		

ANMERKUNG 1 Interpolation ist zulässig.

aus DIN EN 61800-5-1:2008-04

1. Isolationskoordination – Beispiel - Luftstrecke Basis

	SK1 (Leistungsteil)
Systemspannung	$4 * 2,11\text{kV} * 1,1 = \mathbf{9,28\text{kV}}$ inkl. 10% Netzspannungstoleranz
Stoßspannung	48,8kV Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise DIN EN 61800-5-1:2008-04
Zeitweilige Überspannung (Scheitelwert/Effektivwert)	33,2kV/23,5kV Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise DIN EN 61800-5-1:2008-04
Arbeitsspannung (periodischer Scheitelwert)	$9,28\text{kV} * \sqrt{2} + 1\text{kV} = \mathbf{14,13\text{kV}}$ Maximale DC-Spannung im DC-Zwischenkreis im Leerlauf inkl. transienter Schaltüberspannung
Luftstrecke Basisisolierung	72,4mm

1. Isolationskoordination – Beispiel - Luftstrecke verstärkte Isolierung

	SK1 (Leistungsteil)
Systemspannung	$4 * 2,11\text{kV} * 1,1 = \mathbf{9,28\text{kV}}$ inkl. 10% Netzspannungstoleranz
Stoßspannung	48,8kV Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise DIN EN 61800-5-1:2008-04
Zeitweilige Überspannung (Scheitelwert/Effektivwert)	33,2kV/23,5kV Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise DIN EN 61800-5-1:2008-04
Arbeitsspannung (periodischer Scheitelwert)	$9,28\text{kV} * \sqrt{2} + 1\text{kV} = \mathbf{14,13\text{kV}}$ Maximale DC-Spannung im DC-Zwischenkreis im Leerlauf inkl. transienter Schaltüberspannung
Luftstrecke Basisisolierung	72,4mm
Stoßspannung für verstärkte Isolierung	$1,6 * 48,8\text{kV} = \mathbf{78,1\text{kV}}$

Zur Bestimmung der Luftstrecken für *verstärkte Isolierung* aus [Tabelle 9](#) muss:

- für *Hochspannungs-PDS* der Wert verwendet werden, der der 1,6fachen Stoßspannung, *zeitweiligen Überspannung* oder *Arbeitsspannung* entspricht.

Für die Auslegung der Luftstrecke für verstärkte Isolierung wird hier nur noch die Auslegung aufgrund der Stoßspannung betrachtet, da dies bereits bei der Auslegung der Basisisolierung den größten Wert ergeben hat.

aus DIN EN 61800-5-1:2008-04

1. Isolationskoordination – Beispiel - Luftstrecke verstärkte Isolierung

Tabelle 9 – Luftstrecken

Spalte 1	2	3	4 5 6		
			Mindestluftstrecke mm		
Stoßspannung (Tabellen 7, 8, 4.3.6.3)	Zeitweilige Überspannung (Spitzenwert) zur Bestimmung der Isolierung zwischen Umgebungen und Stromkreisen oder Arbeitsspannung (periodischer Scheitelwert) zur Bestimmung der Betriebsisolierung	Arbeitspannung (periodischer Scheitelwert) zur Bestimmung der Isolierung zwischen Umgebungen und Stromkreisen	Verschmutzungsgrad		
			1	2	3
V	V	V	1	2	3
N/A	≤ 110	≤ 71	0,01	0,20 ^a	0,80
N/A	225	141	0,01	0,20	0,80
330	340	212	0,01	0,20	0,80
500	530	330	0,04	0,20	0,80
800	700	440	0,10	0,20	0,80
1 500	960	600	0,50	0,50	0,80
2 500	1 600	1 000	1,5		
4 000	2 600	1 600	3,0		
6 000	3 700	2 300	5,5]		
8 000	4 800	3 000	8,0		
12 000	7 400	4 600	14		
20 000	12 000	7 600	25		
40 000	26 000	16 000	60		
60 000	37 000	23 000	90		
75 000	48 000	30 000	120		
95 000	61 000	38 000	160		
125 000	80 000	50 000	220		
145 000	99 000	60 000	270		

ANMERKUNG 1 Interpolation ist zulässig.

78,1 kV

125,8 mm

aus DIN EN 61800-5-1:2008-04

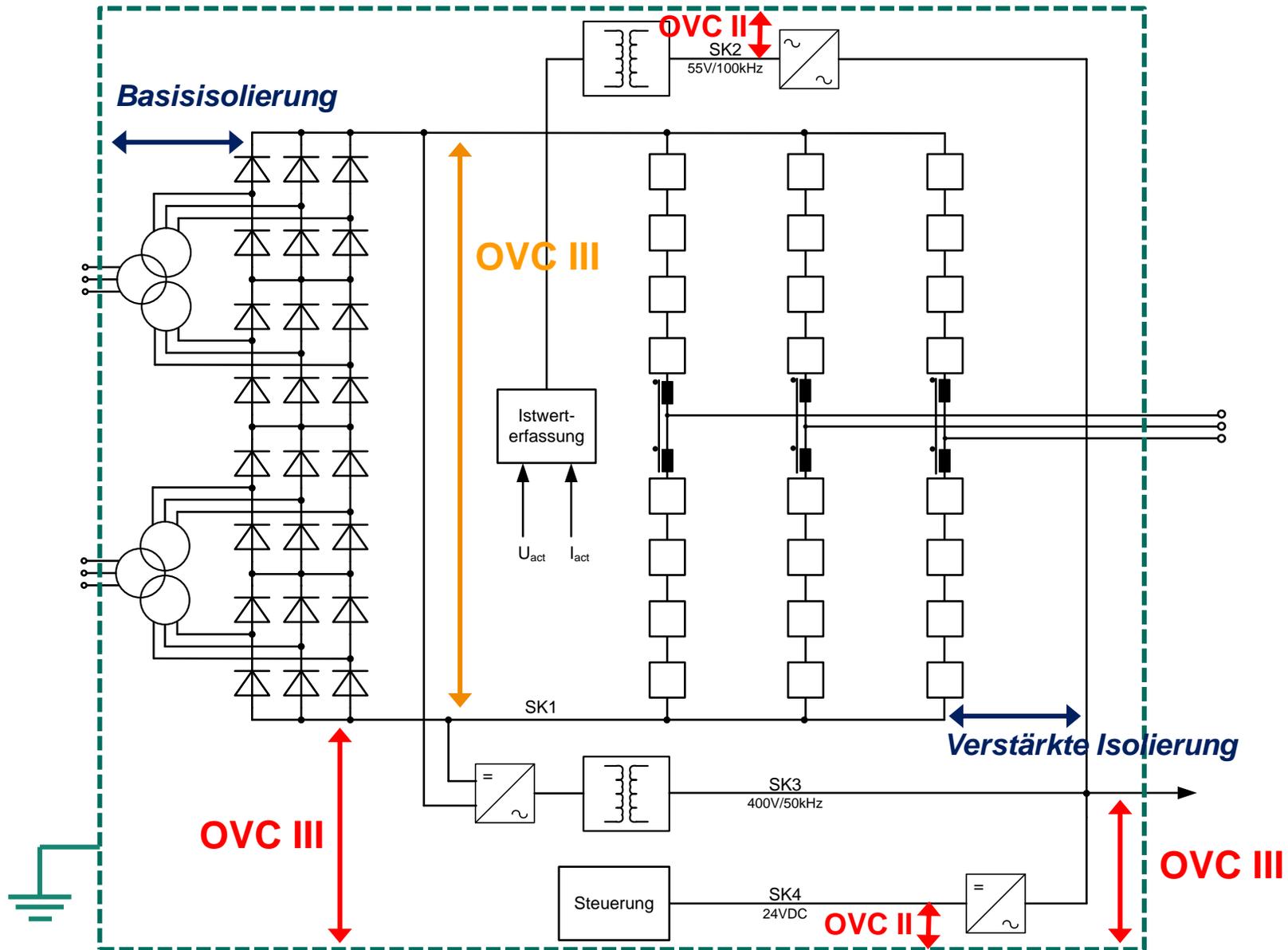
1. Isolationskoordination – Beispiel - Luftstrecke verstärkte Isolierung

	SK1 (Leistungsteil)
Systemspannung	$4 * 2,11\text{kV} * 1,1 = \mathbf{9,28\text{kV}}$ inkl. 10% Netzspannungstoleranz
Stoßspannung	48,8kV Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise DIN EN 61800-5-1:2008-04
Zeitweilige Überspannung (Scheitelwert/Effektivwert)	33,2kV/23,5kV Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise DIN EN 61800-5-1:2008-04
Arbeitsspannung (periodischer Scheitelwert)	$9,28\text{kV} * \sqrt{2} + 1\text{kV} = \mathbf{14,13\text{kV}}$ Maximale DC-Spannung im DC-Zwischenkreis im Leerlauf inkl. transienter Schaltüberspannung
Luftstrecke Basisisolierung	72,4mm
Stoßspannung für verstärkte Isolierung	$1,6 * 48,8\text{kV} = \mathbf{78,1\text{kV}}$
Luftstrecke verstärkte Isolierung	125,8mm

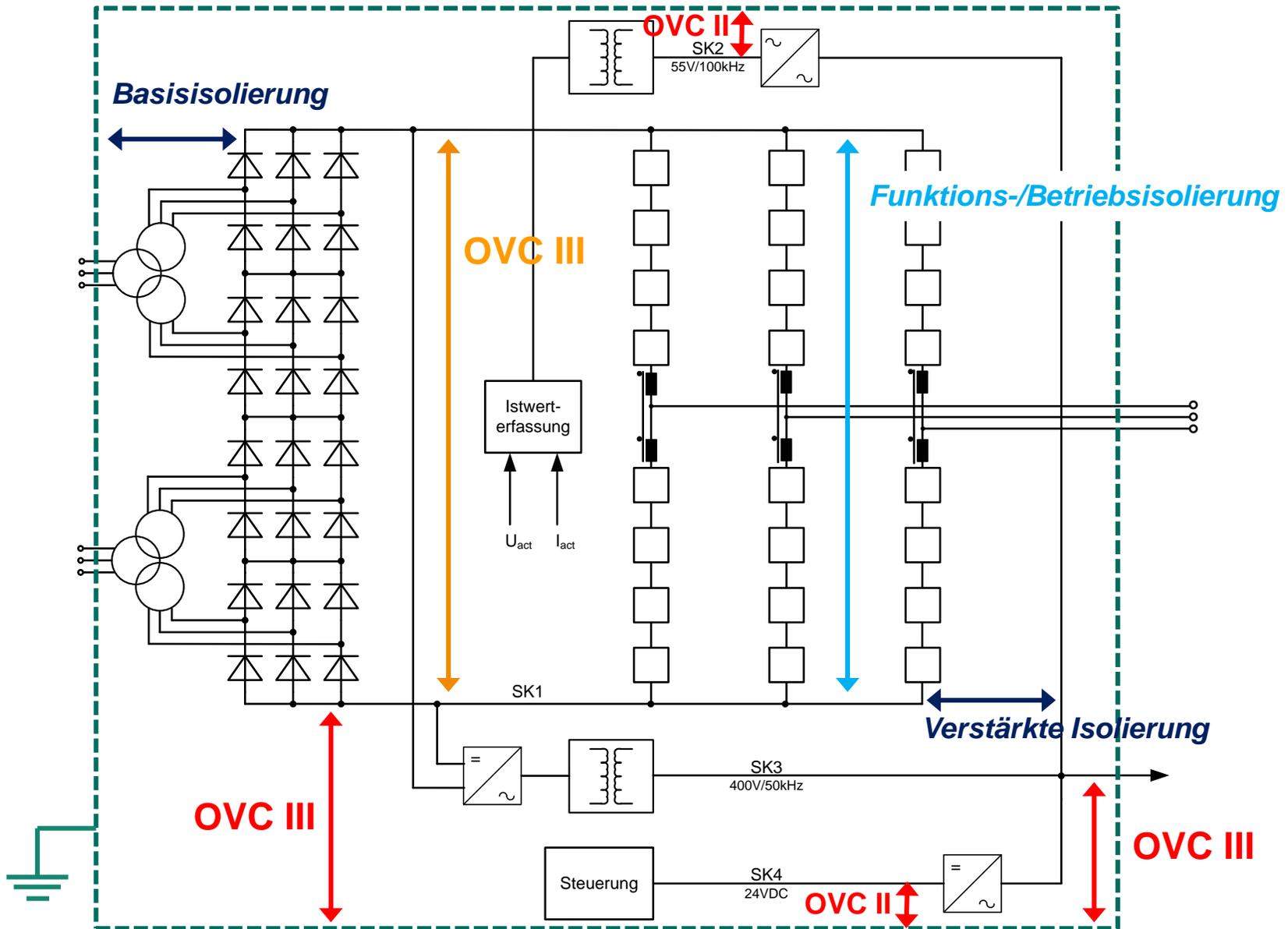
1. Isolationskoordination – Beispiel - Anpassung Aufstellhöhe

	SK1 (Leistungsteil)
Systemspannung	$4 * 2,11\text{kV} * 1,1 = \mathbf{9,28\text{kV}}$ inkl. 10% Netzspannungstoleranz
Stoßspannung	48,8kV Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise DIN EN 61800-5-1:2008-04
Zeitweilige Überspannung (Scheitelwert/Effektivwert)	33,2kV/23,5kV Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise DIN EN 61800-5-1:2008-04
Arbeitsspannung (periodischer Scheitelwert)	$9,28\text{kV} * \sqrt{2} + 1\text{kV} = \mathbf{14,13\text{kV}}$ Maximale DC-Spannung im DC-Zwischenkreis im Leerlauf inkl. transienter Schaltüberspannung
Luftstrecke Basisisolierung	72,4mm (2000m), 82,5mm (3000m)
Stoßspannung für verstärkte Isolierung	$1,6 * 48,8\text{kV} = \mathbf{78,1\text{kV}}$
Luftstrecke verstärkte Isolierung	125,8mm (2000m), 143,4mm (3000m)

1. Isolationskoordination – Beispiel



1. Isolationskoordination – Beispiel - Funktions-/Betriebsisolierung



1. Isolationskoordination – Beispiel - Funktions-/Betriebsisolierung

	SK1 (Leistungsteil)
Systemspannung	$4 * 2,11\text{kV} * 1,1 = \mathbf{9,28\text{kV}}$ inkl. 10% Netzspannungstoleranz
Stoßspannung	48,8kV Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise DIN EN 61800-5-1:2008-04
Zeitweilige Überspannung (Scheitelwert/Effektivwert)	33,2kV/23,5kV Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise DIN EN 61800-5-1:2008-04
Arbeitsspannung (periodischer Scheitelwert)	$9,28\text{kV} * \sqrt{2} + 1\text{kV} = \mathbf{14,13\text{kV}}$ Maximale DC-Spannung im DC-Zwischenkreis im Leerlauf inkl. transienter Schaltüberspannung
Luftstrecke Basisisolierung	72,4mm (2000m), 82,5mm (3000m)
Stoßspannung für verstärkte Isolierung	$1,6 * 48,8\text{kV} = \mathbf{78,1\text{kV}}$
Luftstrecke verstärkte Isolierung	125,8mm (2000m), 143,4mm (3000m)

4.3.6.3 Betriebsisolierung

Bei Teilen oder Stromkreisen, die nicht besonders stark durch äußere Transienten beeinflusst werden, muss die *Betriebsisolierung* nach der *Arbeitsspannung* über der Isolierung bemessen werden.

aus DIN EN 61800-5-1:2008-04

1. Isolationskoordination – Beispiel - Funktions-/Betriebsisolierung

Tabelle 9 – Luftstrecken

Spalte 1	2	3	4 5 6		
			Mindestluftstrecke mm		
			Verschmutzungsgrad		
V	V	V	1	2	3
N/A	≤ 110	≤ 71	0,01	0,20 ^a	0,80
N/A	225	141	0,01	0,20	0,80
330	340	212	0,01	0,20	0,80
500	530	330	0,04	0,20	0,80
800	700	440	0,10	0,20	0,80
1 500	960	600	0,50	0,50	0,80
2 500	1 600	1 000	1,5		
4 000	2 600	1 600	3,0		
6 000	3 700	2 300	5,5]		
8 000	4 800	3 000	8,0		
12 000	7 400	4 600	14		
20 000	12 000	7 600	25		
40 000	26 000	16 000	60		
60 000	37 000	23 000	90		
75 000	48 000	30 000	120		
95 000	61 000	38 000	160		
125 000	80 000	50 000	220		
145 000	99 000	60 000	270		

ANMERKUNG 1 Interpolation ist zulässig.

14,13 kV

30,3 mm

aus DIN EN 61800-5-1:2008-04

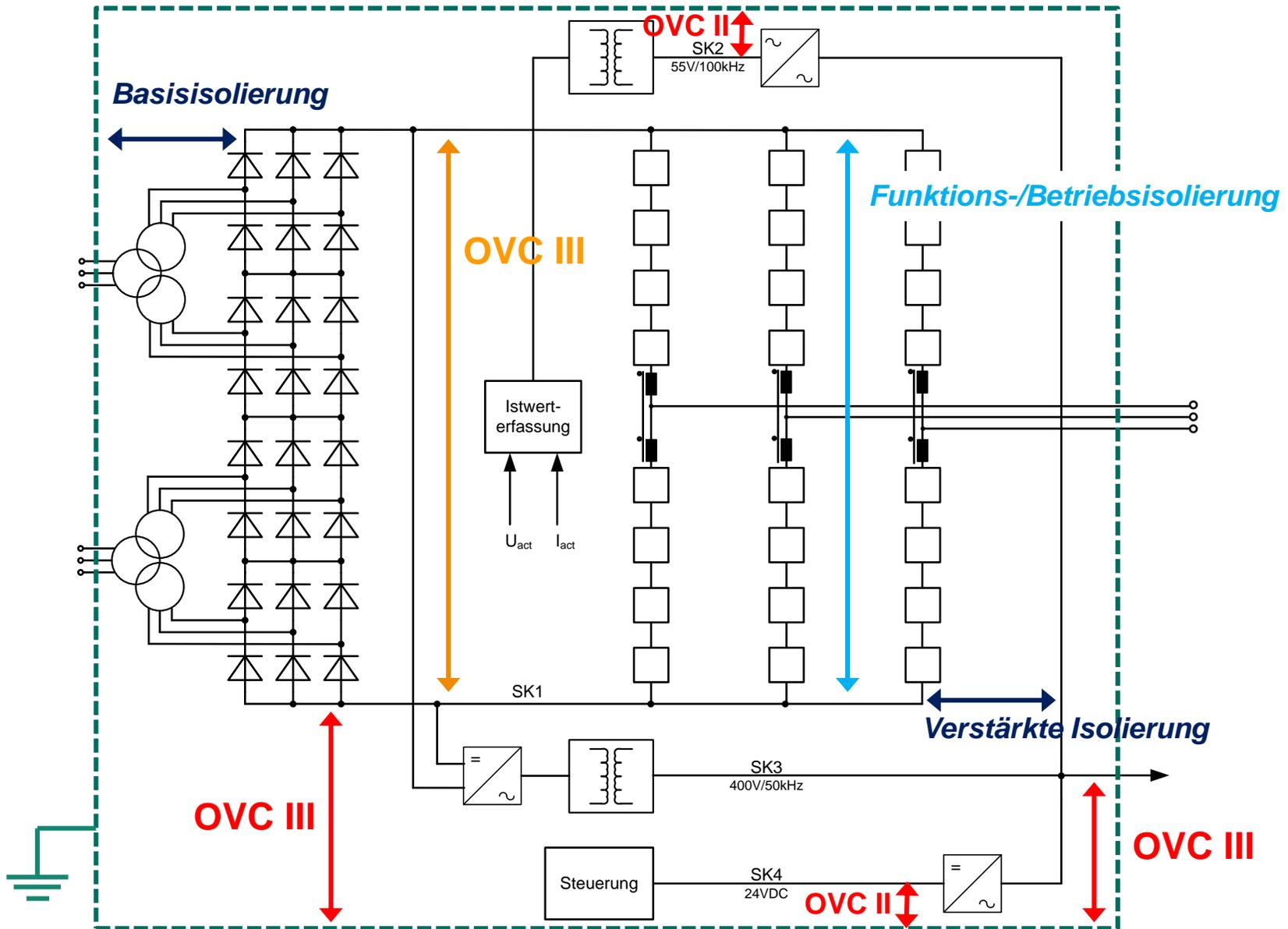
1. Isolationskoordination – Beispiel - Funktions-/Betriebsisolierung

	SK1 (Leistungsteil)
Systemspannung	$4 * 2,11\text{kV} * 1,1 = \mathbf{9,28\text{kV}}$ inkl. 10% Netzspannungstoleranz
Stoßspannung	48,8kV Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise DIN EN 61800-5-1:2008-04
Zeitweilige Überspannung (Scheitelwert/Effektivwert)	33,2kV/23,5kV Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise DIN EN 61800-5-1:2008-04
Arbeitsspannung (periodischer Scheitelwert)	$9,28\text{kV} * \sqrt{2} + 1\text{kV} = \mathbf{14,13\text{kV}}$ Maximale DC-Spannung im DC-Zwischenkreis im Leerlauf inkl. transienter Schaltüberspannung
Luftstrecke Basisisolierung	72,4mm (2000m), 82,5mm (3000m)
Stoßspannung für verstärkte Isolierung	$1,6 * 48,8\text{kV} = \mathbf{78,1\text{kV}}$
Luftstrecke verstärkte Isolierung	125,8mm (2000m), 143,4mm (3000m)
Luftstrecke Funktions-/Betriebsisolierung	30,3mm (2000m), 34,6mm (3000m) z.B. zwischen den Klemmen des DC-Zwischenkreises

1. Isolationskoordination – Beispiel - Kriechstrecken

	SK1 (Leistungsteil)
Systemspannung	$4 * 2,11\text{kV} * 1,1 = \mathbf{9,28\text{kV}}$ inkl. 10% Netzspannungstoleranz
Stoßspannung	48,8kV Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise DIN EN 61800-5-1:2008-04
Zeitweilige Überspannung (Scheitelwert/Effektivwert)	33,2kV/23,5kV Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise DIN EN 61800-5-1:2008-04
Arbeitsspannung (periodischer Scheitelwert)	$9,28\text{kV} * \sqrt{2} + 1\text{kV} = \mathbf{14,13\text{kV}}$ Maximale DC-Spannung im DC-Zwischenkreis im Leerlauf inkl. transienter Schaltüberspannung
Luftstrecke Basisisolierung	72,4mm (2000m), 82,5mm (3000m)
Stoßspannung für verstärkte Isolierung	$1,6 * 48,8\text{kV} = \mathbf{78,1\text{kV}}$
Luftstrecke verstärkte Isolierung	125,8mm (2000m), 143,4mm (3000m)
Luftstrecke Funktions-/Betriebsisolierung	30,3mm (2000m), 34,6mm (3000m) z.B. zwischen den Klemmen des DC-Zwischenkreises
Arbeitsspannung (effektiv im DC-ZK)	$9,28\text{kV} * \sqrt{2} = \mathbf{13,13\text{kV}}$ im Leerlauf ohne transienter Schaltüberspannung

1. Isolationskoordination – Beispiel - Kriechstrecken



1. Isolationskoordination – Beispiel - Kriechstrecken

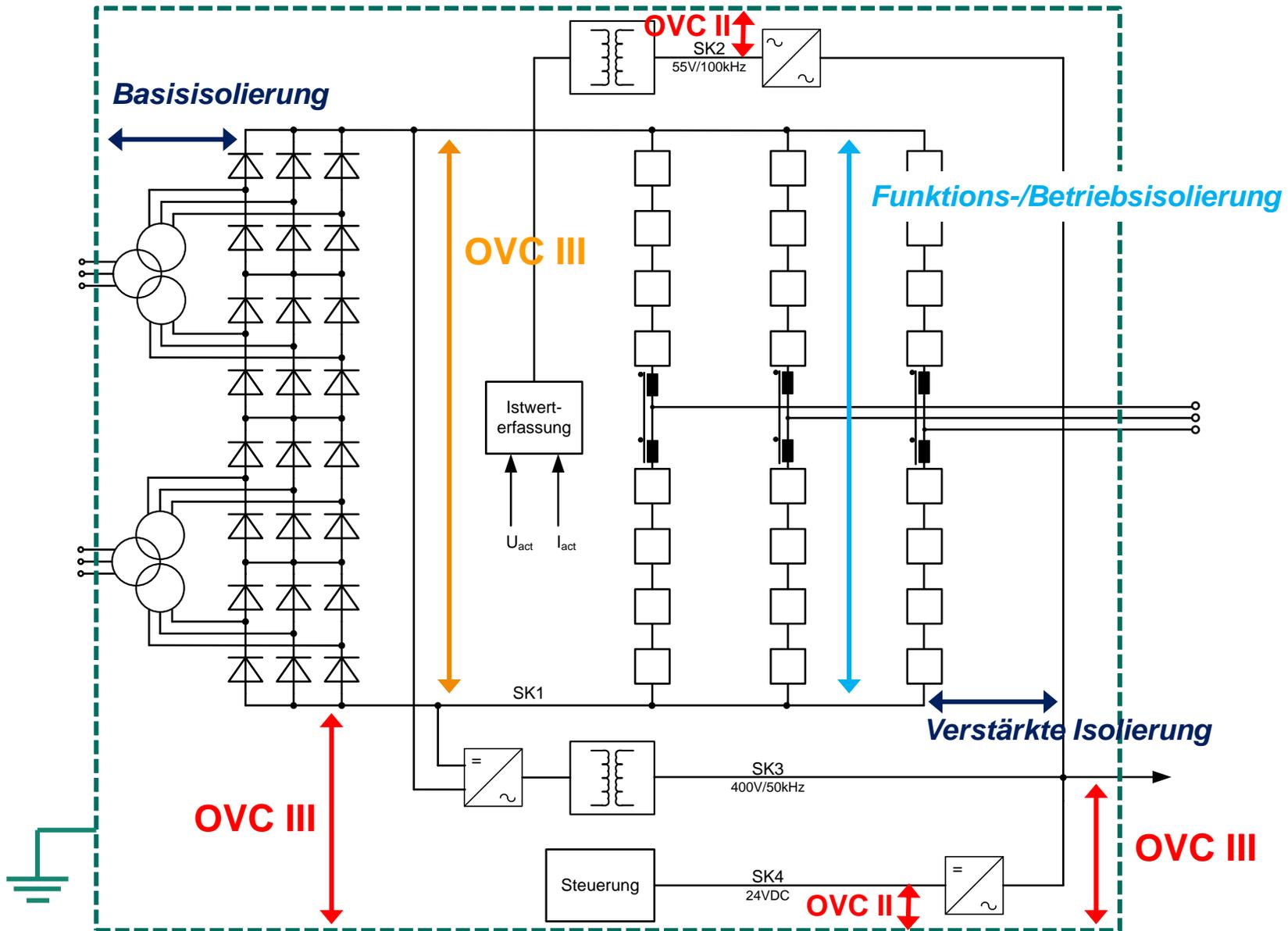
Tabelle 10 – Kriechstrecken (mm)

Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Arbeits- spannung (Effektiv- wert) V	Leiterplatten ^a		Andere Isolatoren								
	Verschmutzungs- grad		Verschmutzungsgrad								
			1	2		3					
	b	c	b	Isolierstoffgruppe				Isolierstoffgruppe			
			I	II	IIIa	IIIb	I	II	IIIa	IIIb	
≤ 2	0,025	0,04	0,056	0,35	0,35	0,35	0,35	0,87	0,87	0,87	
5	0,025	0,04	0,065	0,37	0,37	0,37	0,37	0,92	0,92	0,92	
10	0,025	0,04	0,08	0,40	0,40	0,40	0,40	1,0	1,0	1,0	
25	0,025	0,04	0,125	0,50	0,50	0,50	0,50	1,25	1,25	1,25	
32	0,025	0,04	0,14	0,53	0,53	0,53	0,53	1,3	1,3	1,3	
40	0,025	0,04	0,16	0,56	0,80	1,1	1,1	1,4	1,6	1,8	
50	0,025	0,04	0,18	0,60	0,85	1,20	1,20	1,5	1,7	1,9	
63	0,04	0,063	0,20	0,63	0,90	1,25	1,25	1,6	1,8	2,0	
80	0,063	0,10	0,22	0,67	0,95	1,3	1,3	1,7	1,9	2,1	
100	0,10	0,16	0,25	0,71	1,0	1,4	1,4	1,8	2,0	2,2	
125	0,16	0,25	0,28	0,75	1,05	1,5	1,5	1,9	2,1	2,4	
160	0,25	0,40	0,32	0,80	1,1	1,6	1,6	2,0	2,2	2,5	
200	0,40	0,63	0,42	1,0	1,4	2,0	2,0	2,5	2,8	3,2	
250	0,56	1,0	0,56	1,25	1,8	2,5	2,5	3,2	3,6	4,0	
320	0,75	1,6	0,75	1,6	2,2	3,2	3,2	4,0	4,5	5,0	
400	1,0	2,0	1,0	2,0	2,8	4,0	4,0	5,0	5,6	6,3	
500	1,3	2,5	1,3	2,5	3,6	5,0	5,0	6,3	7,1	8,0	
630	1,8	3,2	1,8	3,2	4,5	6,3	6,3	8,0	9,0	10,0	
800	2,4	4,0	2,4	4,0	5,6	8,0	8,0	10,0	11	12,5	e
1 000	3,2	5,0	3,2	5,0	7,1	10,0	10,0	12,5	14	16	
1 250	4,2	6,3	4,2	6,3	9	12,5	12,5	16	18	20	
1 600	f	f	5,6	8,0	11	16	16	20	22	25	
2 000			7,5	10,0	14	20	20	25	28	32	
2 500			10,0	12,5	18	25	25	32	36	40	
3 200			12,5	16	22	32	32	40	45	50	
4 000			16	20	28	40	40	50	56	63	
5 000			20	25	36	50	50	63	71	80	
6 300			25	32	45	63	63	80	90	100	
8 000			32	40	56	81	81	100	110	125	
10 000			40	50	71	100	100	125	140	160	
12 500		13,13 kV	50	63	90	125	125	d	d	d	
16 000			63	80	110	150	150	d	d	d	
20 000			80	100	140	200	200				

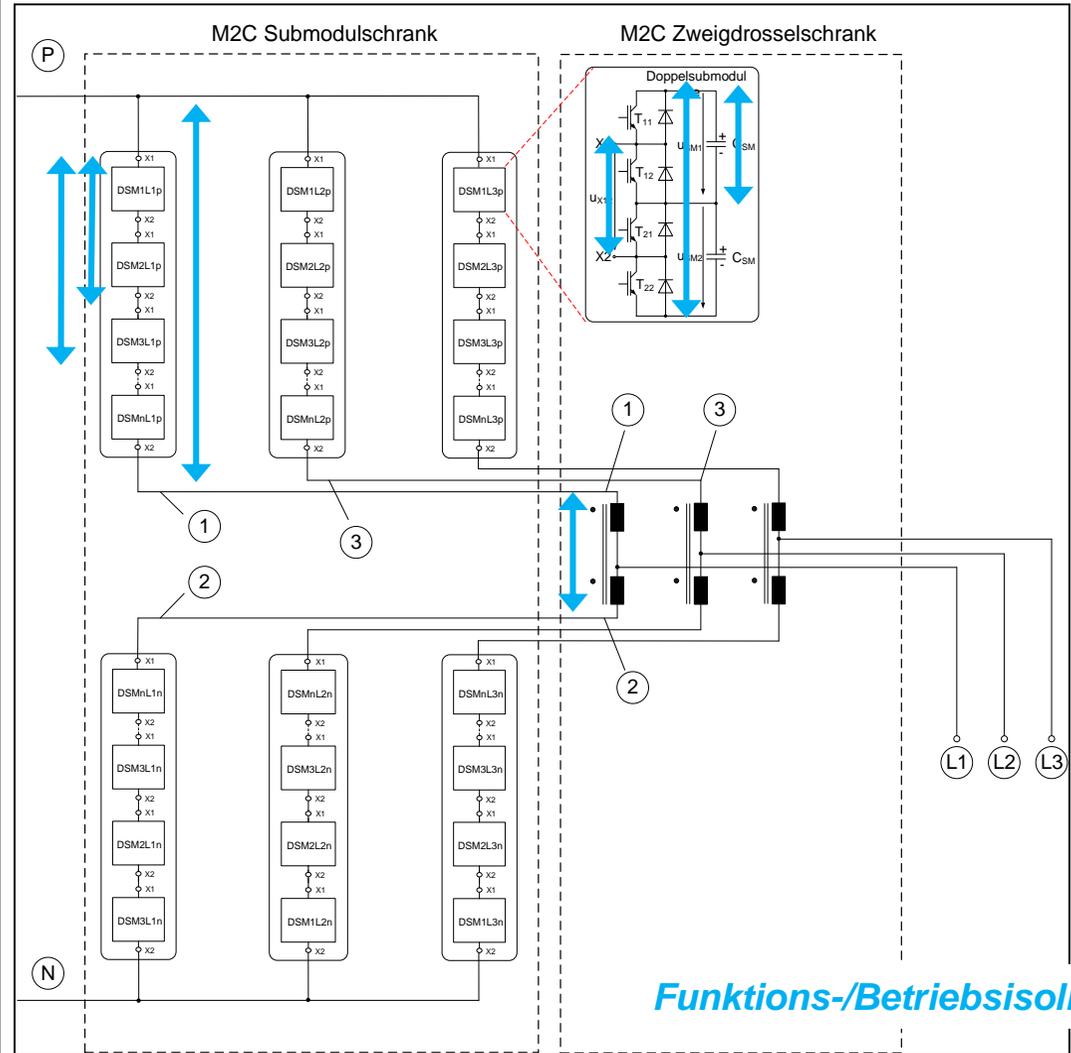
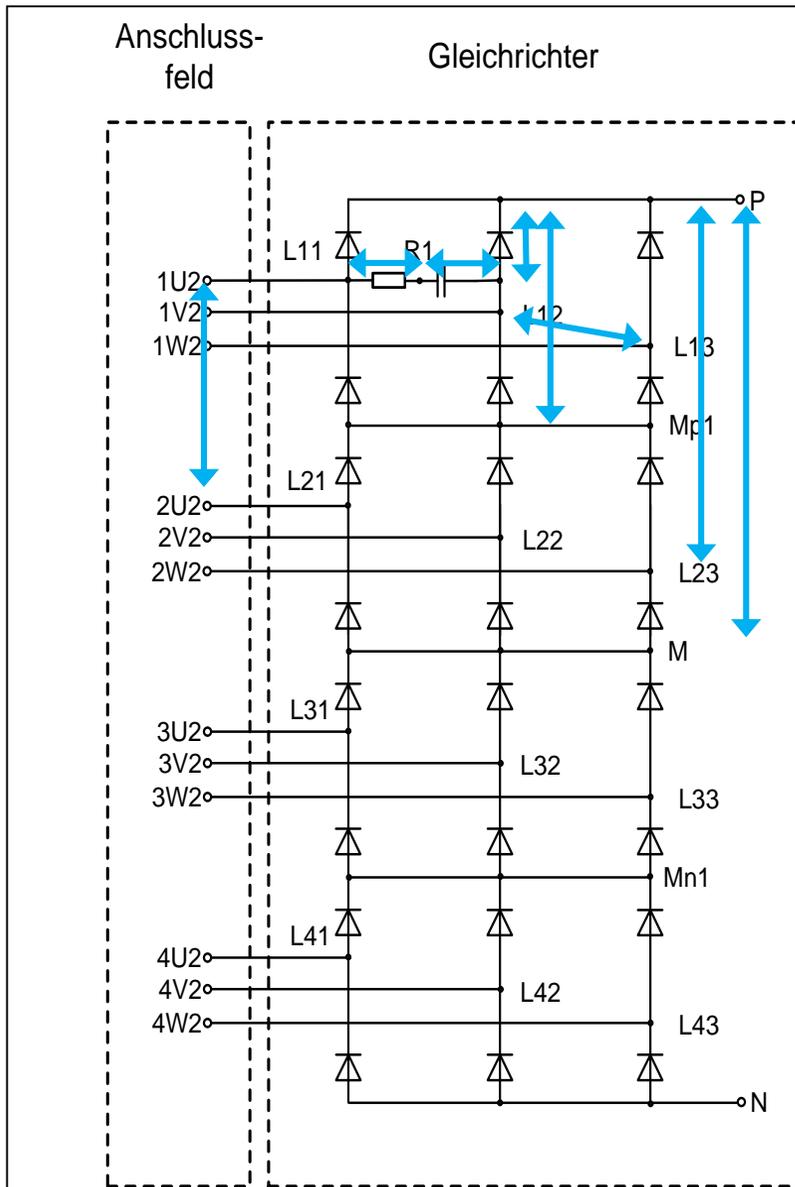
1. Isolationskoordination – Beispiel - Kriechstrecken

	SK1 (Leistungsteil)
Systemspannung	$4 * 2,11\text{kV} * 1,1 = \mathbf{9,28\text{kV}}$ inkl. 10% Netzspannungstoleranz
Stoßspannung	48,8kV Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise DIN EN 61800-5-1:2008-04
Zeitweilige Überspannung (Scheitelwert/Effektivwert)	33,2kV/23,5kV Tabelle 8 – Isolationsspannung für Hochspannungskreise DIN EN 61800-5-1:2008-04
Arbeitsspannung (periodischer Scheitelwert)	$9,28\text{kV} * \sqrt{2} + 1\text{kV} = \mathbf{14,13\text{kV}}$ Maximale DC-Spannung im DC-Zwischenkreis im Leerlauf inkl. transienter Schaltüberspannung
Luftstrecke Basisisolierung	72,4mm (2000m), 82,5mm (3000m)
Stoßspannung für verstärkte Isolierung	$1,6 * 48,8\text{kV} = \mathbf{78,1\text{kV}}$
Luftstrecke verstärkte Isolierung	125,8mm (2000m), 143,4mm (3000m)
Luftstrecke Funktions-/Betriebsisolierung	30,3mm (2000m), 34,6mm (3000m) z.B. zwischen den Klemmen des DC-Zwischenkreises
Arbeitsspannung (effektiv im DC-ZK)	$9,28\text{kV} * \sqrt{2} = \mathbf{13,13\text{kV}}$ im Leerlauf ohne transienter Schaltüberspannung
Kriechstrecke	Basisisolierung: 131mm (10mm/kV), verstärkte Isolierung: 262mm z.B. zwischen den Klemmen des DC-Zwischenkreises

1. Isolationskoordination – Beispiel - Luft-/Kriechstrecken Fkt.isol.



1. Isolationskoordination – Beispiel - Luft-/Kriechstrecken Fkt.isol.



1. Isolationskoordination – Beispiel - Luftstrecken Funktionsisolierung

Tabelle 9 – Luftstrecken

Spalte 1	2	3	4	5	6
Stoßspannung (Tabellen 7, 8, 4.3.6.3)	Zeitweilige Überspannung (Spitzenwert) zur Bestimmung der Isolierung zwischen Umgebungen und Stromkreisen oder	Arbeitsspannung (periodischer Scheitelwert) zur Bestimmung der Isolierung zwischen Umgebungen und Stromkreisen	Mindestluftstrecke mm		
	Arbeitsspannung (periodischer Scheitelwert) zur Bestimmung der Betriebsisolierung		Verschmutzungsgrad		
V	V	V	1	2	3
N/A	≤ 110	≤ 71	0,01	0,20 ^a	0,80
N/A	225	141	0,01	0,20	0,80
330	340	212	0,01	0,20	0,80
500	530	330	0,04	0,20	0,80
800	700	440	0,10	0,20	0,80
1 500	960	600	0,50	0,50	0,80
2 500	1 600	1 000	1,5		
4 000	2 600	1 600	3,0		
6 000	3 700	2 300	5,5]		
8 000	4 800	3 000	8,0		
12 000	7 400	4 600	14		
20 000	12 000	7 600	25		
40 000	26 000	16 000	60		
60 000	37 000	23 000	90		
75 000	48 000	30 000	120		
95 000	61 000	38 000	160		
125 000	80 000	50 000	220		
145 000	99 000	60 000	270		

ANMERKUNG 1 Interpolation ist zulässig.

1. Isolationskoordination – Beispiel - Kriechstrecken Funktionsisolierung

Tabelle 10 – Kriechstrecken (mm)

Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Arbeits- spannung (Effektiv- wert) V	Leiterplatten ^a		Andere Isolatoren								
	Verschmutzungs- grad		Verschmutzungsgrad								
			1	2			3				
	b	c	b	Isolierstoffgruppe				Isolierstoffgruppe			
				I	II	IIIa	IIIb	I	II	IIIa	IIIb
≤ 2	0,025	0,04	0,056	0,35	0,35	0,35	0,87	0,87	0,87		
5	0,025	0,04	0,065	0,37	0,37	0,37	0,92	0,92	0,92		
10	0,025	0,04	0,08	0,40	0,40	0,40	1,0	1,0	1,0		
25	0,025	0,04	0,125	0,50	0,50	0,50	1,25	1,25	1,25		
32	0,025	0,04	0,14	0,53	0,53	0,53	1,3	1,3	1,3		
40	0,025	0,04	0,16	0,56	0,80	1,1	1,4	1,6	1,8		
50	0,025	0,04	0,18	0,60	0,85	1,20	1,5	1,7	1,9		
63	0,04	0,063	0,20	0,63	0,90	1,25	1,6	1,8	2,0		
80	0,063	0,10	0,22	0,67	0,95	1,3	1,7	1,9	2,1		
100	0,10	0,16	0,25	0,71	1,0	1,4	1,8	2,0	2,2		
125	0,16	0,25	0,28	0,75	1,05	1,5	1,9	2,1	2,4		
160	0,25	0,40	0,32	0,80	1,1	1,6	2,0	2,2	2,5		
200	0,40	0,63	0,42	1,0	1,4	2,0	2,5	2,8	3,2		
250	0,56	1,0	0,56	1,25	1,8	2,5	3,2	3,6	4,0		
320	0,75	1,6	0,75	1,6	2,2	3,2	4,0	4,5	5,0		
400	1,0	2,0	1,0	2,0	2,8	4,0	5,0	5,6	6,3		
500	1,3	2,5	1,3	2,5	3,6	5,0	6,3	7,1	8,0		
630	1,8	3,2	1,8	3,2	4,5	6,3	8,0	9,0	10,0		
800	2,4	4,0	2,4	4,0	5,6	8,0	10,0	11	12,5	e	
1 000	3,2	5,0	3,2	5,0	7,1	10,0	12,5	14	16		
1 250	4,2	6,3	4,2	6,3	9	12,5	16	18	20		
1 600	f	f	5,6	8,0	11	16	20	22	25		
2 000			7,5	10,0	14	20	25	28	32		
2 500			10,0	12,5	18	25	32	36	40		
3 200			12,5	16	22	32	40	45	50		
4 000			16	20	28	40	50	56	63		
5 000			20	25	36	50	63	71	80		
6 300			25	32	45	63	80	90	100		
8 000			32	40	56	81	100	110	125		
10 000			40	50	71	100	125	140	160		
12 500			50	63	90	125	d	d	d		
16 000			63	80	110	150					
20 000			80	100	140	200					

1. Isolationskoordination – Beispiel - Prüfspannungen

	SK1 (Leistungsteil)
Systemspannung (Amplitude)	$4 * 2,11\text{kV} * 1,1 * \sqrt{2} = 13,13\text{kV}$ inkl. 10% Netzspannungstoleranz

5.2.3.2.1 Zweck der Prüfung

Die Prüfung wird angewendet, um nachzuweisen, dass die Luftstrecken und die feste Isolierung der Bauteile und des zusammengebauten *PDS/CDM/BDM* eine ausreichende Spannungsfestigkeit besitzen, um Überspannungsbedingungen standzuhalten.

aus DIN EN 61800-5-1:2008-04

1. Isolationskoordination – Beispiel - Prüfspannungen

Tabelle 23 – Prüfspannungen für Stromkreise, die nicht direkt am Netz angeschlossen sind

Spalte 1	2 ^a		3 ^a	
	Spannung für <i>Typprüfungen</i> von Stromkreisen mit <i>Basisisolierung</i> und für alle <i>Stückprüfungen</i>		Spannung für <i>Typprüfungen</i> von Stromkreisen mit <i>Sicherer Trennung</i> und zwischen Stromkreisen und berührbaren Oberflächen (nicht leitfähig oder leitfähig, jedoch nicht mit der Schutzerdung verbunden, Schutzklasse II nach 4.3.5.6)	
Systemspannung (periodischer Scheitelwert) (siehe 4.3.6.2.1)	Wechselspannung (Effektivwert)	Gleichspannung	Wechselspannung (Effektivwert)	Gleichspannung
V	V	V	V	V
≤ 71	80	110	160	220
141	160	225	320	450
212	240	340	480	680
330	380	530	760	1 100
440	500	700	1 000	1 400
600	680	960	1 400	1 900
1 000	1 100	1 600	2 200	3 200
1 600	1 800	2 600	2 900	4 200
2 300	2 600	3 700	4 200	5 900
3 000	3 400	4 800	5 400	7 700
4 600	5 200	7 400	8 300	11 800
7 600	8 500	12 000	14 000	19 000
16 000	18 000	26 000	29 000	42 000
23 000	26 000	37 000	42 000	59 000
30 000	34 000	48 000	54 000	77 000
38 000	43 000	61 000	69 000	98 000
50 000	57 000	80 000	91 000	130 000
60 000	70 000	99 000	109 000	154 000

ANMERKUNG 1 Interpolation ist zulässig.

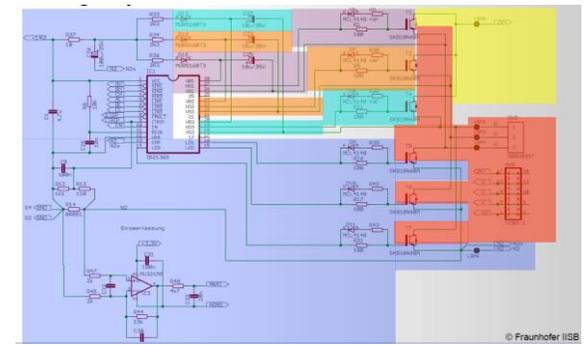
7 600 8 500 14,8 kV 12 000 14 000 23,9 kV 19 000
 16 000 18 000 26 000 29 000 42 000
 23 000 26 000 37 000 42 000 59 000
 13,13 kV 34 000 48 000 54 000 77 000
 38 000 43 000 61 000 69 000 98 000
 50 000 57 000 80 000 91 000 130 000
 60 000 70 000 99 000 109 000 154 000

1. Isolationskoordination – Beispiel - Prüfspannungen

	SK1 (Leistungsteil)
Systemspannung (Amplitude)	$4 * 2,11\text{kV} * 1,1 * \sqrt{2} = 13,13\text{kV}$ inkl. 10% Netzspannungstoleranz
Prüfspannungen (Effektivwerte)	14,8kV AC 50/60Hz (oder entsprechenden DC-Wert) Basisisolierung: Stückprüfung 1s; Typprüfung 5s Verstärkte Isolierung: Stückprüfung 1s 23,9kV AC 50/60Hz (oder entsprechenden DC-Wert) Verstärkte Isolierung: Typprüfung 5s

1. Isolationskoordination - Zusammenfassung

- Außerdem analoges Vorgehen für alle anderen Stromkreise
 - Basisisolierung
 - Verstärkte Isolierung gegen andere Stromkreise
 - Innerhalb der Stromkreise (Funktions-/Basisisolierung)
- Nach den gleichen Regeln werden auch elektronische Baugruppen behandelt
- Bei Wasserkühlung müssen auch die Kühlkörper, Rohre und Schläuche wie elektrische Leitungen behandelt werden:
 - LV: in der Regel geerdete Rohre und Schläuche, Betrieb mit leitfähigem Kühlmedium (Wasser, Wasser/Glykol)
 - MV: entweder geerdet oder Betrieb mit nicht leitfähigem Kühlmedium (entionisiertes Wasser, entionisiertes Wasser/Glykol); Kühlkörper, Rohre und Schläuche gehören zu SK1.



Quelle: Siemens

Allgemein:

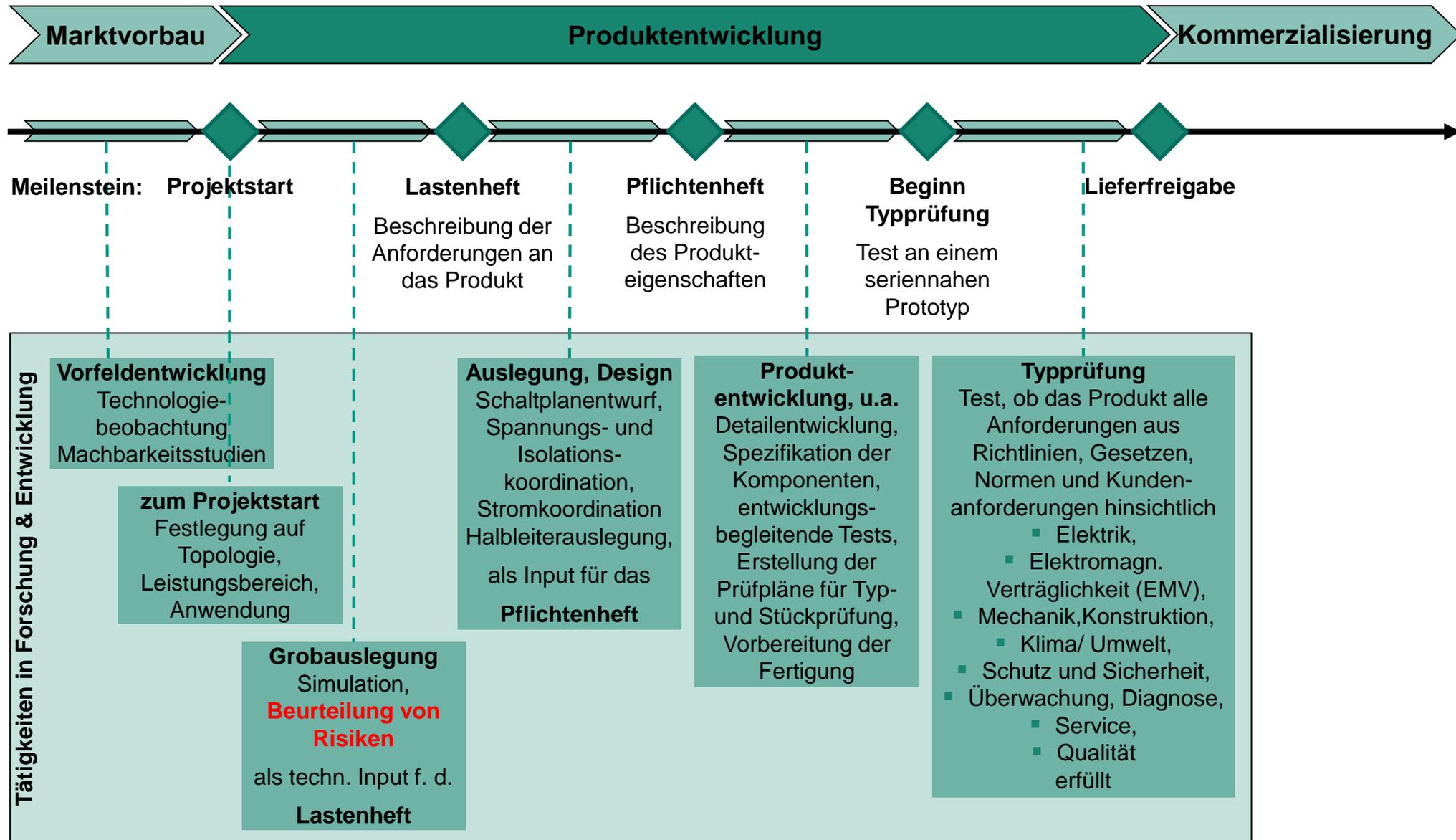
- Die Festlegung von Luft- und Kriechstrecken erfordert neben der Kenntnis der Normen auch viel Wissen zur Schaltungstechnik, zur Funktion und zu den Einsatzbedingungen des Betriebsmittels.
- Bei komplexen Aufbauten oder Leiterplatten kann die Dimensionierung der Luft- und Kriechstrecken sehr unübersichtlich und mühsam sein. Speziell die Beurteilung von kombinierten Luft/Kriechstrecken oder auf Baugruppen die Isolation über Lagen hinweg ist aufwändig.
- Zunehmend verfügbar: Softwareunterstützung für die Kontrolle von Luft- und Kriechstrecken

Gliederung

Stromrichterauslegung

1. Isolationskoordination
2. **Lichtbogenfestigkeit**
3. Strom- und Spannungscoordination
4. Zusammenfassung

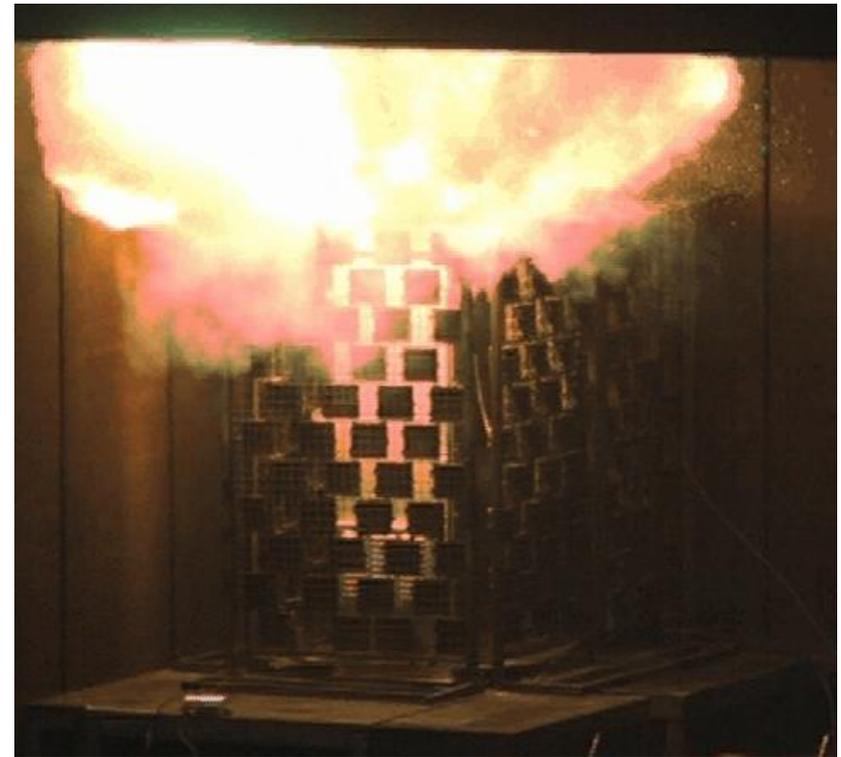
2. Lichtbogenfestigkeit



2. Lichtbogenfestigkeit

Lichtbogenfestigkeit

- Beschreibt die Eigenschaft eines Stromrichters, dass auch im Falle eines **internen Lichtbogens** (internal arc fault) **keine Gefahr für die Menschen** in dessen unmittelbarer Nähe ausgeht.
- Auch wenn die einschlägigen Normen zur Isolationskoordination eingehalten werden, können Lichtbögen entstehen durch
 - Mangelhafte Installation und Wartung,
 - Fehlbedienung,
 - Isolationsversagen,
 - Defekte Bauelemente,
 - Lose Schraubverbindungen,
 - Verschmutzung, Insekten, Nagetiere
 - ...



2. Lichtbogenfestigkeit

Lichtbogenfestigkeit

- Durch das **Produktdesign** muss sichergestellt sein, dass das **Risiko minimiert** wird.
- Risiko: Kombination aus
 - A. **Auftretenswahrscheinlichkeit** und
 - B. **Ausmaß** des möglichen Schadens
- Möglichkeiten zur Risikominimierung:
 - **Fehlertolerantes Design** des Stromrichters (A): größere Abstände, mechanische Abtrennungen,
 - Berücksichtigung von **Sicherheitsreserven** in den Spezifikationen der Bauelemente (A),
 - **Räume** dürfen während des Betriebs **nicht betreten** werden (B),
 - **Lichtbogenfestes Design** (B).



2. Lichtbogenfestigkeit

Lichtbogenfestigkeit

Normenlage

- Bisher keine Normen vorhanden:
 - LV Umrichter (<1000VAC):
 - keine Norm vorhanden.
 - MV Umrichter (>1000VAC):
 - bisher keine Norm vorhanden
 - in Arbeit: IEC 62477-2 “Safety Requirements for Power Semiconductor Converter Systems and Equipment (1000Vac/1500Vdc up to 36kVac/54kVdc)”
- Bisherige Normen basieren auf der Vermeidung von Lichtbögen (z.B. IEC 61800-5-1):



4.5 Schutz gegen energiebezogene Gefahren

4.5.1 Gefahren durch Elektroenergie

Der Ausfall irgendeines Bauelementes innerhalb des *PDS* darf nicht so viel Energie freisetzen, dass eine Gefahr wie z. B. Ausstoß von Werkstoff in einen vom Personal besetzten Bereich entsteht.

Gegebenenfalls sollte die Möglichkeit einer Energieübertragung vom Motor des *PDS* zum *CDM/BDM* in Betracht gezogen werden, wenn die angetriebene Ausrüstung die *CDM/BDM*-Steuerung überschreitet.

ANMERKUNG Für diese Anforderung gibt es im vorliegenden Teil der IEC 61800 keine Prüfungen.

2. Lichtbogenfestigkeit

Möglichkeiten zur Risikominimierung:

- **Fehlertolerantes Design**
- Berücksichtigung von **Sicherheitsreserven**
- **Räume** dürfen während des Betriebs **nicht betreten** werden
- **Lichtbogenfestes Design:**
 - Einbau von Sicherungen
 - Durch schnelle optische Störlichtbogenerkennung und Kurzschließen, d.h. Löschen des Lichtbogens
 - Durch mechanische Maßnahmen, die eine Personengefährdung im Falle eines Lichtbogens minimieren

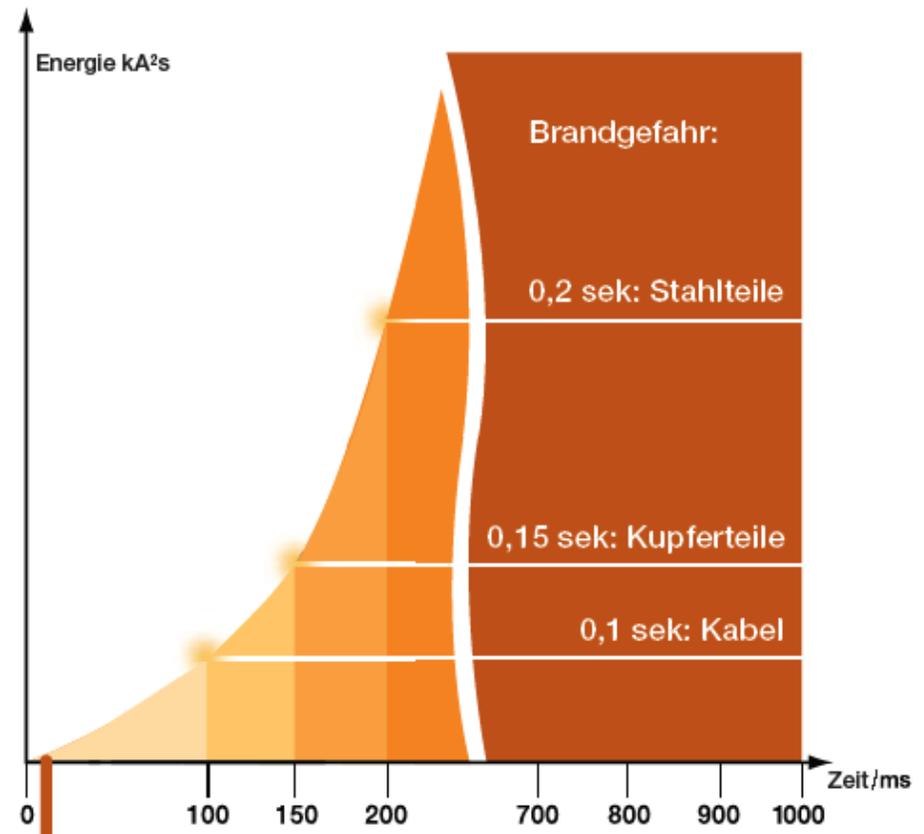
Beides muss durch geeignete Test nachgewiesen werden.

- **Trend:**
 - Klarer Trend zu **erhöhter Personensicherheit**, d.h. störlichtbogenfesten Anlagen (z.B. in Netzanwendungen und der Prozessindustrie)
 - Bisher: Tests und Zertifizierung in Anlehnung an Schaltanlagennorm (z.B. IEC 62271-200 „Metallgekapselte Wechselstrom-Schaltanlagen für Bemessungsspannungen über 1 kV bis einschließlich 52 kV“)

2. Lichtbogenfestigkeit

Störlichtbogen:

- Das Auftreten eines Störlichtbogens (dem schwerstmöglichen Fehlerfall innerhalb eines Stromrichters) ist mit hohen thermischen und mechanischen Belastungen in den betroffenen Bereichen verbunden.

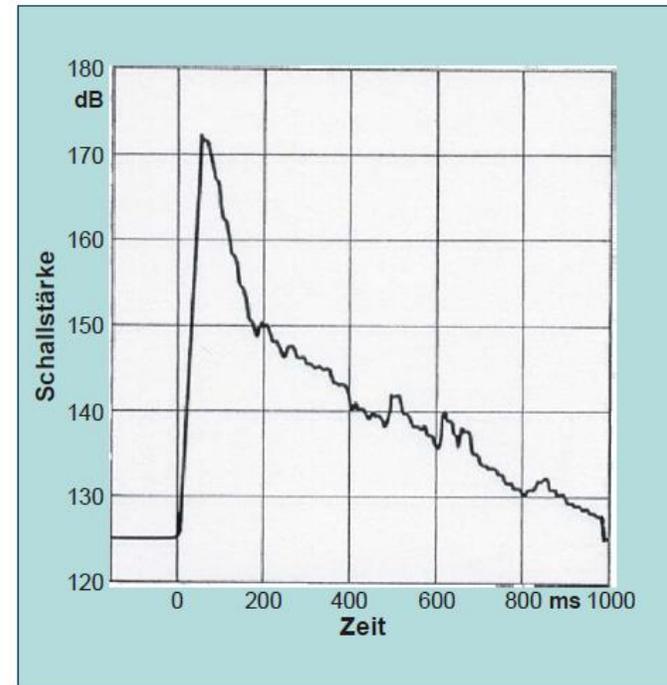
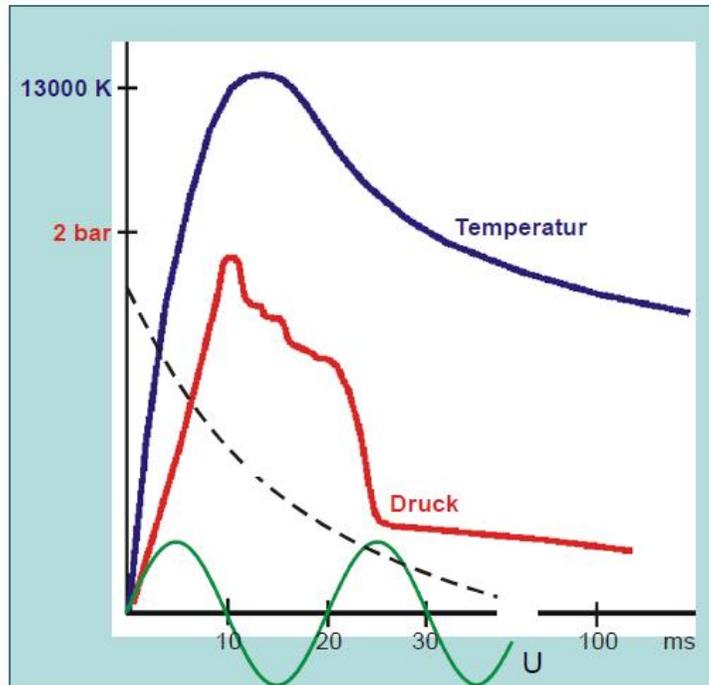


Quelle: ABB

2. Lichtbogenfestigkeit

Störlichtbogen: Für Personen entstehen Gefahren durch

- Enormen Überdruck
- Temperaturanstieg auf bis zu 20.000°C
- Verbrennung / Verdampfung von Metall und Isoliermaterial
- Freisetzung von Materialien und heißen Gasen
- Lauten Knall



Quelle: ABB

2. Lichtbogenfestigkeit – Fehlerarten von Kurzschlüssen

In Umrichtern können verschiedene Arten von Fehlern (z. B. Kurzschlüsse) auftreten:

▪ **Kurzschluss:**

Niederohmige Verbindung zwischen einem spannungsführenden Leiter mit mindestens einem weiteren Leiter:

→ Spannungseinbruch

→ Große Ströme an der Fehlerstelle (zu beachten: magnetische Kräfte)

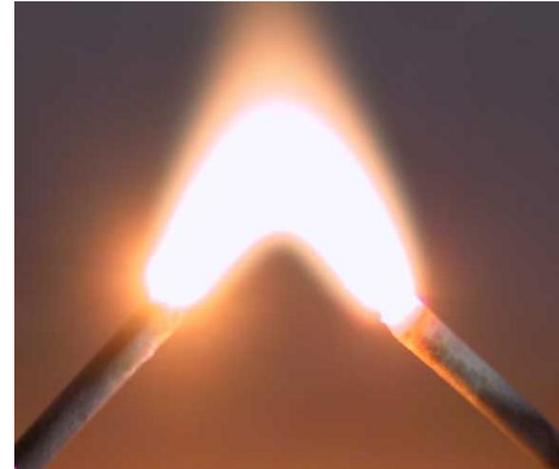
▪ **„Satter“ Kurzschluss:**

Direkter metallischer Kontakt (Übergangswiderstand vernachlässigbar)

▪ **Lichtbogenkurzschluss:**

Durchschlag in Luft, Leiter über Lichtbogen verbunden

- hoch nichtlinear,
- geringer Widerstand,
- Lichtbogenspannung ca. 100–300 V
- bis zu 20.000° C.

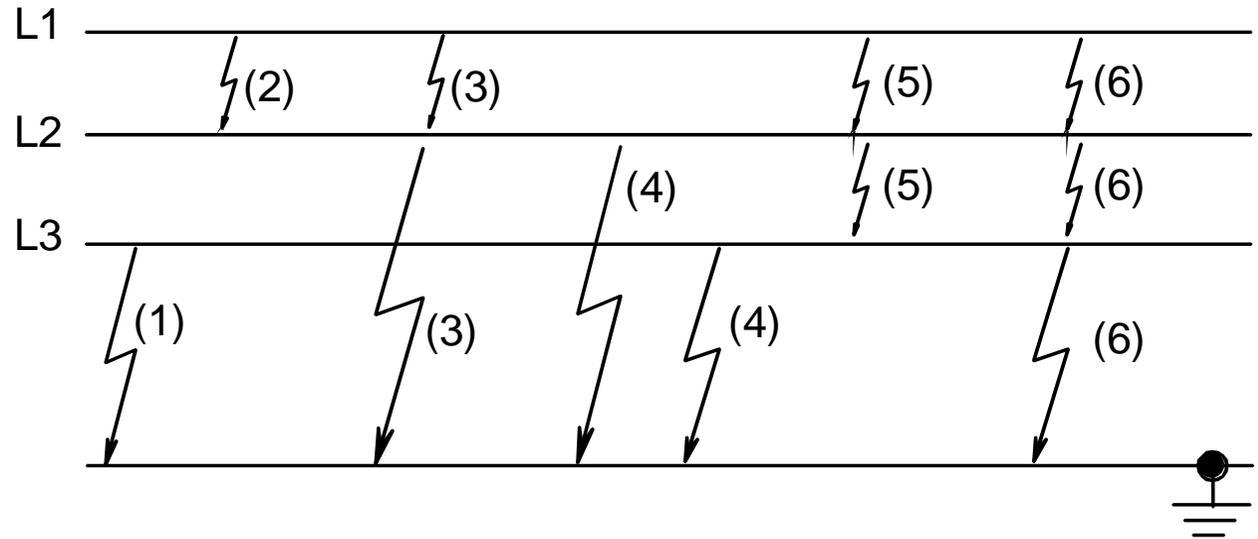


Quelle: wikipedia

2. Lichtbogenfestigkeit – Arten von Kurzschlüssen

Einpolige Fehler:

- Erdschluss (1) - ein Leiter mit Erdpotential verbunden; keine Sternpunktterdung, Fehlerstrom hängt von der Erdkapazität und von der Ausdehnung des Netzes ab
- Erdkurzschluss (1) – wie Erdschluss aber im Netz mit geerdetem Sternpunkt



Zweipolige Fehler:

- zweipoliger Kurzschluss (2): Kurzschluss zwischen zwei Leitern eines Systems
- zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung (3): Kurzschluss zwischen zwei Leitern und Erdberührung einer der beiden Leiter
- Doppelerdschluss (4): zwei Erdschlüsse an unterschiedlichen Orten

Dreipolige Fehler:

- dreipoliger Kurzschluss (5): L1, L2 und L3 miteinander kurzgeschlossen - **größte Belastung für Netze und Betriebsmittel (z.B. Umrichter)**, meist durch einen einpoligen Fehler eingeleitet, (Lichtbogenwanderung oder Spannungserhöhung auf den gesunden Leiter)
- dreipoliger Kurzschluss mit Erdberührung (6)

2. Lichtbogenfestigkeit – Arten von Kurzschlüssen - Modellierung

Ein- und zweipolige Fehler:

- Alle ein- und zweipolige Kurzschlüsse führen zu einem unsymmetrischen Dreiphasensystem (mit symmetrischer Einspeisung)

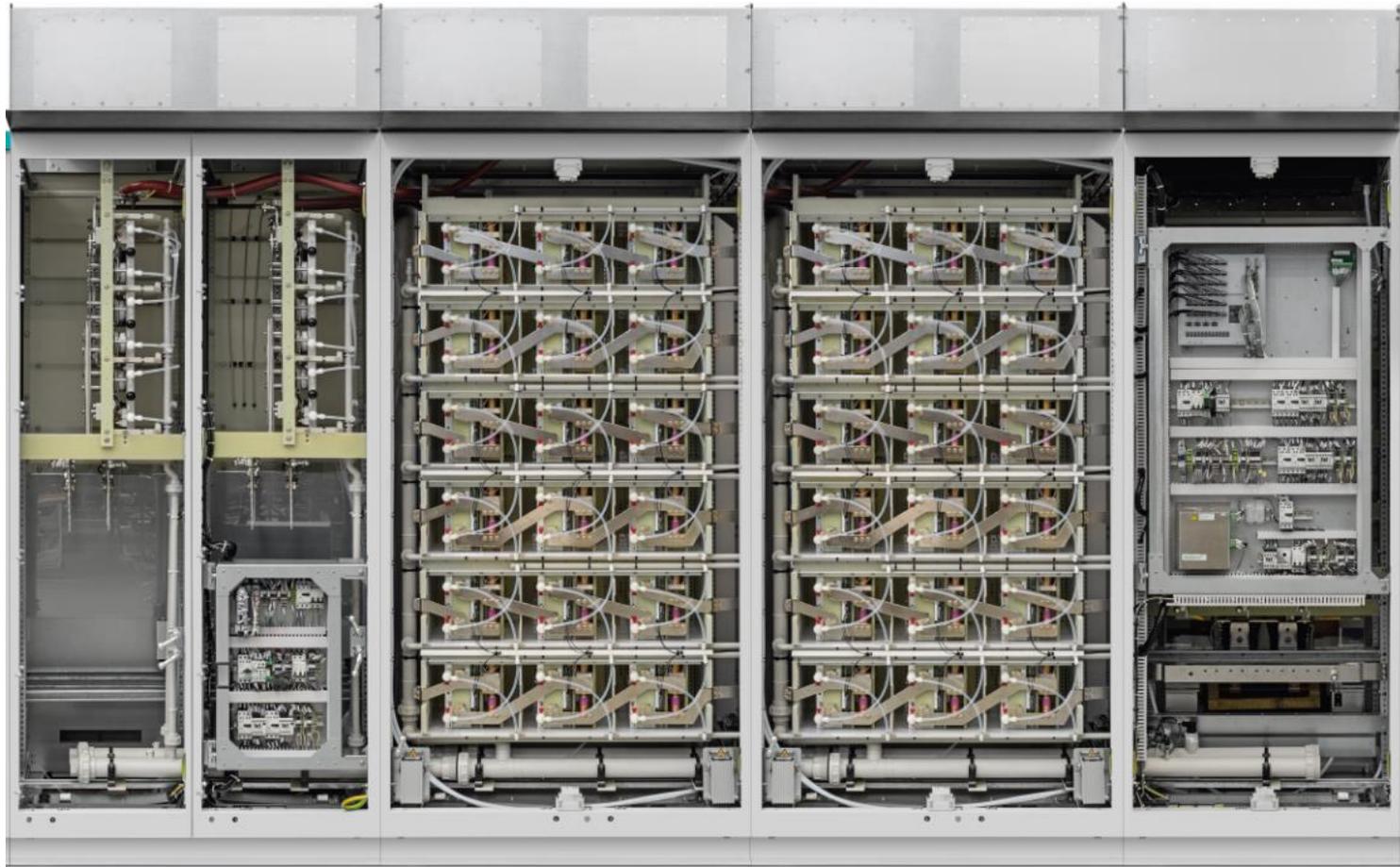
Alle unsymmetrischen Kurzschlüsse müssen

- entweder dreiphasig berechnet werden, z.B. numerisch mit der komplexen Knotenpotentialanalyse (für Wechselstromkurzschlussströme) oder der transienten Knotenpotentialanalyse (mit Einschwingvorgängen),
- oder einphasig mit Hilfe der symmetrischen Komponenten.

Dreipolige Fehler:

- Der **dreipolige Kurzschluss** führt zu einem **symmetrischen Dreiphasensystem**.
- Berechnung mit einem **einphasigen Ersatzschaltbild** und dem Verfahren der Ersatzquelle.
- Mehrere Einspeisungen werden als phasengleich (synchronisiert) angenommen und zu einer Ersatzquelle im Fehlerzweig zusammengefasst.

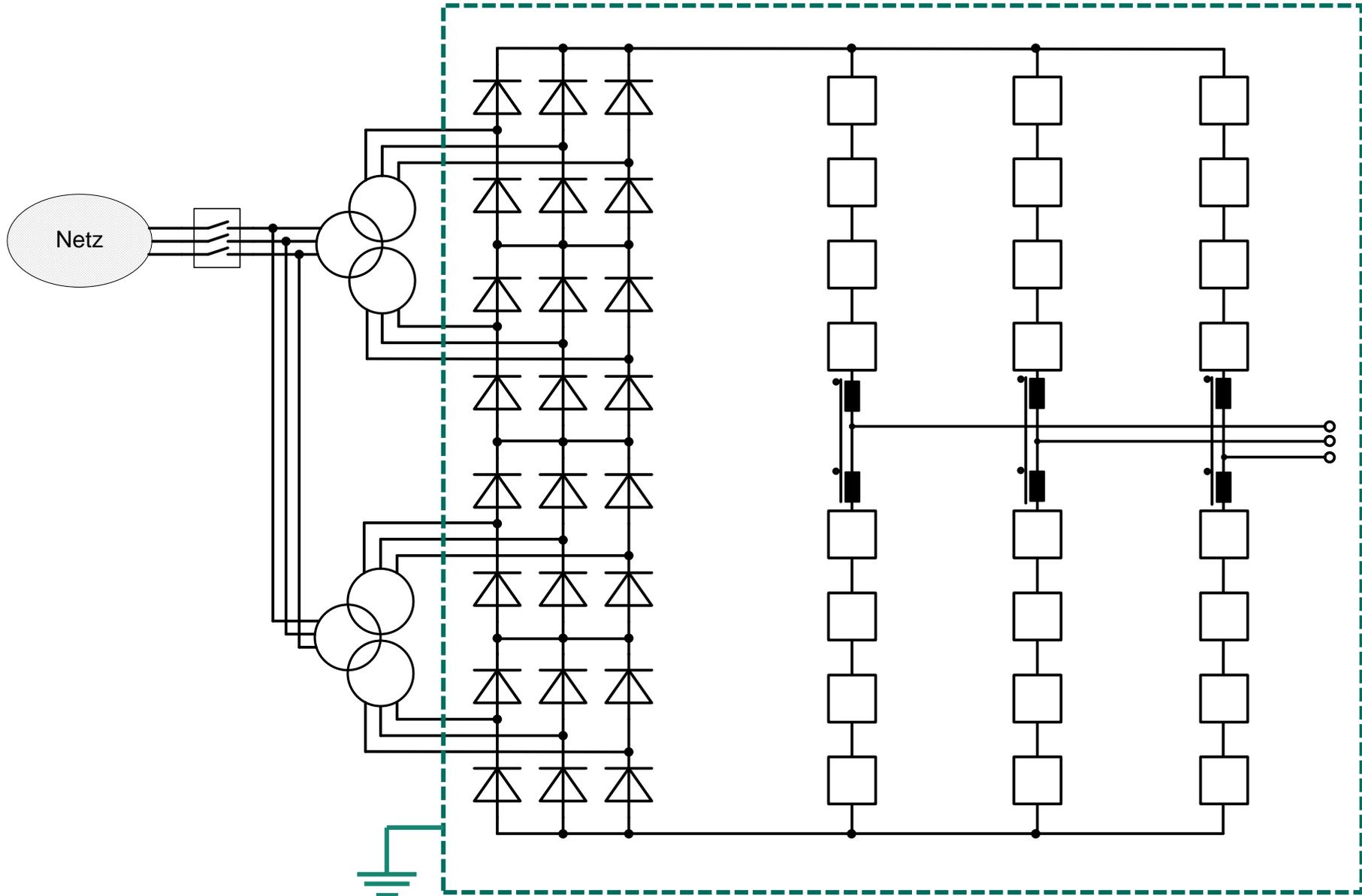
2. Lichtbogenfestigkeit - Beispiel



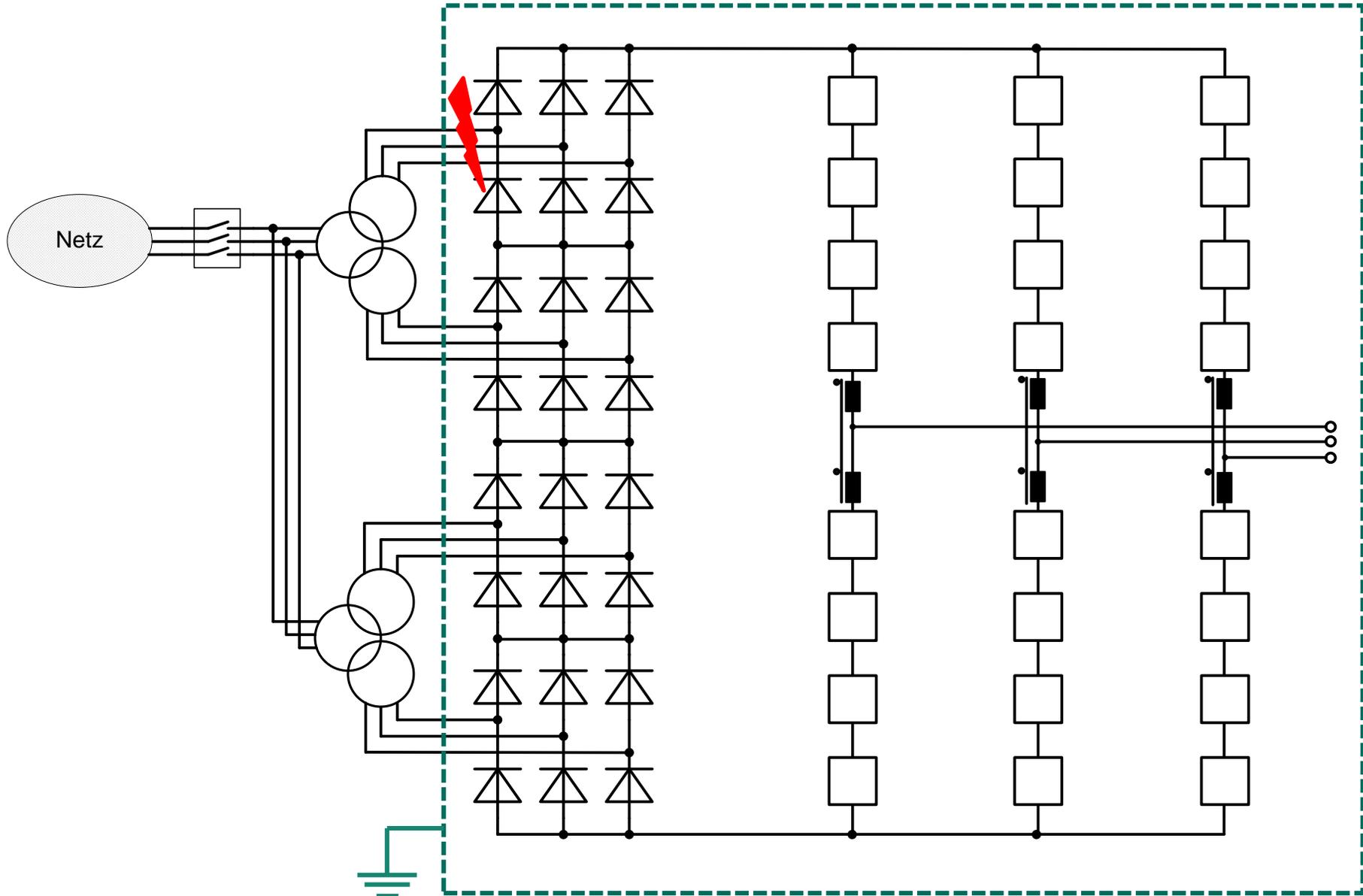
MMC Umrichter: 6,6kV, 1200A, 13,7MVA

Quelle: Siemens

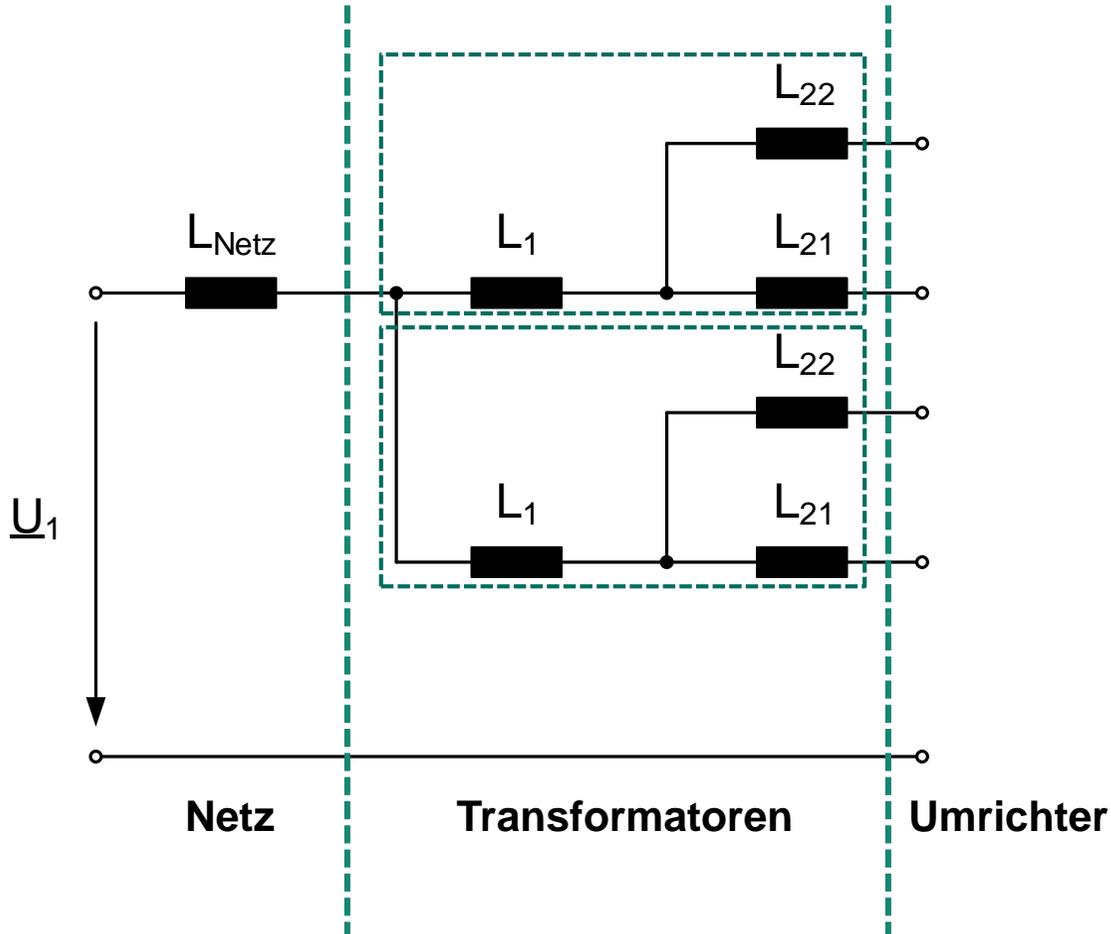
2. Lichtbogenfestigkeit - Beispiel



2. Lichtbogenfestigkeit - Beispiel



2. Lichtbogenfestigkeit - Beispiel



Einphasiges Ersatzschaltbild:

Alle Größen bezogen auf die Sekundärseite (Umrichterseite) der Trafos

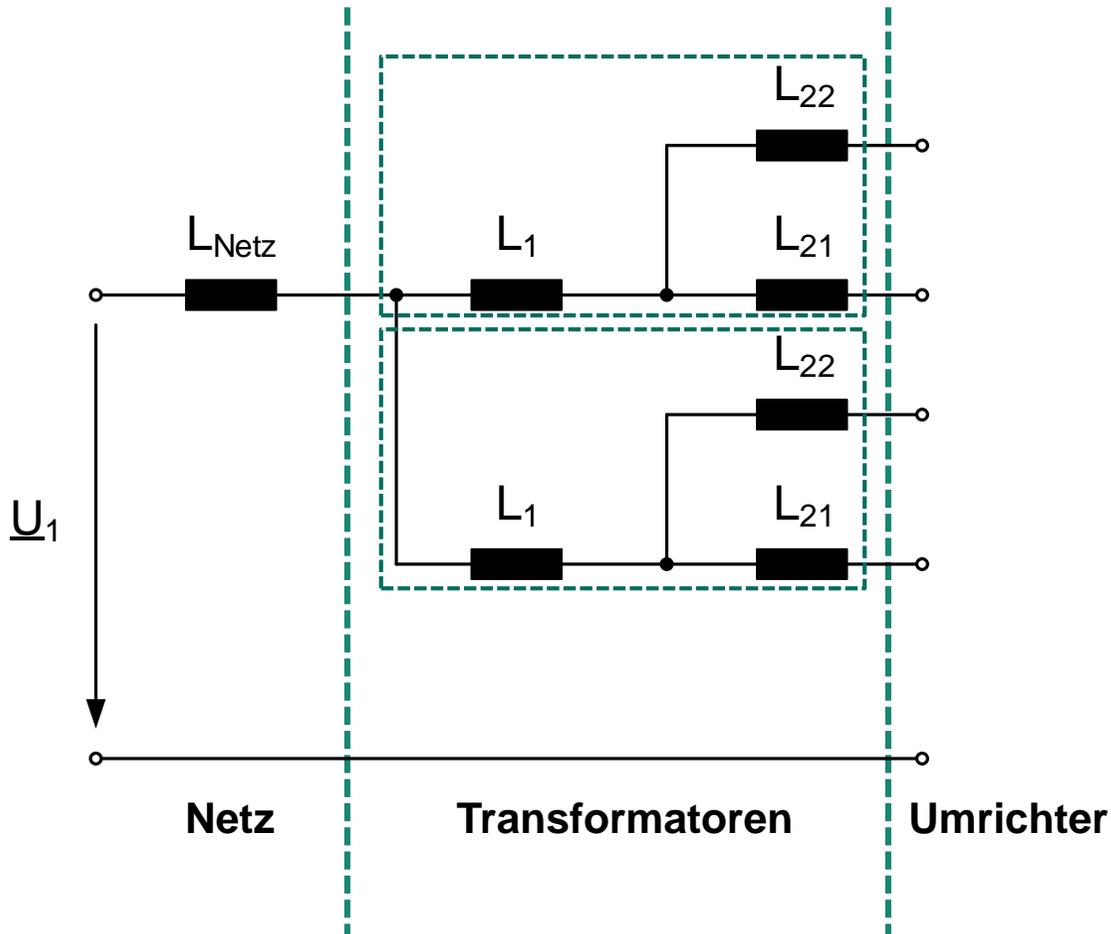
- f : Netzfrequenz $f=50$ Hz
- \underline{U}_N : Netzspannung (Leiter-Leiter)
- \underline{U}_1 : Netzspannung (Leiter-Sternpunkt)

$$U_1 = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$$

- S_{kmax} : Maximale Netzkurzschlussleistung
- L_{Netz} : Netzkurzschlussinduktivität

$$L_{\text{Netz}} = \frac{U_N^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot S_{\text{kmax}}} = \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot S_{\text{kmax}}}$$

2. Lichtbogenfestigkeit - Beispiel



Einphasiges Ersatzschaltbild:

Alle Größen bezogen auf die Sekundärseite (Umrichterseite) der Trafos

- f : Netzfrequenz $f=50$ Hz
- \underline{U}_N : Netzspannung (Leiter-Leiter)
- \underline{U}_1 : Netzspannung (Leiter-Sternpunkt)
- S_{trafo} : Nennscheinleistung eines Trafos
- n_{sek} : Anzahl der sekundärseitigen Wicklungssysteme eines Trafos
- L_1 : primärseitige Trafostreuinduktivität
- L_{2x} : sekundärseitige Trafostreuinduktivität

$$L_{21} = L_{22} = L_2$$

- u_{k12} : Trafostreuinduktivität

$$u_{k12} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_1 + L_2) \cdot S_{\text{trafo}}}{n_{\text{sek}} \cdot U_N^2}$$

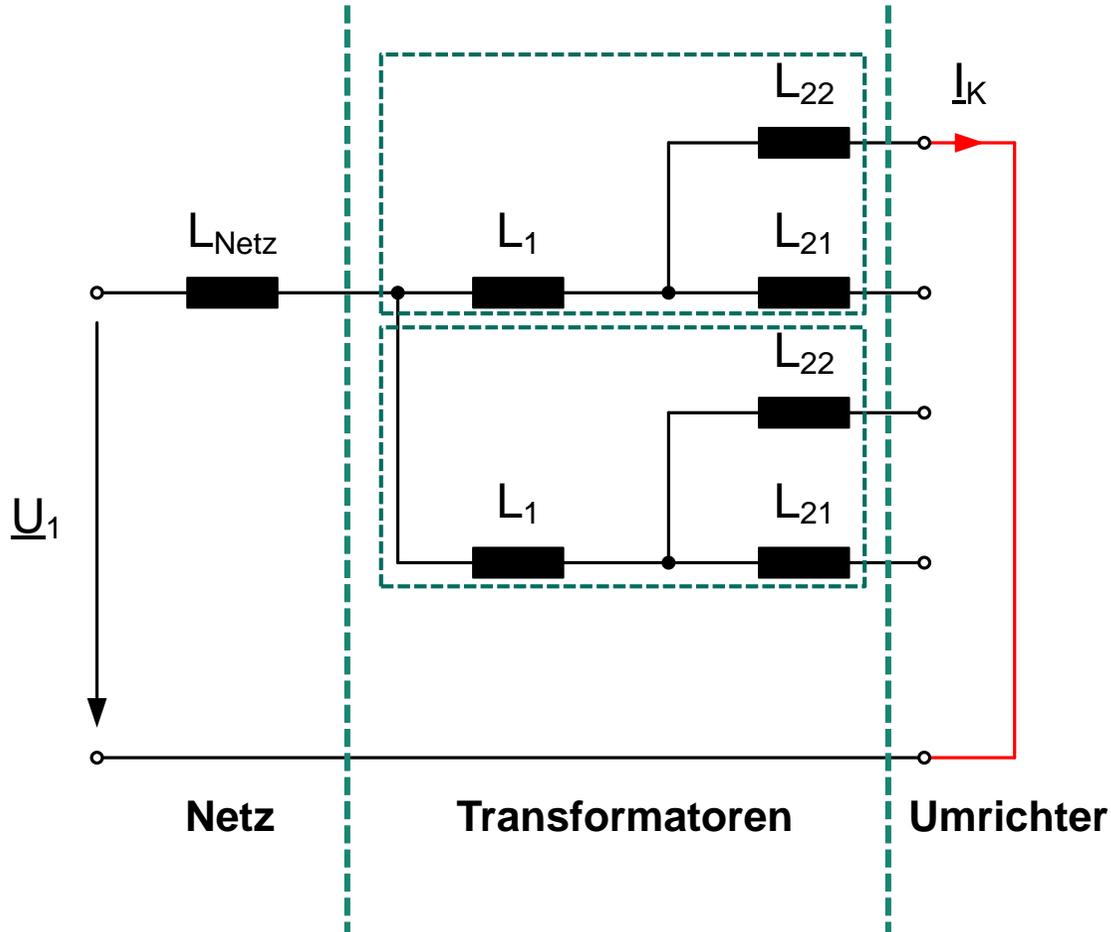
- L_{12} : gesamte Trafostreuinduktivität

$$L_{12} = L_1 + L_2$$

- k_{sek} : Kopplungsfaktor (gibt an, wie stark die Sekundärwicklungen gekoppelt sind, typisch $k_{\text{sek}}=0,1$)

$$k = \frac{L_1}{L_1 + L_2}$$

2. Lichtbogenfestigkeit - Beispiel



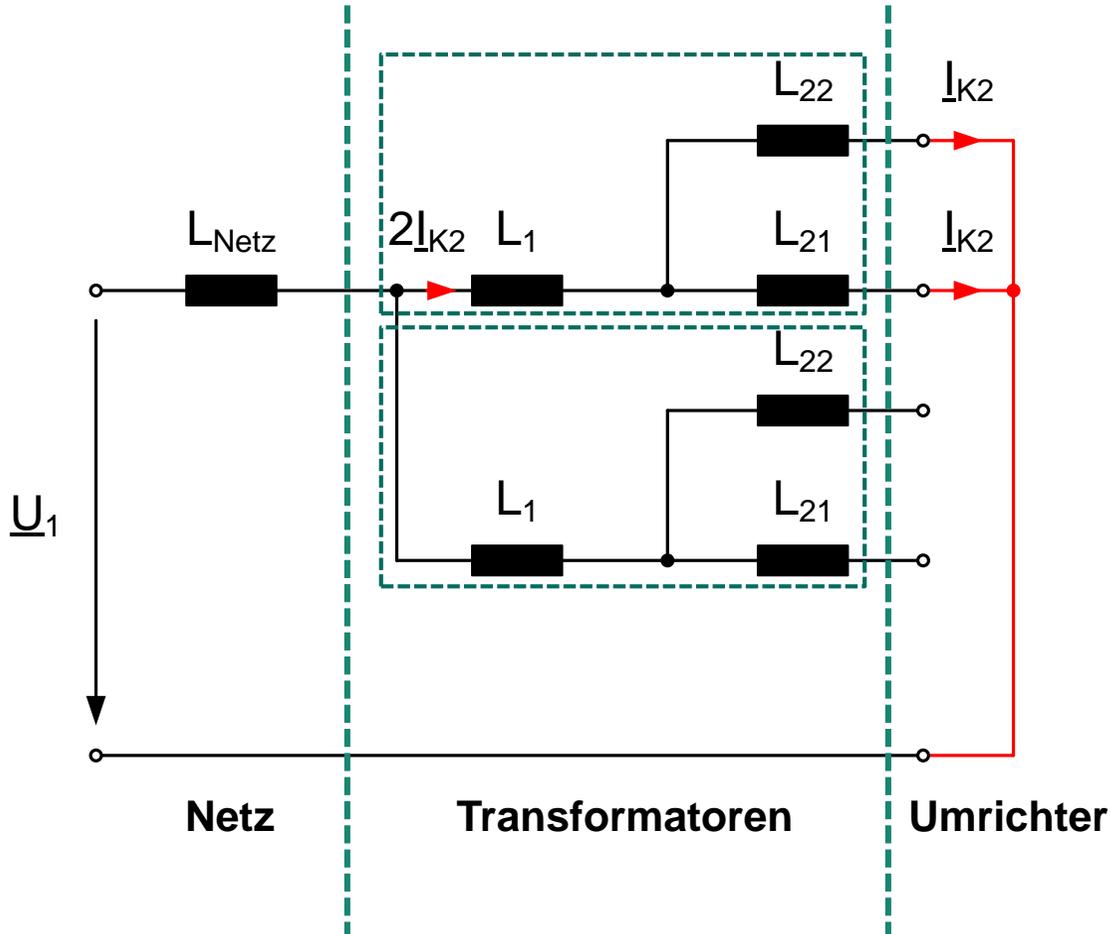
Einphasiges Ersatzschaltbild:

Alle Größen bezogen auf die Sekundärseite (Umrichterseite) der Trafos

- \underline{I}_K : Dauerkurzschlussstrom bei einer kurzgeschlossenen Sekundärwicklung

$$I_K = \frac{U_1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_N + L_1 + L_2)}$$

2. Lichtbogenfestigkeit - Beispiel



Einphasiges Ersatzschaltbild:

Alle Größen bezogen auf die Sekundärseite (Umrichterseite) der Trafos

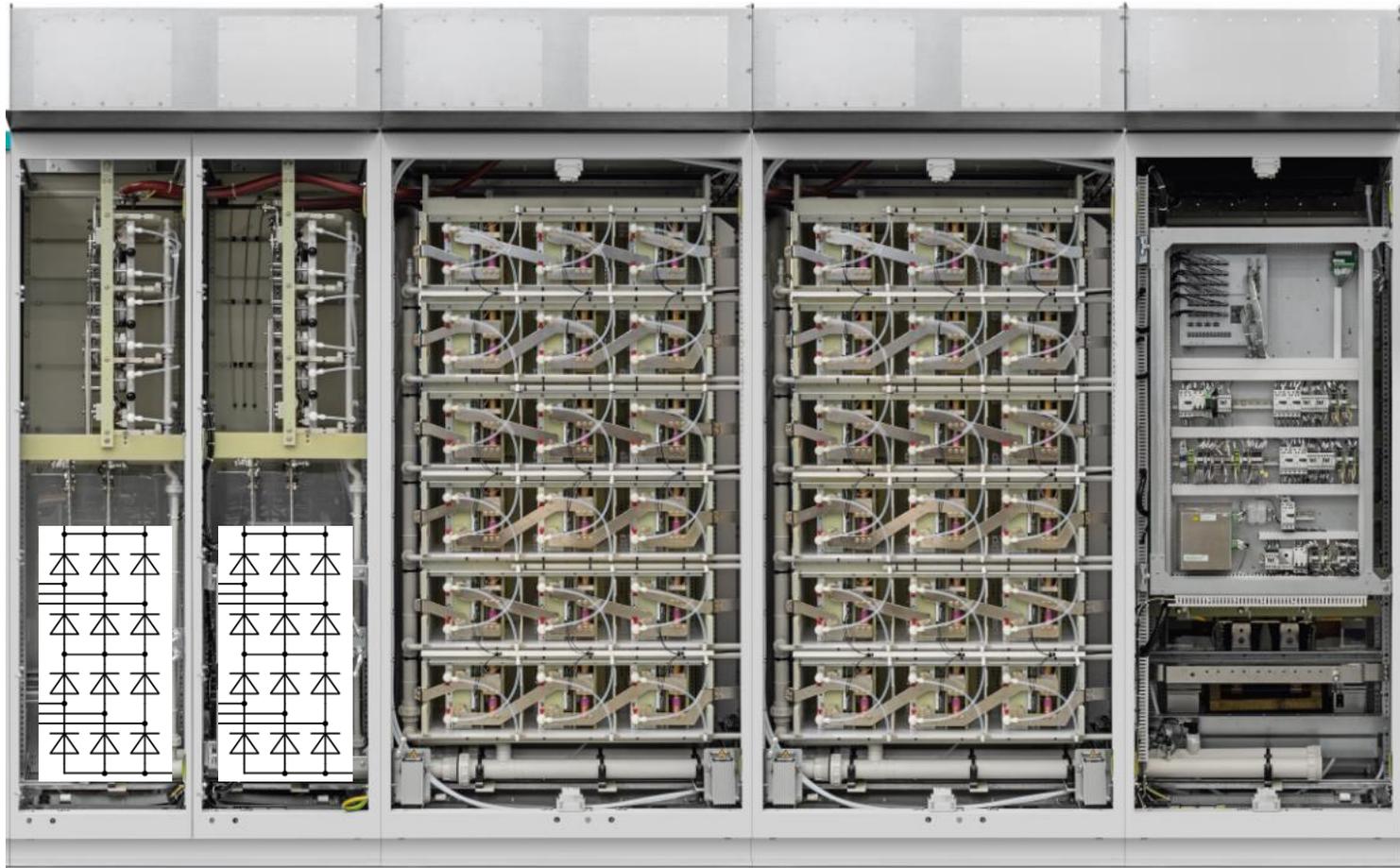
- I_K : Dauerkurzschlussstrom bei einer kurzgeschlossenen Sekundärwicklung

$$I_K = \frac{U_1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_N + L_1 + L_2)}$$

- I_{K2} : Dauerkurzschlussstrom bei zwei kurzgeschlossenen Sekundärwicklungen

$$I_{K2} = \frac{U_1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (2 \cdot L_N + 2 \cdot L_1 + L_2)}$$

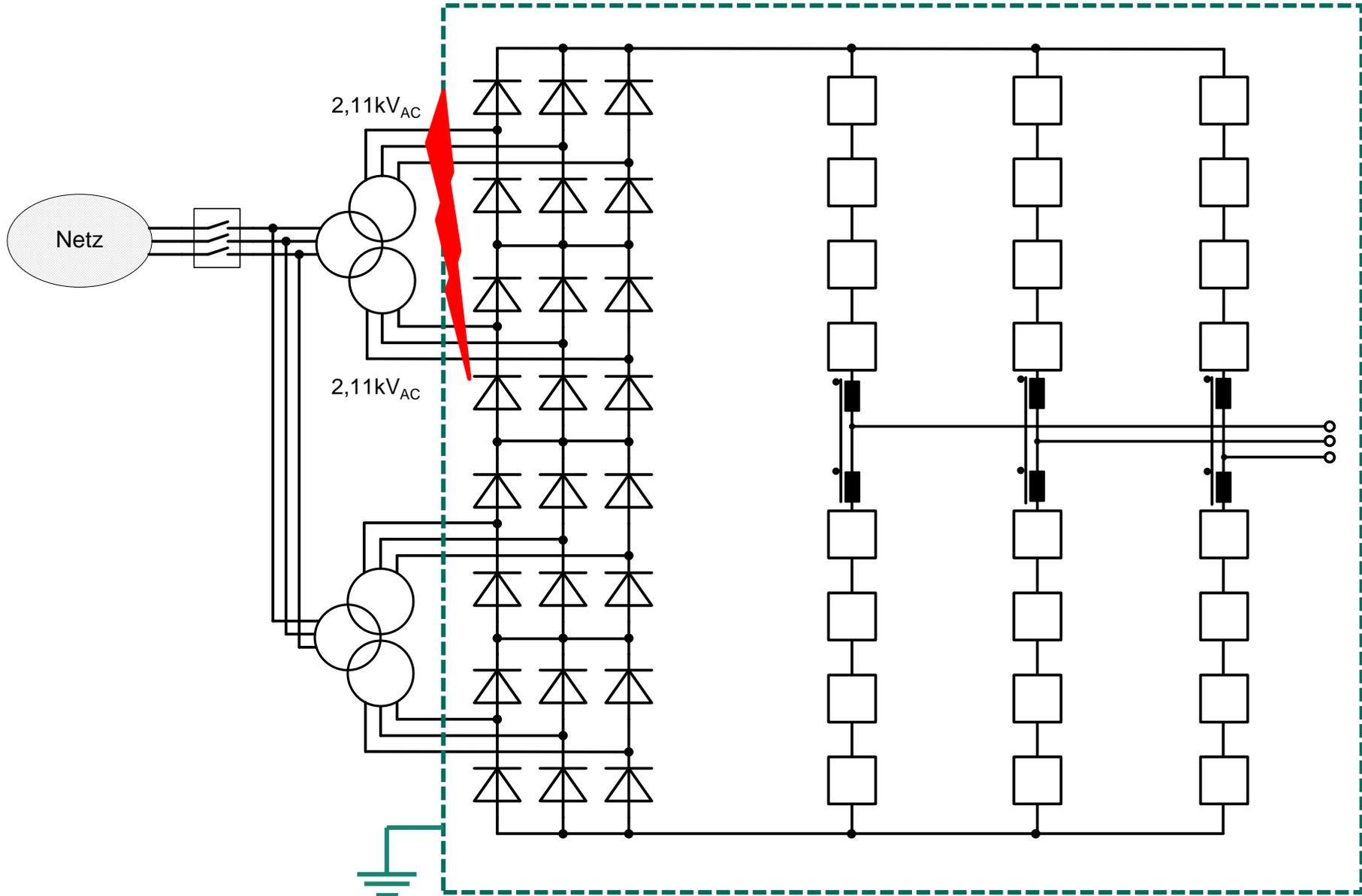
2. Lichtbogenfestigkeit - Beispiel



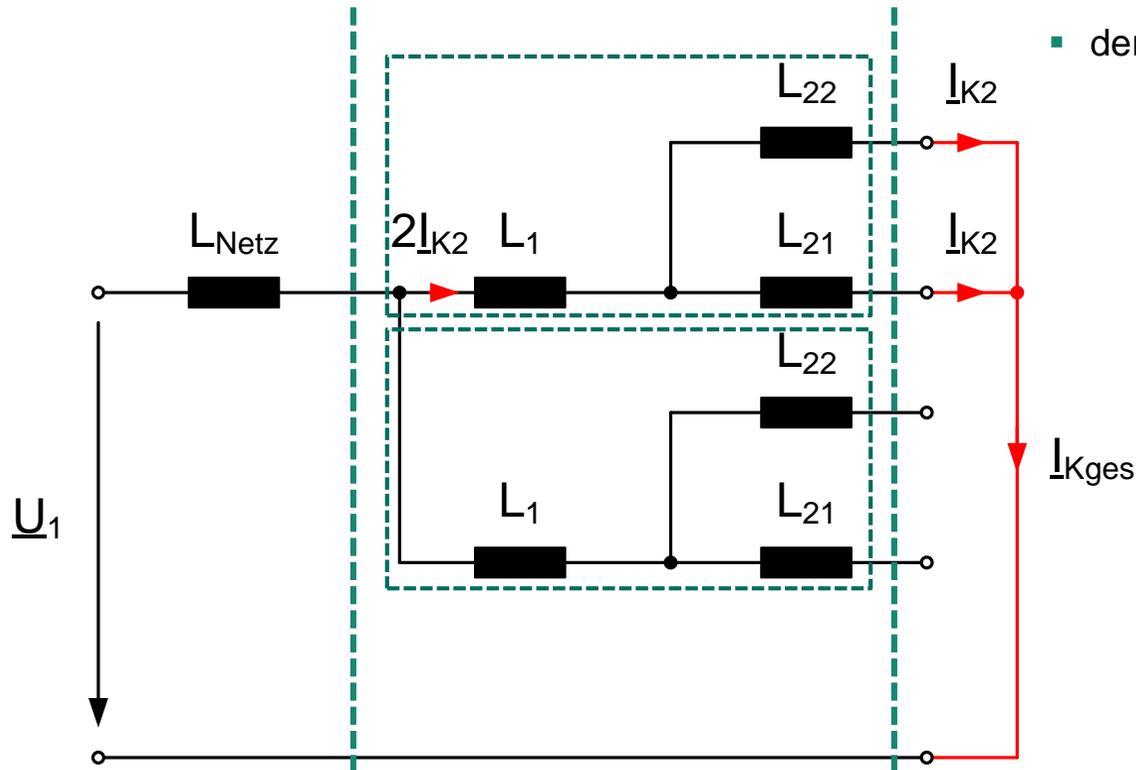
MMC Umrichter: 6,6kV, 1200A, 13,7MVA

Quelle: Siemens

2. Lichtbogenfestigkeit - Beispiel



2. Lichtbogenfestigkeit - Beispiel



- Netz**
- $S_{kmax}=500MVA$
 - $U_N=2,11 kV$

- Transformatoren**
- $u_k=8 \%$
 - $S_{trafo}=2 \times 8MVA$
 - $n_{sek}=2$
 - $k=0,1$

- Umrichter**
- $I_{Kges}=?$

Berechnungsbeispiel: 3p Kurzschluss in 2 Systemen:

- Vernachlässigung der Lichtbogenspannung und
- der ohmschen Widerstände

$$L_{Netz} = \frac{U_N^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot S_{kmax}} = \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot S_{kmax}}$$

$$L_{Netz} = \frac{(2,11kV)^2}{2 \cdot \pi \cdot 50Hz \cdot 500MVA} = 0,02834mH$$

$$L_1 = \frac{k \cdot n_{sek} \cdot U_N^2 \cdot u_{k12}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot S_{trafo}}$$

$$L_1 = \frac{0,1 \cdot 2 \cdot (2,11kV)^2 \cdot 8\%}{2 \cdot \pi \cdot 50Hz \cdot 8MVA} = 0,02824mH$$

$$L_2 = L_1 \cdot \frac{1-k}{k}$$

$$L_2 = 0,02824mH \cdot \frac{1-0,1}{0,1} = 0,2551mH$$

$$I_{K2} = \frac{U_1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (2 \cdot L_N + 2 \cdot L_1 + L_2)}$$

$$I_{K2} = \frac{1,1 \cdot 2,11kV}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50Hz \cdot 0,3683mH} = 11,58kA$$

Dauerkurzschlussstrom $I_{Kges} = 2 \cdot I_{K2} = 23,16kA$

2. Lichtbogenfestigkeit - Beispiel

Verlauf des Kurzschlussstroms:

Bei Eintreten eines Kurzschlusses wird der stationäre Zustand des Netzes gestört.

Der auftretende Kurzschlussstrom setzt sich zusammen aus einem **Dauerkurzschluss-Wechselstrom** und einem **Gleichanteil**.

Die Größe des Gleichanteils hängt vom **Eintrittszeitpunkt** ab. Im **ungünstigsten Fall** tritt der Kurzschluss während des **Spannungsnulldurchgangs** ein.

Dann weist der Kurzschlussstrom den **maximal möglichen Gleichstromanteil** auf. Gleichstromanteil und der Dauerkurzschlussstrom addieren sich zum maximalen Kurzschlussstrom.

$$I_S = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{K2}$$

Kurzschlussstrom:

$$i_{K2}(t) = \sqrt{2} \cdot I_{K2} \cdot \left(\sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \alpha - \varphi_K) - \sin(\alpha - \varphi_K) \cdot e^{-\frac{t}{T_K}} \right)$$

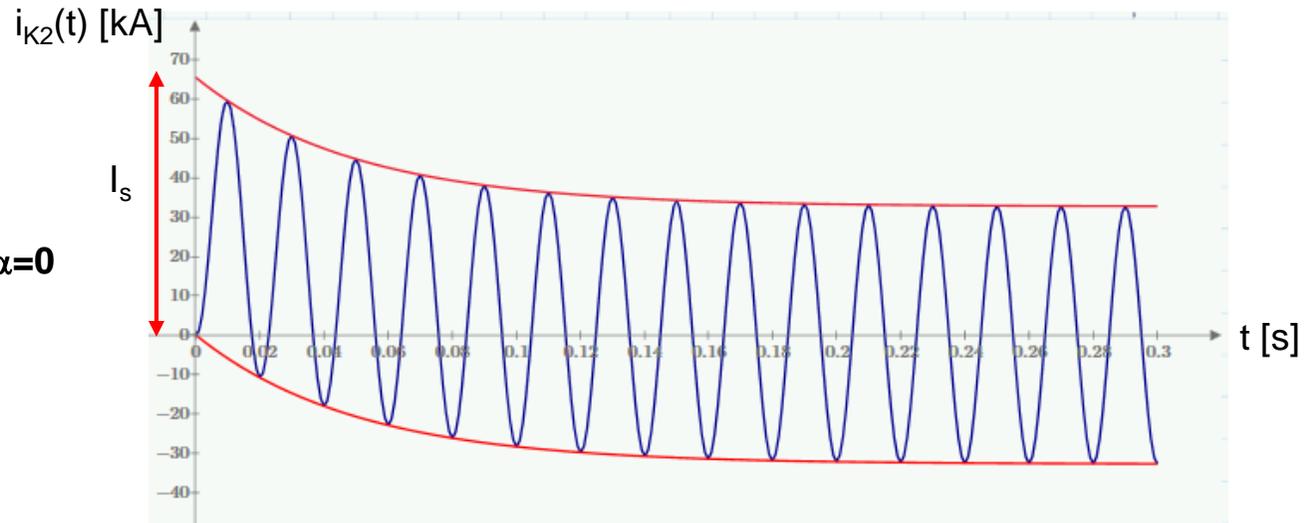
mit

- α : Auftreten des Fehlers in Bezug auf den Spannungsnulldurchgang ($\alpha=0$: im Nulldurchgang)
- φ_K : Verhältnis der Reaktanzen zu den ohmschen Anteilen (typisch: $X/R=10$) $\varphi_K = \arctan\left(\frac{X}{R}\right)$
- T_K : Zeitkonstante $T_K = \frac{L}{R}$

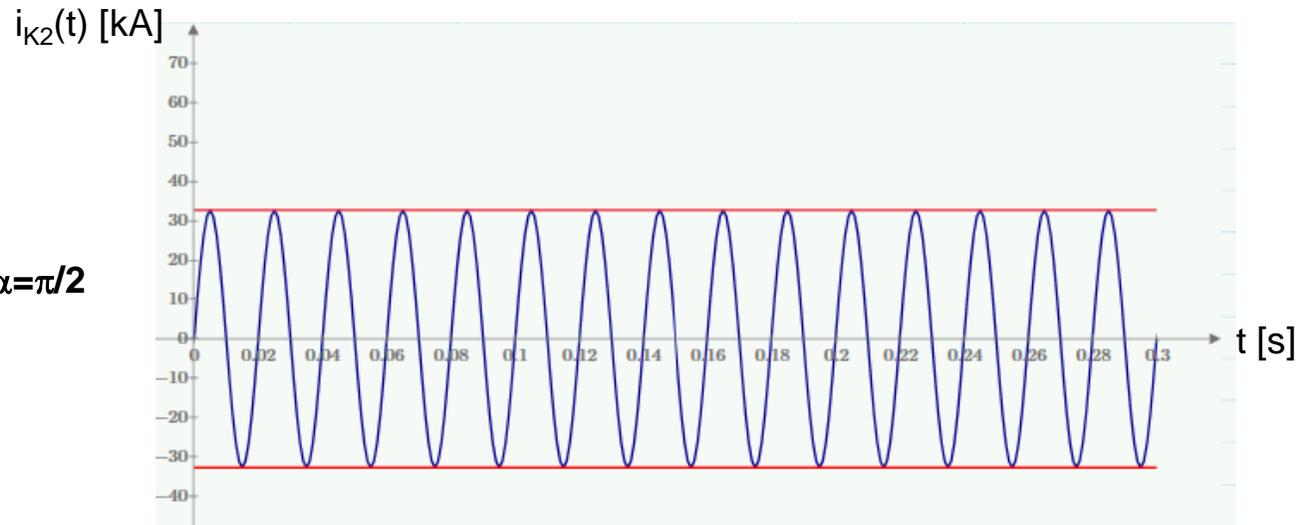
2. Lichtbogenfestigkeit - Beispiel

Kurzschlussfall:

- Phase 1: $\alpha=0$
- $X/R=0,1$
- $T_K=50$ ms



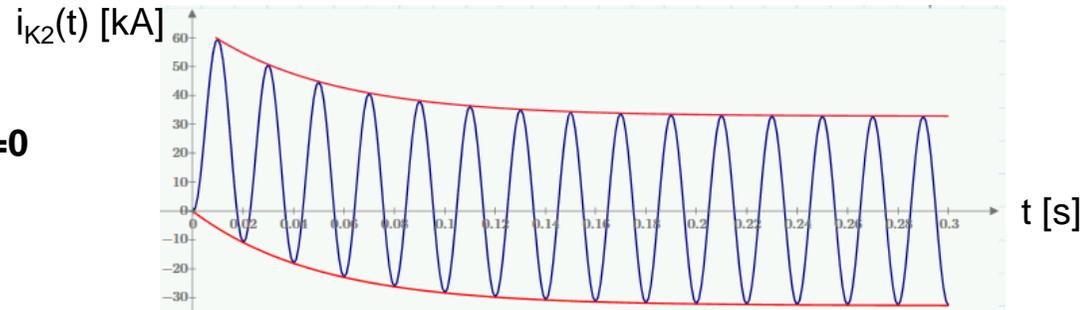
- Phase 1: $\alpha=\pi/2$
- $X/R=0,1$
- $T_K=50$ ms



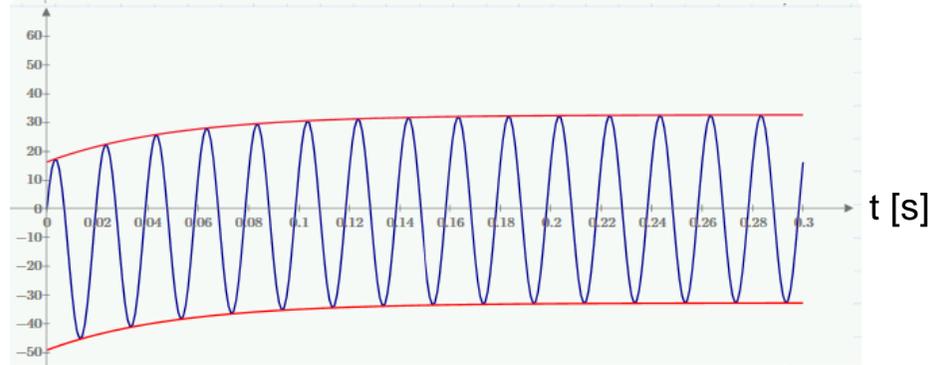
2. Lichtbogenfestigkeit - Beispiel

Kurzschlussfall:

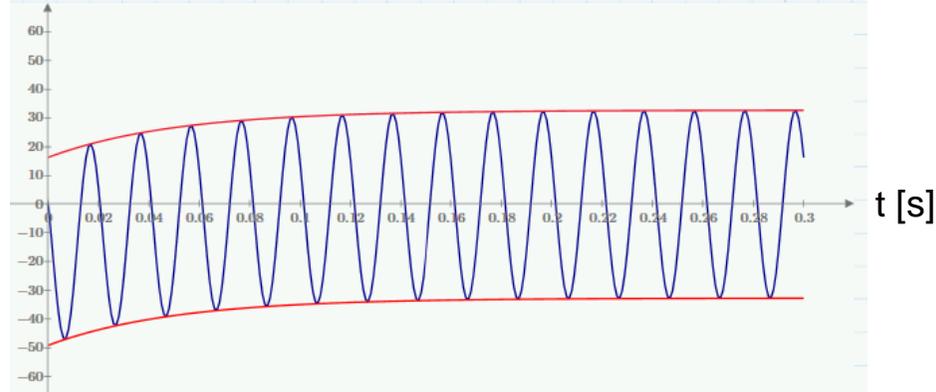
- Phase 1: $\alpha=0$
- $X/R=0,1$
- $T_K=50$ ms



- Phase 2: $\alpha=4\pi/3$
- $X/R=0,1$
- $T_K=50$ ms



- Phase 3: $\alpha=2\pi/3$
- $X/R=0,1$
- $T_K=50$ ms



2. Lichtbogenfestigkeit

Möglichkeiten zur Risikominimierung:

- **Fehlertolerantes Design**
- Berücksichtigung von **Sicherheitsreserven**
- **Räume** dürfen während des Betriebs **nicht betreten** werden
- **Lichtbogenfestes Design:**
 - **Einbau von Sicherungen**
 - Durch schnelle optische Störlichtbogenerkennung und Kurzschließen, d.h. Löschen des Lichtbogens
 - Durch mechanische Maßnahmen, die eine Personengefährdung im Falle eines Lichtbogens minimieren

Beides muss durch geeignete Test nachgewiesen werden.

- **Trend:**
 - Klarer Trend zu **erhöhter Personensicherheit**, d.h. störlichtbogenfesten Anlagen (z.B. in der Öl- und Gasindustrie)
 - Bisher: Tests und Zertifizierung in Anlehnung an Schaltanlagennorm (z.B. IEC 62271-200 „Metallgekapselte Wechselstrom-Schaltanlagen für Bemessungsspannungen über 1 kV bis einschließlich 52 kV“)

2. Lichtbogenfestigkeit

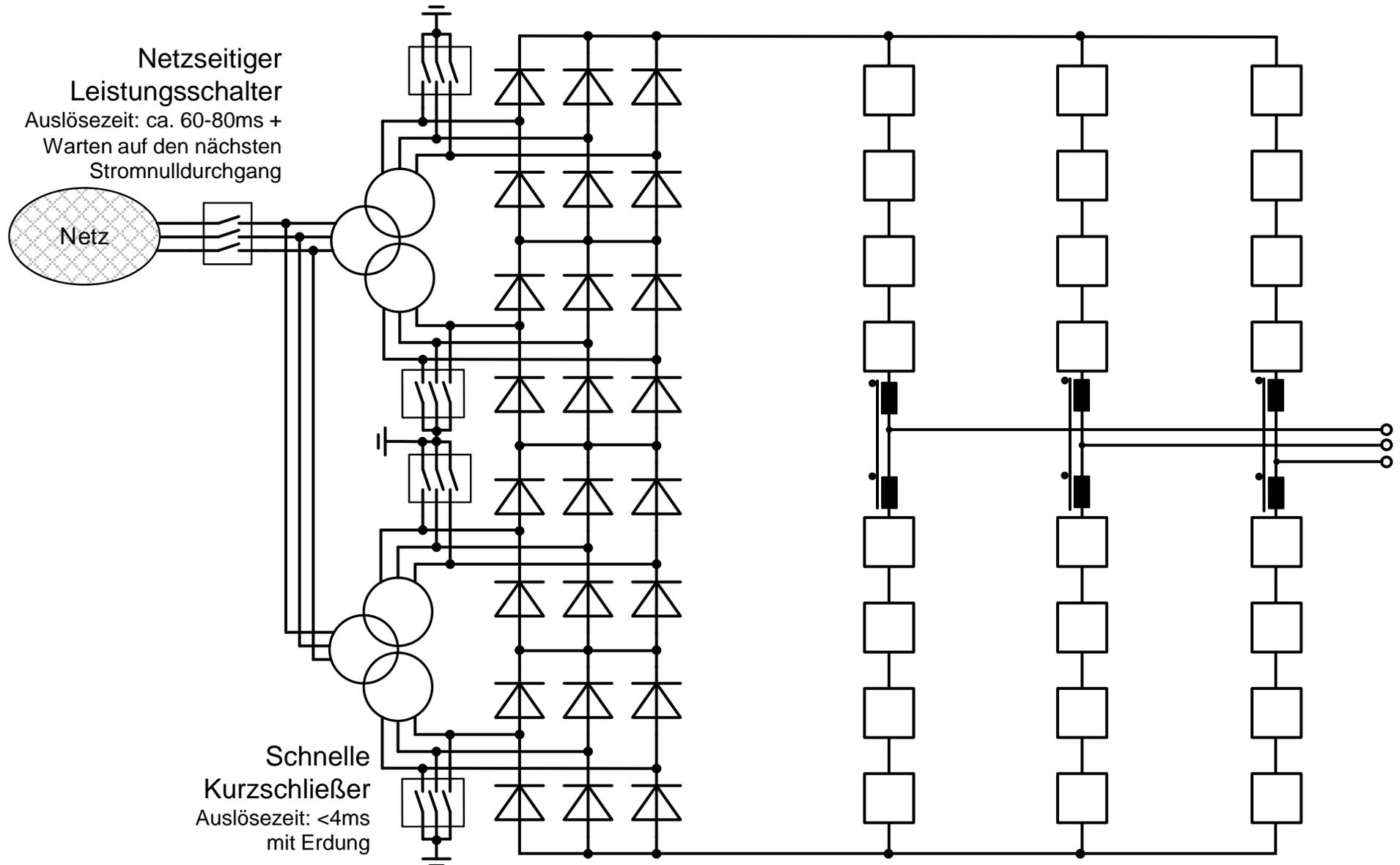
Möglichkeiten zur Risikominimierung:

- **Fehlertolerantes Design**
- Berücksichtigung von **Sicherheitsreserven**
- **Räume** dürfen während des Betriebs **nicht betreten** werden
- **Lichtbogenfestes Design:**
 - Einbau von Sicherungen
 - **Durch schnelle optische Störlichtbogenerkennung und Kurzschließen, d.h. Löschen des Lichtbogens**
 - Durch mechanische Maßnahmen, die eine Personengefährdung im Falle eines Lichtbogens minimieren

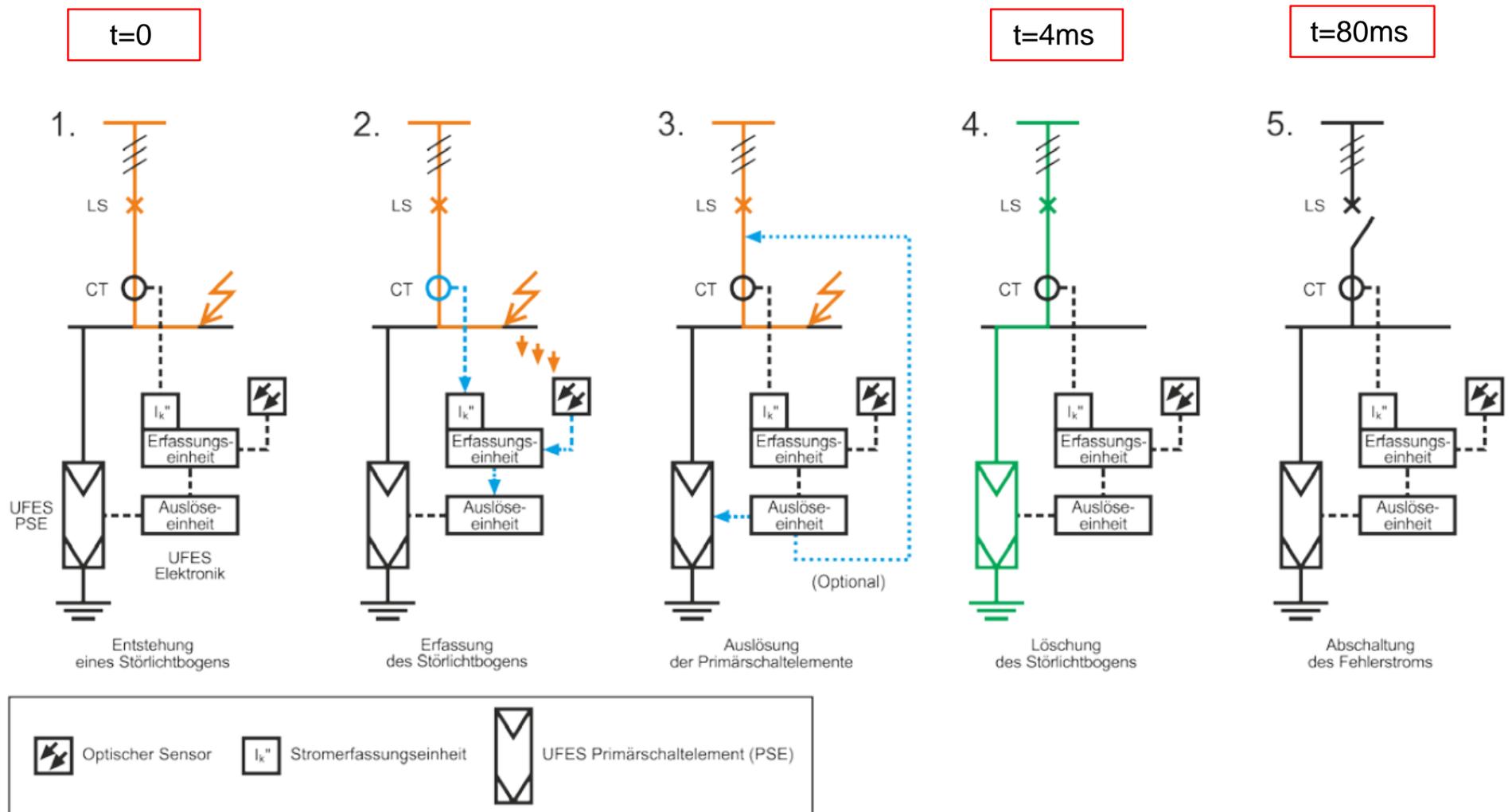
Beides muss durch geeignete Test nachgewiesen werden.

- **Trend:**
 - Klarer Trend zu **erhöhter Personensicherheit**, d.h. störlichtbogenfesten Anlagen (z.B. in der Öl- und Gasindustrie)
 - Bisher: Tests und Zertifizierung in Anlehnung an Schaltanlagennorm (z.B. IEC 62271-200 „Metallgekapselte Wechselstrom-Schaltanlagen für Bemessungsspannungen über 1 kV bis einschließlich 52 kV“)

2. Lichtbogenfestigkeit – Lichtbogenfestes Design - Störlichtbogenerkennung

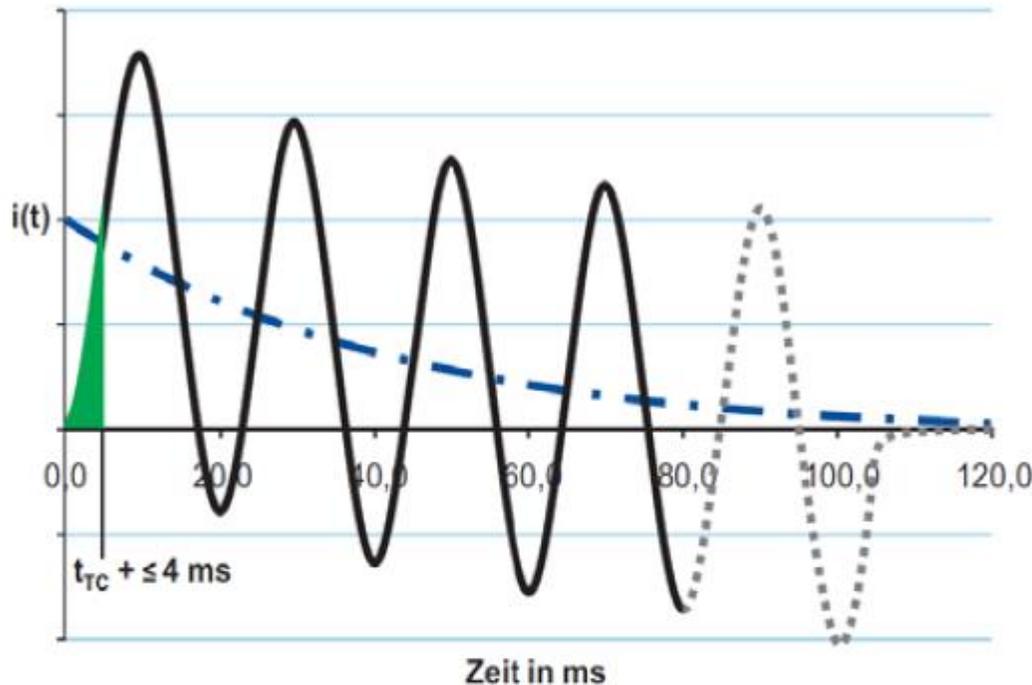


2. Lichtbogenfestigkeit – Lichtbogenfestes Design - Störlichtbogenerkennung



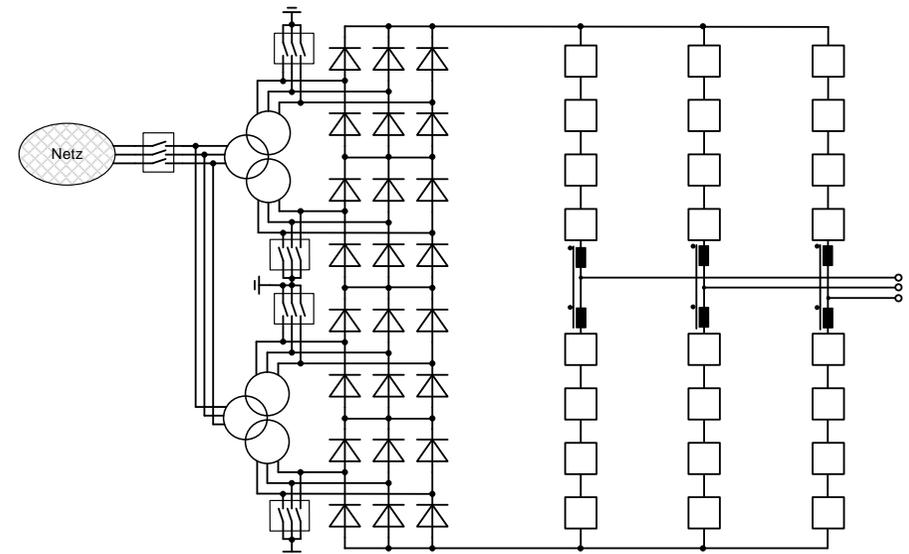
Quelle: ABB

2. Lichtbogenfestigkeit – Lichtbogenfestes Design - Störlichtbogenerkennung



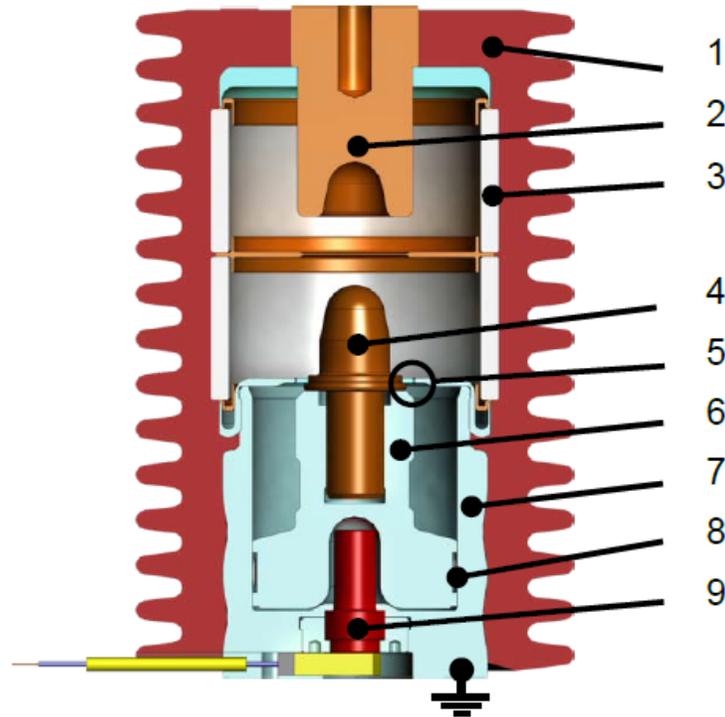
- Kurzschlussstrom I_k
- - - DC-Komponente
- Störlichtbogendauer mit UFES
- ⋯ Finale Abschaltung durch Leistungsschalter - 80 ms + Zeit x
- t_{TC} Zeit bis zum Erreichen der Auslösekriterien

- Effektive Schadensbegrenzung erfordert schnellste Intervention
- Löschzeit des ultraschnellen Erdungsschalters: < 4 ms nach Erfassung des Fehlers



Quelle: ABB

2. Lichtbogenfestigkeit – Lichtbogenfestes Design - Störlichtbogenerkennung



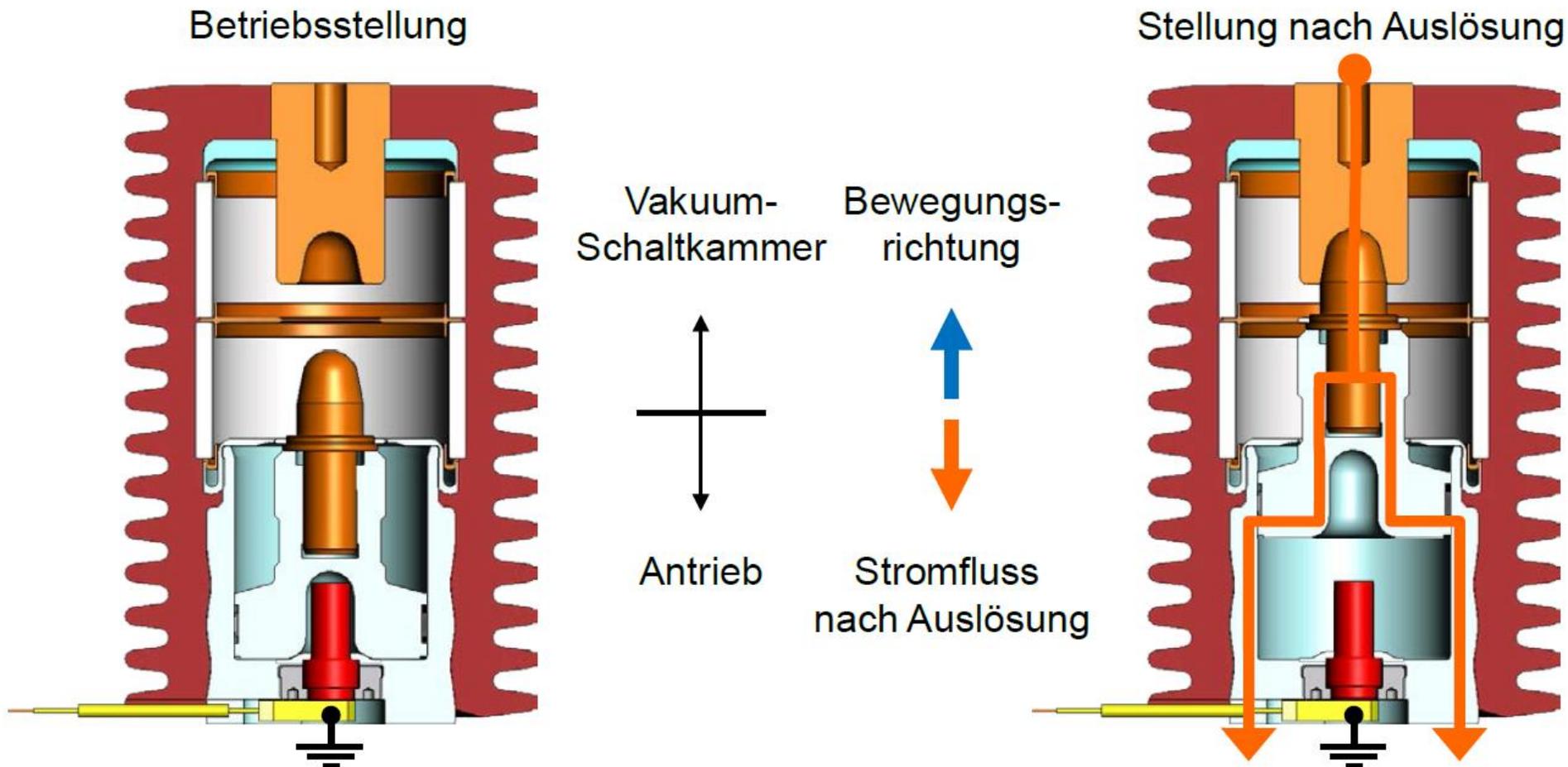
- | | |
|-------------------------|------------------------------|
| 1. Epoxidharz Isolation | 6. Kolben |
| 2. Festkontakt | 7. Zylinder |
| 3. Keramik Isolator | 8. Bewegliches Kontaktsystem |
| 4. Beweglicher Kontakt | 9. Mikro-Gas-Generator |
| 5. Sollbruchstelle | |

Primärschaltelement Typ U1

- Vakuum-Schaltkammer und Schaltantrieb in einer kompakten Schalteinheit integriert
- Schneller und zuverlässiger Mikro-Gas-Generator Antrieb
- Schnelle Schaltzeit von $\sim 1,5$ ms
- Einfache Handhabung
- Geringer Wartungsaufwand
- Flexible Installationsmöglichkeiten

Quelle: ABB

2. Lichtbogenfestigkeit – Lichtbogenfestes Design - Störlichtbogenerkennung



Quelle: ABB

2. Lichtbogenfestigkeit – Lichtbogenfestes Design

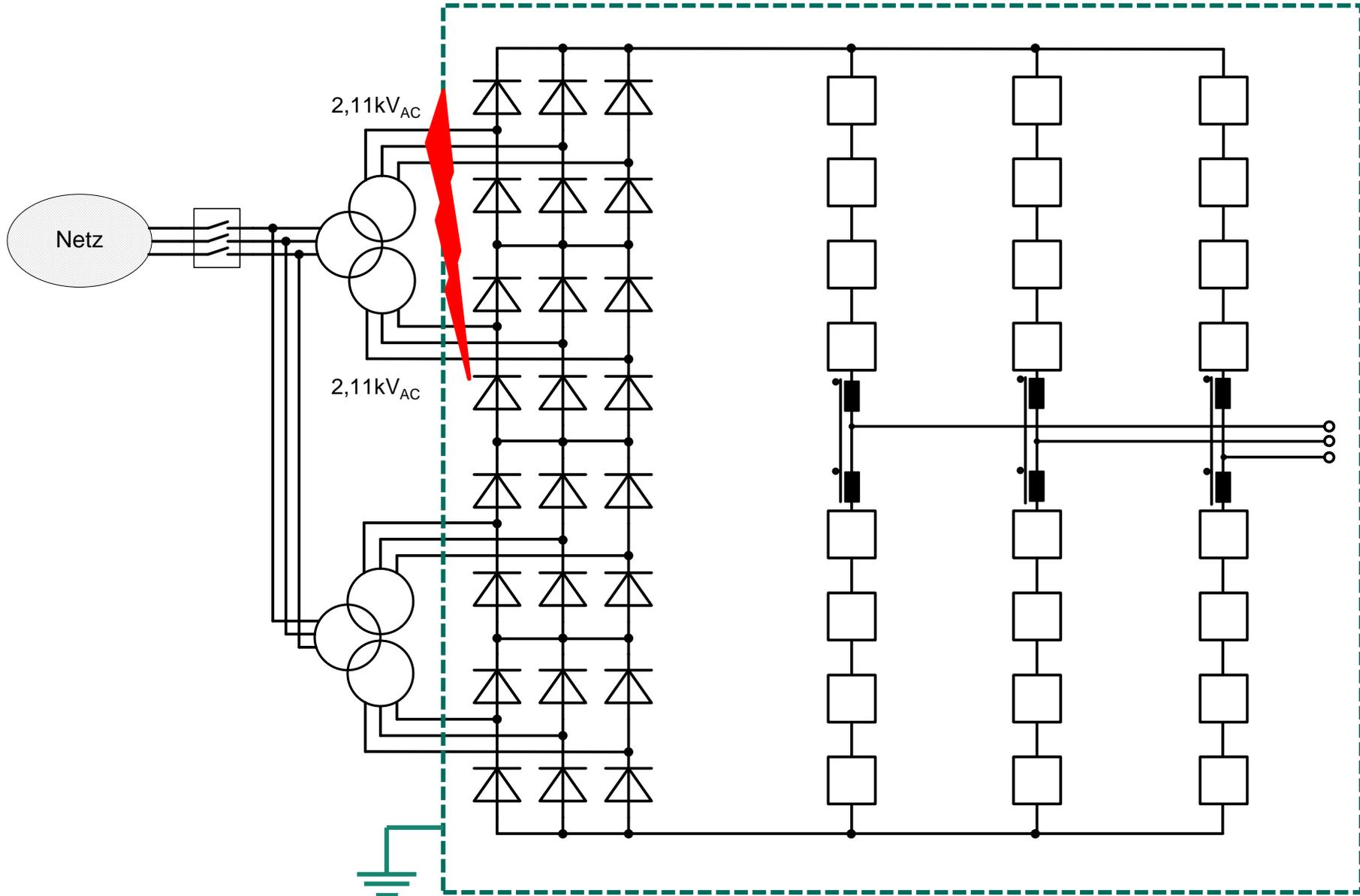
Möglichkeiten zur Risikominimierung:

- **Fehlertolerantes Design**
- Berücksichtigung von **Sicherheitsreserven**
- **Räume** dürfen während des Betriebs **nicht betreten** werden
- **Lichtbogenfestes Design:**
 - Einbau von Sicherungen
 - Durch schnelle optische Störlichtbogenerkennung und Kurzschließen, d.h. Löschen des Lichtbogens
 - **Durch mechanische Maßnahmen, die eine Personengefährdung im Falle eines Lichtbogens minimieren**

Beides muss durch geeignete Test nachgewiesen werden.

- **Trend:**
 - Klarer Trend zu **erhöhter Personensicherheit**, d.h. störlichtbogenfesten Anlagen (z.B. in Netzapplikationen oder in der Prozessindustrie)
 - Bisher: Tests und Zertifizierung in Anlehnung an Schaltanlagennorm (z.B. IEC 62271-200 „Metallgekapselte Wechselstrom-Schaltanlagen für Bemessungsspannungen über 1 kV bis einschließlich 52 kV“)

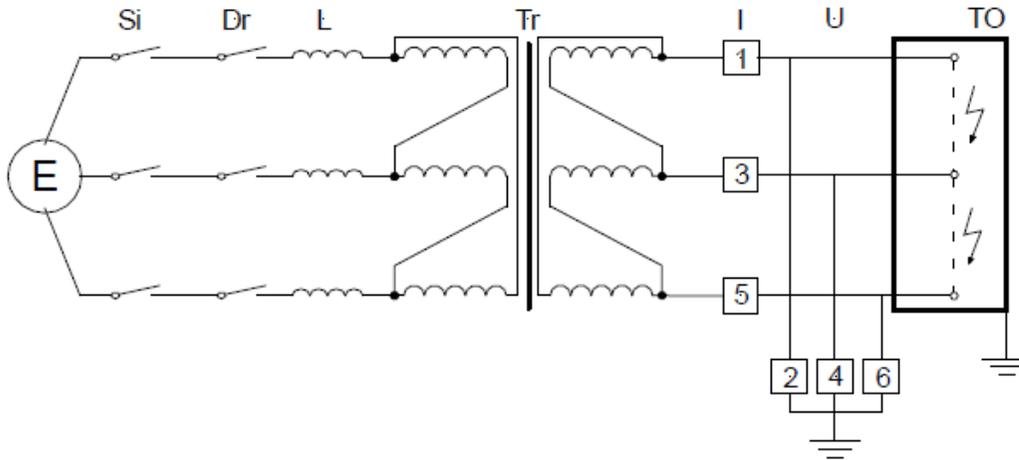
2. Lichtbogenfestigkeit – Lichtbogenfestes Design – Mech. Maßnahmen



2. Lichtbogenfestigkeit – Lichtbogenfestes Design – Mech. Maßnahmen

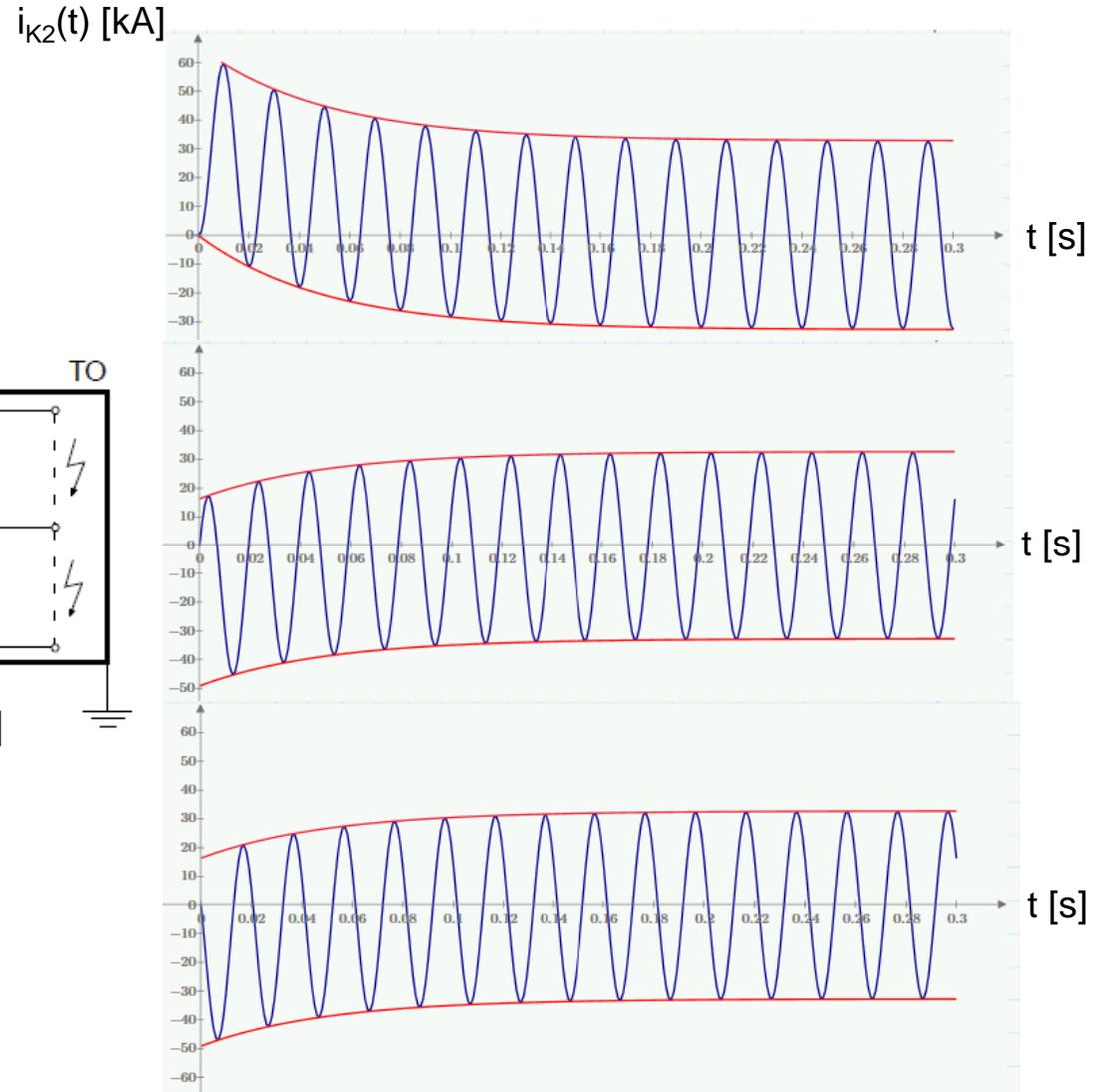
Testschaltung:

- Einstellung des Dauerkurzschlussstroms über die Einspeisung



E	Power supply	I	Current measurement
Si	Master breaker	U	Voltage measurement
Dr	Making switch	P	Pressure measurement
L	Current-limiting reactor	TO	Test object
Tr	Short-circuit transformer	1 - 6	Measuring points

Figure 3: Test circuit



Quelle: IPH, Siemens

2. Lichtbogenfestigkeit – Lichtbogenfestes Design – Mech. Maßnahmen

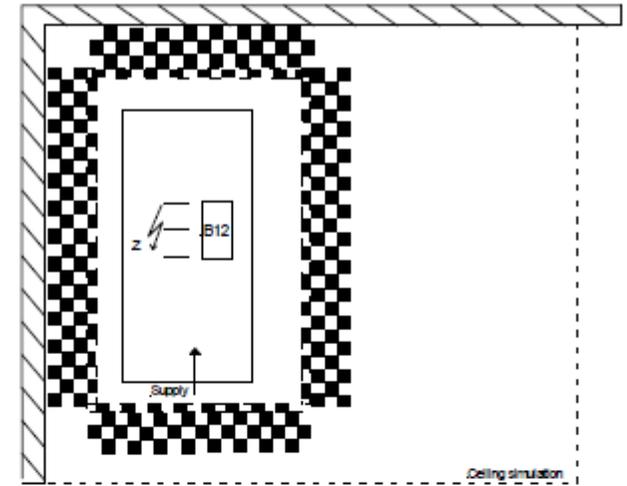


Figure 1: Test object in a free-standing position (top view)

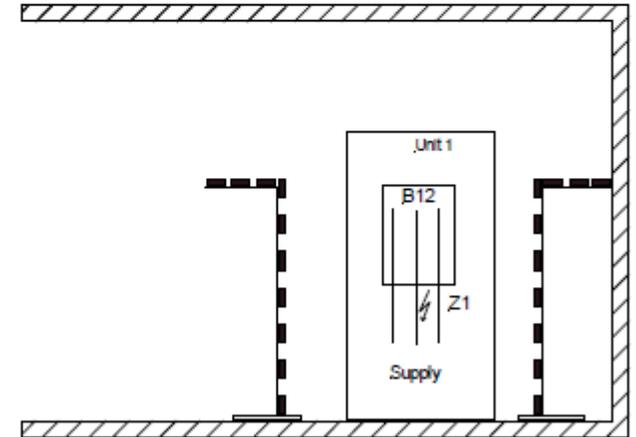


Figure 2: Test object in a free-standing position (front view)

Point of initiation:

Z1 Three-phase at the end of the cable terminals

Quelle: IPH, Siemens

2. Lichtbogenfestigkeit – Licht

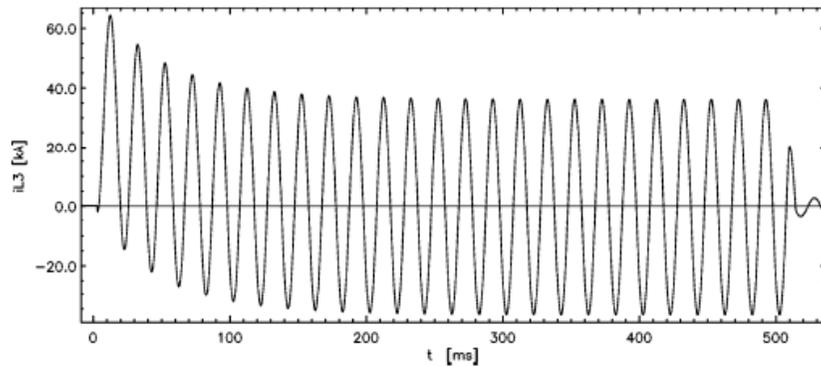
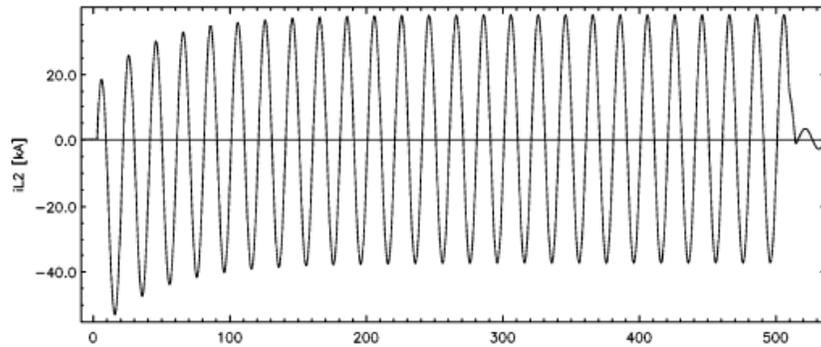
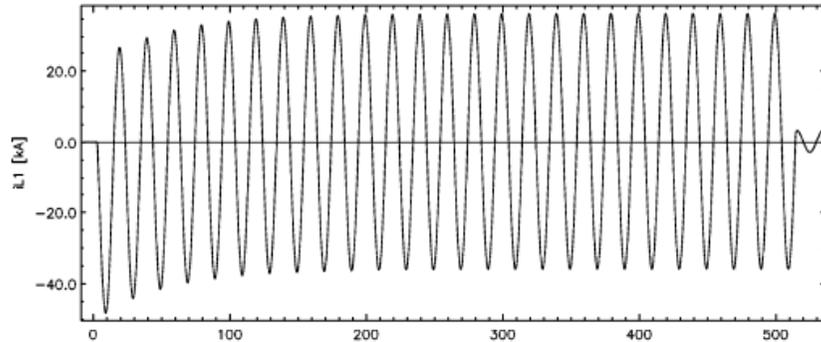
Test auf Lichtbogenfestigkeit:

- Ort des Lichtbogens:
Höchst möglicher
Energieeintrag
- Realistische
Nachbildung der
mechanischen
Umgebungsbeding-
ungen (z.B. Materialien,
umbauter Raum)

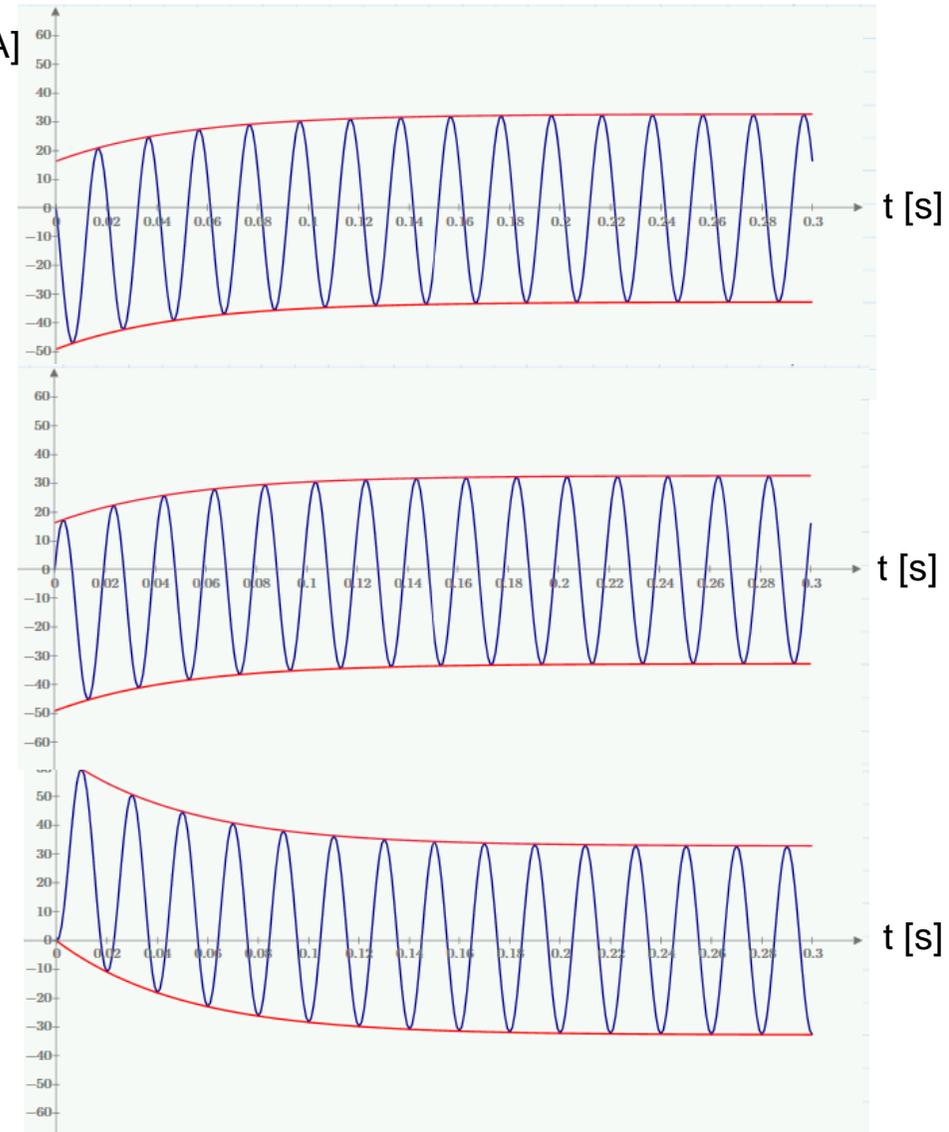


Quelle: Siemens

2. Lichtbogenfestigkeit – Lichtbogenfestes Design – Mech. Maßnahmen



$i_{K2}(t)$ [kA]



Quelle: IPH, Siemens

2. Lichtbogenfestigkeit – Lichtboger

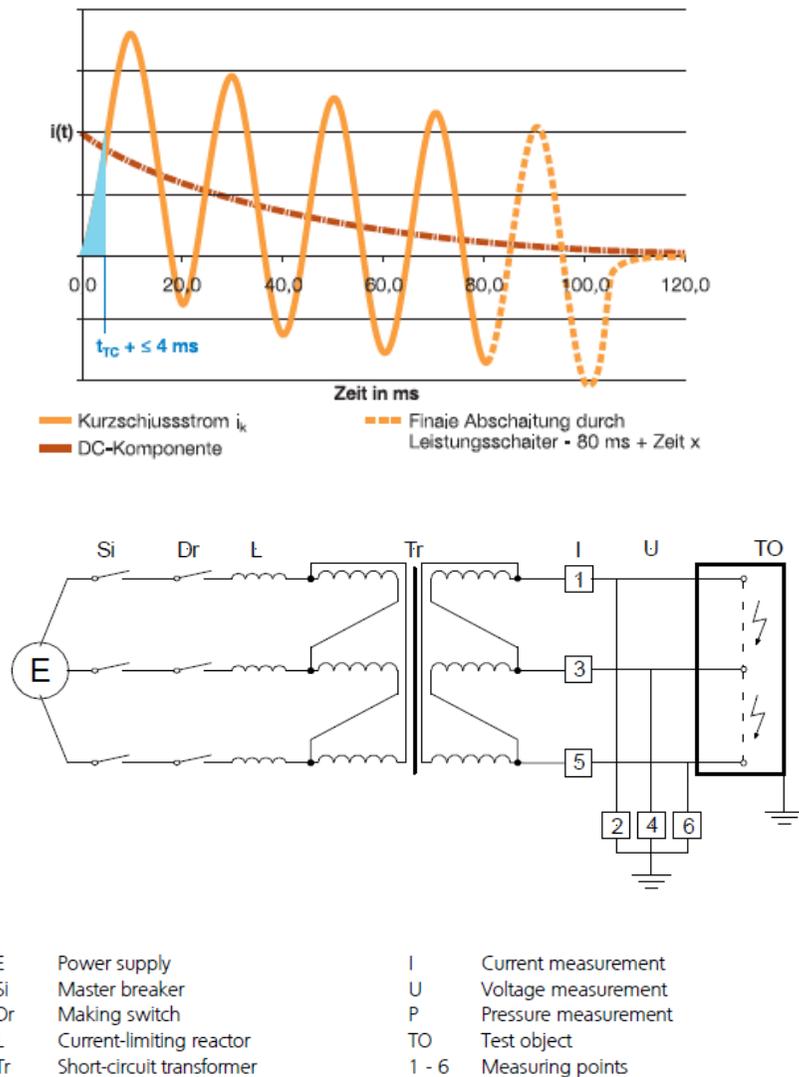
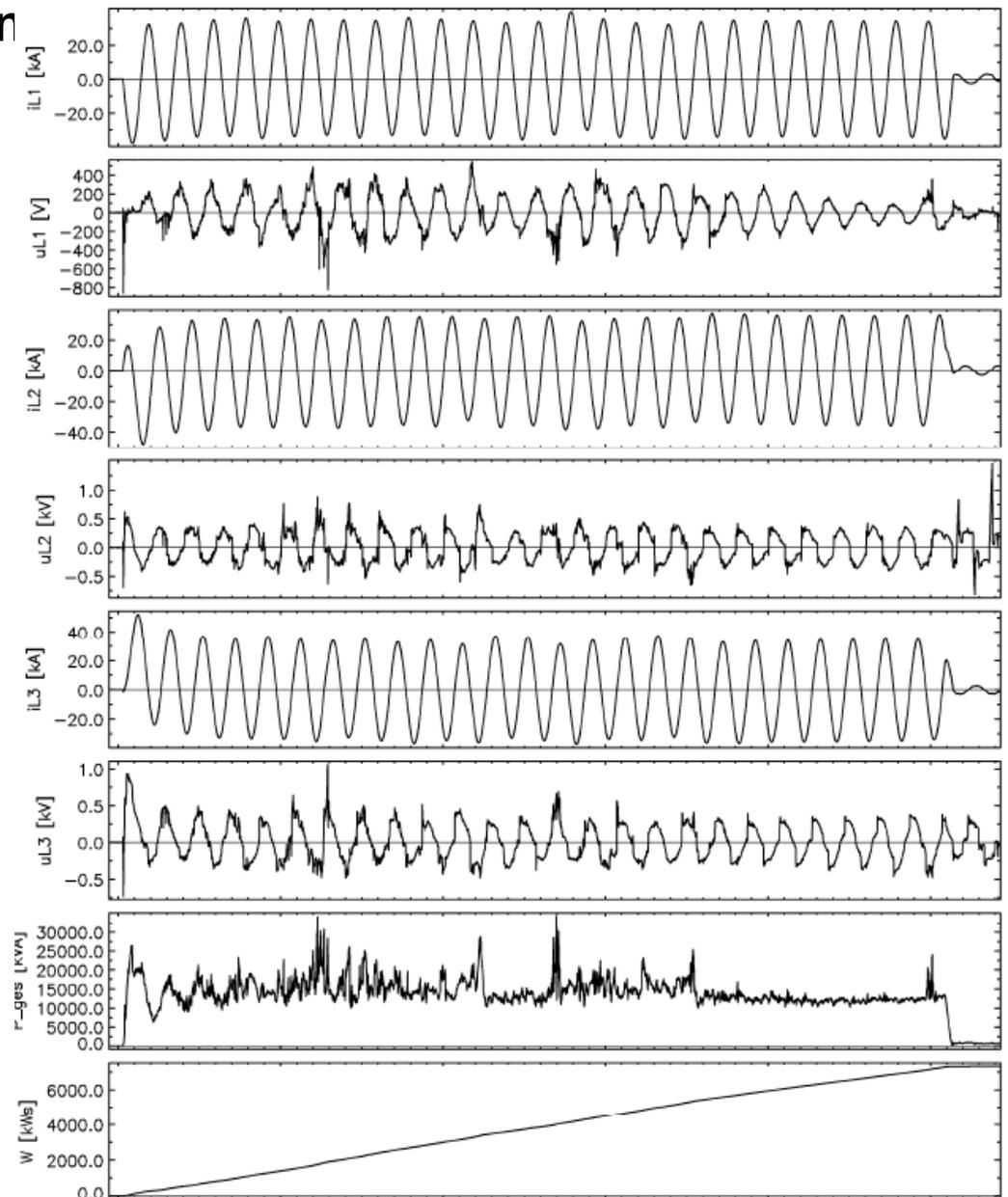


Figure 3: Test circuit



2. Lichtbogenfestigkeit - Zusammenfassung

- **Bisher:**
Lichtbogenfestigkeit nur berücksichtigt in Schaltanlagen oder elektrischen Maschinen
- **Zukünftig:**
Lichtbogenfestigkeit zunehmend auch für Umrichter gefordert, da steigende Anforderungen an Personensicherheit
- Lichtbogenfestigkeit muss bereits in einer sehr frühen Phase der Entwicklung mit berücksichtigt werden
- **Anforderungen** sind vorab zu klären
- **Geeignete Abhilfe** sind zu definieren:
 - Sicherungen
 - Optische Störlichtbogenerkennung und Kurzschließen
 - Robuste Mechanik
 - Auslegungskriterien um den Fehlerstrom zu begrenzen
- **Nachweis** durch geeignete Tests

Gliederung

Stromrichterauslegung

1. Isolationskoordination
2. Lichtbogenfestigkeit
3. **Strom- und Spannungscoordination**
4. Zusammenfassung

2. Lichtbogenfestigkeit

Marktvorbau

Produktentwicklung

Kommerzialisierung

Meilenstein:

Projektstart

Lastenheft

Beschreibung der Anforderungen an das Produkt

Pflichtenheft

Beschreibung des Produkteigenschaften

Beginn Typprüfung

Test an einem seriennahen Prototyp

Lieferfreigabe

Vorfeldentwicklung

Technologiebeobachtung, Machbarkeitsstudien

zum Projektstart

Festlegung auf Topologie, Leistungsbereich, Anwendung

Grobauslegung

Simulation, Beurteilung von Risiken als techn. Input f. d.

Lastenheft

Auslegung, Design

Schaltplanentwurf, **Spannungs- und Isolationskoordination**, **Stromkoordination**, Halbleiterauslegung, als Input für das **Pflichtenheft**

Produktentwicklung, u.a.

Detailentwicklung, Spezifikation der Komponenten, entwicklungsbegleitende Tests, Erstellung der Prüfpläne für Typ- und Stückprüfung, Vorbereitung der Fertigung

Typprüfung

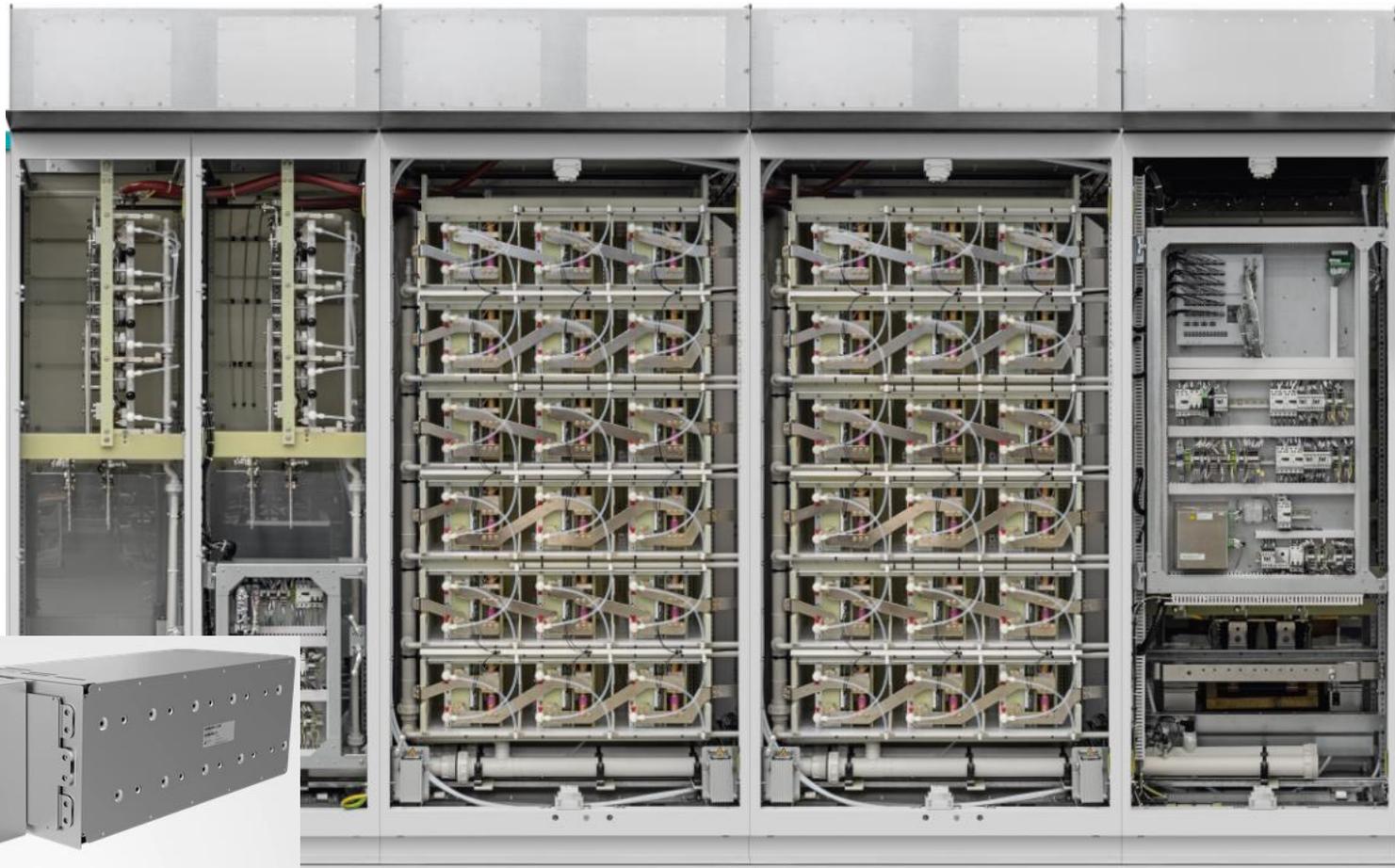
Test, ob das Produkt alle Anforderungen aus Richtlinien, Gesetzen, Normen und Kundenanforderungen hinsichtlich

- Elektrik,
- Elektromagn. Verträglichkeit (EMV),
- Mechanik, Konstruktion,
 - Klima/ Umwelt,
- Schutz und Sicherheit,
- Überwachung, Diagnose,
 - Service,
 - Qualität erfüllt

Tätigkeiten in Forschung & Entwicklung

3. Strom- und Spannungscoordination

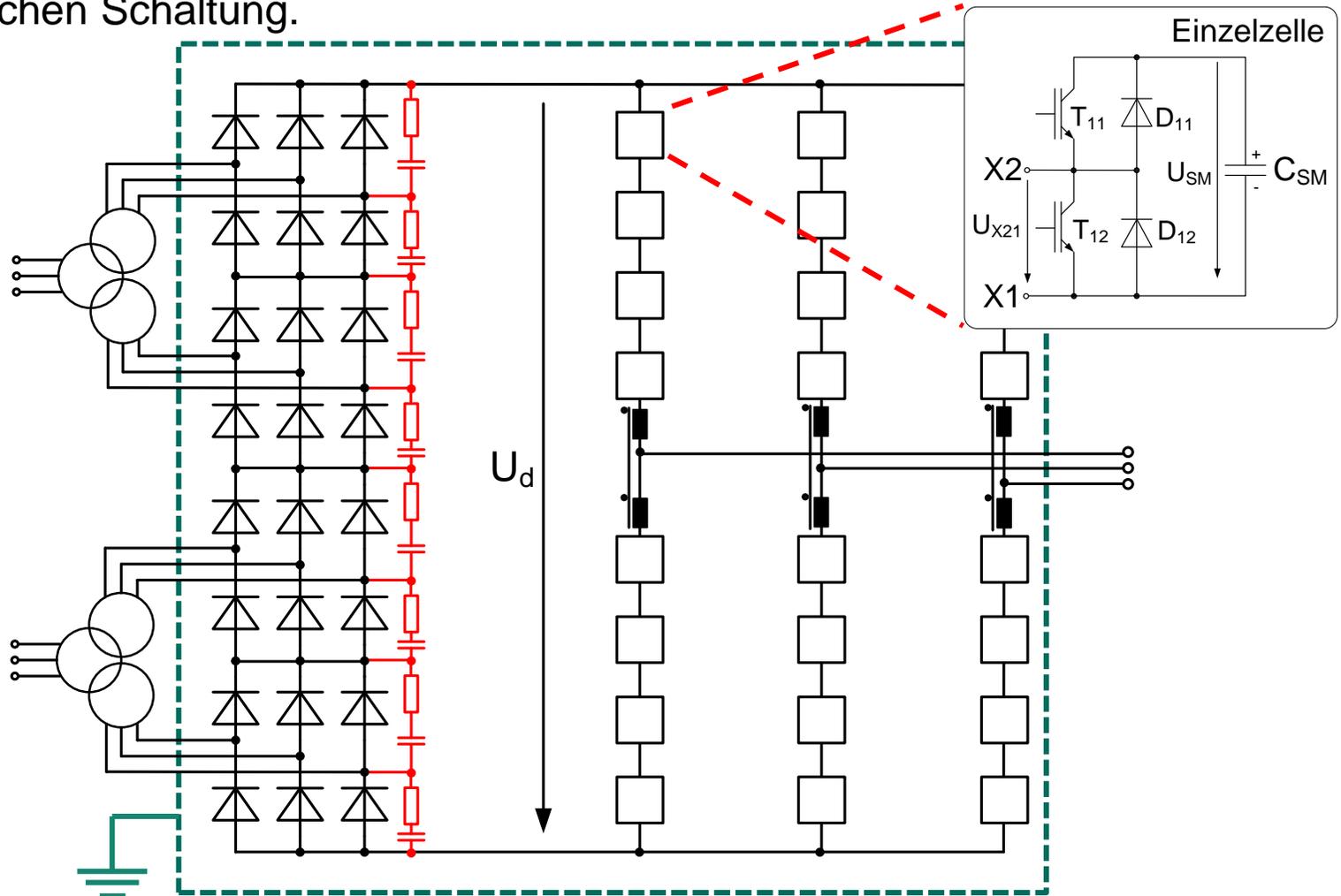
Strom- und Spannungscoordination gibt einen **ersten Überblick** über auslegungsrelevante **Ströme und Spannungen** im Leistungsteil einer leistungselektronischen Schaltung.



Quelle: Siemens

3. Strom- und Spannungscoordination

Strom- und Spannungscoordination gibt einen **ersten Überblick** über auslegungsrelevante **Ströme und Spannungen** im Leistungsteil einer leistungselektronischen Schaltung.



3. Spannungscoordination

Berechnung von:

- **Effektivwerte** von Spannungen an Leistungshalbleitern und passiven Bauelementen (z.B. Kondensatoren, Widerständen) zur Auslegung von
 - Isolationsstrecken (Kriechstrecken),
 - Bemessungsspannung von AC-Kondensatorenunter Berücksichtigung der „worst case“ Betriebsbedingungen, z.B.
 - Betrieb bei maximaler Netz- bzw. Zwischenkreisspannung im Nennbetrieb.
- **Periodische und nicht-periodische Spitzenwerte** von Spannungen für die Dimensionierung von z.B.
 - Kondensatoren (u.a. relevant für die Lebensdauer),
 - von Halbleitern.

Beispiel DC-Kondensator:

Bemessungsspannung (Nennspannung) U_N

Größt- bzw. Scheitelwert der Spannung, für die der Kondensator dimensioniert und benannt ist (abweichend von anderen Normen für Wechselspannungskondensatoren nicht der Effektivwert!)

Stoßspitzenspannung U_S

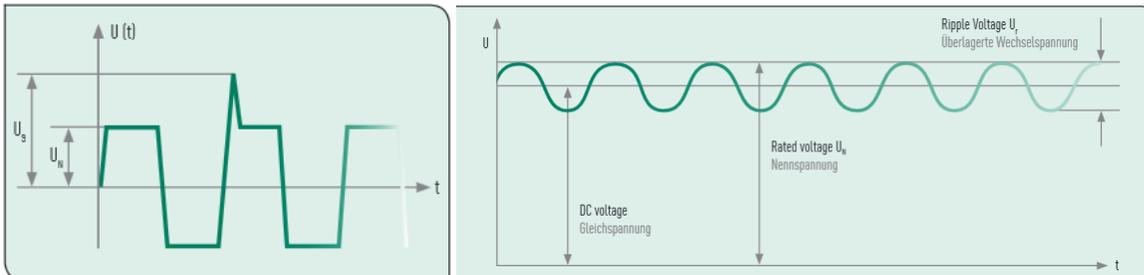
Höchster Spitzenwert, der vereinzelt kurzzeitig im Störfall auftreten darf. Maximale Anzahl 1000 mal mit einer Höchstdauer von jeweils 50 ms.

Effektive Wechselspannung U_{eff}

Maximal zulässiger Effektivwert von sinusförmiger Wechselspannung im Dauerbetrieb.

Überlagerte Wechselspannung U_r

Spitze-Spitze-Wert der Wechselkomponente der gleichgerichteten Spannung.



3. Spannungskoordination (Einschub: „FIT“-Rate)

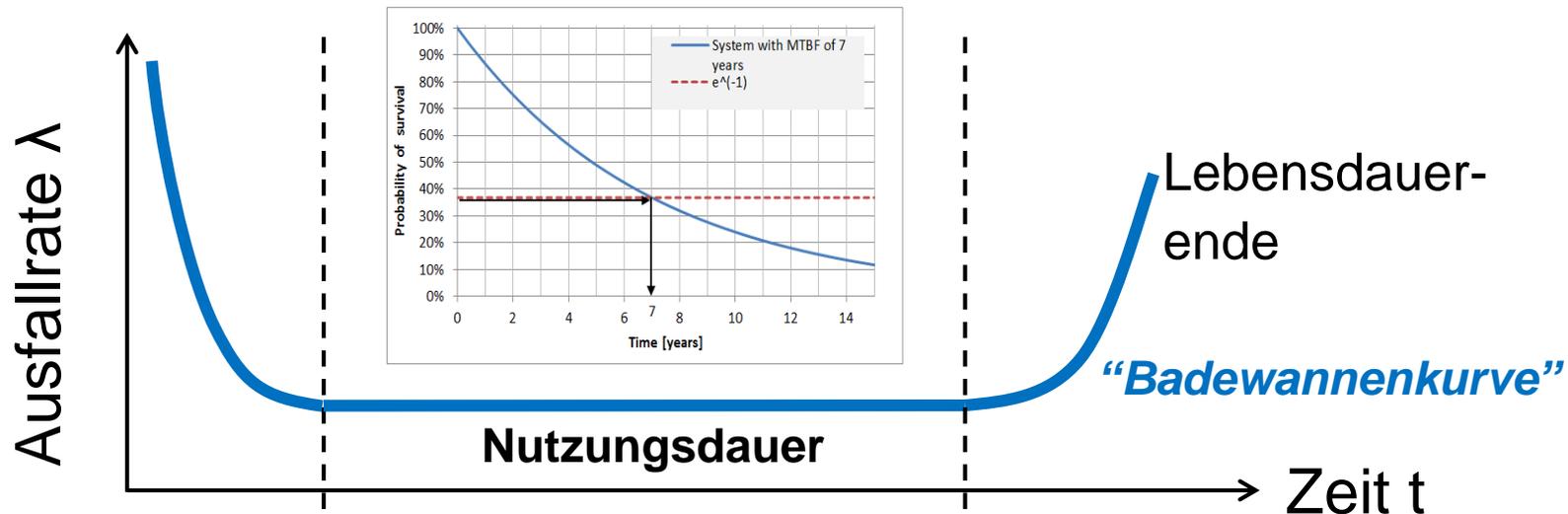
Frühausfälle
Fallende
Fehlerrate

Zufällige Fehler
konstante
Fehlerrate

Ausfälle durch Verschleiß
Steigende
Fehlerrate

$$FIT = \frac{\text{Ausfälle}}{10^9 h}$$

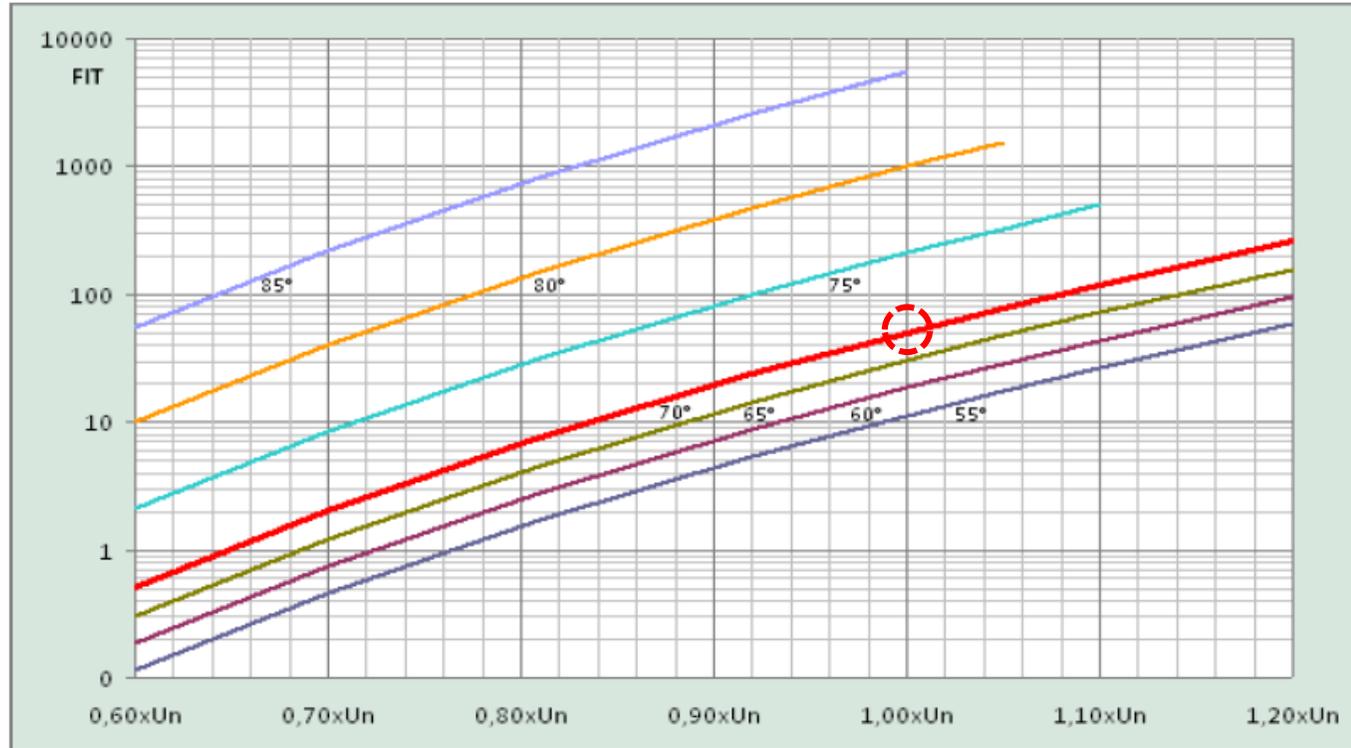
$$MTBF = \frac{1}{FIT}$$



- Bestimmung der Ausfallrate: Messungen mit großen Stichproben.

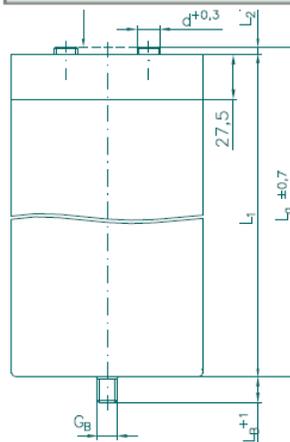
3. Spannungskoordination

Beispiel DC-Kondensator:



Characteristics

Rated capacitance	C_N	750 $\mu\text{F} \pm 5\%$
Rated d.c. voltage	$U_{N\text{DC}}$	1200 V
Max. ripple voltage	U_r	250 V
Non-recurrent surge voltage	U_s	1800 V
Rated energy	W_N	540 Ws
Maximum current (rms)	I_{max}	80 A
Maximum peak current	i	7.2 kA
Maximum surge current	I_s	21.6 kA
Series resistance	R_s	0.71 m Ω
Tangent of the loss angle	$\tan\delta_o$	2×10^{-4}
Self discharge time constant	$C \times R_{\text{le}}$	5000 s
Self inductance	L_e	50 nH
Thermal conditions		
Lowest operating temperature	θ_{min}	-25 $^\circ\text{C}$
Maximum operating temperature	θ_{max}	85 $^\circ\text{C}$
Thermal resistance		
Storage temperature	R_{th}	2 K/W
	θ_{storage}	-40..+85 $^\circ\text{C}$
failure rate		
reference service life		50 FIT*
at θ_{hotspot}		100000 h
		$\leq 70 \text{ }^\circ\text{C}$



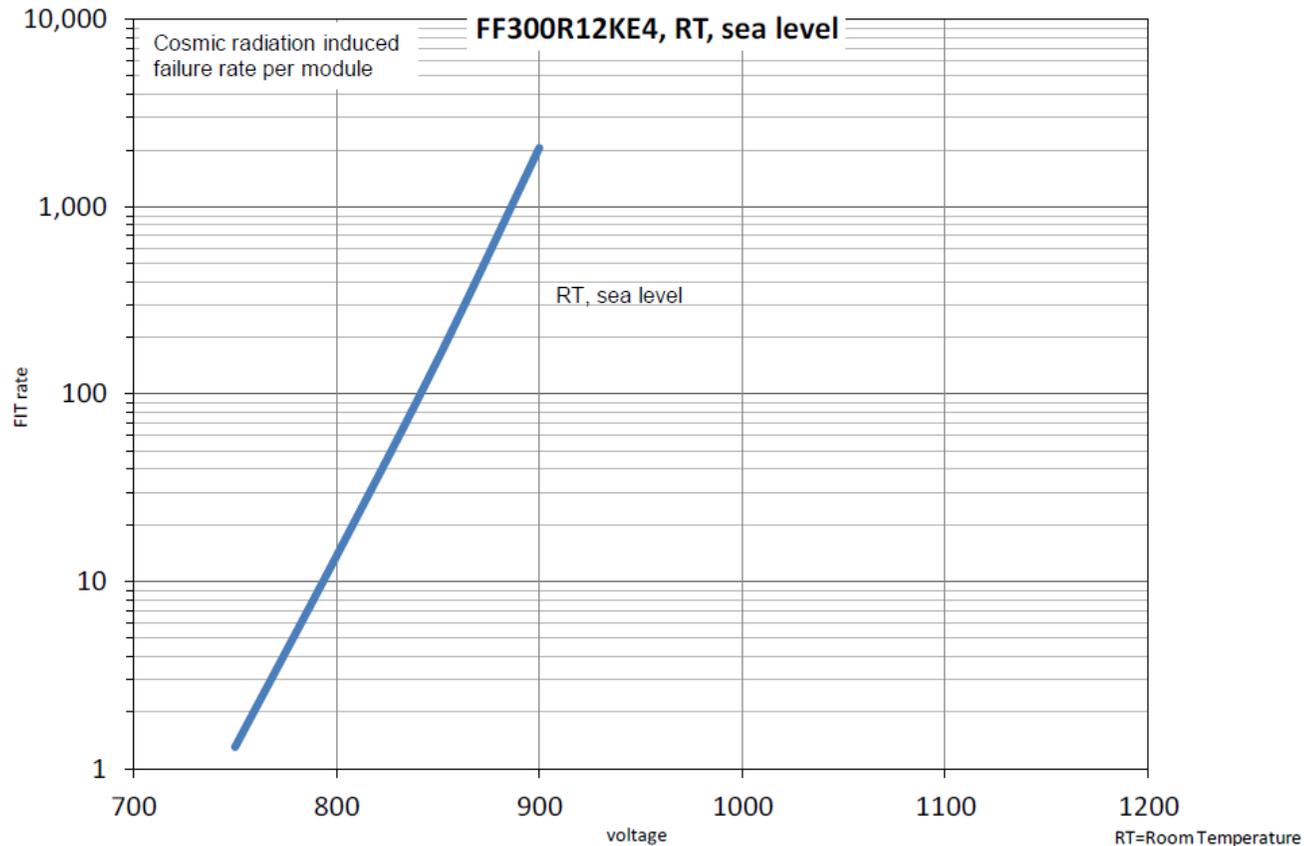
* See FIT-RATE diagram on pg.3

Quelle: Electronicon

3. Spannungskoordination

Beispiel 1200V-IGBT: Ausfallrate in Abhängigkeit der Zwischenkreisspannung

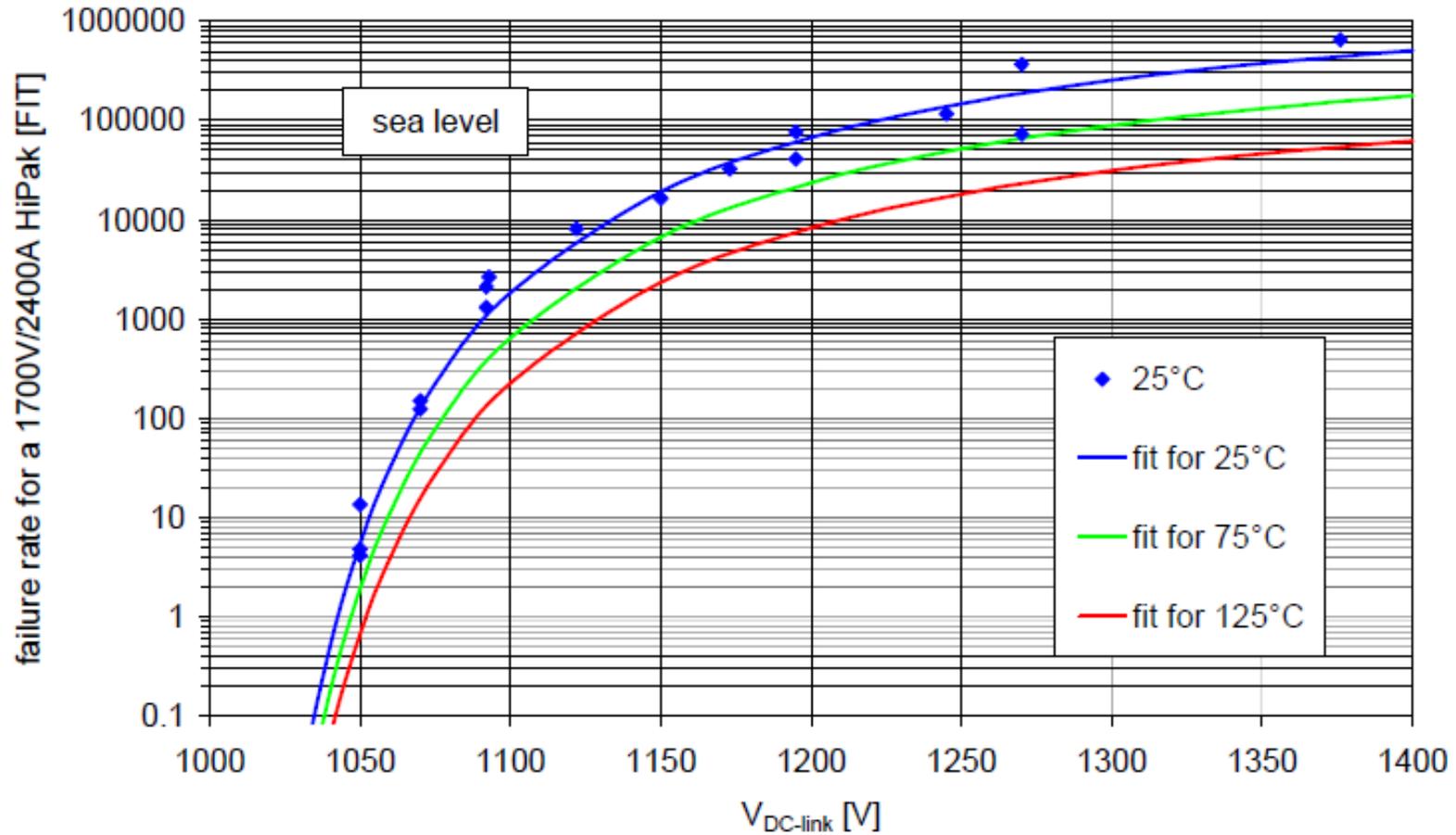
FF300R12KE4 – Fit rates vs. DC voltage



Quelle: Infineon

3. Spannungskoordination

Beispiel 1700V-IGBT: Ausfallrate in Abhängigkeit der Zwischenkreisspannung



Quelle: ABB

3. Spannungskoordination

Festlegung von Schutz- und Abschaltsschwellen (Beispiel: ZK-Spannung):

- falls vorhanden: Bei Versagen der SW-Schwelle, **Auslösung Kurzschließer zur Spannungsbegrenzung durch Hardware**, gleichzeitig Öffnen der ein- und ausgangsseitigen Schaltelemente **125%**
- falls vorhanden: **Auslösung Kurzschließer zur Spannungsbegrenzung durch Software**, gleichzeitig Öffnen der ein- und ausgangsseitigen Schaltelemente **123%**
- Impulssperre, d.h. Blockieren aller Schaltbefehle **120%**
- falls vorhanden: Einsatzschwelle Bremssteller **118%**
- Begrenzung der ZK-Spannung durch regelungstechnische Maßnahmen, z.B. U_{dmax} - *Betrieb* während des Bremsens **115%**
- Maximale ZK-Spannung bei 110% Netzspannung im Leerlauf **110%**
- **ZK-Spannung bei 100% Netzspannung im Leerlauf** **100% $U_{d,nenn}$**
- Minimale ZK-Spannung bei 90% Netzspannung unter Vollast **85%**
- Impulssperre wegen Unterspannung **80%**

z.B.:



U_d

3. Stromkoordination

Berechnung von:

- **Effektivwerte** von Strömen in
 - Stromschienen/Leiterbahnen
 - Passiven Bauelementen (z.B. Kondensatoren, Widerständen, Induktivitäten)zur (thermischen) **Auslegung** von z.B.
 - Querschnitten,
 - Verschraubungen, Übergangsstellen,
 - Kühlungunter Berücksichtigung der „**worst case**“ Betriebsbedingungen, z.B.
 - maximale Leistung bei minimaler Netz- bzw. Zwischenkreisspannung
 - schlechtestem Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$,
 - Feldschwächbetrieb, d.h. Betrieb eines Motors mit minimaler Spannung und maximaler Leistung.

Beispiel DC-Kondensator:

Maximalstrom I_{\max}

Maximaler Effektivwert des im Dauerbetrieb zulässigen Stromes. Die im Datenblatt angegebenen Werte ergeben sich entweder aus der maximal zulässigen Verlustleistung oder der Stromtragfähigkeit der Anschlüsse.

3. Stromkoordination

Berechnung von:

- **Mittelwerte** von Strömen in Halbleitern
 - für die Berechnung von Schaltverlusten und Durchlassverlusten.
- **Spitzenströme** für die Dimensionierung
 - von Halbleitern (maximale periodische Abschaltströme),

Periodischer Kollektor-Spitzenstrom Repetitive peak collector current	$t_p = 1 \text{ ms}$	I_{CRM}	2800	A
--	----------------------	-----------	------	---

- Kondensatoren,

Beispiel DC-Kondensator:

Spitzenstrom \hat{I}

Periodisch zulässiger Spitzenwert des Stromes.

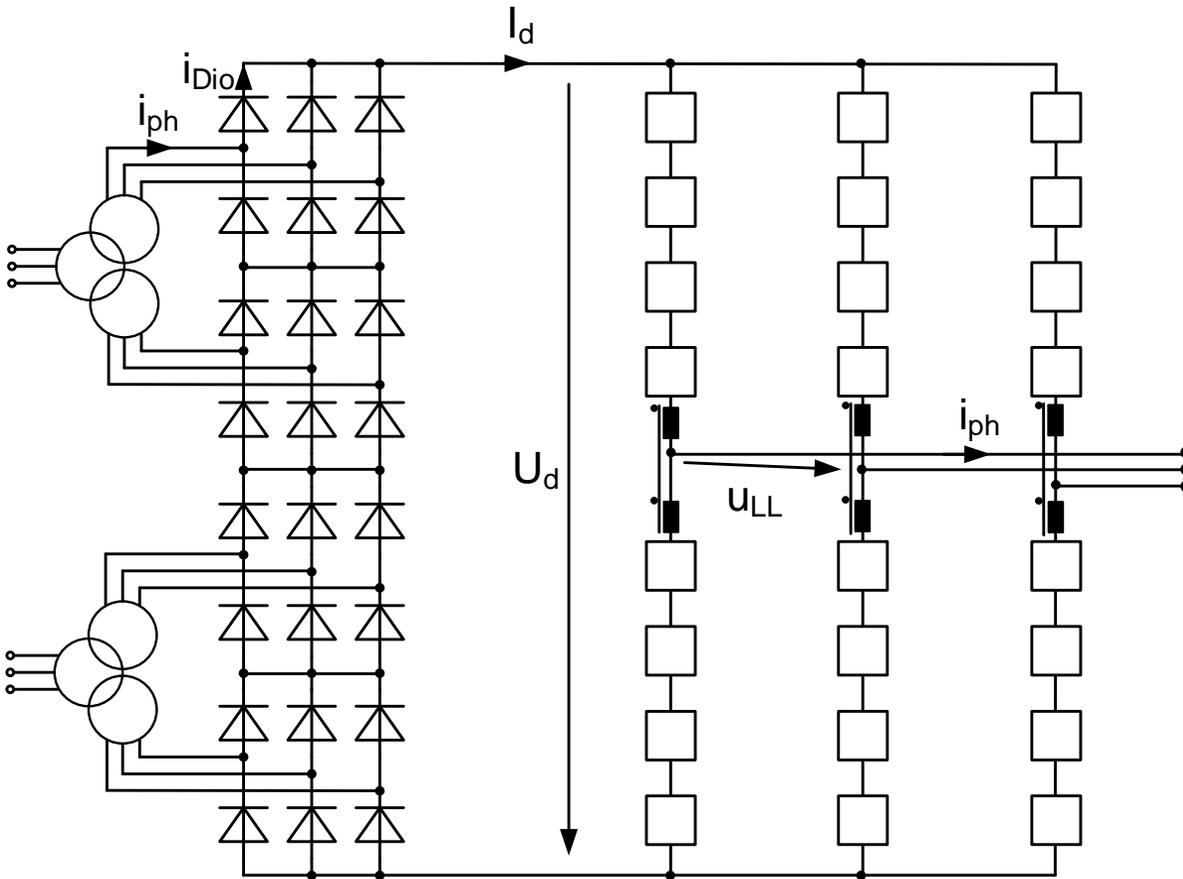
Stoßspitzenstrom I_S

Höchster Spitzenwert, der vereinzelt kurzzeitig im Störfall auftreten darf.

Maximale Anzahl 1000 mal mit einer Höchstdauer von jeweils 50 ms.

- Stromwandlern (linearer Abbildungsbereich).

3. Stromkoordination



Stromkoordination Diodengleichrichter:

Zwischenkreisstrom $I_{d,max}$:

$$U_d \cdot I_d = \sqrt{3} \cdot U_{LL} \cdot I_{ph} \cdot \cos(\varphi)$$

$$I_{d,max} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{LL} \cdot I_{ph} \cdot \cos(\varphi)}{U_{d,min}}$$

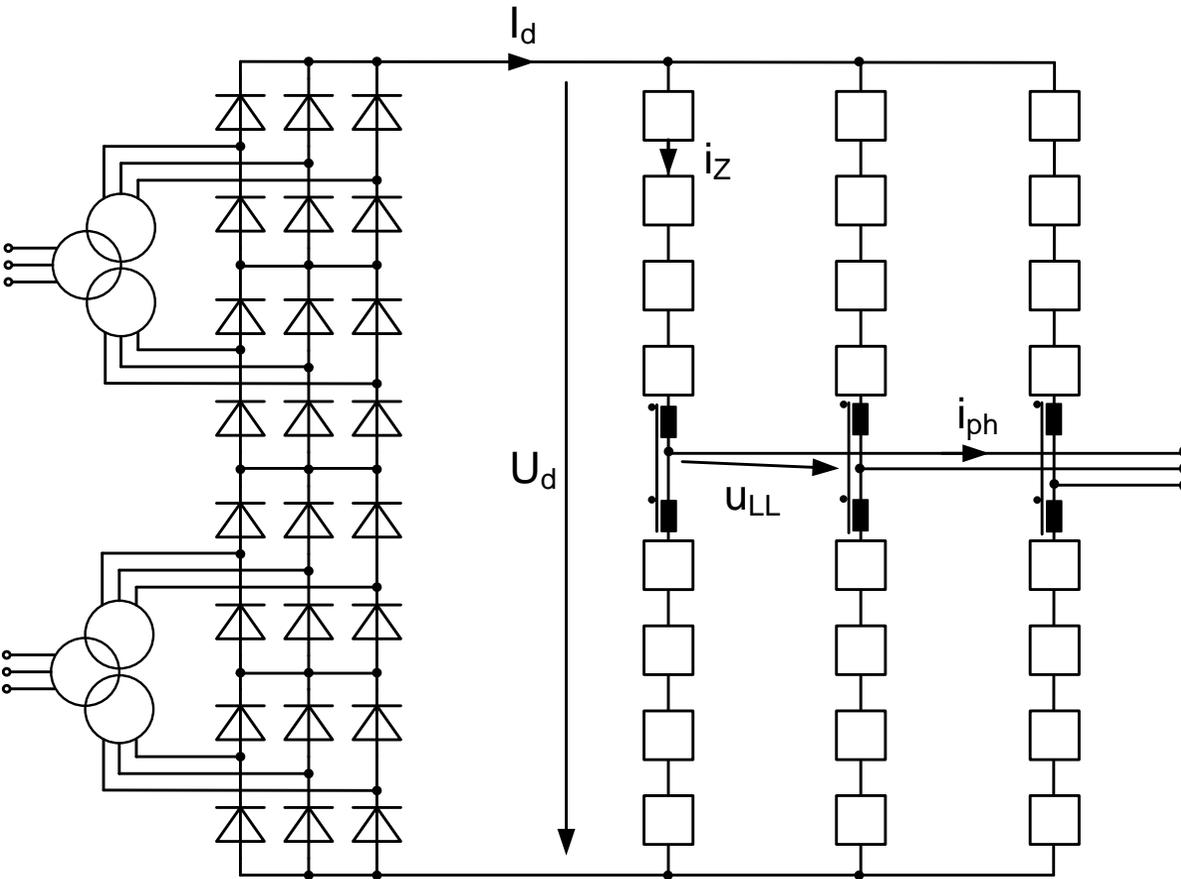
Effektivwert I_{Dio} des Diodenstroms:

$$I_{Dio,max} = \frac{I_{d,max}}{\sqrt{3}}$$

Effektivwert I_{ph} des Phasenstroms:

$$I_{ph,max} = I_{d,max} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}}$$

3. Stromkoordination



**Stromkoordination Modularer Multilevel-
umrichter:**

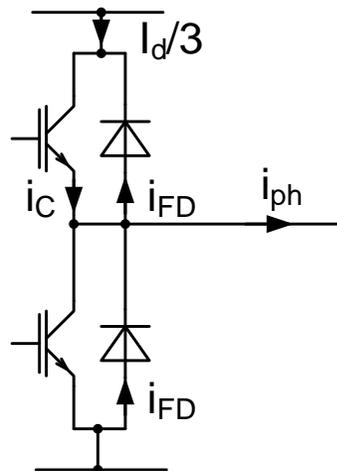
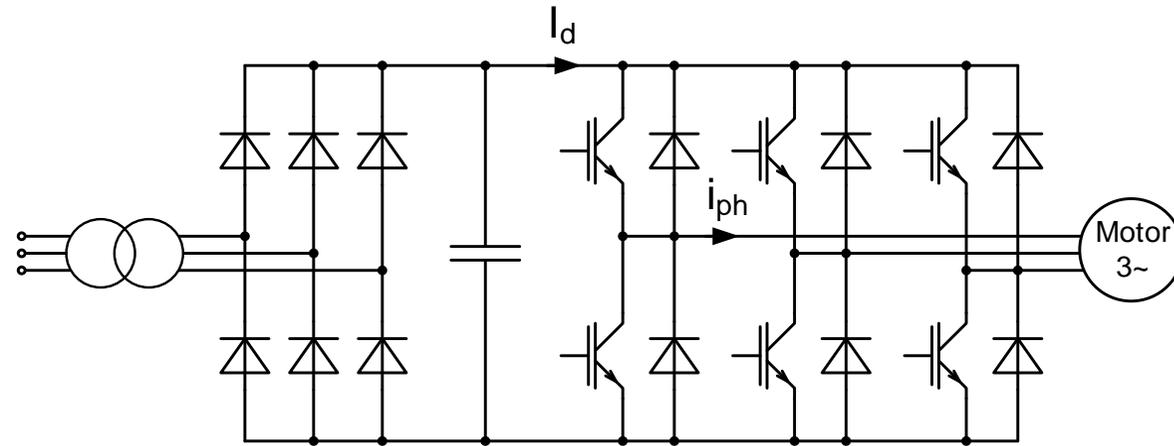
Zweigstrom i_z :

$$i_z(t) = \frac{I_d}{3} + \frac{i_{ph}(t)}{2}$$

Effektivwert I_z :

$$I_{z,max} = \sqrt{\left(\frac{I_{d,max}}{3}\right)^2 + \left(\frac{I_{ph,max}}{2}\right)^2}$$

3. Stromkoordination



Stromkoordination 2-Level-Umrichter:

Arithmetischer Mittelwert des Kollektorstroms i_C :

$$\bar{i}_C = \frac{|\bar{i}_{ph}|}{4} + \frac{|I_d|}{6}$$

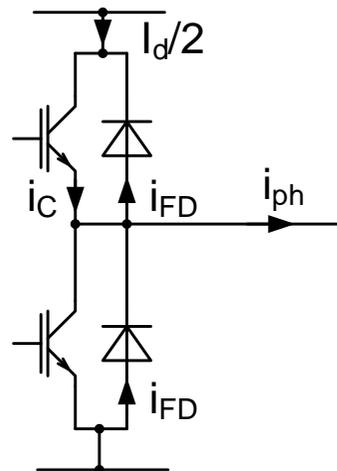
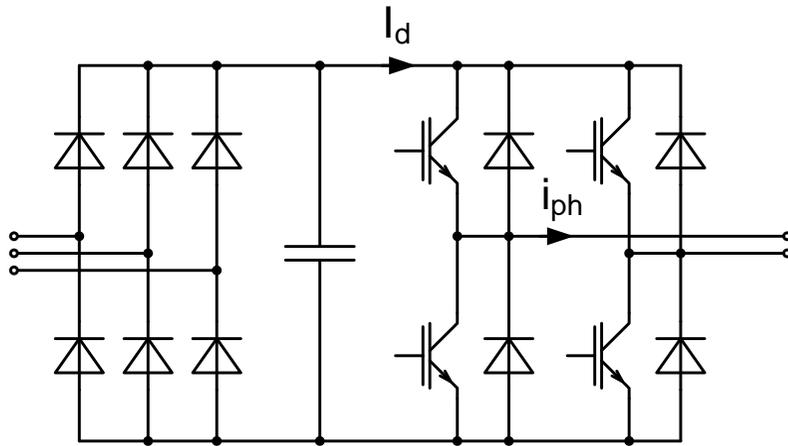
wobei

$|\bar{i}_{ph}|$: Arithm. Mittelwert des Betrages des AC-Stroms

Arithmetischer Mittelwert des Diodenstroms i_{FD} :

$$\bar{i}_{FD} = \frac{|\bar{i}_{ph}|}{4} - \frac{|I_d|}{6}$$

3. Stromkoordination



Stromkoordination 2-Level-Umrichter:

Arithmetischer Mittelwert des Kollektorstroms i_C :

$$\bar{i}_C = \frac{|\bar{i}_{ph}|}{4} + \frac{|I_d|}{4}$$

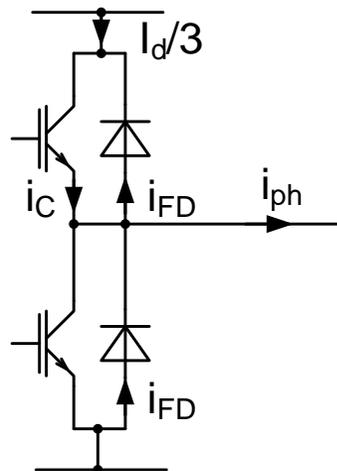
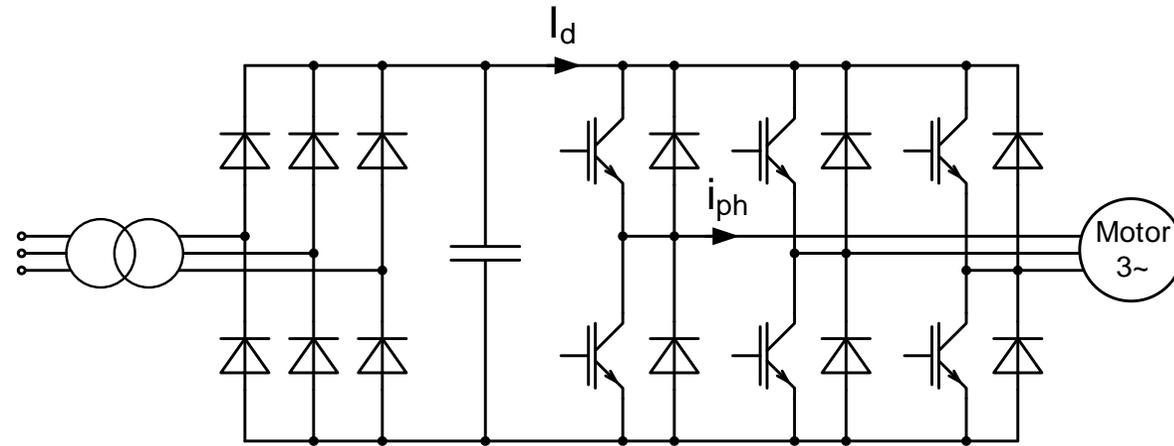
wobei

$|\bar{i}_{ph}|$: Arithm. Mittelwert des Betrages des AC-Stroms

Arithmetischer Mittelwert des Diodenstroms i_{FD} :

$$\bar{i}_{FD} = \frac{|\bar{i}_{ph}|}{4} - \frac{|I_d|}{4}$$

3. Stromkoordination



Stromkoordination 2-Level-Umrichter (siehe LE, Prof. Hiller):

Effektivwert I_C des Kollektorstroms i_C :

$$I_C = \hat{i}_{ph} \cdot \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{m}{3\pi} \cdot \cos(\varphi)}$$

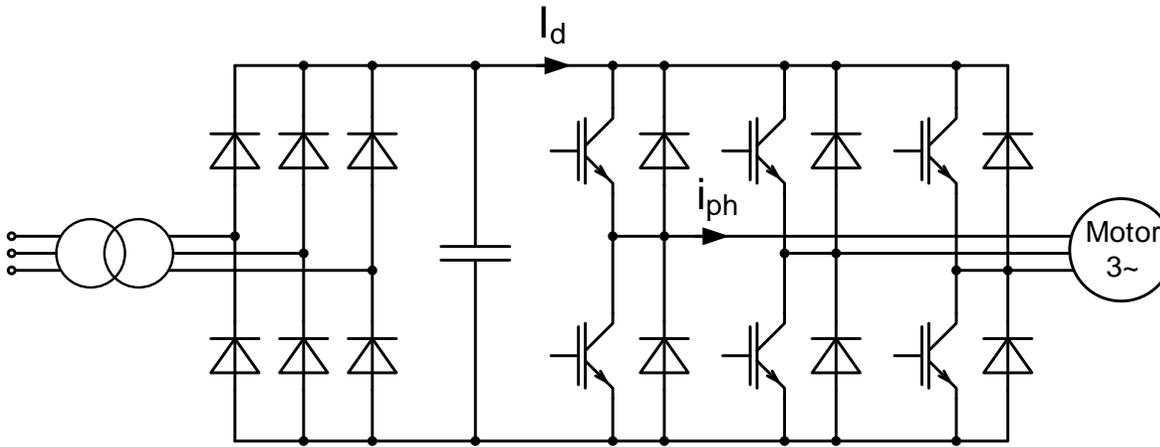
wobei

m : Aussteuergrad

Effektivwert I_{FD} des Diodenstroms i_{FD} :

$$I_{FD} = \hat{i}_{ph} \cdot \sqrt{\frac{1}{8} - \frac{m}{3\pi} \cdot \cos(\varphi)}$$

3. Stromkoordination



Allgemeiner Ansatz für die exakte Berechnung der Durchlassverluste P_{VD} :

$$\overline{P_{VD}} = u_{T0} \cdot \overline{i_C} + r_T \cdot I_C^2$$

Alternativ: Vereinfachte, **angenäherte** Berechnung der Durchlassverluste P_D auf Basis des äquivalenten Durchlassstroms

Ansatz:

$$\overline{P_{VD}} = \overline{i_C} \cdot U_F^*(i_F^*)$$

Wobei U_F^* diejenige Durchlassspannung (**äquivalente Durchlassspannung**) auf der Durchlasskennlinie des Bauelements ist, die man benötigt, um die korrekten Durchlassverluste zu bestimmen.

Der dazugehörige Strom i_F^* ist der **äquivalente Durchlassstrom**.

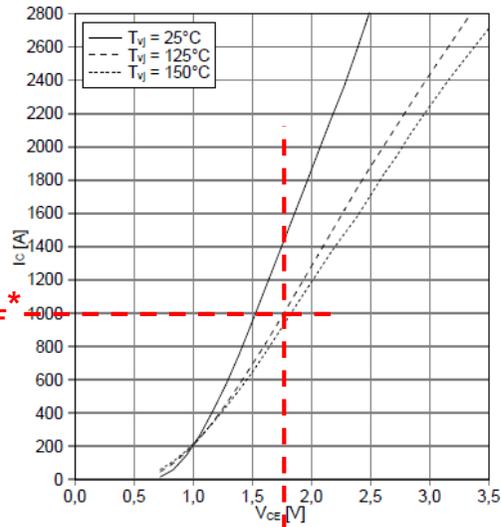
Für sinusförmige AC-Ströme i_{ph} gilt:

$$i_F^* = \hat{i}_{ph} \cdot \frac{\pi}{4}$$

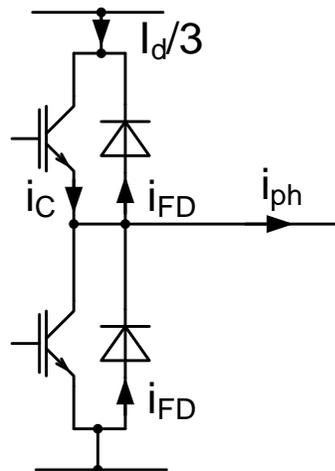
D.h. die **Durchlassverluste** hängen nur noch von der **AC-Stromkurvenform** und dem **Mittelwert des Stroms** ab (auch für andere Kurvenformen möglich).

Vorteil: Effektivwert des Bauelementstroms wird nicht benötigt. Liefert sehr exakte Ergebnisse (Fehler <5%).

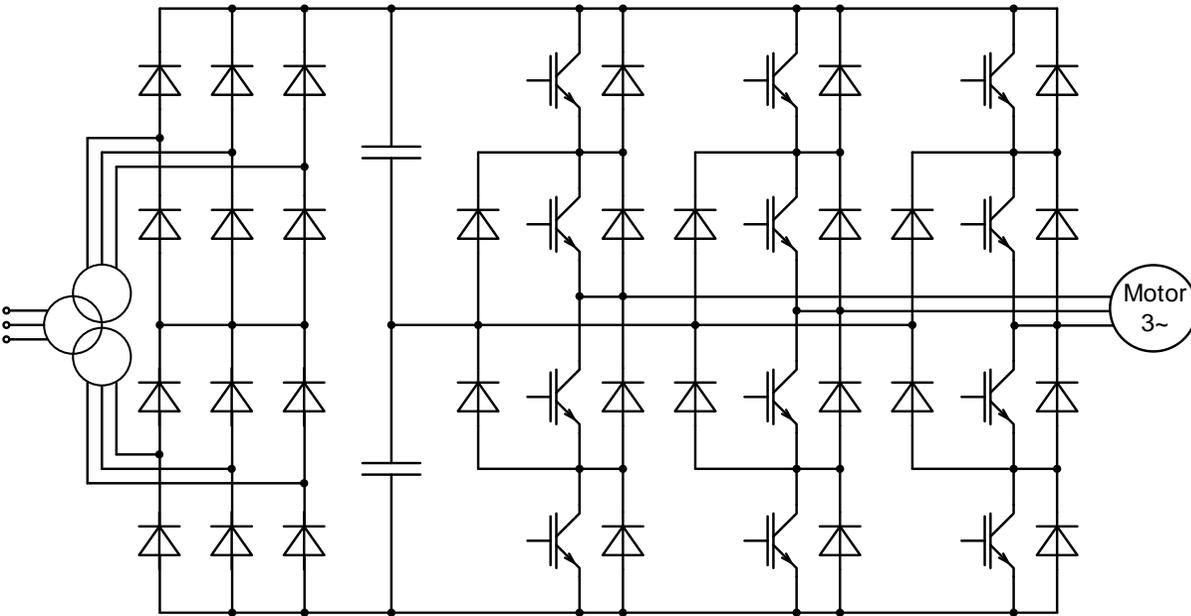
Ausgangskennlinie IGBT, Wechselrichter (typisch)
output characteristic IGBT, Inverter (typical)
 $i_C = f(V_{CE})$
 $V_{GE} = 15\text{ V}$



$U_F(i_F^*)$



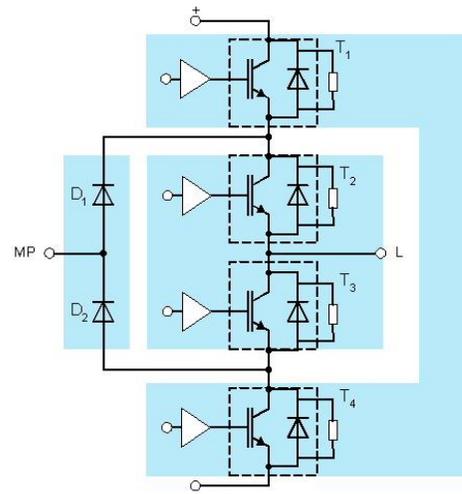
3. Stromkoordination



Stromkoordination 3-Level-Umrichter:

Berechnung der Ströme durch Simulation da i.d.R. zu viele Freiheitsgrade vorhanden sind.

Ströme werden maßgeblich durch das verwendete Pulsmuster beeinflusst.



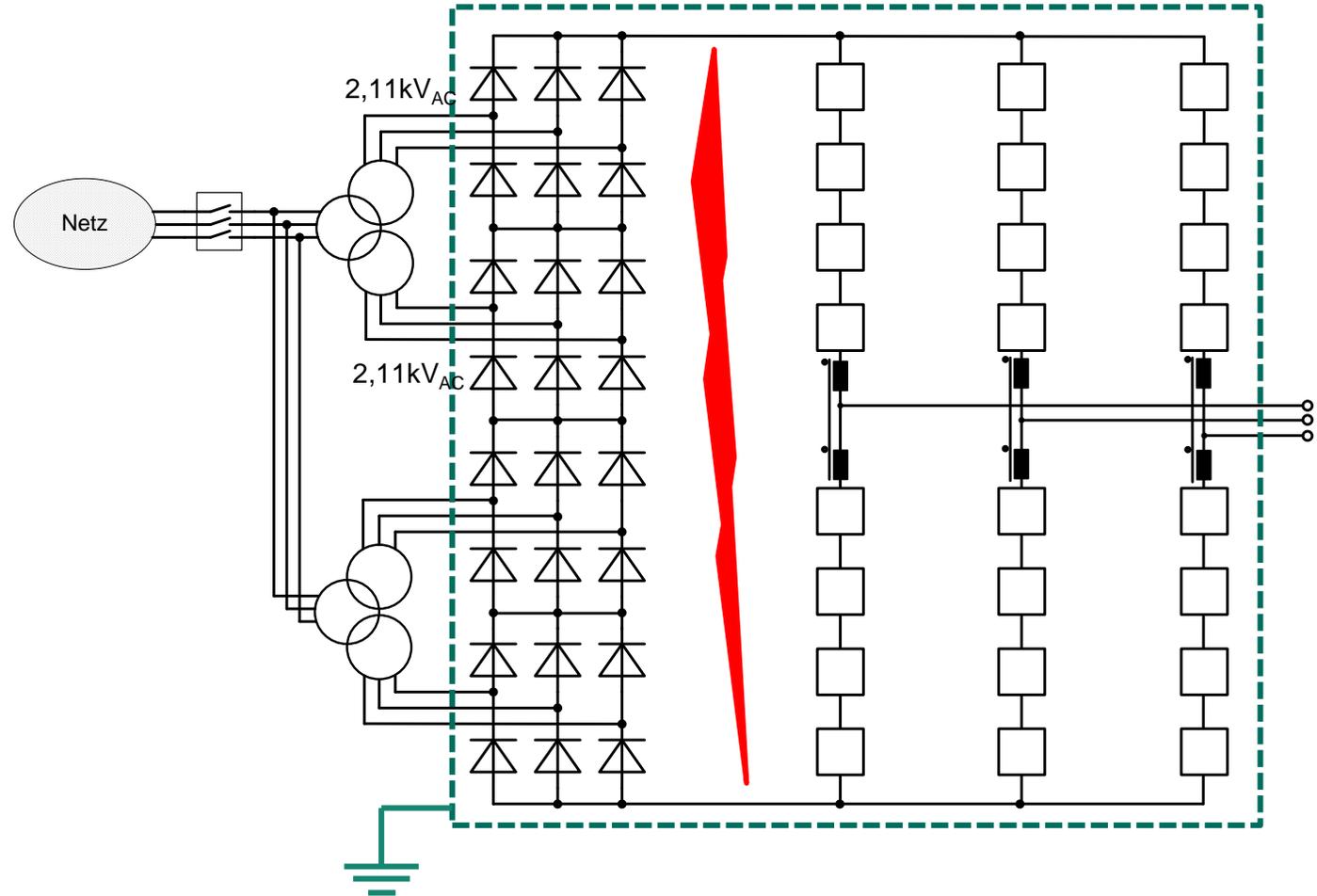
3. Stromkoordination – Beispiel - Kurzschlussstrom

Motivation:

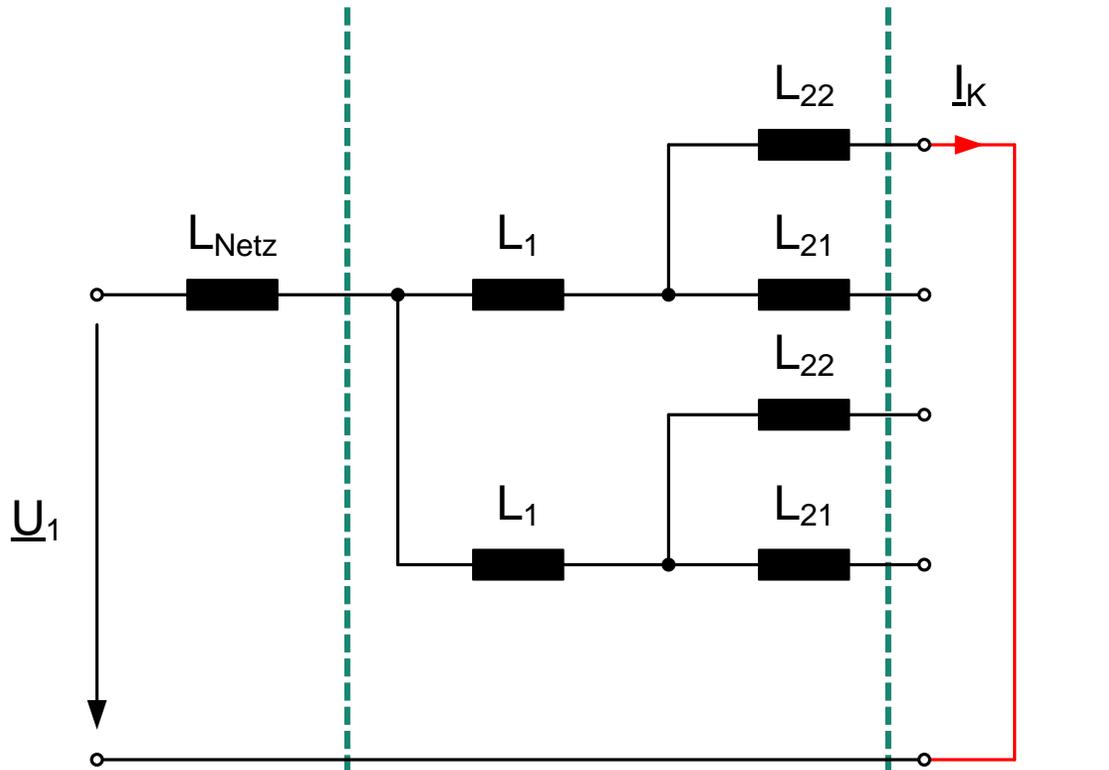
Eine Netzgleichrichter-Diode muss den aus

- der Induktivität an der Einspeisung und
- der Netzspannung

berechneten Kurzschlussstrom im Falle eines DC-seitigen Kurzschlusses ohne Schäden überstehen (Vermeidung von Folgeschäden).



3. Stromkoordination - Kurzschlussstrom



- | | | |
|--|--|--|
| <p>Netz</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ $S_{kmax}=500MVA$ ▪ $U_N=2,11\text{ kV}$ | <p>Transformatoren</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ $u_k=8\%$ ▪ $S_{trafo}=2 \times 8MVA$ ▪ $n_{sek}=2$ ▪ $k=0,1$ | <p>Umrichter</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ $I_K=?$ |
|--|--|--|

Einphasiges Ersatzschaltbild:

Alle Größen bezogen auf die Sekundärseite (Umrichterseite) des Trafos

Mit Werten aus vorherigem Beispiel:

$$L_{Netz} = \frac{(2,11kV)^2}{2 \cdot \pi \cdot 50Hz \cdot 500MVA} = 0,02834mH$$

$$L_1 = \frac{0,1 \cdot 2 \cdot (2,11kV)^2 \cdot 8\%}{2 \cdot \pi \cdot 50Hz \cdot 8MVA} = 0,02824mH$$

$$L_{21} = L_{22} = L_2$$

$$L_2 = 0,02824mH \cdot \frac{1-0,1}{0,1} = 0,2551mH$$

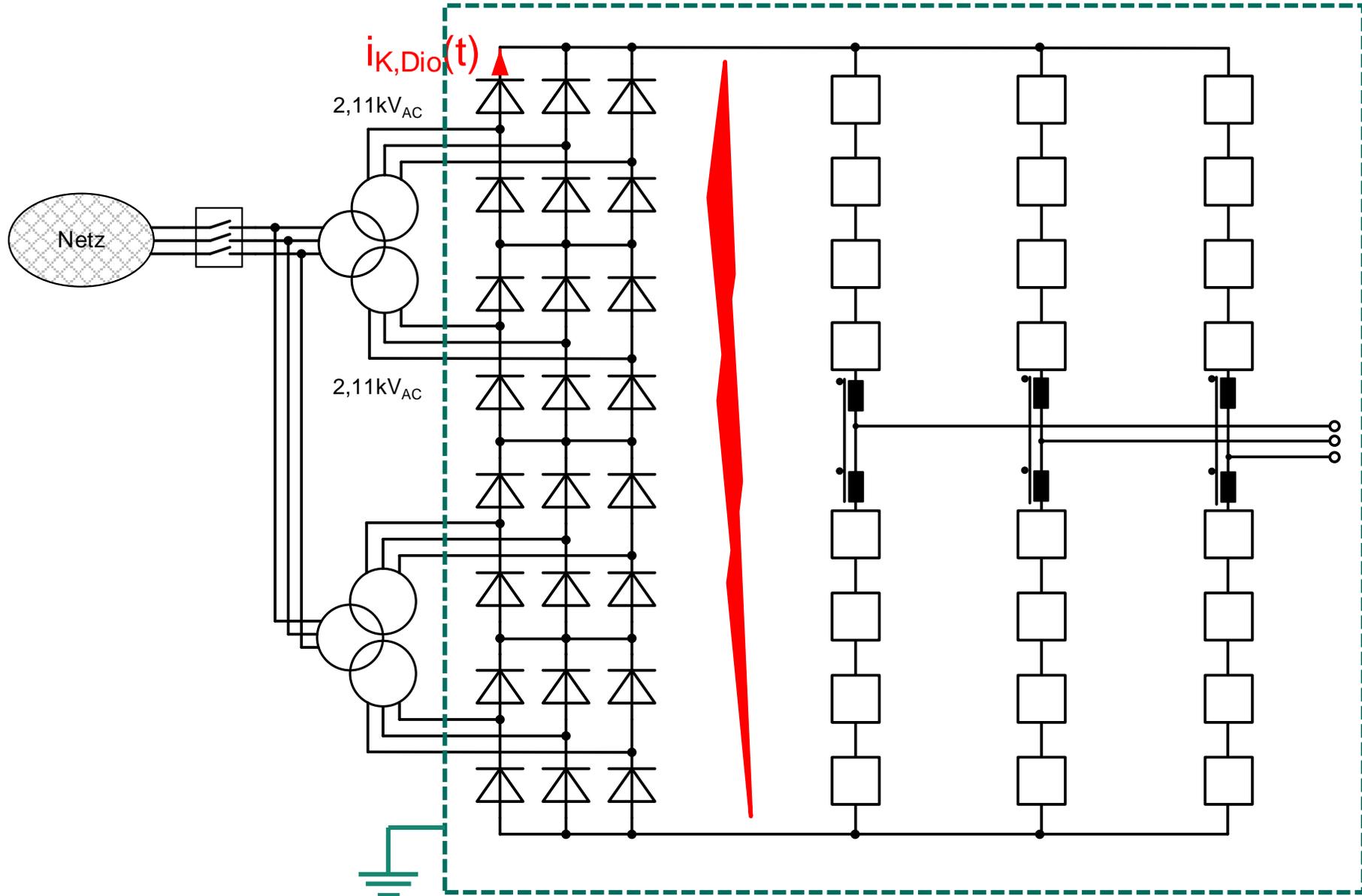
- I_K : Dauerkurzschlussstrom bei einer kurzgeschlossenen Sekundärwicklung

$$I_K = \frac{U_1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_N + L_1 + L_2)}$$

$$I_K = \frac{1,1 \cdot 2,11kV}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50Hz \cdot 0,3117mH} = 13,68kA$$

- Strom wird nicht aufaddiert, da alle Sekundärwicklungen DC-seitig in Reihe geschaltet sind

3. Stromkoordination - Kurzschlussstrom



3. Stromkoordination - Kurzschlussstrom

Verlauf des Kurzschlussstroms:

Der auftretende Kurzschlussstrom setzt sich zusammen aus einem **Dauerkurzschluss-Wechselstrom** und einem **Gleichanteil**.

Die Größe des Gleichanteils hängt vom **Eintrittszeitpunkt** ab. Im **ungünstigsten Fall** tritt der Kurzschluss während des **Spannungsnulldurchgangs** ein.

Dann weist der Kurzschlussstrom den **maximal möglichen Gleichstromanteil** auf. Gleichstromanteil und der Dauerkurzschlussstrom addieren sich zum maximalen Kurzschlussstrom.

$$I_S = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_K$$

Kurzschlussstrom:

$$i_K(t) = \sqrt{2} \cdot I_K \cdot \left(\sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \alpha - \varphi_K) - \sin(\alpha - \varphi_K) \cdot e^{-\frac{t}{T_K}} \right)$$

Diodenstrom:

$$i_{K,Dio}(t) = \begin{cases} i_K(t) & \text{für } i_K(t) > 0 \\ 0 & \text{für } i_K(t) \leq 0 \end{cases}$$

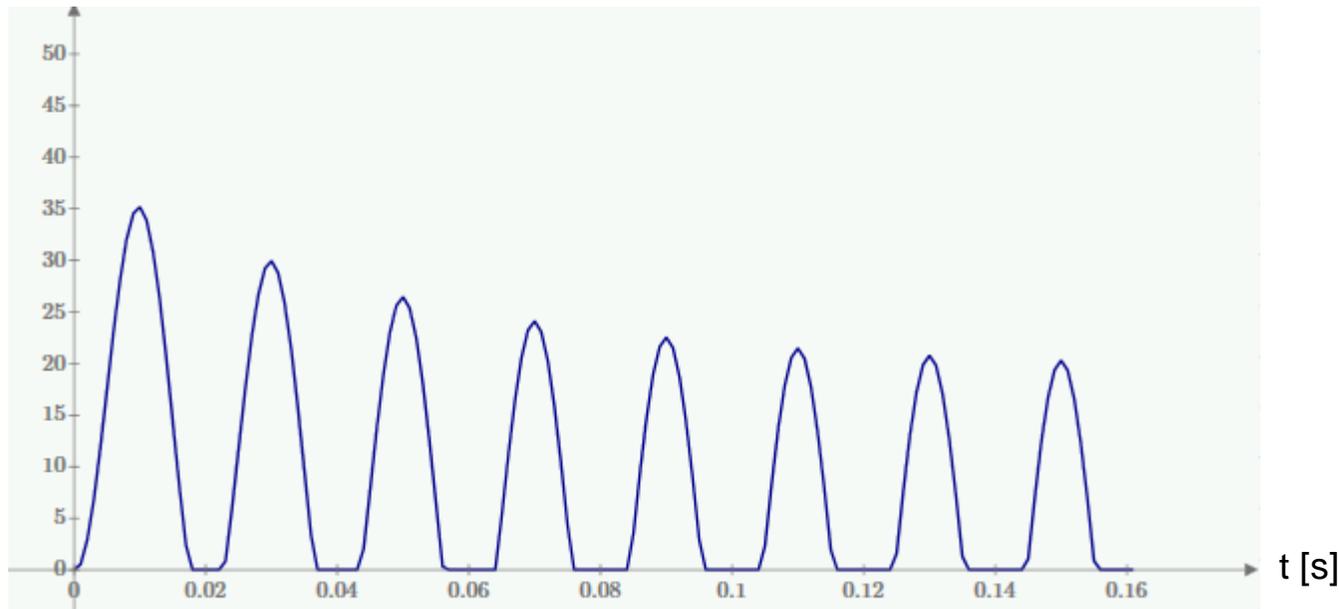
mit

- α : Auftreten des Fehlers in Bezug auf den Spannungsnulldurchgang ($\alpha=0$: im Nulldurchgang)
- φ_K : Verhältnis der Reaktanzen zu den ohmschen Anteilen (typisch: $X/R=10$) $\varphi_K = \arctan\left(\frac{X}{R}\right)$
- T_K : Zeitkonstante $T_K = \frac{L}{R}$

3. Stromkoordination - Kurzschlussstrom

Diodenstrom bei ZK-Kurzschluss:

$i_{K,Dio}(t)$ [kA]

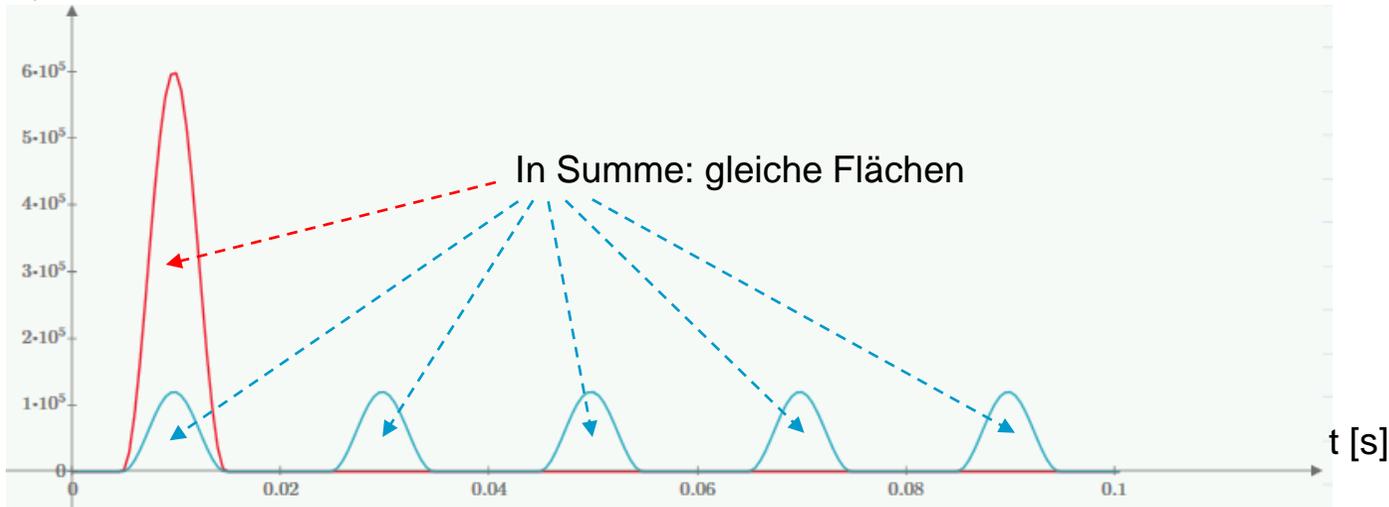


- Angaben für das Grenzlastintegral in den Datenblättern beziehen sich auf **eine Strom-Sinushalbwell**e mit einer **Pulsdauer von 10ms**
- Hier: **24.5kA** bzw. $3000 \cdot 10^3 A^2s$

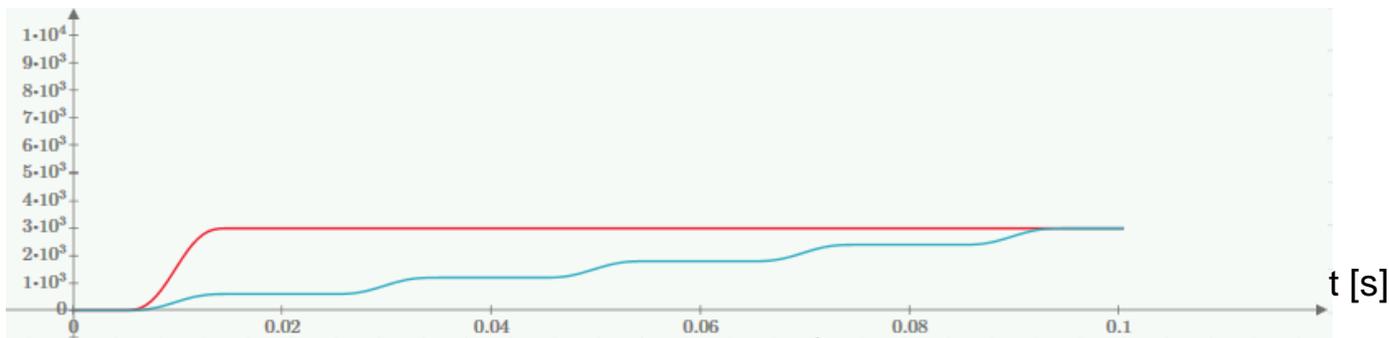
Stoßstrom-Grenzwert surge current	$T_{vj} = 25 \text{ °C}, t_p = 10 \text{ ms}$ $T_{vj} = T_{vj,max}, t_p = 10 \text{ ms}$	I_{FSM}	28000 24500	A A
Grenzlastintegral I^2t -value	$T_{vj} = 25 \text{ °C}, t_p = 10 \text{ ms}$ $T_{vj} = T_{vj,max}, t_p = 10 \text{ ms}$	I^2t	3920 3000	$10^3 A^2s$ $10^3 A^2s$

3. Stromkoordination - Kurzschlussstrom

$$(i_{K,Dio}(t))^2 [10^3 A^2]$$



$$\int_0^t (i_{K,Dio}(t))^2 dt [10^3 A^2 s]$$

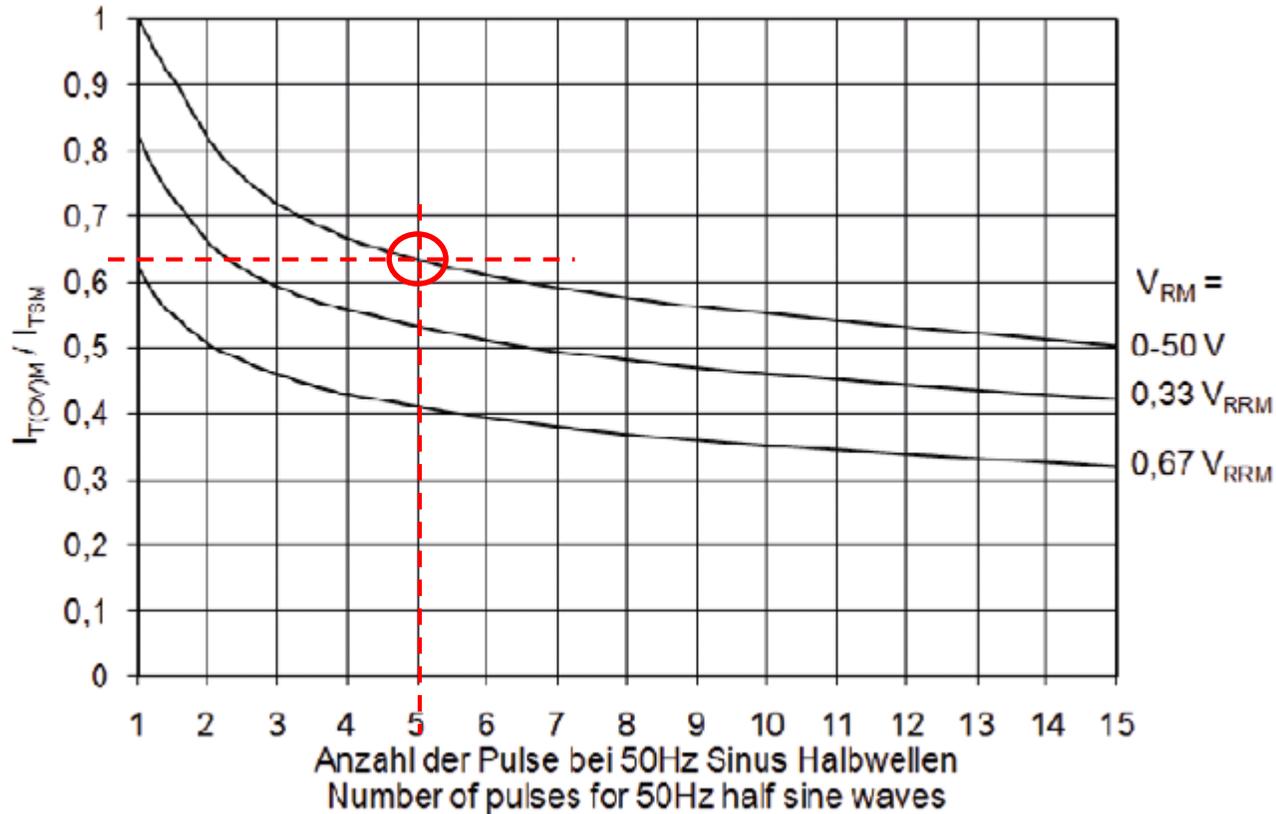


- Angaben für das Grenzlasterintegral in den Datenblättern beziehen sich auf **eine Strom-Sinushalbwell** mit einer **Pulsdauer von 10ms**
- Hier: **24.5kA** bzw. $3000 \cdot 10^3 A^2 s$
- **Aufteilung des Fehlerintegrals auf 5 Sinushalbwellen** innerhalb der ersten 100ms nach Fehlereintritt (typische **max.** Zeit bis zum Öffnen des Leistungsschalters auf der Netzseite) mit einem um den Faktor $1/\sqrt{5}$ kleineren Stoßstrom von $24.5kA \cdot 1/\sqrt{5} = 11kA$.

Stoßstrom-Grenzwert surge current	$T_{vj} = 25 \text{ °C}, t_p = 10 \text{ ms}$ $T_{vj} = T_{vj \text{ max}}, t_p = 10 \text{ ms}$	I_{FSM}	28000 A	24500 A
Grenzlasterintegral I^2t -value	$T_{vj} = 25 \text{ °C}, t_p = 10 \text{ ms}$ $T_{vj} = T_{vj \text{ max}}, t_p = 10 \text{ ms}$	I^2t	3920 $10^3 A^2 s$	3000 $10^3 A^2 s$

3. Stromkoordination - Kurzschlussstrom

Diodenstrom bei ZK-Kurzschluss:

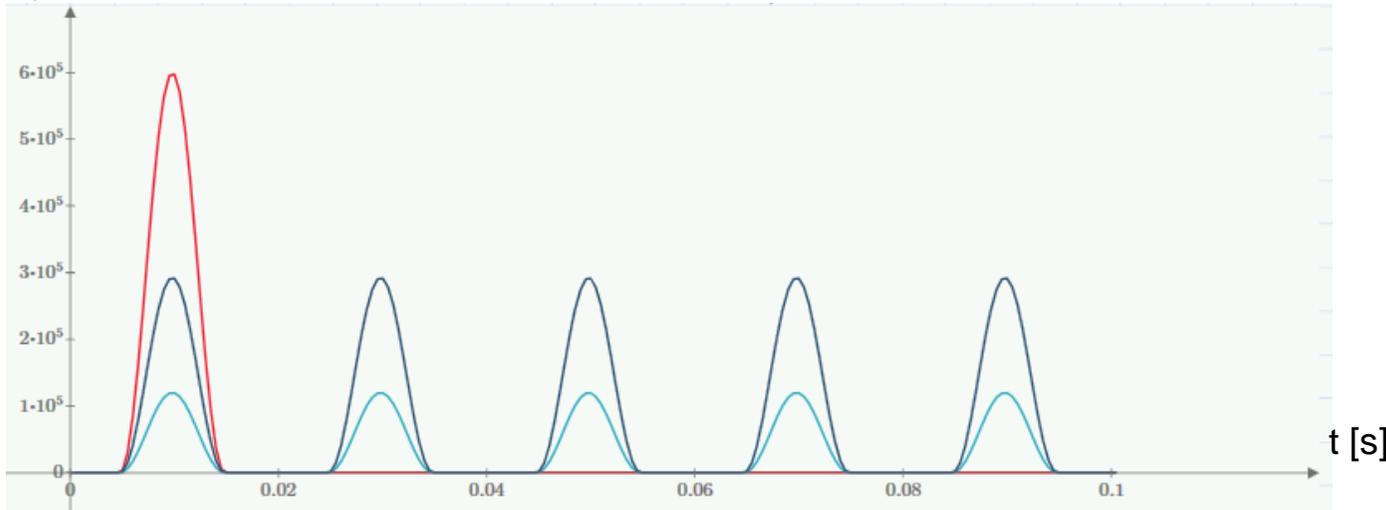


- Angaben für das Grenzlastintegral in den Datenblättern beziehen sich auf **eine Strom-Sinushalbwell** mit einer **Pulsdauer von 10ms**
- Eine höhere Anzahl von Impulsen führt zu einem Derating im Stoßstrom-Grenzwert (hier 0,64).
- Dafür kann das Bauelement dann auch mit dieser höheren Anzahl von Impulsen beaufschlagt werden.

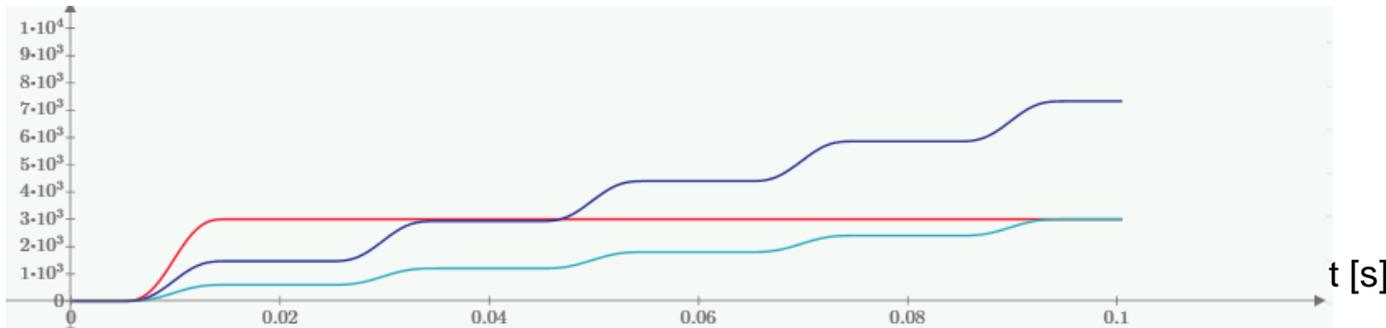
Stoßstrom-Grenzwert surge current	$T_{vj} = 25\text{ °C}, t_p = 10\text{ ms}$ $T_{vj} = T_{vj\text{max}}, t_p = 10\text{ ms}$	I_{FSM}	28000 24500	A A
Grenzlastintegral I^2t -value	$T_{vj} = 25\text{ °C}, t_p = 10\text{ ms}$ $T_{vj} = T_{vj\text{max}}, t_p = 10\text{ ms}$	I^2t	3920 3000	$10^3\text{ A}^2\text{s}$ $10^3\text{ A}^2\text{s}$

3. Stromkoordination - Kurzschlussstrom

$$(i_{K,Dio}(t))^2 [10^3 A^2]$$



$$\int_0^t (i_{K,Dio}(t))^2 dt [10^3 A^2 s]$$



- Angaben für das Grenzlasterintegral in den Datenblättern beziehen sich auf **eine Strom-Sinushalbwell** mit einer **Pulsdauer von 10ms**
- Hier: **24.5kA** bzw. $3000 \cdot 10^3 A^2 s$
- **Aufteilung des Fehlerintegrals auf 5 Sinushalbwellen** innerhalb der ersten 100ms nach Fehlereintritt (Zeit bis zum Öffnen des Leistungsschalters auf der Netzseite) mit einem um den Faktor $1/\sqrt{5}$ kleineren Stoßstrom von $24.5kA \cdot 1/\sqrt{5} = 11kA$.
- **Rückrechnen auf einen höheren I²t-Wert** mit einem höheren Stoßstrom von $11kA \cdot 1/0.64 = 17.1kA$

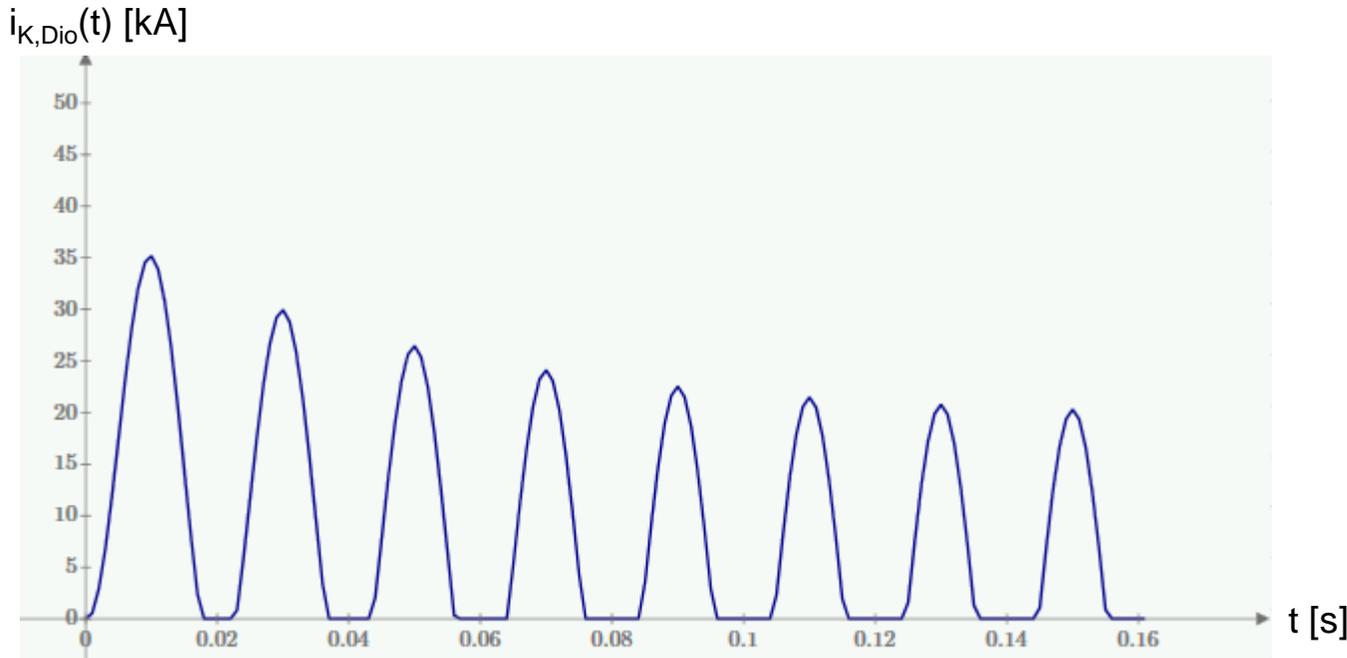
$$\rightarrow I^2 t_{\text{neu}} = \frac{1}{0,64^2} \cdot I^2 t$$

$$\rightarrow I^2 t_{\text{neu}} = 7327 \cdot 10^3 A^2 s$$

Stoßstrom-Grenzwert surge current	$T_{vj} = 25 \text{ °C}, t_p = 10 \text{ ms}$ $T_{vj} = T_{vj \text{ max}}, t_p = 10 \text{ ms}$	I_{FSM}	28000 24500	A A
Grenzlasterintegral I ² t-value	$T_{vj} = 25 \text{ °C}, t_p = 10 \text{ ms}$ $T_{vj} = T_{vj \text{ max}}, t_p = 10 \text{ ms}$	I ² t	3920 3000	$10^3 A^2 s$ $10^3 A^2 s$

3. Stromkoordination - Kurzschlussstrom

Beispiel (Folie 123):



- Angaben für das Grenzlastintegral in den Datenblättern beziehen sich auf **eine Strom-Sinushalbwell**e mit einer **Pulsdauer von 10ms**
- Hier: **24.5kA** bzw. $3000 \cdot 10^3 \text{A}^2\text{s}$
- **Aufteilung des Fehlerintegrals auf 5 Sinushalbwellen** innerhalb der ersten 100ms nach Fehlereintritt (Zeit bis zum Öffnen des Leistungsschalters auf der Netzseite) mit einem um den Faktor $1/\sqrt{5}$ kleineren Stoßstrom von $24.5\text{kA} \cdot 1/\sqrt{5} = \mathbf{11\text{kA}}$.
- **Rückrechnen auf einen höheren I²t-Wert** mit einem um den Faktor 1/0,64 höheren Stoßstrom

$$\rightarrow I^2t_{\text{neu}} = \frac{1}{0,64^2} \cdot I^2t$$

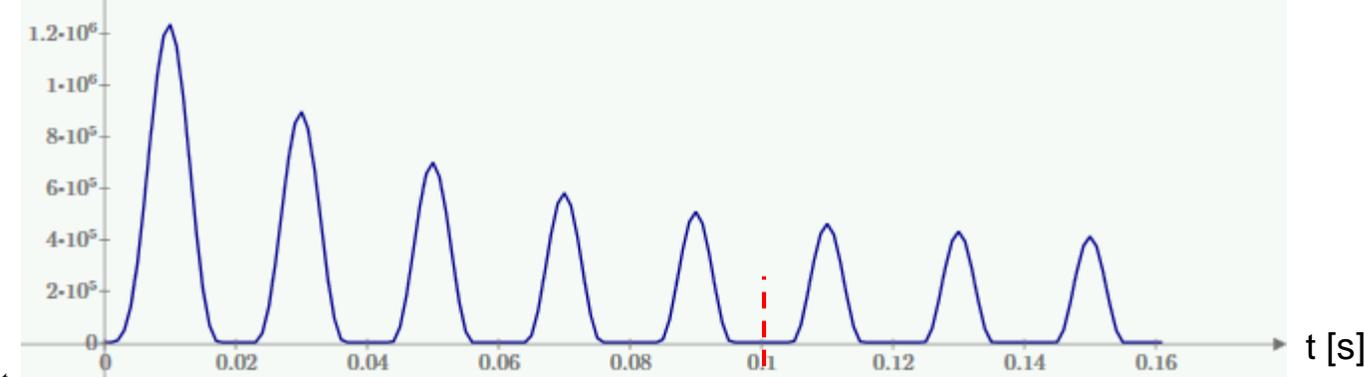
$$\rightarrow I^2t_{\text{neu}} = \mathbf{7327 \cdot 10^3 \text{A}^2\text{s}}$$

Stoßstrom-Grenzwert surge current	$T_{vj} = 25 \text{ }^\circ\text{C}, t_p = 10 \text{ ms}$ $T_{vj} = T_{vj\text{max}}, t_p = 10 \text{ ms}$	I_{FSM}	28000 24500	A A
Grenzlastintegral I ² t-value	$T_{vj} = 25 \text{ }^\circ\text{C}, t_p = 10 \text{ ms}$ $T_{vj} = T_{vj\text{max}}, t_p = 10 \text{ ms}$	I ² t	3920 3000	$10^3 \text{ A}^2\text{s}$ $10^3 \text{ A}^2\text{s}$

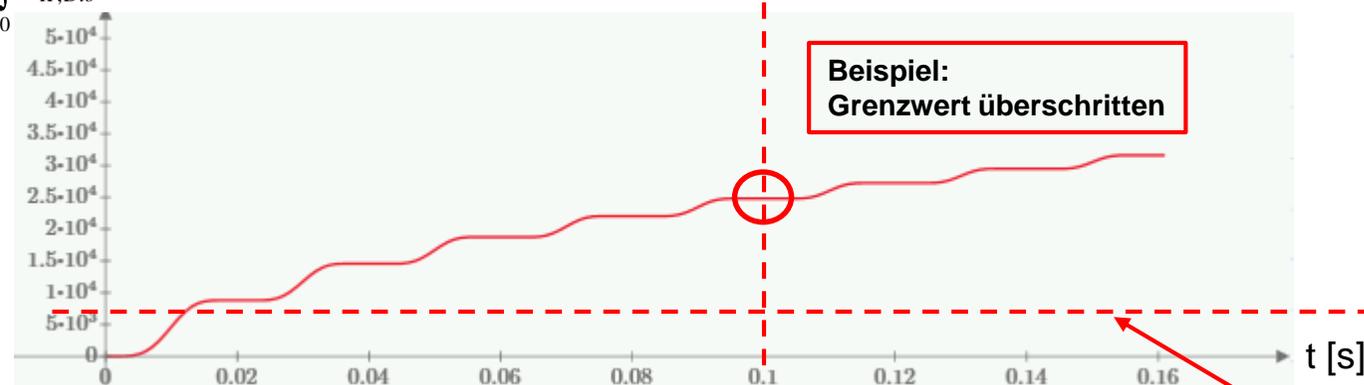
3. Stromkoordination - Kurzschlussstrom

Beispiel (Folie 123):

$(i_{K,Dio}(t))^2 [10^3 A^2]$



$\int_0^t (i_{K,Dio}(t))^2 dt [10^3 A^2 s]$



Beispiel:
Grenzwert überschritten

Stoßstrom-Grenzwert surge current	$T_{vj} = 25 \text{ }^\circ\text{C}, t_p = 10 \text{ ms}$ $T_{vj} = T_{vj\text{max}}, t_p = 10 \text{ ms}$	I_{FSM}	28000 A 24500 A
Grenzlastintegral I^2t -value	$T_{vj} = 25 \text{ }^\circ\text{C}, t_p = 10 \text{ ms}$ $T_{vj} = T_{vj\text{max}}, t_p = 10 \text{ ms}$	I^2t	3920 $10^3 A^2s$ 3000 $10^3 A^2s$

- Angaben für das Grenzlastintegral in den Datenblättern beziehen sich auf **eine Strom-Sinushalbwell** mit einer **Pulsdauer von 10ms**
- Hier: **24.5kA** bzw. $3000 \cdot 10^3 A^2s$
- Aufteilung des Fehlerintegrals auf **5 Sinushalbwellen** innerhalb der ersten 100ms nach Fehlereintritt (Zeit bis zum Öffnen des Leistungsschalters auf der Netzseite) mit einem um den Faktor $1/\sqrt{5}$ kleineren Stoßstrom von $24.5kA \cdot 1/\sqrt{5} = 11kA$.
- Rückrechnen auf einen **höheren I^2t -Wert** mit einem um den Faktor $1/0,64$ höheren Stoßstrom

$$\rightarrow I^2t_{\text{neu}} = \frac{1}{0,64^2} \cdot I^2t$$

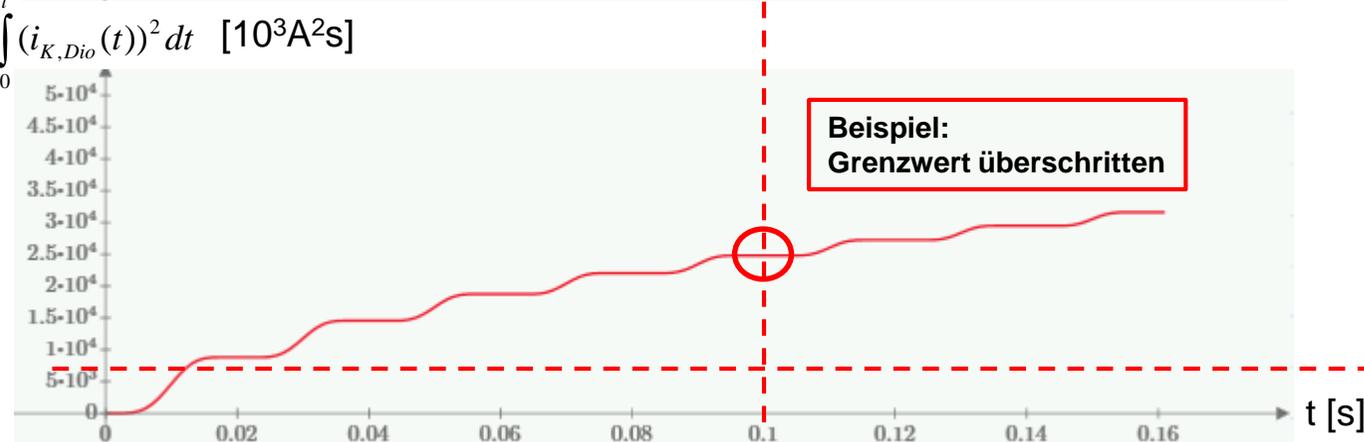
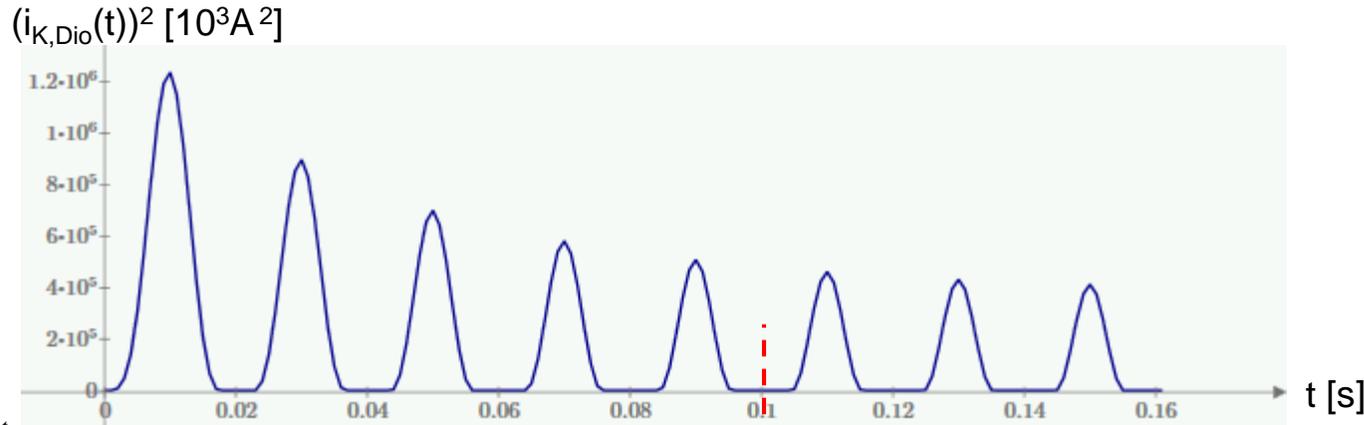
$$\rightarrow I^2t_{\text{neu}} = 7327 \cdot 10^3 A^2s$$

3. Stromkoordination - Kurzschlussstrom

Beispiel (Folie 123):

Zusammenfassung:

- **Beachtung der Applikationshinweise für mögliches Derating (Dauer, Anzahl der Impulse)**
- Durchlassverluste führen zu einer starken Erwärmung
- **Auch die Motorseite betrachten.**
- Ggf. Abhilfemaßnahmen definieren
 - Größeres Bauelement
 - Höheres Trafo- u_k bzw. höhere Netzinduktivität
 - Einbau von Sicherungen
 - Kurzschließer auf der AC-Seite



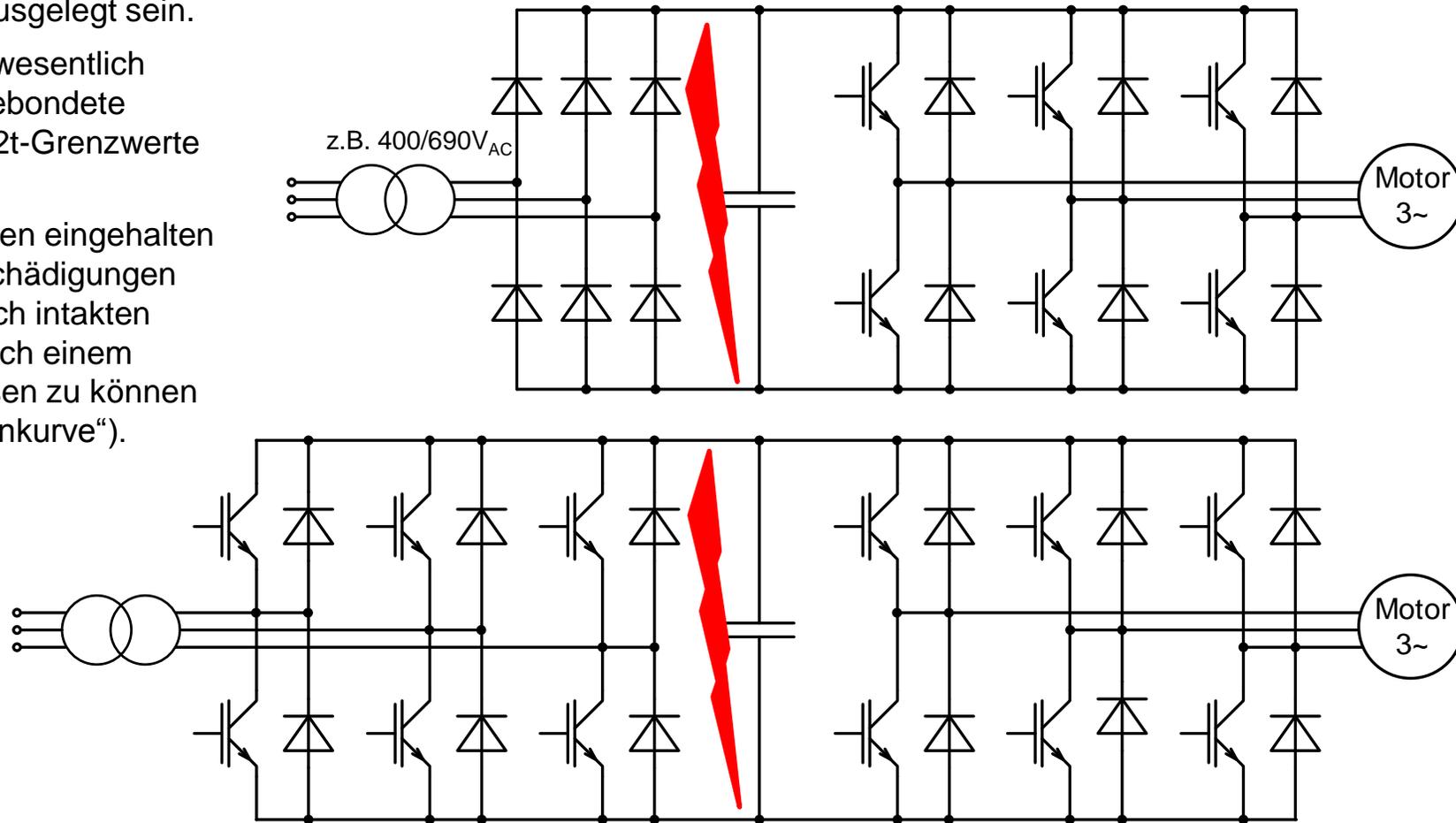
Stoßstrom-Grenzwert surge current	$T_{vj} = 25\text{ °C}, t_p = 10\text{ ms}$ $T_{vj} = T_{vj\text{max}}, t_p = 10\text{ ms}$	I_{FSM}	28000 24500	A A
Grenzlastintegral I^2t -value	$T_{vj} = 25\text{ °C}, t_p = 10\text{ ms}$ $T_{vj} = T_{vj\text{max}}, t_p = 10\text{ ms}$	I^2t	3920 3000	$10^3\text{ A}^2\text{s}$ $10^3\text{ A}^2\text{s}$

3. Stromkoordination - Kurzschlussstrom

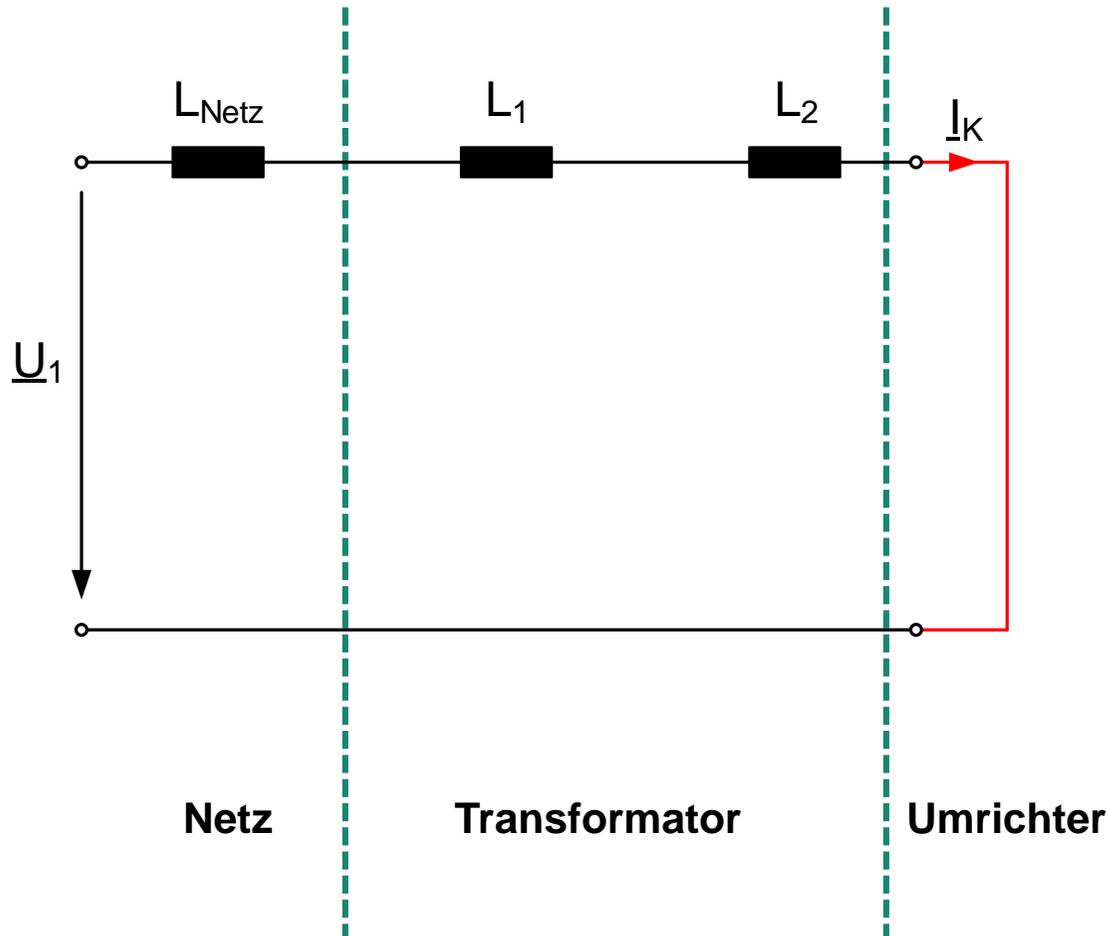
Motivation:

Neben den Netzgleichrichter-Dioden müssen auch die Freilaufdioden für den berechneten Kurzschlussstrom ausgelegt sein.

- Auslegung i.d.R. wesentlich schwieriger, da gebondete Module kleinere I_{2t}-Grenzwerte aufweisen.
- Grenzwerte müssen eingehalten werden, um Vorschädigungen von scheinbar noch intakten Bauelementen nach einem Fehler ausschließen zu können (vgl. „Badewannenkurve“).



3. Stromkoordination - Kurzschlussstrom



Einphasiges Ersatzschaltbild:

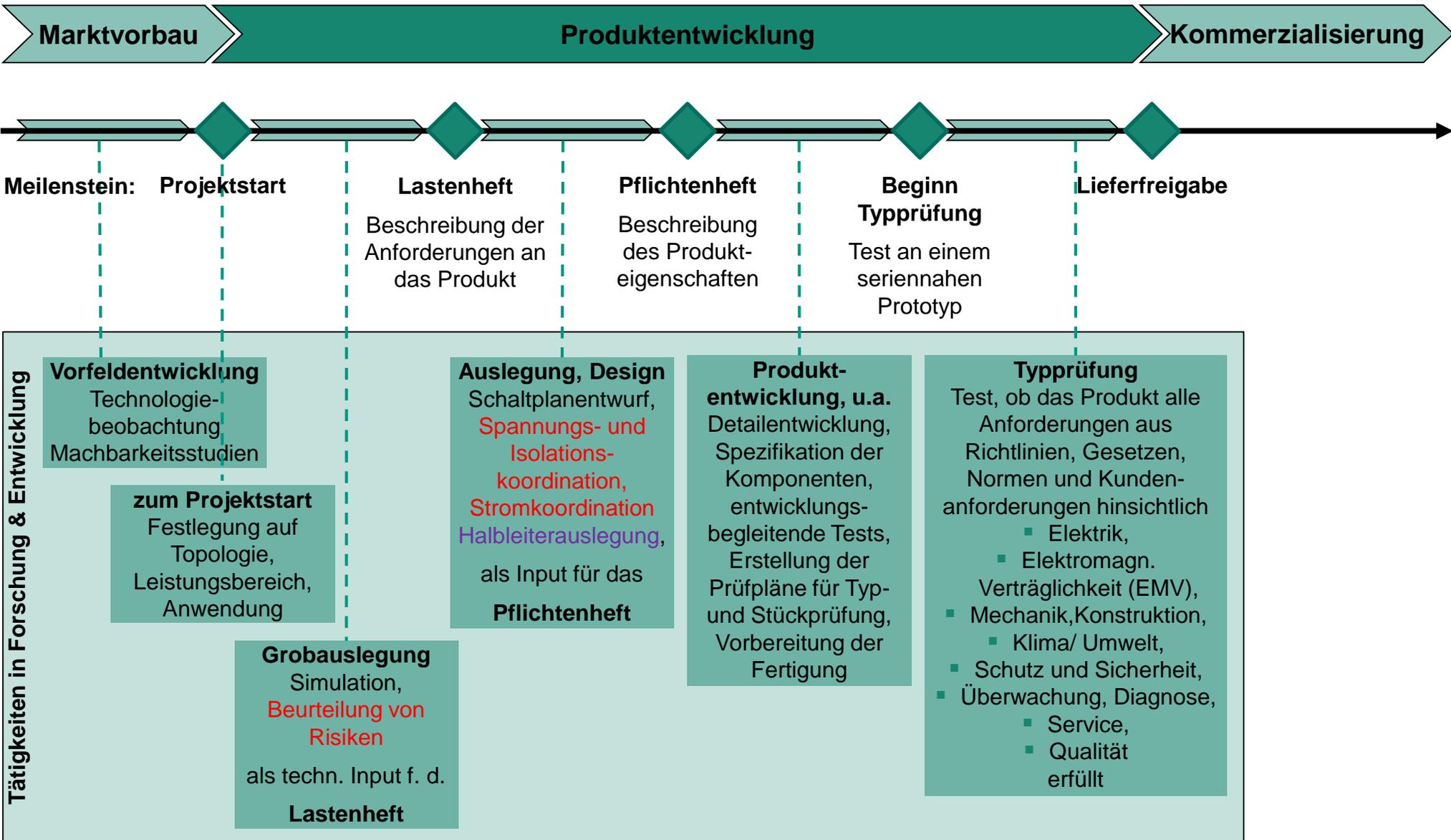
Alle Größen bezogen auf die Sekundärseite (Umrichterseite) des Trafos

- \underline{I}_K : Dauerkurzschlussstrom bei Kurzschluss im Zwischenkreis

$$I_K = \frac{U_1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_N + L_1 + L_2)}$$

Grenzlastintegral I ² t - value	V _R = 0 V, t _p = 10 ms, T _{vj} = 125°C	I ² t	200	kA ² s
---	---	------------------	-----	-------------------

4. Zusammenfassung



Zeitplan

	KW	Datum	Inhalt
PLS1	KW42	17.10.2017	Einleitung
PLS2	KW43	24.10.2017	Systemübersicht
	<i>KW44</i>	<i>31.10.2017</i>	<i>Keine Vorlesung - Feiertag</i>
PLS3	KW45	07.11.2017	Systemübersicht
PLS4	KW46	14.11.2017	Stromrichterauslegung
PLS5	KW47	21.11.2017	Stromrichterauslegung
PLS6	KW48	28.11.2017	Stromrichterauslegung
PLS7	KW49	05.12.2017	Halbleiterauslegung
PLS8	KW50	12.12.2017	Systembetrachtungen
PLS9	KW51	19.12.2017	Kabel, Filter
	<i>KW52</i>	<i>26.12.2017</i>	<i>Keine Vorlesung - Weihnachtspause</i>
	<i>KW1</i>	<i>02.01.2018</i>	<i>Keine Vorlesung - Weihnachtspause</i>
PLS10+11	KW2	09.01.2018	Doppel-Veranstaltung (Dozent: Hr. Tischmacher, Siemens AG): Wechselwirkung Umrichter/Maschine
PLS12	KW3	16.01.2018	Netzanwendungen
PLS13	KW4	23.01.2018	Netzverhalten, Netzanwendungen
PLS14	KW5	30.01.2018	Systembetrachtungen, Fragestunde
	<i>KW6</i>	<i>06.02.2018</i>	<i>Keine Vorlesung</i>