

Hochschule Magdeburg-Stendal
Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Industriedesign (IWID)
Institut für Elektrotechnik

Bachelorarbeit

zur Erlangung des Grades eines "Bachelor of Engineering"
im Studiengang Mechatronische Systemtechnik

**Thema: Erstellung einer Blitzschutzrichtlinie für die Produkt-
palette der FAM im Auftrag der "Gesellschaft für
Prozeßautomation mbH" (GPA)"**

Eingereicht von: Thomas Mengewein

Angefertigt für: GPA Gesellschaft für Prozeßautomation, Magdeburg

Matrikel: E 2010

Ausgabetermin: 25. November 2013

Abgabetermin: 21. Februar 2014

Schulischer Betreuer: Herr Prof. Dr.-Ing. Haentzsch

Betrieblicher Betreuer: Herr Dipl.-Ing. Frank Zittlau

.....
1. Prüfer

.....
2. Prüfer

Bachelorthesis

für Herrn Thomas Mengewein

Kurzthema : Erstellung einer Blitzschutzrichtlinie für die Produktpalette der FAM im Auftrag der „Gesellschaft für Prozeßautomation mbH“ (GPA)

Aufgabenstellung :

Das wachsende Aufgabenspektrums der weltweit operierenden Förderanlagen und Baumaschinen GmbH (FAM) fordert Produkte, die neben ihrer Komplexität den Schutz von Mensch, Maschine und Funktion/Produktion bei einem Blitzeinschlag durch das sichere Einfangen, Ableiten und Erden gewährleisten.

Aus dieser Grundlage heraus soll im Rahmen dieser Bachelorarbeit, neben der Charakterisierung des Blitzes und seinen Folgen das Portfolio der FAM-Fördertechnik analysiert und resultierende Schwachpunkte und Probleme dargestellt werden.

Hieraus sind den internationalen Standards und Normen entsprechende Lösungen zu generieren, die in einer zu konzipierenden FAM-Richtlinie, welche sowohl den Blitzschutz als auch die Erdung in Typicals formuliert, angewendet werden.

Als Schwerpunkte zu behandeln:

- Die Klassifizierung und Auslegung des Blitzschutzsystems für das Produktportfolio
- Betrachtungen im Rahmen des Funktionspotentialausgleichs
- Grundlagen zur Auslegung der Erdungsanlage
- Gegenüberstellung der Kundenspezifikationen und der Blitzschutznormung
- Generierung einer Richtlinie mit Typicals

Optional:

- Untersuchung hinsichtlich der Gegenüberstellung geeigneter Varianten des Funktionspotentialausgleichs und die Blitzstromtragfähigkeit eines translatorischen oder rotatorischen Lagers

Tag der Ausgabe : 25.11.2013

Betreuer:

Hr. Dipl.-Ing. Frank Zittlau (GPA)

Tag der Abgabe : 21.02.2014

Tel. +49 391 6380 16228

Email frank.zittlau@fam.de

Magdeburg, den 25.11.2013

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Ort, Datum

Unterschrift des Verfassers

I. Inhalt

1. EINLEITUNG	3
1.1 AUFGABE UND ZIEL DER ARBEIT.....	3
1.2 HISTORIK.....	4
2. CHARAKTERISTIKA DES BLITZES	5
2.1 ENTSTEHUNG, ORTUNG UND HÄUFIGKEIT VON BLITZEN.....	5
2.2 DER BLITZ	6
2.2.1 <i>Blitzeinschlag</i>	7
2.2.2 <i>Blitzstrom-Parameterwerte</i>	9
2.2.3 <i>Wirkungen des Blitzes</i>	10
2.2.3.1 Scheitelwert des Erstblitzstromes	11
2.2.3.2 Kraftimpuls.....	12
2.2.3.3 Steilheit des Folgeblickstromanstieges	12
2.2.3.4 Ladung und spezifische Energie.....	13
2.2.3.5 Elektromagnetischer Impuls	15
2.3 ZUSAMMENFASSUNG UND DARSTELLUNG DER WIRKUNGEN DES BLITZES	15
2.4 KONFLIKT DES KONSTRUKTEURS	16
3. DIE FAM UND DER BLITZSCHUTZ	18
3.1 DER BLITZSCHUTZ BAULICHER ANLAGEN	18
3.2 PLANUNG UND ANALYSE.....	19
3.2.1 <i>Das FAM-Portfolio</i>	19
3.2.2 <i>Risikomanagement</i>	22
3.2.2.1 Berechnung	23
3.2.2.2 Resultat	24
3.2.3 <i>Äußerer Blitzschutz</i>	25
3.2.3.1 Grundlagen des äußeren Blitzschutzes	25
3.2.3.2 Schwächen und Stärken.....	28
3.2.3.3 Analyse und Beeinflussung der Schwächen.....	29
3.2.3.4 Funktionspotentialausgleich	35
3.2.3.5 Erdungsanlage der mobilen Geräte	46
3.2.3.6 Erdungsanlage in Kraftwerken.....	53
3.2.3.7 Minimierung der Erdungsspannung.....	63
3.2.4 <i>Innerer Blitzschutz</i>	65
3.2.4.1 Blitzschutzpotentialausgleich.....	65
3.2.4.2 Trennungsabstand.....	67
3.2.5 <i>Schutz gegen die elektromagnetischen Impulse des Blitzes</i>	71
3.2.5.1 Blitzschutzzonen.....	71
3.2.5.2 Erdung und Potentialausgleich	72
3.2.5.3 Magnetische Schirmung und Leitungsführung.....	74
3.2.5.4 Problematik ortsveränderliche Geräte	77
3.2.6 <i>Koordinierung des Potentialausgleichs in Kraftwerken</i>	79

3.3 AUSWAHL UND DEFINITION – VORAUSSETZUNG FÜR BLITZSCHUTZRICHTLINIE	82
3.3.1 Ergebnisse der Betrachtungen	82
3.3.2 Blitzschutz – Ortsveränderliche Geräte und Förderbrücken	82
3.3.3 Blitzschutz – Kraftwerksanlagen	97
3.4. PRÜFUNG, WARTUNG UND DOKUMENTATION	101
3.4.1 Prüfung	101
3.4.2 Wartung	102
3.4.3 Dokumentation	102
4. BLITZSCHUTZRICHTLINIE.....	103
4.1. AUFBAU UND GESTALTUNG DER FAM-RICHTLINIE	103
4.1.1 Vergleich der Werknormen.....	103
4.1.2 Vorgehensweise, Gestaltung und Ausführung	103
4.2 ANWENDEN DER BLITZSCHUTZRICHTLINIE AN EINEM BEISPIEL.....	105
5. ABSCHLIEßENDE BETRACHTUNG UND AUSBLICK	107
II. LITERATURVERZEICHNIS	I
III. NORMENVERZEICHNIS	II
IV. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	III
V. FORMELZEICHENVERZEICHNIS	V
VI. ABBILDUNGSVERZEICHNIS	XII
VII. TABELLENVERZEICHNIS	XIII
VIII. ANHANG	XIV
ANHANG 1: RISIKOMANAGEMENT	I
ANHANG 2: DARSTELLUNG BLITZEINSCHLAG ABSETZER UND BANDSCHLEIFENWAGEN	VI
ANHANG 3: BEWEISFÜHRUNG BLITZEINSCHLAG IN E-HAUS	VIII
ANHANG 4: SCHUTZWINKEL UND BLITZSCHUTZZONEN DER MOBILEN GERÄTE.....	IX
ANHANG 5: FUNKTIONSPOTENTIALAUSGLEICH	XI
ANHANG 6: ANORDNUNG KLEMMVERBINDUNG	XV
ANHANG 7: BESTIMMUNG SPEZIFISCHER ERDWIDERSTAND NACH WENNER	XVI
ANHANG 8: BESTIMMUNG AUSBREITUNGSWIDERSTAND.....	XVII
ANHANG 9: SPANNUNGSVERLAUF AM ABSETZER	XVIII
ANHANG 10: DARSTELLUNG EINES KRAFTWERKGEBÄUDES	XIX
ANHANG 11: DARSTELLUNG EINES ERDUNGSMASCHENNENETZ	XXII
ANHANG 12: UNTERSUCHUNG AN BLITZSCHUTZERDUNGSANLAGEN	XXIII
ANHANG 13: PROJEKTDARSTELLUNG	XXIV
ANHANG 14: POSITIONIERUNG VON FANGEINRICHTUNGEN AUF DÄCHERN	XXVII
ANHANG 15: POTENTIALAUSGLEICH IN KRAFTWERKSGBÄUDEN.....	XXVIII

1. Einleitung

1.1 Aufgabe und Ziel der Arbeit

Der weltweite Einsatz der Förderanlagen und Baumaschinen der FAM sowie deren Bauart und Lage sind Faktoren, die einen Blitzeinschlag mit all seinen Begleiterscheinungen begünstigen. Dies stellt Forderungen nach einem Blitzschutzsystem für jedes Gerät und jede Anlage des Produktportfolios, welches das sichere Einfangen, Ableiten und Verteilen des Blitzstroms in der Erde gewährleistet. Durch diesen Personen- und Anlagenschutz werden die Schäden der Blitzwirkungen reduziert und Verletzungen durch den elektrischen Schlag sowie der Verlust der Anlage oder ihrer Verfügbarkeit aufgrund des Ausfalls des elektrischen Systems auf ein akzeptiertes Maß begrenzt.

Die Bachelorarbeit „Erstellung einer Blitzschutzrichtlinie für die Produktpalette der FAM“, die in Zusammenarbeit mit der Hochschule Magdeburg-Stendal Fachbereich IWID - Institut für Elektrotechnik - entsteht, erörtert und generiert ein Regelwerk für die Analyse und Planung, Errichtung, Ausführung und Prüfung des Blitzschutzes und der Erdung.

Zu Beginn der Arbeit werden die Entstehung, Bedrohung und das Zerstörungspotential von Blitzen erläutert und die daraus hervorgehenden normativen Berechnungsmodelle und Tabellen vorgestellt. Anschließend wird die Produktpalette der FAM charakterisiert. Hieraus werden Demonstrationsmodelle ausgewählt, die zum einen die Gesamtheit aller ortsveränderlichen Geräte und zum anderen die Kraftwerksanlagen definieren.

Anschließend erfolgt das Risikomanagement und eine Stärken- und Schwächenanalyse. Darauf folgend werden an grafischen und rechnerischen Modellen diese Schwächen, wie auch der Funktionspotentialausgleich und die Erdungsanlage und deren Dimensionierung untersucht und Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt.

Es folgt eine Koordinierung der Blitzschutznorm mit weiteren Richtlinien und Normen um daraus den inneren Blitzschutz und die Schutzmaßnahmen gegen den elektromagnetischen Impuls zu klassifizieren sowie einen einheitlichen Schutz und Anwendungsplattform zu generieren. In ihr wird außerdem die Problematik der Wirtschaftlichkeit der Schutzbeschaltung aufgezeigt und ein Lösungsvorschlag begründet.

Abschließend werden die in der Bachelorarbeit aufgezeigten Lösungsmöglichkeiten durch klare Definitionen ersetzt, es erfolgt eine Gliederung sowie die Struktur der Blitzschutzrichtlinie, welche anhand einer Demonstration beispielhaft angewendet wird.

1.2 Historik

„Könnte nicht die Kenntnis von der Kraft der Spitzen der Menschheit von Nutzen sein,...“ [1]

Am 15. Juni 1752 legte Benjamin Franklin durch den Versuch des elektrischen Drachens den Grundstein für den modernen Blitzschutz, indem er nachwies, dass über die feuchte elektrisch-leitfähige Halteschnur seines Drachens und einem an ihm hängenden Schlüssel sich Funken aus einem heranziehenden Gewitter ziehen lassen. Er bewies so [1] und [3], dass der Wetterstrahl kein Zeichen der Götter oder gar Feuer ist, das aus den brennbaren Dämpfen der Erde besteht, die bei Regen aus ihr entweichen, sondern ein Ausgleichvorgang aufgrund einer elektrostatischen Aufladung.

Die daraus folgende Weiterentwicklung des Schilderhausexperiment (Abb. 1), welches in Schrift im Jahr 1750 vorbetrachtend entstand, beschrieb den ersten Schutz eines Objektes vor Blitzen und deren Folgen durch eine angespitzte mit dem Erdreich verbundene eiserne Fangstange. [3]

In seinen anschließenden Versuchen gewinnt er Erkenntnisse über den begrenzten

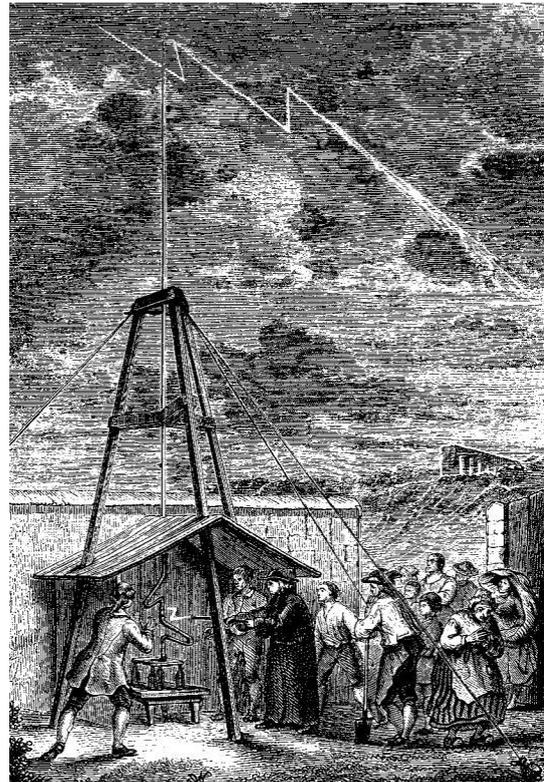


Abb. 1: Erstes Blitzableiterexperiment [1]

Schutzbereich und die Dimensionierung der Fangstangen und Ableitungen. Wenig später erhielt als erstes europäisches Bauwerk der Eddystone-Leuchtturm bei Plymouth den Blitzableiter und im Jahre 1769 wurde durch den Schutz der Hamburger St.-Jacobi-Kirche auch in Deutschland der Blitzschutz eingeführt. [2]

In [2] und [3] liest man weiter, dass die darauf folgenden fahrlässig ausgeführten Experimente und Turmläuten gegen Gewitter sowie fragliche Modeaccessoires, spätestens nach dem Tod von Physikprofessor Georg Wilhelm Richmann, der während der Lesung durch einen Blitzeinschlag einem gefährlichen Körperstrom ausgesetzt war, das gefährliche Potential des Blitzes für den Menschen darstellten.

Am Ende des 18. Jahrhunderts wurden die ersten „Allgemeingültigen Vorschriften“ von Reimarus herausgegeben und in der Folgezeit definierte man unter dem Treiben der Feuerversicherungsanstalten Blitzschutzvorschriften, die im heutigen Sprachgebrauch als äußerer und innerer Blitzschutz beschrieben werden. Die Vermeidung der Schäden durch

unmittelbare Blitzentladungen und Lufterlektrizität, auch elektromagnetischer Impuls genannt, gewann an Bedeutung während des Etablierens und raschen Anwachsens der Fernmeldetechnik.

Obwohl Schutzmaßnahmen getroffen werden, sterben heute noch 30% der Menschen, die von einem Blitz getroffen werden, an den Folgen des Blitzschlages [15] oder an den Auswirkungen des Potentialtrichters. Darüber hinaus fallen dem Blitz Anlagen, Maschinen, Gebäude und Installationen bis hin zur immer filigraner werdenden Elektronik durch Brand und Überspannung zum Opfer. Aus diesem Grund sind der Blitzschutz und die Blitzforschung ein notwendiges Muss und Wissenschaft.

2. Charakteristika des Blitzes

2.1 Entstehung, Ortung und Häufigkeit von Blitzen

Unter Zuhilfenahme der Quellen [2], [3], [4], [5] und [6] wird die Blitzentstehung, -ortung und -häufigkeit beschrieben.

Die Voraussetzung für den Blitz sind Front-, Wärme- oder orographische Gewitter, deren Zellen sich wegen elektrostatischer Ladungstrennprozesse durch Reibung und Zersprühen von Eispartikeln und Wassertröpfchen beim Aufsteigen warmer Luftmassen in größere Höhen positiv oder negativ aufladen. Der naturbedingte Ausgleich dieser Differenz des andersgearteten Potentials gegenüber der Bezugserde trägt den Namen Blitz. Er tritt überwiegend zwischen den Wolken auf und wird deswegen als Wolke-Wolke-Blitz bezeichnet. Erdblitz hingegen, wie der Abwärtsblitz (Wolke-Erde), gehen oft im flachen Gelände und bei niedrigen baulichen Anlagen nieder und kennzeichnen einen zur Erde hin verästelten Verlauf. Aufwärtsblitze (Erde-Wolke) können an sehr hohen und exponierten Objekten wie z.B. Fernmeldetürmen entstehen.

Die Struktur des Naturphänomens liegt der Entladung eines gigantischen Kondensators zugrunde, bei dem der positive Abwärtsblitz das für den Blitzschutz gefährlichste Ereignis darstellt. Seine Initiierung beginnt durch die Ionisierung der Wolkenunterseite, bei der die zufällig vorhandenen Raumladungsdichten lokale Feldstärken von bis zu 100kV/m erreichen. Der Leader entsteht und nähert sich mit einer Geschwindigkeit von etwa 300km/s in 10m-Abschnitten ruckweise und zufällig der Erde. Hierdurch steigt die elektrische Feldstärke und beschleunigt die Aufladung der Erde. Nach dem Überschreiten der elektrischen Festigkeit der Luft wachsen dem bis auf wenige 100m bis 10m angenäherten Leitblitz Fangentladungen der Erdobjekte entgegen. Treffen die entgegengesetzt ausbreitenden Leader aufeinander, ist ein Kanal mit niedriger Impedanz geschaffen und die Hauptentladung setzt ein. Ferner beschreibt die Ladung des initiierenden Leaders die Aufteilung in einen

negativen oder positiven Blitz, der im Verhältnis 9/1 von der geographischen Lage bzw. der Höhe des Objektes abhängt. Das helle Aufleuchten der Hauptentladung zeichnet diesen Pfad nach, lässt auf die Temperatur von einigen 10000°C und der Ausbreitungsgeschwindigkeit von 100000 km/s des Blitzes schließen. Weiterhin bietet der verbleibende niederimpedante Kanal die Möglichkeit zur Entstehung von bis zu zehn folgenden Teilblitzen. Außerdem zeigen Beobachtungen an Turmspitzen, dass in einem Streubereich von 1m die Möglichkeit weiterer Einschläge aufgrund von Windeinwirkung, welche die Blitzfußpunkte verschiebt, möglich sind [2].

Weltweit sind zu jedem beliebigen Zeitpunkt mehr als 2000 Gewitter aktiv, die pro Sekunde 100 Blitze produzieren. Doch deren Häufigkeit divergiert stark von Ort zu Ort. In Mitteleuropa zum Beispiel treten pro Quadratkilometer etwa 10-25 Gewitter jährlich auf, hingegen sind es rund um den Äquatorgürtel annähernd 100-180 pro Jahr. Diese empirische Beobachtung firmiert unter dem Fachbegriff Keraunischer Pegel. Dieser Pegel galt in der Vergangenheit als ausschlaggebend für die Bestimmung der Blitzeinschlaghäufigkeit in einem bestimmten Gebiet. Die Blitzforschung erkannte, dass der Blitz einen elektromagnetischen Impuls (LEMP) durch den hohen Stromfluss beim Einschlag aussendet. Dieser Impuls kann mit Hilfe des Global-Positioning-Systems und mit auf einer Fläche verteilten Messstationen, welche die Stärke und die Laufzeitunterschiede erfassen und zentral auswerten, den Verlauf der Gewitterfront, den genauen Ort und Zeitpunkt, die Art des Blitzes und dessen Stärke wiedergeben.

Der Blitzinformationsdienst der Firma Siemens (BLIDS) oder das europäische Pendant European Cooperation for Lightning Detection (EUCLID) definieren mit diesem Verfahren die Einschlaghäufigkeit bzw. die Erdblitzdichte auf einen Punkt mit einer Abweichung von etwa 200m. Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass sich jährlich etwa 1,5 Millionen Blitze über dem Gebiet der Bundesrepublik entladen.

2.2 Der Blitz

Ein Wolke-Erde-Blitz führt bei Entladung einen gewaltigen Strom zur Erde, der neben seinen thermischen und dynamischen Auswirkungen auch für die Induktion von Überspannungen, hochfrequenten Störungen und Isolationsschäden verantwortlich ist. Die nachfolgende Klassifizierung des Blitzeinschlages, der dabei auftretenden Blitzströme und die daraus resultierenden Wirkparameter sind nach [3] und [N1] definiert und geben Aufschluss über die primäre und sekundäre Gefährdung, die in und an der baulichen Anlage ein unterschiedliches Schutzpotential für Mensch und Maschine bedürfen.

2.2.1 Blitzeinschlag

Blitzeinschläge werden in Direkt, Nah- und dem Ferneinschlag unterschieden. Rückblickend auf die Entstehung des Blitzes wird der Einschlagpunkt durch den Startpunkt der Fangentladung festgelegt. Da sich der Leitblitzkopf dem Erdboden aufgrund der ständig anwachsenden elektrischen Bodenfeldstärke nur bis zu einem bestimmten Abstand (10-100m) nähern kann, bevor er stagniert und die Fangentladung auslöst, wird dieser Abstand zwischen dem Blitzkopf und dem Einschlagpunkt ohne Fangentladung als Enddurchschlagsstrecke bezeichnet. Nach [3] ist ein geometrisch-elektrisches Modell entstanden, dass die Enddurchschlagsstrecke r in m , wie folgt, über die Proportionalität zum Blitzstrom I in kA annähert:

Die im Blitzkanal befindliche längenbezogene Ladung Q' in As bestimmt die Größe des Blitzstromes im Produkt mit der Vorwachs geschwindigkeit v in km/h :

$$i = Q' * v \quad \text{Formel 1}$$

Da die Vorwachs geschwindigkeit v der Hauptentladung konstant ist, gilt:

$$i \sim Q'$$

In erster Näherung ist die Feldstärke am Kopf des Leitblitzes proportional zur längenbezogenen Ladung Q' und umgekehrt proportional zur Enddurchschlagsstrecke. Daraus folgt die Anfangsfeldstärke E_a in kV/m .

$$E_a \sim \frac{Q'}{r}$$

Um den Start der Fangentladung zu initiieren, bedarf es einer Anfangsfeldstärke, also gilt:

$$Q' \sim r \quad \text{bzw.} \quad r \sim i$$

Hieraus folgt aus [3] nach jetzigem Stand der Blitzforschung die empirische Näherung nach Formel 2:

$$r = 10 * I^{0,65} \quad \text{Formel 2}$$

Dieses geometrisch-elektrische Modell zeigt, dass sich, wie durch die Blitzstromparameter im weiteren Verlauf begründet, negative stromschwache Abwärtsblitze dem Objekt vielmehr nähern als ein stromstärkerer positiver Wolke-Erde-Blitz.

Aus dieser Erkenntnis wurden die in Tab. 1 folgenden Enddurchschlagstrecken einem Gefährdungspegel zugeordnet. Dieser ist ein Maß für die minimalen und maximalen Blitzstrom-Parameterwerte, welche einem entsprechenden blitzeinschlaggefährdeten Objekt im Grad seiner Anforderung im Rahmen der IEC 62305 zugrunde gelegt werden.

Anforderung	Gefährdungspegel	Enddurchschlagstrecke r	Zu r gehörender Stromscheidenwert \hat{I} in kA
hoch	<i>I</i>	20m	2,9
erhöht	<i>II</i>	30m	5,4
normal	<i>III</i>	45m	10,1
niedrig	<i>IV</i>	60m	15,7

Tab. 1: Enddurchschlagstrecke des Blitzes nach [3]

Ferner gilt, dass der kleinste Stromscheidenwert ein Einfangen des Blitzes mit einer Wahrscheinlichkeit von 99% gewährt. Was gleichzeitig aber auch bedeutet, dass kleinere Blitze nicht eingefangen werden und das zu schützende Volumen treffen.

Weiterhin zeigten die Untersuchungen der CIGRE-Gruppe (*Conseil International des Grands Réseaux Electriques*), dass die Enddurchschlagsstrecke weniger von Art und Form des getroffenen Objektes abhängt, sondern viel mehr mit der Höhe des Objektes zunimmt.

Der Vergleich der Enddurchschlagsstrecke mit einem sich um den Kopf des Leitblitzes ausbreitenden kugelförmigen blitzeinschlaggefährdeten Bereich endet in der Definition der Blitzkugel. Das Verfahren gilt als Hauptwerkzeug für die Bestimmung des äußeren Schutzraumes einer baulichen Anlage. Durch eine experimentelle Betrachtung können aus ihr das Schutzwinkel- und Maschenverfahren abgeleitet werden, welche im Verlauf dieser Arbeit noch eingehend vorgestellt und angewendet werden.

Beim Direkteinschlag wird der transiente Blitzstrom unvermittelt in das zu schützende Objekt eingeleitet. Hierdurch können Schädigungen der Bausubstanz und der Installationen durch Ausschmelzungen, thermische und elektrische Funkenbildung, die auch Brände initiieren können, auftreten. Zum Schutz des Objektes dienen Blitzschutzsysteme, die über metallene Komponenten den Blitz einfangen und sicher in die Erdungsanlage des Hauses ableiten. Es entsteht wegen des Erdungswiderstandes der Erdungsanlage eine Anhebung des Gebäudepotentials bzw. ein Potentialtrichter zwischen ihr und der Bezugserde, der zu Schäden in der elektrische Anlagen und die an ihr angeschlossenen Geräte führt. Zudem induziert der sich schnell ändernde Blitzstrom Stoßspannungen und daraus resultierende Stoßströme in die Leiterschleifen der Gebäudeinstallation. Außerdem ruft der Spannungsfall einen Fluss von Teilblitzströmen in den über den Potentialausgleich an der Haupterdungsschiene (HES) direkt oder über Schutzelemente angeschlossenen entfernt geerdeten Versorgungsleitungen hervor.

Die Bedrohung des Naheinschlags resultiert aus dem Blitzeinschlag in Energie- und Versorgungsleitungen, die in die Anlage eingeführt sind. Hierdurch können größere

Blitzströme als beim Direkteinschlag fließen. Im Gegensatz zum Direkteinschlag, bei dem über das äußere Blitzschutzsystem der Blitzstrom sofort in die Erde und anteilig auf die an der HES angeschlossenen entfernt geerdeten Installationen abgeführt wird, muss beim Naheinschlag der in der Versorgungsleitung eingeführte Stoßstrom erst über Schutzelemente und der HES nahezu komplett zur Erdungsanlage abgeleitet werden, sodass dadurch eine größere Belastung für die Schutzelemente entsteht.

Der typische Fall eines Ferneinschlags liegt vor, wenn ein Blitz neben oder in die Freileitung des vorgeschalteten Mittelspannungsnetzes einschlägt oder wenn Wanderwellen verursacht durch Wolke-Wolke-Blitze im Netz Überspannungen induzieren.

Zudem ist in allen drei Fällen der elektromagnetische Impuls des Blitzes gegenwertig, sodass allgemein gilt: Die Störeinwirkung ist umso größer, je näher der Einschlag am Schutzobjekt erfolgt.

2.2.2 Blitzstrom-Parameterwerte

Bei einer Blitzentladung treten drei typische Komponenten auf. Sie werden als Erstblitzstrom, Folgeblitzstrom und Blitzlangzeitstrom bezeichnet und gelten als die primären Blitzstörgrößen.

Aufgrund des technischen Fortschritts, der internationalen Aufzeichnung und Normungsarbeit sind diese Größen der natürlichen Blitzstromverläufe charakterisierbar und den erwähnten Gefährdungspegeln aufgrund ihrer beeinflussenden Komponenten zugeordnet. Wobei der Gefährdungspegel einen Zahlenwert darstellt, der sich auf einen Satz von Blitzstromparametern der kleinsten und größten Blitzbemessungswerte bezieht, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit nicht überschritten werden [N1].

Die folgenden Tabellen 2-4, zusammengestellt aus [3] und [N1], gliedern die Blitzstromarten in Bezug auf die Gefährdungspegel, die beispielhaft in Abb. 2 gezeigt sind.

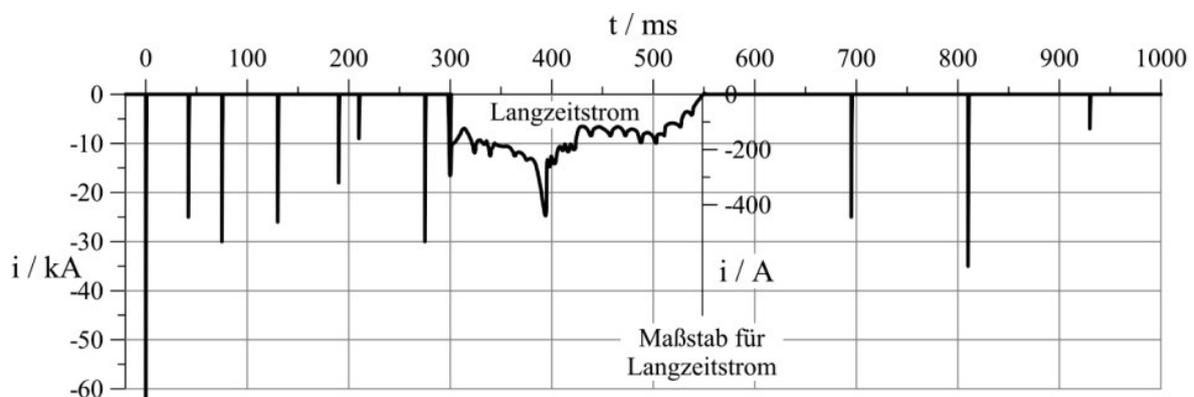


Abb. 2: Grafische Darstellung Blitzstrom-Parameterwerte (nach Prof. K. Berger) aus [18]

Der Erstblitzstrom, siehe Tab. 2, ist unterteilt in positiv(+) und negativ(-), er verläuft langanhaltend, aperiodisch und gedämpft.

Gefährdungspegel	Symbol	Einheit	I		II		III / IV	
			+	-	+	-	+	-
Erstblitzstrom			+	-	+	-	+	-
Stromsichelwert	\hat{I}	<i>kA</i>	200	100	150	75	100	50
Ladung Stoßstrom	$Q_{Stoß}$	<i>As</i>	100	28,7	75	21,5	50	14,3
Spezifische Energie	W/R	<i>MJ/Ω</i>	10	1,4	5,6	0,81	2,5	0,36
Zeitparameter	T_1/T_2	<i>μs/μs</i>	10/350 (+) / 1/200(-)					

Tab. 2: Parameter Erstblitzstrom [N1]

Der Folgeblitzstrom ist wie der Erstblitzstrom ein gedämpfter aperiodische Impuls, der jedoch eine wesentlich höhere Steilheit und kleinere Wirkzeit besitzt und sein Maximum im negativen Abwärtsblitz findet und in Tab. 3 definiert ist.

Gefährdungspegel	Symbol	Einheit	I	II	III / IV
Stromsichelwert	\hat{I}	<i>kA</i>	50	37,5	25
Mittlere Steilheit	di/dt	<i>kA/μs</i>	200	150	100
Zeitparameter	T_1/T_2	<i>μs/μs</i>	0,25/100		

Tab. 3: Parameter Folgeblitzstrom [N1]

Ein unipolarer Rechteckimpuls mit einer geringen Stromstärke kennzeichnet den ladungsintensiven Blitzlangzeitstrom. Seine Werte sind in Tab. 4 dargestellt.

Gefährdungspegel	Symbol	Einheit	I	II	III / IV
Ladung Langzeitstrom	Q_{Lang}	<i>As</i>	200	150	100
Zeitparameter	T_{Lang}	<i>s</i>	0,5		

Tab. 4: Parameter Blitzlangzeitstrom [N1]

2.2.3 Wirkungen des Blitzes

Die Art der Blitzströme, die daraus resultierenden Potentialunterschiede und Überspannungen können auf verschiedene Weise eine Gefährdung von Lebewesen und die Beeinträchtigung der Funktion oder gar eine Zerstörung der bauliche Anlage bedeuten. Die nachfolgenden Unterscheidungsmerkmale ordnen die Größen der Blitzströme ihren Wirkungen zu. Mit Hilfe der analytischen Darstellung durch Formel 3 nach [N1] des Blitzstromes *i* in *kA* während der Zeit *t* in *s* zeigt die Abb. 3 den Stromverlauf eines positiven Wolke-Erde-Blitzes nach Gefährdungspegel *I* und bildet die Grundlage für die Definition der sekundären Störgrößen.

$$i(t) = \frac{\hat{I}}{k} * \frac{(t/\tau_1)^{10}}{1 + (t/\tau_2)^{10}} * \exp(-t/\tau_2)$$

Formel 3

$\hat{I} = 200 \text{ kA}$ Stromsichelwert $k = 0,93$ Reduktionsfaktor
 $\tau_1 = 19 \mu\text{s}$ Stirnzeitkonstante $\tau_2 = 485 \mu\text{s}$ Rückenzeitkonstante

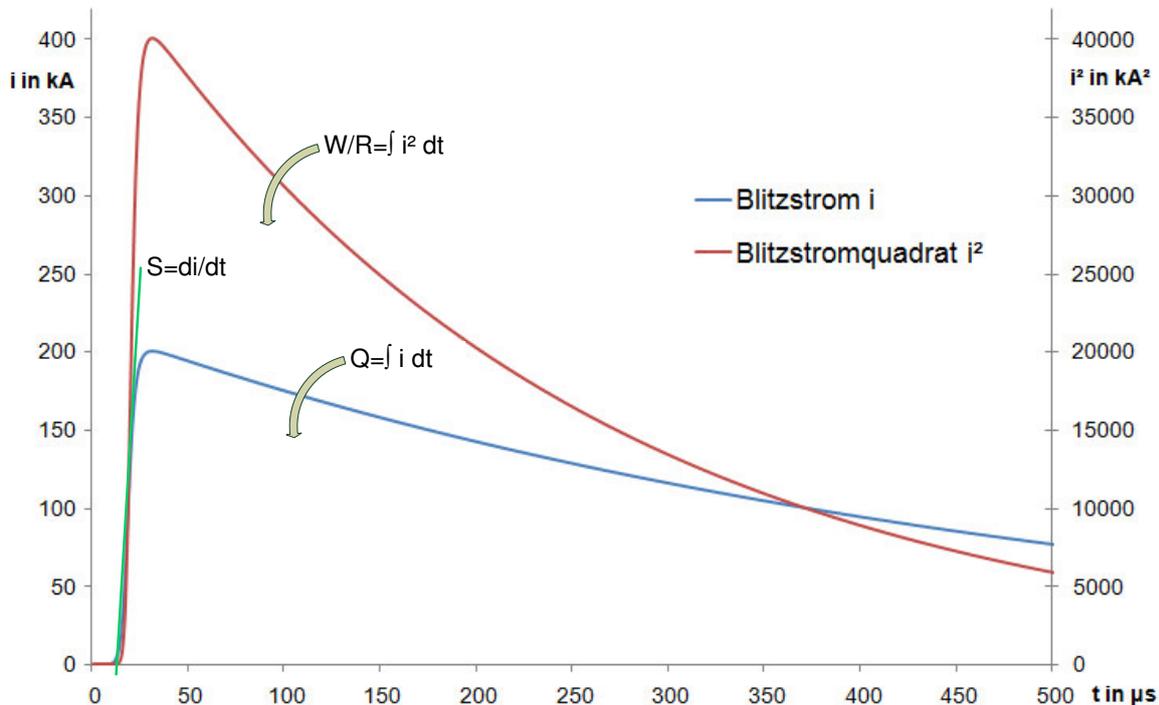


Abb. 3: Analytische Darstellung des Blitzstromes

2.2.3.1 Scheitelwert des Erstblitzstromes

Das Einprägen eines Blitzstroms in die leitfähigen Teile eines Systems, die über den Potentialausgleich auch mit dem Schutzleiter der Energieversorgung verbunden sind, wird als galvanische Kopplung bezeichnet. Nach dem ohmschen Gesetz lässt sich mit der Formel 4 aus [3] der Spannungsfall U in V durch die Amplitude des Stromes \hat{I} und die Impedanz R in Ω der Leitungen wie auch die der Erdungsanlage einfach nachvollziehen.

$$U = \hat{i}(t) * R$$

Formel 4

Die [N1] gibt folgende in der Tab. 2 gelistete Werte vor, sodass ein Spannungsfall bei hohen (früher: extremen) Anforderungen (Gefährdungspegel I) eine Erhöhung des Anlagenpotentials um mehrere 100kV auslöst.

Auf der einen Seite kann daher in der elektrischen Installation eines Gebäudes eine Isolationsgefährdung in Form von Durchschlag auftreten, da die Spannungsfestigkeit der einzelnen Isolationsmaterialien überschritten wird. Interne Geräte, Leitungen oder Adern können somit beschädigt oder gänzlich zerstört werden. Außerdem ist durch die elektrische Funkenbildung unter anderem auch die Möglichkeit eines Brandes gegeben.

Andererseits wird am Erdungswiderstand R_E einer Erdungsanlage, der mitunter einige Ohm betragen kann, oder an einer homogenen leitenden Fläche, beim Eintreten eines Blitzstroms ein enormer Spannungsfall gegenüber der Bezugserde deutlich. Dieser Spannungsfall spiegelt die Gefährdung aufgrund von Schritt- und Berührungsspannungen für Lebewesen durch den Potentialtrichter bildhaft wider.

2.2.3.2 Kraftimpuls

Die Proportionalität der Kraft zum Quadrat des elektrischen Stroms ($F \sim i^2$) wobei F in N bewirkt eine Anziehung oder Abstoßung parallel verlegter Leitungen bzw. eine Deformation von ungünstig angeordneten Leitungsschleifen. Dies kann auch zur Zerstörung von Halterungen und Stützen sowie der Verschiebung von Klemmen führen. Mit der Länge des parallelen Verlaufs l in m und dem Abstand d in m parallel zueinander positionierten Leitungen kann die auf sie einwirkende Kraft durch Formel 5 aus [N1] zur richtigen Auslegung bestimmt werden.

$$F(t) = 2 * 10^{-7} * i^2(t) * \frac{l}{d} \quad \text{Formel 5}$$

2.2.3.3 Steilheit des Folgeblitzstromanstieges

Die induktive Kopplung beschreibt die Höhe der Spannungen in einer Installationsschleife, die wegen der Stromsteilheit und des daraus folgenden sich rasch verändernden magnetischen Feldes im Blitzkanal selbst wie bei Naheinschlägen oder beim Ableitvorgang über das Blitzschutzsystem induziert werden.

Hierbei ist neben der Gegeninduktivität M in $\mu Vs/A = \mu H$ der Schleife die Stromsteilheit des Folgeblitzes, die wegen des schon bestehenden Kanals wesentlich größer ist, zu verwenden. Das Ergebnis gezeigt in Formel 6 liefert eine magnetisch induzierte Rechteckspannung U_{ind} , die während der Zeit Δt in eine offene oder geschlossene Leitungsschleife induziert wird [3].

$$U_{ind} = M * \frac{di}{dt} \quad \text{Formel 6}$$

Die Gegeninduktivität einer beliebigen Rechteckschleife nach Formel 7 ist über die Superposition bestimmbar [3]. Hierzu ist unter Voraussetzung des quasistatischen Zustands die Länge des parallelen Verlaufs l in m , die Breite der Leiterschleife b in m und der Abstand a in m zur Mitte der Ableitung von Bedeutung.

$$M = 0,2 * l * \ln \frac{b}{a} \quad \text{Formel 7}$$

Infolge der induzierten Rechteckspannung können bei Kurzschluss oder Durchschlag der Isolierstrecke in der Schleife hohe Ströme fließen. Hierbei kann durch die elektrische Funkenbildung ein Brand verursacht oder auch die Elektroinstallation komplett zerstört werden.

2.2.3.4 Ladung und spezifische Energie

Die Einwirkzeit und Polarität des Erstblitzstromes und Blitzlangzeitstromes sowie die sich in der Stirn des Blitzes befindliche Ladung sind Grund für thermische Wirkungen am Lichtbogenfußpunkt, der Erwärmung des blitzstromdurchflossenen Leiters und der daraus möglichen thermischen Funkenbildung an Verbindungsstellen. In [3] ist folgendes zu lesen.

2.2.3.4.1 Erwärmung des Einschlagortes

Die Größe der Ladung des Blitzes Q_{Blitz} in As, die sich aus der Stoß- und Langzeitentladung, wie in Formel 8 beschrieben, zusammensetzt, besitzt die Fähigkeit bei Einschlag Beschädigungen wie Brände und Ausschmelzungen herbeizuführen. Je nach Einwirkdauer und Größe des dazugehörigen Stromes können Metalle punktuelle Schmelzerscheinungen von wenigen Mikrometern sowie ein Sprühen aufweisen. Außerdem ist durch den ladungsintensiven Langzeitstrom ein Durchlöchern von millimeterstarken Blechen möglich.

$$Q_{Blitz} = Q_{Sto\beta} + Q_{Lang} = \int_0^{T_{lang}} i * dt \quad \text{Formel 8}$$

2.2.3.4.2 Erwärmung eines Leiters

Die spezifische Energie des Blitzes W/R in J beschreibt den zeitlichen Umsatz eines Stoßstromes in einem temperaturabhängigen Gleichstromwiderstand R von 1Ω . Sie ist in Formel 9 definiert.

$$\frac{W}{R} = \int_0^{T_2} i^2 * dt \quad \text{Formel 9}$$

Folglich gilt die Formel 10 für die in einem Leiter umgesetzte Energie.

$$W = R * \int_0^{T_2} i^2 * dt = R * W/R \quad \text{Formel 10}$$

Nun lässt sich mit Hilfe der spezifischen Energie W/R des Erstblitzstromes auch die Erwärmung eines blitzstromdurchflossenen Leiters annähern. Bei der Formel 11 in Verbindung mit Tab. 5 kann eine gleichmäßige Stromverteilung in den stromführenden Leitern aller Materialien angenommen und ein Temperatenausgleich wegen der kurzen Stromeinwirkung zwischen dem Leiter und seiner Umgebung vernachlässigt werden [3].

$$\Delta\vartheta = \frac{1}{\alpha} \left(\exp \frac{W}{q^2 * \gamma * C_W} * \alpha * \varrho - 1 \right)$$

Formel 11

$\Delta\vartheta = \vartheta_S - \vartheta_U$ = Temperaturdifferenz zwischen Schmelz- und Umgebungstemperatur in K

α = Temperaturkoeffizient des Widerstandes

ϱ = spezifisch-ohmscher Widerstand bei Umgebungstemperatur

q = Leiterquerschnitt in m^2

γ = Massendichte

C_W = spezifische Wärmekapazität

C_S = spezifische Schmelzwärme

Kennwerte	Aluminium (Al)	Eisen (Fe)	Nichtrostender Stahl (NIRO) 1.4571	Kupfer (Cu)
ϱ in Ωm	$29 * 10^{-9}$	$120 * 10^{-9}$	$750 * 10^{-9}$	$17,8 * 10^{-9}$
α in $1/K$	$4,0 * 10^{-3}$	$6,5 * 10^{-3}$	$8 * 10^{-4}$	$3,92 * 10^{-3}$
γ in kg/m^3	2700	7700	7980	8920
ϑ_S in $^{\circ}C$	658	1530	1500	1080
C_S in J/kg	$397 * 10^3$	$272 * 10^3$	$300 * 10^3$	$209 * 10^3$
C_W in $J/(kg * K)$	908	469	500	385

Tab. 5: Kennwerte von Materialien [3]

Bei genauerer Analyse lässt sich erkennen, dass die Schmelztemperaturen bei kleinen Querschnitten aller Materialien weit überschritten werden und daraus folgend der Leiter komplett schmilzt oder gar explodiert. Erst ab einem Leiterquerschnitt von $q_{Cu} = 16mm^2$ herrscht Blitzstromtragfähigkeit bei einem maximal auftretendem positiven Erstblitzstroms nach Tab. 2. [3]

2.2.3.4.3 Ausschmelzung

Die umgesetzte Lichtbogenenergie W am Einschlagpunkt ist mit dem Anoden-/Kathodenspannungsfall $U_{A,K}$ und der Ladung des Blitzes über Formel 12 ermittelbar.

$$W = Q_{Blitz} * U_{A,K}$$

Formel 12

Das Schmelzen der getroffenen Oberfläche ist auf den Energieumsatz im Lichtbogen-Fußpunkt des Blitzes zurückzuführen. Die nachfolgende Formel 13 gilt als konservativ-überbewertete Näherung des ausgeschmolzenen Volumens [N1_AnD4.1.2].

$$V = \frac{W}{\gamma} * \frac{1}{[C_W * (\vartheta_S - \vartheta_U) + C_S]}$$

Formel 13

2.2.3.5 Elektromagnetischer Impuls

Der elektromagnetische Impuls (LEMP) rührt aus dem elektromagnetischen Feld des Blitzkanalteilstückes, welches Werte von mehreren MV/m für die elektrische sowie einige kA/m für die magnetische Komponente aufweist [3]. Dieser Impuls erzeugt Überspannungen und Ströme durch die induktive und kapazitive Kopplung in metallenen Installationen. Er führt auch zu der Übertragung von Wanderwellen in Freileitungen. Sein schadhafter Einfluss ist bei allen Blitzeinschlagarten gegenwärtig.

Für die einfache statische Betrachtung ist das einfallende Magnetfeld H_0 eines transienten LEMPs zusammengesetzt aus dem Abstand s_a in m zum Einschlagort und dem Erstblitzstrom I_0 und wird über Formel 14 ermittelt.

$$H_0 = \frac{I_0}{2 * \pi * s_a} \quad \text{Formel 14}$$

Die hervorgerufenen Überspannungen des LEMPs übertreffen bei weitem die Überspannungen der von Schalthandlungen (SEMP) und nuklearen Explosionen (NEMP) ausgelösten Impulse.

2.3 Zusammenfassung und Darstellung der Wirkungen des Blitzes

Der Schutz vor den gefährlichen Auswirkungen des Blitzes wird in Blitzschutzklassen (BSK) beschrieben. Diese beinhalten die allgemein klassifizierten und beschriebenen Parameter der Gefährdungspegel entsprechend ihrer Stärke und Verhältnisse. In der Tab. 6 werden sie aufgelistet.

BSK	Scheitelwert \hat{I} in kA	Gesamtladung Q_{Blitz} in As	Impulsladung Q_{stoB} in As	Spezifische Energie $\frac{W}{R}$ in $\frac{MJ}{\Omega}$	Steilheit $\frac{di}{dt}$ in $\frac{kA}{\mu s}$
I	200	300	100	10	200
II	150	225	75	5	150
III/IV	100	150	50	2,5	100

Tab. 6: Zusammenfassung Blitzparameter [N1]

Obwohl Blitze mit der Tab. 6 eindeutig charakterisiert wurden, sei abschließend erwähnt, dass diese Werte mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit nicht überboten werden. Dennoch wurden auch Blitzstromstärken oberhalb der 200kA bei Turmmessungen im Rahmen der Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore aufgezeichnet, [N1] und [16].

In der Abb. 4 werden nun die für die anschließenden Betrachtung und Auslegung des Blitzschutzes verwendeten Wirkungen demonstriert.

Die Komplexität der Wirkungen eines Blitzeinschlages wird zur Vereinfachung in drei Gruppen eingeteilt. Zum einen stehen die physikalischen Schäden durch Strom, Energie und Ladungshöhe in Gruppe 1 und zum anderen basiert die Gruppe 2 auf der Induktion von Überspannungen in die inneren Systeme. Aus ihnen resultieren die Gefährdungen für Geräte und Maschinen. Die Gruppe 3 hingegen zeigt den Menschen, der durch das Auftreten von gefährlichen Schritt- und Berührungsspannungen oder bei einem Stromstoß durch den Blitz verursacht, ohne das Vorhandensein von Schutzmaßnahmen verletzt oder getötet werden kann.

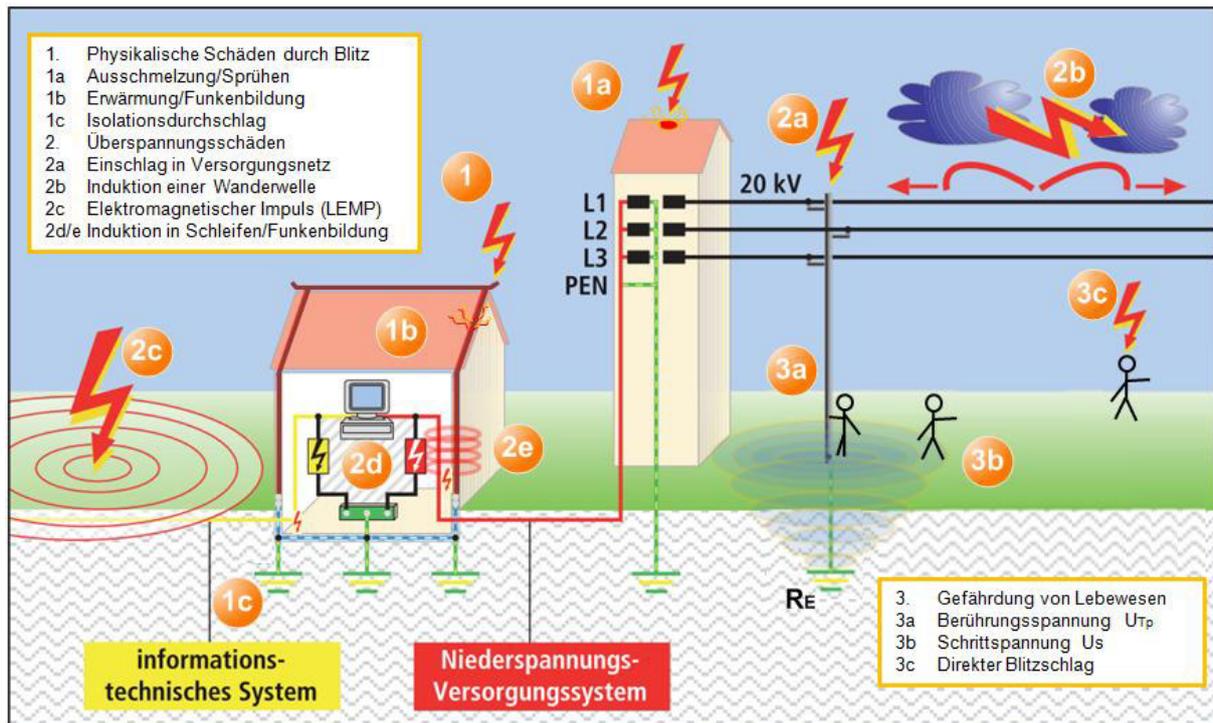


Abb. 4: Zusammenfassung Wirkungen eines Blitzes nach [7]

Um die Gefahren der Wirkungen auf ein tolerierbares Maß zu verringern oder sie zu vermeiden bedarf es eines Systems, das sowohl den Menschen als auch die Maschine schützt.

2.4 Konflikt des Konstrukteurs

Es folgt eine polemische Auseinandersetzung mit dem Begriff Blitzschutz und dessen Notwendigkeit, die im Vorfeld dieser Arbeit im Bereich der FAM bestand.

„Es gibt weder Einrichtungen noch Verfahren, mit denen die natürlichen Wettererscheinungen so beeinflusst werden können, dass Blitzentladungen verhindert werden können.“ [N1]

Dieses Zitat der Blitzschutznorm IEC 62305-1 gibt treffend wieder, wie sehr ein Blitzschutz z.B. bei explosionsgefährdeten Anlagen von Nöten ist. Hingegen stellt sich die Frage, ob ein

landwirtschaftlich genutztes Gebäude wie z.B. eine Scheune überhaupt einen Blitzschutz braucht.

Ja, sie muss nach [N7] geschützt werden und ihr Schutz obliegt zudem dem Ermessen des Eigentümers.

In erster Linie steht immer der Schutz von Leben im Vordergrund. Wobei hier eine Blitzentladung vom Gebäude ferngehalten werden muss, sodass es zweckmäßig ist, wie in [3] beschrieben, getriggerte Raketen zur vorsätzlichen Erzeugung des Blitzes oder ein isoliertes oder getrenntes Blitzschutzsystem einzusetzen. Nachteil dessen ist das bestehenbleibende elektromagnetische Feld und das Einführen des anteiligen Blitzstromes, welcher aus dem Naheinschlag resultiert, in den metallener Installationen und die hieraus entstehende Gefährdung durch den elektrischen Schlag. Das Abtrennen der Energieversorgung und ein dosenartiger-metallener Schirm, der wie der Faradayische Käfig um die Anlage herum installiert würde, löst diese Probleme. Neben der mangelnden Verfügbarkeit wäre die Anlage ein wirtschaftliches Chaos und es stellt sich die Frage: „Sicherheit zu welchem Preis?“. Werden die vorher betrachteten Lösungen zumal auch unter der Kritik des Eigentümers bis hin zur eigenen Konstruktionsschnittstelle mit der Kollegschaft optimiert, ist das Blitzschutzsystem immer noch ein ästhetisches Wagnis. Viel mehr bleibt anzumerken, dass ein Blitzschutzsystem nicht vor Blitzeinschlag schützt, da es diesen im eigentlichen Sinne zum Funktionieren benötigt. Überlegungen zum Nutzen dessen sind gerechtfertigt und der leichtsinnige Verzicht auf einen Teil oder des gesamten Systems drängen sich auf.

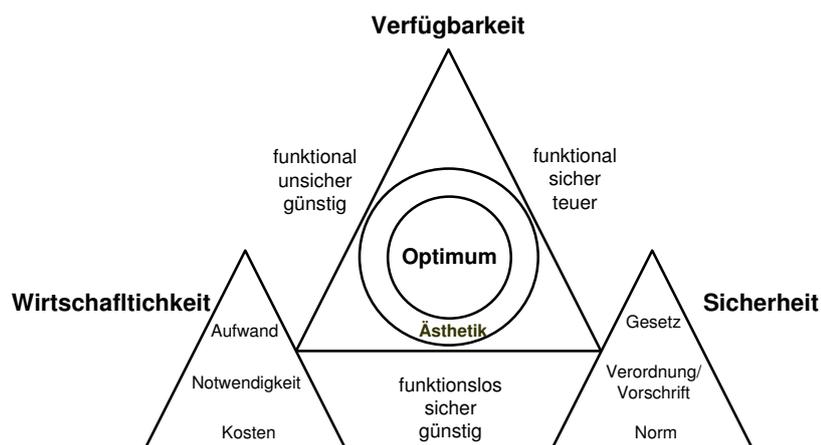


Abb. 5: Konflikt des Konstrukteurs

Doch welche Auswirkungen hat dies und inwieweit entspricht es dem Reglement der Technik bzw. der Gesetze?

Halber Blitzschutz ist kein Blitzschutz!

Die Wechselwirkungen zwischen der Sicherheit für Lebewesen, den behördlichen und normativen Verweisen, der Verfügbarkeit der Anlage und die entstehenden Kosten für das Blitzschutzsystem beeinflussen sich gegenseitig. Die Ausmaße dieser Betrachtung stellen den Konstrukteur vor einen Konflikt (Abb. 5). Mit der Erfassung des Risikos und einer darauffolgenden Kosten-Nutzenanalyse muss im Rahmen einer koordinierten Planung, Konstruktion und Ausführung mit allen beteiligten Instanzen ein Optimum erreicht werden.

3. Die FAM und der Blitzschutz

3.1 Der Blitzschutz baulicher Anlagen

Der Blitzschutz ist nach [N1] die Gesamtheit aller Maßnahmen, die das Leben und die Gesundheit von Mensch und Tier schützen, der Zerstörung von Sachwerten entgegenwirken und die Funktion der baulichen Anlage erhält. Er wird unterteilt in das Blitzschutzsystem (Lightning Protection System (LPS)) und in die Schutzmaßnahmen gegen den elektromagnetischen Impuls (engl.: Surge Protection Measures (SPM)).

Die internationale Blitzschutznorm IEC 62305 gliedert den Blitzschutz (Lightning Protection (LP)), wie in Abb. 6 gezeigt ist, in vier Teile, sodass der Blitzschutz einer baulichen Anlage zuerst nach der Erkennung der Blitzbedrohung und anschließender Risikoanalyse im zweiten Teil erfolgen darf.

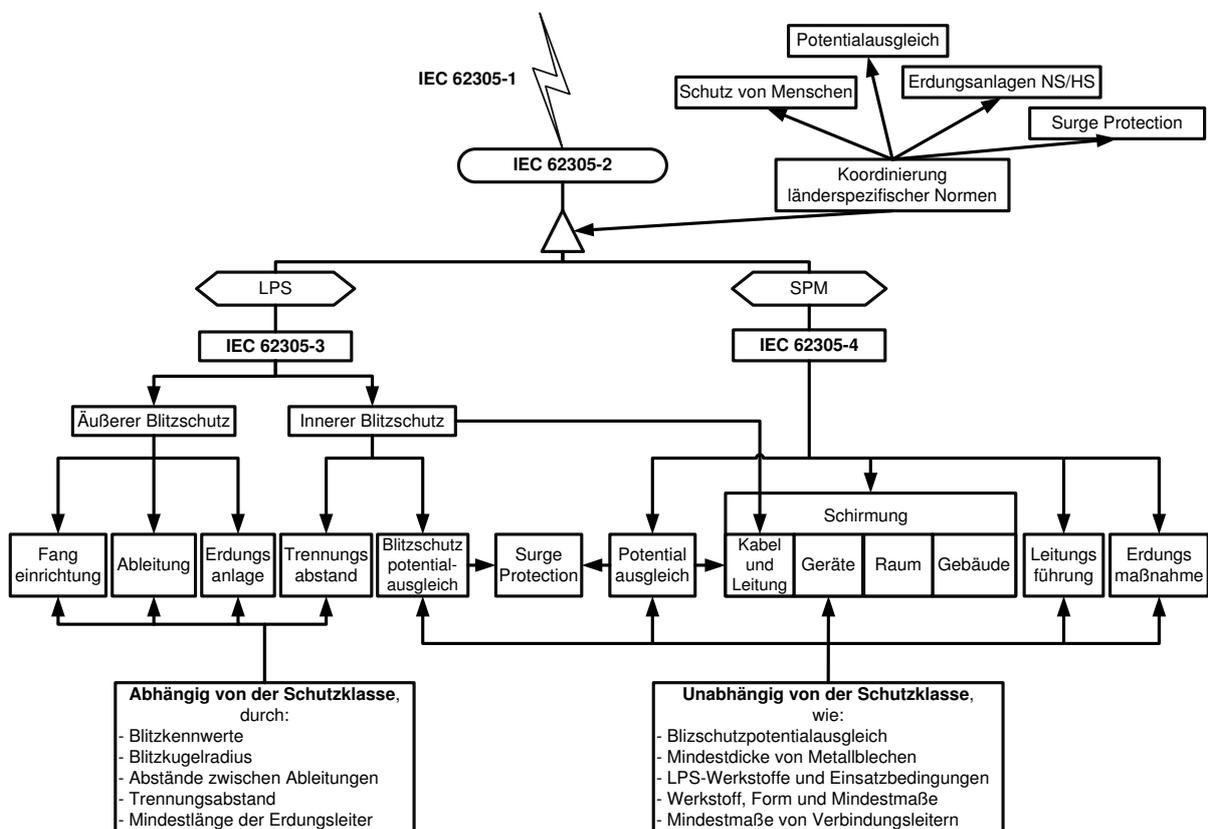


Abb. 6: Blitzschutznorm und Koordinierung

Neben der Norm sind jedoch auch die allgemeinen länderspezifischen Ergänzungen bzw. Einschränkungen zu beachten. Darüber hinaus erfordert die Konkurrenz des Blitzschutzes zu anderen Normen eine Koordinierung mit diesen, sodass sie wie im Bereich des Potentialausgleichs und des Überspannungsschutzes erfolgen muss.

Das Flussdiagramm in Abb. 6 demonstriert die in der Planungs- und Ausführungsphase zu durchlaufenden Schritte, um ein Blitzschutzsystem bei Einhaltung der Konstruktions- und Dimensionierungsregeln zu erstellen, das in der Lage ist die Gefährdungen durch die primären und sekundären Störgrößen des Blitzes zu kompensieren.

3.2 Planung und Analyse

Für die Geräte der FAM sollte die Notwendigkeit des Blitzschutzes vom Kunden oder dem Betreiber der Anlage hinsichtlich der bestehenden Blitzgefährdung aufgezeigt werden, solange sie nicht durch Gesetze, Errichtungsvorschriften und Verordnungen des jeweiligen Landes ausdrücklich besteht. So gibt es wie in der Bundesrepublik Deutschland baurechtliche Vorgaben der Bauordnungen der einzelnen Bundesländer oder auch pauschale Methoden, wie die des VdS (Vertrauen durch Sicherheit GmbH), die den Blitzschutz bei diversen baulichen Anlagen in bestimmten Maßen fordern.

Die Landesbauordnung Sachsen-Anhalt definiert diese Notwendigkeit im Paragraph §45 wie folgt: *„Bauliche Anlagen, bei denen nach Lage, Bauart und Nutzung Blitzschlag leicht eintreten oder zu schweren Folgen führen kann, sind mit dauernd wirksamen Blitzschutzanlagen zu versehen.“* [N16]

3.2.1 Das FAM-Portfolio

Die FAM ist ein weltweit agierendes Unternehmen, dessen Anlagen und Geräte im Berg- und Tagebau, an Umschlagplätzen, in Kraft- und Schüttgutwerken sowie in Häfen als auch für die Zerkleinerung und Aufbereitung eingesetzt werden. Die Hauptaufgabe der Maschinen besteht darin ein Gut aus einer Quelle zu akquirieren, es gegebenenfalls vor Ort zu verarbeiten, die Förderung zum Zielort zu gewährleisten und dort abzusetzen oder gezielt bis zur weiteren Verwendung zu speichern. Diese mit dem EVA-Prinzip eines Computers vergleichbare Wirkungsweise beruht auf vielen unterschiedlich komplex arbeitenden Geräten, die entweder vollkommen automatisiert oder durch den Mensch gesteuert oder vereinzelt geregelt werden. Die nachstehende piktografische Darstellung (Abb. 7) dieser Geräte, zusammengestellt aus [9], verdeutlicht deren Wirkprinzip.

Obwohl die Verwendung der Geräte in unterschiedlichen Bereichen stattfindet und deren Aufbau stark voneinander abweichen kann, lassen sich dennoch Gemeinsamkeiten finden,

die sich in Konstruktions- und Maschinenelemente mit den erforderlichen Verbindungsteilen gliedern. Hieraus folgend bilden sie eine Fusion aus Kran- und Bandanlage zum Fördern, Speichern und Verarbeiten. Die Hauptmerkmale eines Geräts sind die Antriebs- und Förderleistung, die Gurtbreite mit dem zu fördernden Gut und dessen Körnung, dazu kommen wahlweise die Abtragstiefe und –höhe sowie spezielle geometrische Abmessungen wie die Auslegerlänge und die ortsbezogenen Einsatzbedingungen.

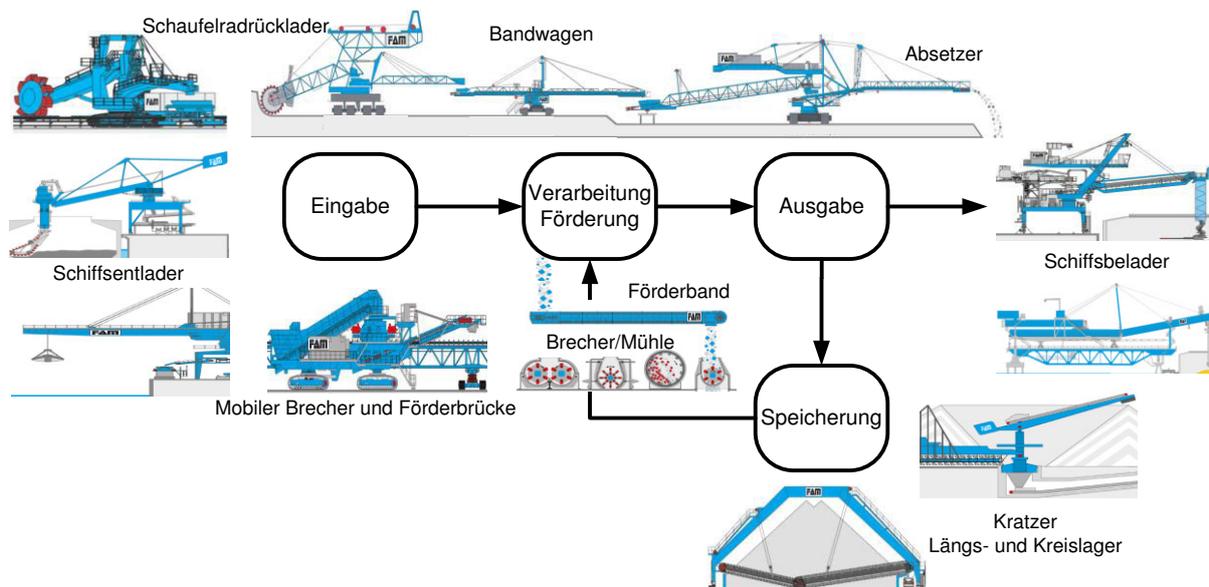


Abb. 7: EVA-Prinzip der FAM nach [9]

Dafür verwendet die FAM bei der Konstruktion ihrer Geräte und Maschinen überwiegend Konstruktionen aus Stahl in unterschiedlicher Qualität, Güte, Festigkeit und Stahlguss, sowie Kupfer und Aluminium, die maßgeblich durch das Schweißen, Schrauben, die Auswahl von Steckverbindungen wie das Bolzen oder auch Klemmen dauerhaft miteinander verbunden sind. Nur sehr selten weisen die weiteren Hauptkonstruktionselemente wie der Gurt und oder die Tragrolle vollkommen nicht metallische Verbindungen auf. Zudem kommen in Einzelfällen zum Beispiel bei einem Förderbrückennetz Betonbauten mit Bewehrung, in der Antriebstechnik Ritzel aus Polymer-Verbundstoffen oder um Vibrationen zu dämpfen weiche Kunststoffe zum Einsatz. Darüber hinaus ist das Unternehmen bei der Realisierung eines Projektes an die Beherrschung des Förderguts und Einhaltung von Sicherheits- und Brandvorschriften gebunden. Während die Materialien wie Erz, Sand, Lehm, Zement und Stein bis hin zum Abraum nur die Belastbarkeit der Bandanlage definieren, werden durch den Transport von Düngemittel und Kohle in Schüttbereichen gefährliche Konzentrationsdichten erreicht, die die Einführung von Ex-Schutz bedürfen. In einigen Anwendungsgebieten, wie dem beschriebenen Düngemitteltransport oder dem Einsatz der Anlagen in Häfen, werden die normalen Anforderungen an den Korrosionsschutz überstiegen. Hier werden schon werkseitig spezielle Beschichtungs- und

Konservierungsverfahren angewendet um der salz-, schwefel- oder nitrathaltigen Atmosphäre vor Ort zu widerstehen.

Des Weiteren müssen die Anlagen nicht nur während des Aufbaus und der Inbetriebnahme montiert, gesteuert, überwacht und gewartet werden. Vielmehr sind nach der Übergabe an den Kunden die Funktion der Anlage selbst, das sichere Bewegen und eine zentrale Position des Anlagenbedieners wichtig. Dies erfordert neben der Transformation in den Mittel-, Nieder- und Schutzkleinspannungsbereich, der allgemeinen Software- und Motorensteuerung auch Sensoren und Beleuchtungssysteme auf Seiten der Elektrotechnik.

Auf dem Gebiet der Mechanik verlangt es nach Zugangsbereichen und Möglichkeiten des sicheren Aufstieges, wobei hierfür in den meisten Fällen metallene Laufbühnen und Steigleitern eingesetzt werden, die an dem bzw. um das Gerät herum installiert sind. Die technologische Vielfalt, die weit über das Maß einfacher Translations- und Rotationsbewegungen hinaus geht und ihren Zenit in großen ebenen und räumlichen Getriebemechanismen besitzt, lässt sich mit Hilfe des Absetzers in der Abb. 8 anschaulich darstellen.

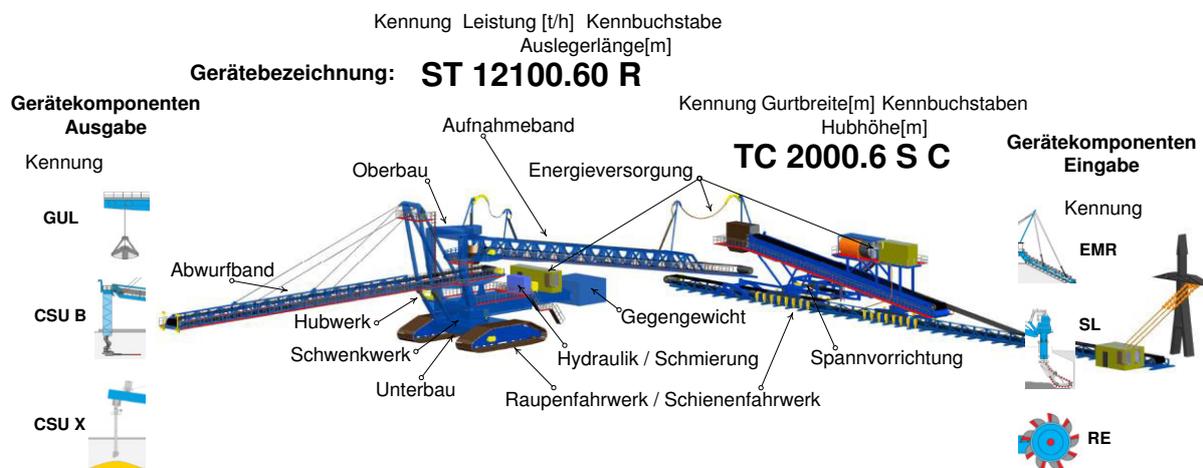


Abb. 8: Absetzer mit Bandschleifenwagen

Dieser Gerätetyp kommt in seiner Struktur im ortsveränderlichen Betrieb am meisten zum Einsatz, sodass das Austauschen bzw. Ergänzen seiner elementaren Konstruktionsgruppen in einer Art Baukastensystem die vorstehende Behauptung begründet. Zudem dient es dazu, die in ihrer Art und Benennung standardisierten Konstruktionselemente und die spezifischen Auslegungskriterien des äußeren Blitzschutzes vorzustellen. Darüber hinaus werden der innere Blitzschutz und die Kraftwerkserdungsanlagen mit Hilfe des Turms eines Förderbrückennetzes einer FAM-Kraftwerksanlage, zu sehen in den Abbildungen von Anhang 10 (An10) und An11_Abb. 1, charakterisiert.

3.2.2 Risikomanagement

Abb. 9 zeigt den allgemeinen Ablauf der Betrachtung der Förderanlage bis hin zum Risikomanagement respektive der Risikoanalyse nach IEC 62305-2, [N2]. Die Einführung der Blitzschutzzone (Lightning Protection Zone (LPZ)), in denen der Wert der elektromagnetischen Umgebung hinsichtlich der Blitzgefährdung festgelegt ist und in der [N4] beschrieben wird, steht in Wechselwirkung mit der [N3]. Die gemeinsame Auslegung unter dem Wissen der Blitzwirkungen erspart eine spätere Anpassung.

Da nicht vorausgesetzt werden darf, dass die Förderanlage nach geltendem deutschem Recht, der Verordnung und Normung den Bestimmungen oder Erwartungen anderer Länder oder des Kunden entspricht, empfiehlt sich eine Risikoanalyse auf dem traditionellen Weg. Erst nach dieser Betrachtung ist es möglich das Blitzschutzsystem und dessen Ausmaße zu bestimmen.

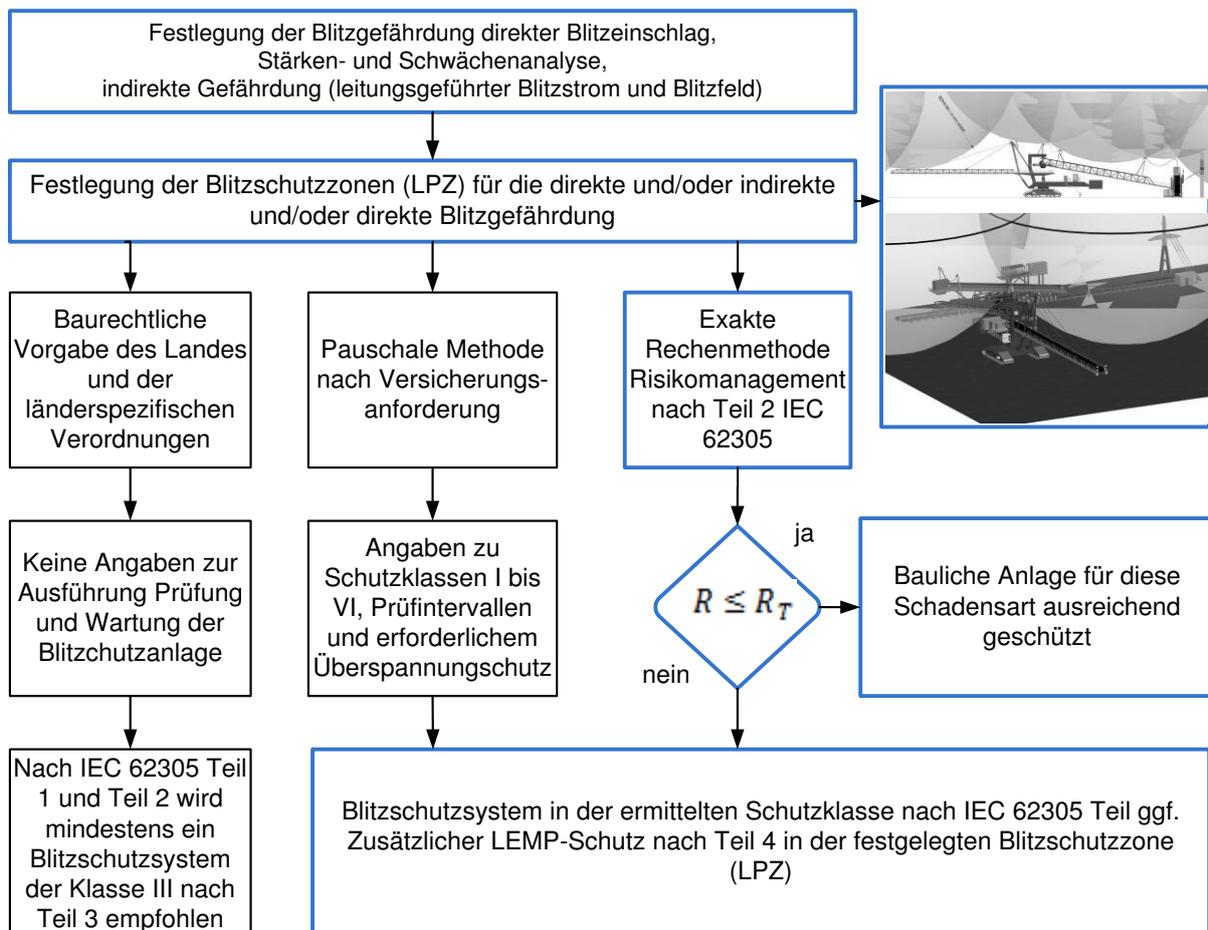


Abb. 9: Planung und Analyse nach [2]

Für das Risikomanagement des Absetzers nach [N2] empfiehlt es sich eine Checkliste zu verwenden. In ihr, wie in Anhang 1 (An1_Tab. 1) beschrieben, werden sämtliche notwendigen Details wie geometrische Abmessungen (An2_Abb. 6), die Trassierung, die

Schirmung oder Potentialsteuerung und andere anlagenspezifische Aspekte gesammelt und zur weiteren Verarbeitung im Rahmen der Berechnung des Risikos genutzt.

3.2.2.1 Berechnung

Die Schadenswahrscheinlichkeit P , die Häufigkeit von Blitzeinschlägen N sowie das Schadensausmaß bzw. der eintretende Verlust L sind die Grundannahmen für die Analyse des Risikos R . Hierbei muss das Schadensrisiko unterhalb des akzeptierbaren Risikos R_T liegen, um, wie es Formel 15 zeigt, von einer tolerierbaren Schutzwirkung auszugehen.

$$R = N * P * L \leq R_T \quad \text{Formel 15}$$

Hinsichtlich der Wirkungen des Blitzes und den damit einhergehenden Gefährdungen und prägenden Folgeschäden wird bei der Risikoanalyse zwischen den Schadensquellen S , Schadensursachen D und Schadensarten L unterschieden.

Die [N2] gibt hierfür die Gegenüberstellung nach Tab. 7 an, wobei die Schadensarten in den Schadensrisiken normentsprechend als Verlust wiedererscheinen.

Schadensquelle	Blitzeinschlag (bezogen auf die bauliche Anlage)			
	Direkt	Indirekt		
Schadensursache	S1 Direkter Blitzeinschlag (BE) in BA	S2 BE in Erdboden neben BA	S3 Direkter BE in eingeführte Versorgungs- leitung (VL)	S4 BE in den Erdboden neben eingeführter VL
D1 Elektrischer Schock von Lebewesen	R_A $= N_D * P_A * L_A$		R_U $= (N_L + N_{DJ})$ $* P_U * L_U$	
D2 Feuer, Explosion, mechanische und chemische Wirkungen	R_B $= N_D * P_B * L_B$		R_V $= (N_L + N_{DJ})$ $* P_V * L_V$	
D3 Störungen an elektrischen und elektronischen Systemen	R_C $= N_D * P_C * L_C$	R_M $= N_M * P_M * L_C$	R_W $= (N_L + N_{DJ})$ $* P_W * L_W$	$R_Z = N_I * P_Z * L_Z$

Tab. 7: Berechnete Werte der einzelnen Risikokomponenten [N2]

Die acht Risiko-Komponenten lassen sich nun in vier Schadensrisiken summierend zusammenfassen, von denen zwei für die Untersuchung des Absetzers relevant sind und mit den entsprechenden tolerierbaren Risikowerten in Absprache mit dem Anlagenbetreiber oder dem Kunden oder wie hier durch die Norm als Standardwert vorgegeben, vergleichen:

⇒ Risiko des Verlustes von Menschenleben

$$R_1 = R_A + R_B + R_C + R_M + R_U + R_V + R_W + R_Z \leq 10^{-5} \quad \text{Formel 16}$$

⇒ Risiko des Verlustes von wirtschaftlichen Werten

$$R_4 = R_B + R_C + R_M + R_V + R_W + R_Z \leq 10^2 \quad \text{Formel 17}$$

Anmerkung: Für die Schadensart L_4 , aus der das Risiko R_4 resultiert, gilt kein allgemein-akzeptierbares Risiko, da der Eigentümer des Geräts bzw. der Anlage den Schutzgrad im Sinne der Wirtschaftlichkeit bestimmt [4], sodass eine Optimierung zwischen ihm und der FAM gemeinsam erfolgen muss. Hierfür ist im Punkt „3.2.5.4 Problematik ortsveränderliche Geräte“ eine Kostenbetrachtung aufgeführt.

3.2.2.2 Resultat

Die Erfüllung der Bedingungen für die Einhaltung der Schadensgrenzen verlangt nach einem Blitzschutzsystem der *Blitzschutzklasse III*. Dies führt in übereinstimmend mit den Bestimmungen der [N7] zu der allgemeinen Auslegung des Blitzschutzes für das Gerät. Die Berechnungsschritte des Risikomanagements werden hier über die in An1 dargestellte Checkliste und unter Nutzung der vorparametrierten Software in Form einer Excel-Tabelle aus [N2B2], auch zu sehen in An1, ausgeführt. Darüber hinaus gibt es noch weitere Softwarehilfen wie das Risikoanalyse-Werkzeug der Firma Dehn und Söhne (DEHN Risk Tool).

3.2.3 Äußerer Blitzschutz

3.2.3.1 Grundlagen des äußeren Blitzschutzes

Das äußere LPS nach [3], [N1] und [N3] dient dem sicheren Einfangen, gefahrlosen Ableiten und Verteilen des Blitzstroms in der Erde. Seine Hauptaufgabe besteht darin die Wirkungen der spezifischen Energie, der Ladung und des Stromsichelwertes des Blitzes bei Einschlag zu beherrschen und dadurch physikalische Schäden wie Brand, Ausschmelzung, Explosion durch Funkenbildung in gefährdeten Bereichen und die Effekte des Potentialtrichters zu begrenzen oder auszuschließen.

Es beinhaltet:

- ⇒ Fangeinrichtung (FE)
- ⇒ Ableiteinrichtung (AE)
- ⇒ Erdungsanlage (EA)

Die [N3_Kapitel 4 (N3_Kap.4)] empfiehlt hierfür u.a. die Nutzung von natürlichen Bestandteilen. Diese sind wie die Materialien des äußeren Blitzschutzes metallisch und verbleiben dauerhaft in einer baulichen Anlage. Somit gilt die metallene Konstruktion des Absetzers als Fang- und Ableitungseinrichtung und sollte deswegen auch als solche eingesetzt werden, wenn sie durchgängig unter Einhaltung der erforderlichen Leiter-Mindestquerschnitte und ausreichender Blechdicken vom Oberbau bis zum Raupenfahrwerk ausgeführt sind. Aus Formel 11 und Formel 13 leitet sich die Tab. 8 ab, die in [N3_Kap.5] und in [N5] als Auslegungskriterium für natürliche Bestandteile definiert ist.

Werkstoff	Dicke ¹ <i>t₁ in mm</i>	Dicke ² <i>t₂ in mm</i>	Mindestquerschnitt // Erwärmung <i>q in mm² // Δθ in K</i>		
			flach	rund	Seil
Eisen / NIRO	4	0,5	50 // 290 _{Fe} / 940 _{NIRO}		
Kupfer	5	0,5	50 // 22		
Aluminium	7	0,65	70 // 25	50 // 52	
1: verhindert Durchlöchern			einsatzbedingte Vergrößerung		
2: Durchlöchern, Überhitzung, Entzündung möglich			176 // 2 _{Cu} / 4 _{Al} / 11 _{Fe} / 58 _{NIRO}		

Tab. 8: Auslegung von Fangeinrichtungen und Ableitungen nach [N3]

Außerdem führt schon allein die Querschnittvergrößerung aufgrund von einsatzbedingten Festigkeits- und Korrosionsansprüchen, die nach [N3] verlangt wird, zu einer Minimierung der Temperaturerhöhung. Sie ist wiederum in Bereichen mit Explosionsrisiko durch gefährliche Konzentrationsdichten ausschlaggebend.

3.2.3.1.1 Verfahren

Die nun in der Anwendung am Gerät erläuterten Verfahren gelten im europäischen Raum als normkonform und entsprechen dem Stand der Technik. Ihre Wirksamkeit mittels gewählter Schutzmaßnahme zur Reduzierung des Risikos ist nachgewiesen. Alle weiteren Verfahren, wie das ESE-Verfahren (Early Streamer Emission), gelten als nicht normkonform, [N3] und [4], werden deshalb nicht in dieser Arbeit behandelt und finden keine Verwendung zum Typical.

Die folgenden normkonformen Verfahren sind der [N3] entnommen.

Nach dem in Kapitel 2 (Kap.2. Charakteristika des Blitzes) erläuterten geometrisch-elektrischen Modell, ist die Enddurchschlagsstrecke ein Radius aus dem eine Blitzkugel mit Formel 2 ermittelt werden kann. Hieraus wurde das Blitzkugelverfahren entwickelt, welches als zu bevorzugendes Verfahren hinsichtlich seiner Genauigkeit gilt [3].

Blitzkugelverfahren (BKV)

Die Blitzkugel, gewählt nach der zu bearbeitenden BSK nach Tab. 1 und Tab. 6, entspricht der Enddurchschlagsstrecke mit dem Radius r , wobei ihr Mittelpunkt dem Leitkopf des Blitzes entspricht. Sie wird um und über die bauliche Anlage (BA) (hier Absetzer) gerollt. Sämtliche Berührungspunkte bzw. Flächen, die der Tab. 8 nicht entsprechen, müssen mit weiteren Fangeinrichtungen (FE) ausgestattet werden.

Nach der ersten Anordnung der FE muss das BKV erneut angewendet werden um den sich zwischen den FE einstellenden Durchhang in gerader und diagonaler Richtung auf gefährliche Näherungen zur BA oder auf ihr befindliche zu schützende Geräte und Anlagenteile zu überprüfen. Eine Berührung muss ausgeschlossen sein und kann über die Eindringtiefe p in m und dem Abstand d in m zwischen den Fangstangen wie folgt über Formel 18 ermittelt werden:

$$p = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

Formel 18

Maschenverfahren (MV)

Kleine Maschen minimieren den Durchhang der Blitzkugel vom BKV so sehr, dass es auf nicht metallenen Flachdächern ohne Wölbung Anwendung findet. Es ist nur von der Lage des Firstes (höchster Anlagenpunkt) und der Anlagenkanten abhängig und somit frei gestaltbar.

Durch die Variation der Kantenlängen der Masche können mit ihm auch gewölbte Dächer, die durch ihre Höhe, wie es bei Förderbrücken vorzufinden ist, nicht mehr durch Fangstangen gesichert werden können, vor direktem Einschlag geschützt werden.

Bei Gebäuden, die wegen ihrer Höhe im besonderen Maße Seiteneinschlägen ausgesetzt sind, können zudem die Ableitungen als FE genutzt werden. Ihre Abstände zueinander im Vergleich zur Maschenweite, wie Tab. 9 zeigt, sind nur im Fall der *BSK I* größer.

Schutzwinkelverfahren (SWV)

Dieses Verfahren ist vom BKV abgeleitet. Die FE mit der Höhe h in m bildet unter dem Winkel φ um sich einen kreisförmigen Schutzbereich aus, der mittels Fangleitung oder Fangseil erweiterbar ist und immer eine geschlossene Bezugsebene bis zum Auslauf des Schutzbereichs benötigt. Formel 19 zeigt seine Berechnung.

$$\varphi = \frac{180}{\pi} * \arcsin\left(1 - \frac{h}{r}\right) \quad \text{Formel 19}$$

In der Tab. 9 sind die nach [N3] normierten Werte der einzelnen Verfahren abhängig von der BSK dargestellt:

BSK	Blitzkugelradius	Maschenweite	Schutzwinkel	Abstand Ableitungen
<i>I</i>	20m	5 * 5m	$\varphi = f(r_{BSK})$	10m
<i>II</i>	30m	10 * 10m		10m
<i>III</i>	45m	15 * 15m		15m

Tab. 9: Auslegungskriterien in Abhängigkeit von der Blitzschutzklasse

Jedes der beschriebenen Verfahren ist aufgrund der sich willkürlich ausbildenden Fangentladung eines Objektes und der daraus resultierenden Enddurchschlagsstrecke im Bezug auf die Schutzwirkung höhenabhängig.

3.2.3.2 Schwächen und Stärken

Aufgrund der Tatsache, dass der Blitz, analysiert mit dem BKV, siehe An2 und Abb. 10, über die gesamte Länge des Absetzers einschlagen kann, entstehen an jedem Ort mit exponierter Lage wie Laufbühne und Steigleiter am Pylon, E-Haus oder Kabelabspannung aber auch den Seilabspannungen Schäden durch direkten Blitzeinschlag, die zu nicht tolerierbaren Verlusten führen. Darüber hinaus schafft die Höhe des im Gebiet freistehenden Absetzers das Potential für Seiteneinschläge. Ihre Darstellung durch die Blitzkugel der *BSK I* trägt dazu bei die Priorität des Schutzes von Menschen voranzustellen.

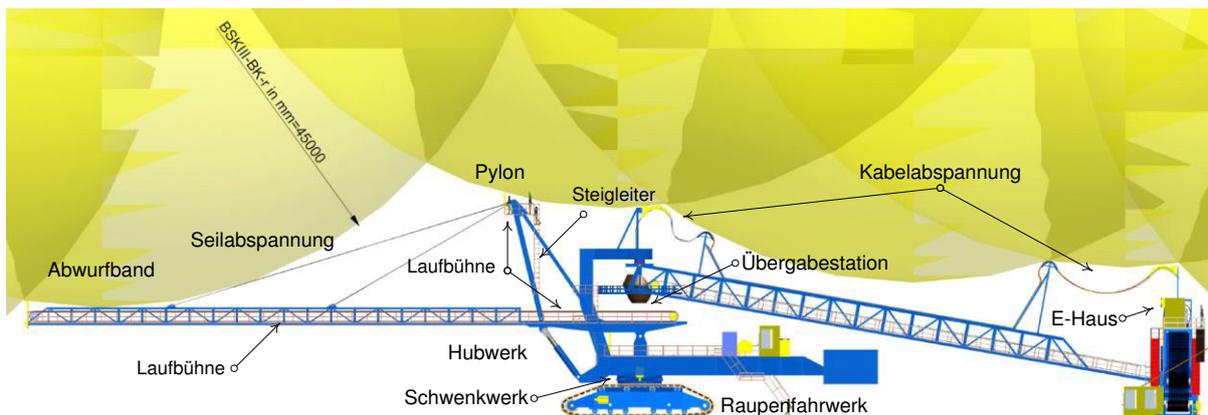


Abb. 10: Demonstration Blitzeinschlag am Absetzer

Die Stärke des Absetzers ist das Metallskelett der Konstruktionskomponenten, welches in jeder Hinsicht die Materialanforderungen nach Tab. 8 überbietet. Dazu kommen viele über Schweiß- und Schraubverbindungen oder über Stahlseile vermaschte Ableitwege, die eine Stromaufteilung veranlassen und somit die physikalischen Wirkungen des Blitzes normgerecht noch weiter minimieren und unbedenklich machen. Jedoch stellen Lager wie das Schwenk- oder Schienenfahrwerk sowie das über Bolzen gesteckte ebene Getriebe zwischen Übergabestation (Aufnahme-Abwurfband), Pylon und Hubwerk keine nach [N3] genormte Verbindung dar. Ihre Auslegung wird in „3.2.3.4 Funktionspotentialausgleich“ diskutiert. Außerdem erfüllt die Erdung des Absetzers über das Raupenfahrwerk keine nach [N3] typische Art und wird in „3.2.3.5 Erdungsanlage der mobilen Geräte“ behandelt.

3.2.3.3 Analyse und Beeinflussung der Schwächen

3.2.3.3.1 Grundsatz

Der Schutz von Mensch und Maschine bzw. den elektrischen Geräten wie zum Beispiel auf dem Pylon beruht auf ähnlichen Auslegungskriterien, sodass im Bezug auf die physikalischen Schäden des direkten Blitzeinschlages ein Schutz besteht, wenn:

- ⇒ FEn gezielt platziert und dimensioniert werden,
- ⇒ die Anordnung in das Innere des Pylon verschoben wird, sodass sie im Schutzwinkel steht,
- ⇒ ein getrenntes bzw. isoliertes LPS errichtet wird
oder in Hinblick auf den Schutz des Menschen
- ⇒ der Aufstieg und das Begehen bei Gewitter mittels Warn-/Verbotsschild und einer Unterweisung im Rahmen einer Arbeitsschutzbelehrung verboten wird.

3.2.3.3.2 Gefahr für Menschen

unter Verwendung von: An2_Abb. 1, 2, 3, 4 und 6

Das Begehen der Anlage während eines Gewitters im blitzeinschlaggefährdeten Bereich kann nicht immer durch ein Verbot vermieden werden oder ist wegen der Aufrechterhaltung des Betriebs vertraglich bestimmt. Somit muss dessen Wirkung durch das Begrenzen von Schritt- und Berührungsspannung unter dem Schutz vor Direkteinschlag ausgelegt werden, falls ein Verlegen der FE und AE nicht möglich ist.

Um die Berührungsspannung in diesen Fällen zu minimieren, empfiehlt [N3] das Nutzen von vernetztem Polyethylen als Isolierstoff, das mit mindestens 3mm Stärke die AE auf einer Länge von 3m – entspricht der maximalen Griffhöhe des Menschen h_{Mmax} – ummantelt und eine Stehstoßspannungsfestigkeit von 100kV(1,2/50 μ s) aufweist. Weiterhin ist ein Verweis auf die Standortisolierung, die in Punkt 3.2.3.7 behandelt wird, gegeben. Um den gesamten Bereich wie z.B. an der Pylonspitze zu schützen, wäre ein Verbund aus FE einsetzbar, die miteinander über metallene Seile verbunden sind um eine Stromaufteilung zu gewährleisten. Der Aufbau eines Metaldachs ist hier sehr augenscheinlich und vernünftig, doch sollte in Bezug zur auftretenden Windlast dimensioniert werden. Das folgende Simulationsmodell soll Aufschluss über den Verzicht der Isolation geben, indem ein niederimpedanter Kontakt zwischen dem Menschen und dem LPS bei BE nach *BSK I* besteht. Dafür wird eine einzelnen AE, die an der Laufbühne angeschlagen ist oder die Steigleiter charakterisiert, zugrundegelegt. Ferner gelten hier die Annahme der Parallelschaltung von Widerständen

und die allgemeine Berechnungsmethodik geometrisch-physikalischer Grundlagen sowie die Formel 6 und Formel 7.

Annahme: BSK I	Mensch	Material AE	
R_{Mensch} in Ω	500	Fe	Cu
h_{Mmax} in cm	300		
I_{Mmax} in mA	200		
$b_{Schleife}$ in m	0,1		
Berechnung:	Formel:	Lösung:	
Widerstand AE	$R_{AE} = I_{Mmax} * \frac{R_{Mensch}}{\hat{I}_{BSK I}}$	500 $\mu\Omega$	
Querschnitt AE	$q_{AE} = \varrho_{AE} * \frac{h_{Mmax}}{R_{AE}}$	900 mm^2	102 mm^2
Masse AE	$m_{AE} = \gamma * h_{Mmax} * q_{AE}$	20,8 kg	2,7 kg
Rundradius	$r_{Rund} = \sqrt{q_{AE} / \pi}$	16,9 mm	5,7 mm
Gegeninduktivität	$M = 0,2 * h_{Mmax} * \ln \frac{b_{Schleife}}{r_{Rund}}$	1,07 μH	1,72 μH
Induzierte Spannung	$U_{ind} = M * \frac{di}{dt}$	213 kV	344 kV

Die errechneten Werte zeigen, dass die rein ohmsche Komponente, bei Annahme eines Stromes I_{Mmax} , der nach [N10] als lebensbedrohlich gilt, mittels Auswahl großer Querschnitte oder dem Einbinden weiterer Ableitungen in Form eines Daches oder abgespannten Seilvorrichtung beherrschbar wird. Konstruktive Gesichtspunkte wie die Windangriffsfläche und das Gewicht treten neben dem eigentlichen Problem klar in den Hintergrund.

Aufgrund der großen Stromsteilheit ist die induzierte Berührungsspannung, die einen Stromfluss von einigen hundert Ampere zur Folge hat und damit tödlich ist, für den Schutz des Menschen ausschlaggebend. Darüber hinaus beschreibt die Normenreihe [N10] das Phänomen der Seitenblitze. Sie entstehen allein durch das berührungslose Stehen neben der Fangstange und haben eine Induktion der Überspannung und demzufolge einen Stromfluss wie beim direkten Berühren durch den Körper zur Folge.

Diese Problematik wird mit dem Einhalten des Trennungsabstandes, in Punkt 3.2.4.2 beschrieben, gelöst. Zudem muss nach [N13] ein zusätzlicher Handbereich von mindestens 1,75m seitlich eingehalten werden. Da ein Mensch, wie es die Figur in An2_Abb. 2 und 4 zeigt, unbeabsichtigt in den Gefahrenbereich greifen kann.

Die Summe der Abstände und der konstruktive Mehraufwand durch den Dachaufbau, das Isolieren der FE sowie des Bodens zeigen, dass ein striktes Verbot des Betretens von Freibereichen, die nicht im Schutzwinkel der Anlage inklusive Handbereich + möglichem Trennungsabstand liegen, erfolgen muss. Eine Arbeitsschutzbelehrung und die Anbringung von Warnschildern müssen ausgeführt werden, die den Menschen bei Gewitter im Nahbereich das Aufsuchen von Schutzbereichen gebieten.

Das Auftreten von Schrittspannungen ist bei durchverbundenden Laufgitterrosten der Laufbühnen und Handläufe als unbedenklich einzustufen.

3.2.3.3.3 Schutz vor Ausschmelzung und Verringerung der mechanischen Festigkeit

E-Haus

Das E-Haus des Bandschleifenwagens in An2_Abb. 2 besitzt, da hier Bleche mit $t_{Blech} = 1,5 \dots 2,5mm$ [14] eingesetzt werden, eine zu geringe Stärke nach Tab. 8 und kann bei einem ladungsintensiven Blitzlangzeitstrom durchlöchert werden. Dies hat zur Folge, dass bei Umwelteinflüssen wie Regen Wasser in die Wärmeisolationsschicht (PU-Dämmstoffkern) der Kabine oder direkt in das Innere eindringt und dort neben Korrosion und Schimmelbildung auch eine Gefährdung der allgemeinen Funktion oder des Menschen durch Fehlerströme darstellt. Der gezielte Einsatz von FE vermeidet den direkten Einschlag in das dünnwandige Blech. Darüber hinaus stellt dem Anschein nach das Aufnahmeband das E-Haus in An2_Abb. 3 und dem Kurzbegriff SW in seinen ausgebildeten Schutzbereich. Bei einer maximalen Positionsänderung durch das Schwenken des Absetzers wäre seine Schutzwirkung vernachlässigbar gering. Auf den Einsatz in Form von Fangstangen muss verzichtet werden, da das Unterfahren diese durch konstruktive Vorgaben in unterschiedlichen Projekten mit minimalen Abständen von wenigen Zentimetern untersagt. Der Einsatz eines dickeren Stahlblechs als Dach oder der Schutz durch das Maschenverfahren soll durch die folgende Berechnung nach Formel 12 und Formel 13 unter Zuhilfenahme der analytischen Darstellung nach Abb. 3 mit Formel 2, einer durch [N1] gegebenen Annäherung zur Formel 3 und Formel 8 und Tab. 6 bewiesen werden.

Annahme: BSKIII		Q_{lang}	T_2	$\bar{U}_{A,K}$	ϑ_U	Material		
		100As	350 μ s	20V	20°C	Fe	NIRO	
Blitzkugelradius r_{BK} in m (An3)		50						
Berechnung:		Formel:				Lösung:		
Blitzstrom		$\hat{I} = (0,1r_{BK})^{\frac{1}{0,65}}$				11,9kA		
Blitzgesamtladung		$Q_{Blitz} = Q_{lang} + \left(\frac{1}{0,7}\right) * \hat{I} * T_2$				105,9As		
Ausgeschmolzenes Volumen		$V = \frac{U_{A,K} * Q_{Blitz}}{\gamma * C_W * (\vartheta_S - \vartheta_U) + C_S}$				0,28cm ³	0,25cm ³	
Lochtiefe bei Annahme von:								
Halbkugel		$t_{LochHK} = \sqrt[3]{2V/3\pi}$				3,9mm	3,8mm	
Kegelstumpf		$r_1 = 8mm$ $r_2 = 4mm$	$t_{LochKS} = \frac{3V}{\pi * (r_1^2 + r_1r_2 + r_2^2)}$				2,39mm	2,14mm

In den Abbildungen von An3 wird bewiesen, dass ein BE mit entsprechendem Stromscheitelwert \hat{I} auf das Dach des E-Hauses wirkt. Die Blitzgesamtladung, wobei die Ladung des ersten Stoßstromes nach [N1_AnA3] angenähert ist, durchlöchert in jedem Fall das Dach. Die beiden Annahmen zur Lochtiefe, welche einfachen geometrischen Beziehungen entsprechen, stellen mögliche Ausschmelzformen dar. Sie stützen sich zudem auf Untersuchungen, die in [3_Kap.4] beschrieben werden. Hier heißt es, dass vor allem die Ladung des Blitzlangzeitstromes für die Durchlöcherung verantwortlich ist. Hingegen erreicht die Ladung des Blitzstoßstromes lediglich eine Schmelztiefe von 1/10mm. Somit durchschlägt der Blitz mit $Q_{lang} = 100As$ definitiv Stahlbleche mit einer Stärke von 1,5mm und mit $Q_{lang} = 200As$ sogar Stärken von 2mm, wobei die Lochdurchmesser zwischen 4-12mm liegen.

Seilabspannungen

Wie im Fall des E-Hauses beschrieben, wird wegen des direkten Blitzeinschlages in die Seilabspannung oder einer vergleichbaren tragenden Konstruktion ein Materialausbrand hervorgerufen, sodass die mechanische Festigkeit bei der dauerhaften Zugbeanspruchung unter Umständen nicht mehr gegeben ist. Der gezielte Einsatz von FE, die als definierte Einschlagpunkte auf dem Gerät verteilt und auszulegen sind, verhindert diese negative Querschnittbeeinflussung.

Aufgrund des Heben und Senken von Auslegern durch Windensysteme, wie sie beim Quadranten-Schiffsbelader (QSL), zu sehen in An13_Abb. 2, eingesetzt werden, ist das Setzen definierter Einschlagpunkte problematisch.

In [N3B2_Kap.11] wird der Schutz von Stahlseilen nicht gefordert. Weiterhin werden FAM-intern Sicherheitsfaktoren für Seilabspannungen $S_{Ab} = 3$ und für Seilwinden $S_{Winde} = 6$ verwendet, die das Seil weit über die eigentliche Zugbelastung hinaus dimensionieren, sodass das Tragen des Auslegers beim Abreißen eines Seils über die „Reserve“ erreicht wird. Dennoch müssen nach Beobachtung eines direkten Blitzeinschlages die Sichtung und Beurteilung des Schadens erfolgen und ggf. weitere Maßnahmen, wie der Austausch des Seils, ergriffen werden.

3.2.3.3.4 Schutz der elektrischen Installation

Schlägt der Blitz in die elektrische Installation ein, ist neben der physikalisch bedingten Zerstörung der Geräte ein hoher Stromfluss in den Versorgungsleitungen möglich. Eine Fangeinrichtung in Form einer Fangstange, die mit einem Trennungsabstand neben die Installation gesetzt wird, kann bei ausreichender Höhe, geeigneter Befestigung und einem nicht parallelen Verlauf zur Versorgungsleitung des Geräts, einen Schutz im Sinne des SWV gewährleisten.

Der Trennungsabstand, näheres im Punkt 3.2.4.2, stellt sicher, dass die Induktionsschleife zwischen Fangstange und elektrischer Installation durch die Stromsteilheit des Blitzstoßstromes keine Überschläge bzw. elektrische Funkenbildung an der Näherungsstelle bewirkt.

Die Verwendung der metallenen Konstruktion als Fangeinrichtung ist aufgrund der vermaschten und niederohmig verbundenden Ableitwege eine Maßnahme, die keines Trennungsabstandes bedarf [N3_Kap.6.3]. Deshalb wird in An4_Abb. 1 der SW der gesamten Maschine aufgezeigt, sodass ein einfaches Verschieben der Geräte und Installationen, die in An2 als blitzeinschlaggefährdet gelten, in diesen Bereich keine zusätzlichen Maßnahmen erfordert. Außerdem zeigt An4, dass nur in vereinzelt Fällen, wie dem des Bandmotors in An2_Abb. 5, durch die Bewegung des Absetzer und Bandschleifenwagens kein Verschieben in den Schutzbereich möglich ist und hier die Fangstange eingesetzt werden muss.

Die Trassierung der energie- und informationstechnischen Leitungen erfolgt in den meisten Fällen in nicht gedeckelten Kabelkanälen dafür aber im Schutzbereich der Anlage. Im Freibereich, zu sehen in An2_Abb. 1, 2, 3 und 5, trifft dies nur teilweise zu, sodass die Kabelabspannung über der das Energieversorgungskabel verlegt ist, keinen ausreichenden

Schutz bietet und, wie in Kap.2.1 beschrieben, einem direktem Blitzeinschlag wegen der windbeeinflussten Verschiebung des Blitzfußpunktes ausgesetzt ist. Der Einsatz einer Fangstange, die die Abspannung um 0,5m überragt, wäre ausreichend. Jedoch ist es, um eine bessere Koordinierung zwischen dem LPS und dem SPM zu erreichen, zweckmäßig und denkbar einen entsprechenden Übergabebereich wie beim Schiffsentlader (SL) An13_Abb. 1 mittels eines beidseitig in den Blitzschutzpotentialausgleich (Punkt 3.2.4.1) integrierten Schirmrohres oder gedeckelten Kabelkanales, welche blitzstromtragfähig sein müssen, zu schützen. Der Einsatz des Schirmrohres führt bei Blitzeinschlag zu einer verzögert-ansteigenden Längsspannung U_L in V, die bei geeigneter Materialauswahl begrenzt werden kann. Dafür gelten in der Berechnung ein zylindrisches Rohr mit der Wandstärke t_{Rohr} nach Tab. 8 sowie einem Innenradius r_{in} und die Annahme, dass der Gleichstromwiderstand R_G dem Kopplungswiderstand R_K entspricht, welcher auf physikalisch-geometrischen Grundsätzen nach Tab. 5 beruht. Außerdem sei $\hat{I}_{0/\infty}$ im Gegensatz zum eigentlichen Verlauf ein Stromscheitelwert eines Stoßstromes mit einer Steilheit $S = 0/\infty$ in μs um die maximal auftretende Längsspannung pro Meter $U_{L/m}$ zu ermitteln.

Annahme:		Material			
$\hat{I}_{0/\infty}$ in kA	200	Fe		Cu	
r_{in} in mm		30	100	30	100
t_{Rohr} in mm	4				
Berechnung:	Formel:	Lösung:			
Spezifischer Widerstand in $\mu\Omega/m$	$R_K = R_G = \frac{\rho_{Rohr}}{\pi * t_{Rohr} * (t_{Rohr} + 2 * r_{in})}$	149	46,8	22,1	6,9
Längsspannung in V/m	$U_{L/m} = R_K * \hat{I}_{0/\infty}$	29,8	9,4	4,4	1,39

Die Berechnung zeigt, dass der Blitzeinschlag in das Schirmrohr eine Längsspannung verursacht, die bei ausreichender Leitungsisolations und kleinen zu überbrückenden Abständen keine Auswirkungen auf die Leitungen hat. Darüber hinaus so [3_Kap.14.2] herrscht innerhalb des Schirmrohrs kein magnetisches Feld, das eine Überspannung in der Leiterschleife durch die induktive Kopplung hervorrufen kann, somit wird mit dieser Maßnahme gleichzeitig dem SPM entsprochen. Dennoch ist eine beidseitige Überspannungsschutz-Beschaltung der aktiven Adern der Versorgungsleitungen erforderlich, da mit zunehmender Leitungslänge der Trennungsabstand, welcher in 3.2.4.2 eingehend behandelt wird, zunimmt.

3.2.3.4 Funktionspotentialausgleich

3.2.3.4.1 Einleitung

„Die Anzahl der Verbindungen entlang einer Ableitung ist auf ein Minimum zu beschränken. Verbindungen sind durch Hartlöten, Schweißen, Klemmen, Quetschen, Falzen, Schrauben oder Nieten sicher auszuführen.“ [N3]

Obwohl die AE des Absetzers in den meisten Fällen dieser Vorgabe entspricht, verkörpern Lager und die Gelenke der ebenen Getriebe, die einen Teil dieser Einrichtung bilden, keine normgerechte Verbindung und sind zudem im erhöhten Maß dem Verschleiß ausgesetzt. Somit stellt der Funktionspotentialausgleich (FPA) aus betrieblichen Gründen die elektrische Potentialgleichheit zwischen zwei benachbarten leitfähigen Teilen her, sodass ein sicheres Ableiten des Blitzstromes in jedem Fall gewährleistet ist. Mit Hilfe einer Untersuchung an Wälzlagern soll mit dem Vorwissen aus Kap.2 die grundlegende Gefahr bis hin zur Zerstörung aufgrund des Stromflusses zwischen Lager- und Getriebebauteilen erkannt werden. Folgend werden für ausgewählte Komponenten Lösungsmöglichkeiten im Rahmen des FPA diskutiert, die sich in der artverwandten Praxis bewährt haben, aber auch für besondere bauliche Anlagen der [N3B2] entnommen sind. Abschließend wird der Durchgangswiderstand eines Absetzer theoretisch und praktisch in Form einer Widerstandsmessung ermittelt um den Einsatz des FPA in verschiedenen Bereichen zu optimieren.

3.2.3.4.2 Untersuchung, Gefahr und Zerstörung

Die Untersuchung nach [10] beschreibt Oberflächenveränderungen, die unabhängig von der Stromart hervorgerufen werden. Neben den gleichförmig rauen und matten Spuren, die sowohl an der Wälzkörperoberfläche als auch in den Laufbahnen auftreten, sind Krater- durch impulsförmige und Riffelbildung durch fortwährende Ströme nennenswert. Schmelzkrater und Schweißperlen, die an stets vorhandenen Mikrospitzen in Laufbahnen bei Stromfluss entstehen, sind ein Indiz für den Verschleiß, der bei rotierenden Lagern und langanhaltenden Strömen aufgrund mechanischer Schwingungen zur Riffelbildung führt. Die in der Praxis bewährte rechnerische Stromdichte G in A/mm^2 gibt Aufschluss über die Gefahr von Stromdurchgangsschäden und sollte zur Vermeidung folgende Bedingung der Formel 20 erfüllen.

$$G = I/q \leq 0,1 A/mm^2 \qquad \text{Formel 20}$$

Zudem werden das Grundöl und die Additive des Schmierstoffs angesichts des Stromdurchgangs und der daraus entstehenden Erwärmung oxidiert und gecrackt. Dies führt

zu einer vorzeitigen Alterung. Sie und das Anreichern von Eisenpartikeln aufgrund des Abtragens der Schweißperlen sind ausschlaggebend für ein mögliches Heißlaufen des Lagers.

Infolge dieser Untersuchung besitzt der Blitz ein zerstörerisches Potential, wobei hier der Stromsichelwert, die Ladung und die spezifische Energie als Hauptparameter mit ihren Wirkungen wie der Erwärmung, dem Verschweißen und der Ausschmelzung im Vordergrund stehen. Eine Begrenzung dieser muss bei der Auslegung des FPA oberste Priorität sein.

3.2.3.4.3 Betrachtungen zum Funktionspotentialausgleich

Die Betrachtungen erfolgen unter der Annahme der maximal zu erwartenden Parameter des Erst- und Langzeitblitzstromes und deren Auswirkungen (Kap.2.2 Der Blitz).

Ebenes Getriebe

Das ebene Getriebe zwischen Übergabestation (Aufnahme- und Abwurfband), dem Pylon als ternären Glied und dem antreibenden Hubwerk (Hydraulikzylinder mit Kolben und Stange) beruht auf mehreren Bolzenverbindungen, die leicht mit einem Erdungsseil, beidseitig ausgeführtem Kabelschuh und entsprechender Sicherung durch Unterlegscheibe, Federring und Schraube bzw. Mutter überbrückt werden können. Da bei dieser flexiblen Verbindungsart durch das Erdungsseil die mechanische Festigkeit nicht gewährt sein muss, kann der Querschnitt nach [N3] bei der Verwendung von Kupfer auf $q_{Cu_{min}} = 25mm^2$ begrenzt werden. Jedoch sollte die Temperaturerhöhung, hier $\Delta\vartheta_{Cu_{min}} = 98K$, angesichts des möglichen Blitzstromes und seiner spezifischen Energie im Bezug zur Umgebung und denkbaren Ex-Schutz-Voraussetzungen nach Formel 11 angepasst werden.

Während die Bolzenverbindung mit dieser Maßnahme vor Schäden bestmöglich geschützt ist und auch der Norm entsprochen wird, kann dennoch der Kolben oder die Kolbenstange mit dem Hydraulikzylinder punktuell oder linienförmig verschweißt werden. Ein zunehmender Verschleiß wie an der Stangendichtung durch das Reiben an einem gebrochenen Punkt oder einem Krater führt zu einer Lebensdauereinschränkung. Die Verwendung eines Erdungsseils ist nur bei kurzen Hubwegen, aufgrund des zunehmenden Seildurchhangs bei größeren Dimensionen, sinnvoll. Zerteilt man das lange Seil in kleine Teilstücke, so wäre es möglich, in Kombination mit einem parallel verlaufenden Teleskoprohr, welches angeschlagen ist an Stange und Zylinder, einen FPA mit minimalem Durchhang zu erreichen. Eine weitere Möglichkeit wäre die Installation eines Stromabnehmers am Zylinderende. Dieser wird in Form einer Bürste oder Andruckrolle [N3B2_Kap.9] durch einen Federmechanismus auf die Stange gepresst und gleicht somit den Potentialunterschied zwischen Zylinder und Stange aus. Darüber hinaus ist eine die Kolbenstange umgreifende Zange, die lediglich beim Heben

und Senken -unter der Annahme einer geringen Betriebsstundenzahl öffnet und bei Stillstand sofort schließt, befestigt am Zylinder, einsetzbar. Andererseits wäre eine Isolation des Hubwerks denkbar, da davon ausgegangen werden kann, dass bei BE der Stromfluss über den Abwurfausleger, den Pylon und dessen Spannseile bis hin zur Übergabestation und seiner ebenfalls durch Bolzen gesicherten und mit Erdungsseilen überbrückten Verbindung zum Oberbau erfolgt. Des Weiteren benutzt die FAM ein allgemeines Hydrauliköl vom Typ HLP 46. Dieses gilt als guter Isolator und erlaubt, bei diesem auf Zehntelmillimeter eingepassten System, die Annahme einer Funkenstrecke, welche erst bei hohen Potentialunterschieden, also dem Erreichen der Überschlagspannung, einen Ausgleich initiiert.

Schwenkwerk

Die Kugeldrehverbindung (KDV) des Schwenkwerks, hier: Axial-Zylinderrollenlager nach An5_Abb. 2 und An5_Abb. 3, wird durch die über ihm angeordneten Geräte, Komponenten und der Konstruktion des Oberbaus mit einer Gesamtgewichtskraft F_G in N , wie aus An5_Abb. 1 zu entnehmen ist, belastet. Dadurch kommt es, wie Formel 21 zeigt, zwischen den Laufflächen und den Zylinderrollen zu einer Flächenpressung p in N/mm^2 , die für die folgende Überlegung vereinfacht als Hertzsche Pressung angenommen wird. Sie schließt aus der Geometrie der aufeinander liegenden Körper mit einer Berührungslänge l_{LB} und dem Wälzkörperradius $r_{Wälz}$ in mm , deren Querkontraktionszahl ν und dem E-Modul E in N/mm^2 .

$$p_0 = \sqrt{\frac{F_G * E}{2\pi * r_{Wälz} * l_{LB} * (1 - \nu^2)}} \quad \text{Formel 21}$$

p_0 beschreibt die maximale Spannung entlang der Mittellinie, die nahezu konstant ist. Im Bereich der gesamten Berührungsfläche ist die Spannung jedoch nicht konstant, sodass über Formel 22 die halbe Breite a in mm der allgemeinen Berührungsfläche nach Hertz berechnet wird.

$$a_B = \sqrt{\frac{8 * (1 - \nu^2) * F_G * r_{Rolle}}{\pi * E * l_{LB}}} \quad \text{Formel 22}$$

Aus ihr wird die Kontaktfläche A in mm^2 , wie in der folgenden Formel 23 beschrieben und in der idealisierten Berechnung gezeigt, erörtert.

$$A = 2 * a_B * l_{LB} \quad \text{Formel 23}$$

Annahme:	Anzahl N	E	ν	Material
Wälzkörper	210	195 N/mm^2	0,27 ... 0,3	Stahl
m_{ges} in kg	228980			
$r_{W\ddot{a}lz}$ in mm	20			
l_{LB} in mm	35			
\bar{g} in m/s^2	9,81			
Berechnung:	Formel:	Lösung:		
Wälzkörper-Gewichtskraft	$F_{W\ddot{a}lz} = m_G / N * \bar{g}$	10,69kN		
Maximalspannung	$p_0 = \sqrt{\frac{F_{W\ddot{a}lz} * E}{2\pi * r_{W\ddot{a}lz} * l_{LB} * (1 - \nu^2)}}$	$721,9 \frac{N}{mm^2}$		
Halbe Berührungsflächenbreite	$a_B = \sqrt{\frac{8 * (1 - \nu^2) * F_{W\ddot{a}lz} * r_{W\ddot{a}lz}}{\pi * E * l_{LB}}}$	0,27mm		
Kontaktfläche	$A_{ges} = 2 * a_B * l_{LB} * N = q$	3961mm ²		
zulässige Stromstärke	$I = 0,1 \frac{A}{mm^2} * q$	396,1A		

Unter Verwendung von Formel 20 wird klar, dass ein bedeutender Strom durch die Gesamtheit des Lagers bzw. anteilig durch jeden Wälzkörper fließen kann. Der Stromsichelwert des Blitzes jedoch übertrifft bei weitem diese Grenze, sodass dadurch Lagerschäden bei Blitzeinschlag auftreten können.

Aus der Sicht des Konstrukteurs ist nach Kap.2.4 der FPA zum Schutz der KDV möglich, aber aus wirtschaftlicher und funktionaler Sicht unrealistisch, sodass auch hier der Fokus auf dem sicheren Ableiten des Blitzstromes liegt und eine Beschädigung des Lagers in Kauf genommen werden muss.

Das Zitat aus [N3] zu Beginn des Punktes „3.2.3.4 Funktionspotentialausgleich“ beschreibt Verbindungen, die bis zu einem gewissen Grad Zug- und Druckbelastungen standhalten. Der Begriff Pressung fällt hierbei nicht. Die auftretende Flächenpressung ist dem Quetschen durch den axialen Kraft- und radialen Formschluss am nächsten, sodass die KDV des Schwenkwerks im eigentlichen Sinne die Bedingung im Bezug auf den Mindestquerschnitt weit über der Normvorgabe erfüllt. Um dennoch einen konformen Schutz zu gewährleisten ist in der einfachsten Form ein Erdungsseil mit $q_{Cu_{min}} = 25mm^2$ zu benutzen, das neben den Anschlagelernen (ASE), bestehend aus Befestigungsplattform, Schraube/Mutter, Federring und Scheibe, über eine Länge verfügt, die es ermöglicht ein Schwenken bis zu einem Winkel von 360° je nach Betriebsrichtung bzw. beidseitig über Seilabstreifer durchzuführen. Hierbei sollte unter der Annahme, dass die KDV nicht leitet, auch auf einen Trennungsabstand zwischen der Elektroinstallation und dem Erdungsseil je nach Länge des Seils geachtet werden, um die magnetisch induzierte Überspannung und die resultierende

gefährliche Funkenbildung auszuschließen. Weiterhin wäre die Montage einer Andruckrolle oder Kohlebürste aber auch eine temporär-geschlossene Verbindung nach [N3B2_Kap.9] möglich.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Erweiterung des Schirmrohransatzes.

Elektrische und informationstechnische Leitungen werden bei räumlich großen rotatorischen und translatorischen Lagern in Energieketten eingebracht. Diese haben die Aufgabe eine sichere Leitungsführung bei Einhaltung des minimalen Biegeradius der größten oder auch unflexibelsten Leitung zu gewährleisten. Dafür besitzt die Kette Glieder, die durch eine Stift- oder Bolzenverbindung eine eindimensionale im einzelnen und im Verbund zweidimensionale Kreisbewegung zulassen. Bestehen diese ausreichend dimensionierten und durch Erdungsseile gebrückten Segmente vorzugsweise aus Kupfer oder Eisen, erfüllt diese Energiekette unter der Verwendung von ASE die Bedingungen der AE und des FPA, aber auch die Bedingung der Schirmung und Trennung der Leitungen.

Die Erweiterung muss jedoch in einer Laboruntersuchung überprüft werden um die Auswirkung der Längsspannung und mögliche Folgen der elektrischen Funkenbildung oder der Induktion in den Leitungen auszuschließen.

Fahrwerke

Der Bandschleifenwagen zeigt ein typisches Beispiel des Schienenfahrwerks, das nicht nur in Erdbodennähe, sondern auch zur Verwendung von translatorischen Lagern wie beim QSL, zu sehen in An13_Abb. 2, eingesetzt wird. Es beruht auf Baugruppen, bestehend aus Ein- oder Zweiradschwingen, die untereinander eine Ausgleichsbewegung durch den Einsatz von Bolzen erlauben. Der einfache FPA über ASE und Erdungsseil ist somit ausreichend. Hingegen ist der FPA mit den Schienen wiederum nur über die Flächenpressung der Räder und ihrer internen Wälzkörper gegeben, die jedoch bei einer Masse von 200Tonnen abermals genügend Kontaktfläche bieten.

Der Einsatz einer Bürste nach [N3B2_Kap.9] am Kopf der Schwingen-Baugruppe, die das Rad überbrückt und direkt auf die Schiene gedrückt wird, und auch in Kundenvorgaben des angloamerikanischen Raums gefordert ist [N17], kann wiederum die Strombelastung der Lager und Räder minimieren. Zumal diese Bürste in modifizierter Form auch den momentan verwendeten Schienenräumer ersetzt. Nachteilig wäre ein zunehmender Abrieb an Bürste und Schiene, der gerade in aggressiven Umgebungen zu einer erhöhten Korrosion führt und den Verschleiß eindeutig verstärkt.

Das Raupenfahrwerk des Absetzers besteht hingegen nur aus den Rädern und Raupenplatten. Trotzdem wird hier unter der Flächenpressung der Gewichtskraft aber auch

der Flächenpressung durch das Spannen der Raupe am Antriebsrad bzw. -Turas ebenfalls die errechnete Kontaktfläche erreicht und sogar überboten. Der Einsatz einer Bürste, die durch eine Feder angepresst wird, kann über die tragende Konstruktion des Unterbaus direkt auf die Raupenplatten oder dem Antriebsrad erfolgen. Jedoch muss unter dem Aspekt der Bodennähe, dem Auftreten des Verkantens von Gestein und dem daraus möglichen Abreißen der Bürste darauf verzichtet werden. Vielmehr kann schon aufgrund der hohen Stoßbelastung der Räder beim Fahren des Absetzers, der Verschleiß durch einen eher selten auftretenden Blitzstrom in den Hintergrund gestellt werden.

Gleisanlagen

Sind Gleise auf metallenen Schwellen montiert, die durch ihren temporär-lokalen Einsatz nicht an die Erdungsanlage angeschlossen sind, wird jede Schwelle mit der Schiene durch ein Erdungsseil mit $q_{Cu} = 50mm^2$ über ASE verbunden. Somit wird erreicht, dass neben dem FPA zwischen den Schienen die Schwellen als Teile der Erdungsanlage fungieren.

Der FPA zwischen den Schienenstößen erfolgt nach [N3B2_Kap.12] durch ein metallenes Flachband $3,5 \times 30mm^2$ mit zwei Schrauben M10, Unterlegscheibe sowie Federring und muss darüber hinaus, falls eine Erdungsanlage vorhanden ist, alle 20m die Möglichkeit des Anschlusses an die Erdungsanlage bieten.

3.2.3.4.4 Widerstandsmessung

Die Messung des Durchgangswiderstandes ist ein Verfahren, das Aufschluss darüber geben soll, inwieweit die metallene Konstruktion mit ihren nicht normkonformen gesteckten oder geführten Verbindungsstellen ein Ableiten des Blitzstromes niederimpedant gewährleistet. Nach dem Prinzip der direkten Messung, wobei hier der Widerstand mit einem Messgerät, das als Spannungsquelle über zwei den Widerstand abschließende Messspitzen arbeitet und die Höhe des spannungsbedingten Stromflusses nach dem ohmschen Gesetz vgl. Formel 4 intern misst und in den Widerstand umwandelt, sollen die vorher errechneten Widerstandswerte überprüft werden. Hierfür sind die in An5_Abb. 4 bis 6 zu sehenden Ersatzschaltbilder beispielhaft, die zur Vereinfachung nur aus der tragenden Konstruktion bestehen. Weiterhin gilt grundsätzlich die Annahme, dass der Widerstand mit dem stromdurchflossenen Querschnitt q_i über die Länge l_i und dem Koeffizienten des spezifischen Widerstandes ϱ nach Tab. 5 mit Formel 24 errechenbar ist.

$$R_i = \varrho_{Fe} * \frac{l_i}{q_i} \quad \text{Formel 24}$$

Das Ergebnis bietet abschnittsweise einen zum Messergebnis vergleichbaren Widerstand. Die in An5_Abb. 4 bis 6 gezeigten Netzwerkknotenpunkte stellen hierbei die Hauptelemente

des FPA dar und sind in der Theorie perfekt leitend, sodass ein grobes Abweichen des gemessenen Wertes zwischen den Mess- und Knotenpunkten vom theoretischen Widerstand auf einen Schwachpunkt im FPA hindeutet.

Wie zu Beginn beschrieben, werden die Daten der Messreihen zwischen den einzelnen Messpunkten, zu sehen in An5_Abb. 4 bis 6, aufgelistet. Die einzelnen Widerstände des Widerstandsnetzwerks sind zudem sehr klein (einige Milliohm) und werden, unter der Voraussetzung, dass hierfür eine vereinfachte Betrachtung genügt, nur als Reihenschaltung des Oberbaus angenähert. Diese besteht aus dem Abwurfband und dem L-Rahmen. An diesem Strompfad schließen sich das Portal und das Schienenfahrwerk an. Das Gleis bildet den Übergang zur Erdungsanlage. Die Knotenpunkte spiegeln die Gelenke, die KDV und die Lager wider.

Es soll genügen, den theoretischen Widerstand anhand des Endstückes des Abwurfbandes zu bestimmen. Hierfür wird ein Stahlträger mit Kennung IPE 300 eingesetzt. Da alle weiteren Elemente einen größeren Gesamtquerschnitt besitzen, ist dieser als Querschnittminimum zur Berechnung ausreichend. Der daraus resultierende maximale Gesamtwiderstand ist sehr konservativ und tritt somit bei nur einer leitfähigen Verbindung zur Erde auf.

Annahme:	IPE 300	h	b	s	t	Material	
		300	150	7,1	1	Stahl	
q_{IPE300} in mm^2	5380						
q_{Fe} in $\Omega mm^2/m$	0,12						
Längen		Position			Widerstand		
l_{Abband} in m	49,272	Abwurfband			$R_1 + R_3 + R_5 + R_{12}$		
l_{L-R} in m	3,500	L-Rahmen			R_{14}		
l_P in m	5,750	Portal			R_{15}		
l_S in m	1,25	Schienenfahrwerk			$R_{S,1}$		
Berechnung:		Formel:			Lösung:		
Grundgleichung		$R_i = q_{Fe} * \frac{l_i}{q_{IPE300}}$			$R_i = 2,23 * l_i * 10^{-5} \frac{\Omega}{m}$		
<i>Abwurfband</i>		R_{Abband}					1,2mΩ
<i>L-Rahmen</i>		R_{L-R}					0,08mΩ
<i>Portal</i>		R_{Portal}					0,13mΩ
<i>Schienenfahrwerk</i>		$R_{S,1}$					0,03mΩ
<i>Maximaler Gesamtwiderstand</i>		$R_{max} = \sum R_i$			1,44mΩ		

Zustand der Anlage

Der Absetzer für das Großkraftwerk Mannheim wurde in einem komplett montierten Zustand vorgefunden. Außerdem sind sämtliche elektrischen und elektronischen Bauteile betriebsfertig angeschlossen und gemäß [N6] und [N13] vor gefährlichen Potentialunterschieden mit Potentialausgleichsleitern (PAL) gesichert. Eine Inbetriebnahme und der Anschluss an die Energieversorgung waren ebenso wie der Anschluss der Gleise an die Erdungsanlage in Form eines Fundamenterders zum Zeitpunkt der Messung noch nicht erfolgt.

Faktoren der Messung

Die Messung erfolgte mit und ohne Erdseil $q_{Cu} = 16mm^2$. Hierbei beruht sie zumindest auf der Basis der Überbrückung einiger Messstellen des Abwurfbandes und des Schienenfahrwerks durch die installierte Elektrik oder auch der Kabelkanäle. In jedem Fall wurden PAL für den Kurzschlussfall $q_{Cu} = 95mm^2$ demontiert. Ferner wurde im Fall des Schwenkwerks bzw. der Kugeldrehverbindung (KDV) die PAL im Schaltschrank der Fahrerkabine und die der Motoren und Geräte auf dem Schwenkwerk demontiert um hier die Leitfähigkeit der Wälzkörper und somit die These: „FPA durch Flächenpressung“ zu belegen.

Für die Messung wurde das Erdungsmessgerät der Firma Fluke 1625 eingesetzt.

Die verwendeten Anschlussleitungen und auch die Klemmverbindungen, zu sehen in An6_Abb. 1, wurden vor der Messung durch eine interne Funktion des Messgeräts kompensiert.

Bei der Messung mit Gleichstrom $I_{Mess} \geq 200mA$ stellte sich zudem ein Fehler in Form von kleinen Abweichungen $1 \dots 2m\Omega$ heraus, die auf das Anschlagen und der Position der Krokodilklemmen an der Klemmverbindung zurückzuführen sind.

Messung

Die Messung erfolgt nach [N3B1] und [N3B3] und sollte den theoretischen und praktischen Gesamtwidestand von $R_{Mess} < 0,2\Omega$ ohne FPA einhalten.

Überprüfung vom Endpunkt des Abwurfbandes bis zum jeweiligen Messpunkt:

Die Messung, dargestellt in Tab. 10, gibt Aufschluss über den Gesamtwidestand der Anlage und erfolgte gemäß An5_Abb. 4. Darüber hinaus bestätigt sie die Forderung der [N3B1] und [N3B3].

R in $m\Omega$	ohne	mit	Erdseil q_{Cu} in mm^2
M1-M2	15	2	3x16 & 1x95
M1-M3	23	9	16
M1-M4	35	4	16
M1-M5.1	21	13	16
M1-M6	40	23	16
M1-M7	3420	Nicht geprüft	

Tab. 10: Gesamtwidestandsmessung

Überprüfung der Kugeldrehverbindung:

Die Messung erfolgte zwischen den zwei Motoren des Schwenkantriebes M_{5MP1} und neben dem Hubwerk M_{5MP2} . Die Messpunkte werden in An5_Abb. 5 ortsbezogen dargestellt. Das Ergebnis der punktbezogenen Messung von M5.1 zu M5.2 ist zu sehen in Tab. 11.

R in $m\Omega$	ohne	mit	Erdseil q_{Cu} in mm^2
MP1			
M5.1-M5.2	1	1	16
MP2			
M5.1-M5.2	13	13	16

Tab. 11: Messung KDV

Überprüfung des Schienenfahrwerks:

Hierfür wurde das Schienenfahrwerk, wie in An5_Abb. 6 gezeigt und in Tab. 12 ausgewertet, wiederum in die Komponenten Schwingen und Räder zerlegt. Als Festpunkte der Messung gelten M6 und M7.

R in $m\Omega$	ohne	mit	Erdseil q_{Cu} in mm^2
M6-M8	2	2	16
M6-M9	7	0	16
M6-M10	12	0	16
M6-M11	41	Nicht geprüft	
M6-M12	22	Nicht geprüft	
M6-M13	1	Nicht geprüft	
M6-M14	5	Nicht geprüft	
M7-M11	3410	Nicht geprüft	
M7-M12	3380	Nicht geprüft	
M7-M13	3350	1	16; über M7-M10
M7-M14	3380	Nicht geprüft	
M7.1-M7.2	0	Nicht geprüft	

Tab. 12: Messung Schienenfahrwerk

Ergebnis

Die Untersuchung zeigte, dass der konservativ-angenäherte theoretische Widerstand nicht erreicht wurde. Des Weiteren stellte sich heraus, dass die

Bolzenverbindung: Nicht nur die Reinigung der Bolzenoberfläche vor der Montage, sondern auch die Montage selbst oder das Verkanten bzw. der Passungssitz gibt dieser Verbindung eine große leitende Kontaktfläche.
M1-M2

Lager: Die Überbrückung brachte eine Verbesserung
M1-M4

Kugeldrehverbindung: Hier bestätigte sich die Annahme einer querschnittgroßen Verbindung. Zudem kommt hinzu, dass das angreifende Stirnrad des Getriebes über das Getriebe selbst einen zusätzlichen Potentialausgleich gewährleistet.
M5.1-M5.2

Flanschverschraubung: R14 & R15	Hier traten kleine Abweichungen auf, die möglicherweise auf das Konservieren der Flanschflächen nach Fertigstellung des Elements zurückzuführen sind. Die Schicht ist nach [N3] tolerierbar.
Schwinge: M6-M8-M9 M6-M8-M10	Es besteht eine niederohmige Verbindung zwischen den Schwingen. Der Einsatz eines Erdungsseils zeigte nur eine minimale Verbesserung. Einfluss: Kabelkanal, geklemmt zwischen den Schwingen.
Räder: M7-M11...M14	Die Räder verfügen über eine niederohmige Verbindungen zur Aufnahme in den Schwingen. Einfluss: Aus der Farbe an den Rädern, welche eine Stärke von einigen $100\mu\text{m}$ aufweist, resultierte ein Übergangswiderstand. Die Schicht ist nach [N3] tolerierbar. Außerdem wird sie im Betrieb abgerieben.
Gleis: M7	Die Messung zwischen M7.1 und M7.2 zeigte, dass der Rost auf den Schienen keinen Einfluss auf den Widerstand nimmt.

3.2.3.4.5 Zusammenfassung

Der FPA führt zu einer niederimpedanten Verbindung, die der Blitzschutznorm durch die Verwendung einfacher Mittel entspricht. Dennoch werden die Wirkungen des Blitzstroms lediglich auf ein Maß minimiert, das keinen ausreichenden Schutz vor allem für die rotatorischen und translatorischen Lager gewährleistet. Ein Schaden muss somit in Kauf genommen werden. Darüber hinaus dienen Schutz- und Potentialausgleichsleiter der Energieversorgung dem FPA und ergeben bei einem konsequent durchgeführten Blitzschutzpotentialausgleich eine zusätzliche AE zur Erde.

Das Ergebnis der Messung ergab, dass das Produktportfolio der FAM die Normvorgabe auch ohne Verwendung des PAL mit einem Gesamtwiderstand von $R_{Mess_{ohne}} = 0,04 \dots 0,08\Omega$ erfüllt. Jedoch wurde durch ihn eine weitere Minimierung auf $R_{Mess_{mit}} = 0,023(\dots 0,04\Omega)$ erreicht. Lediglich die dünne Farbschicht an den Rädern führte dazu, dass das Ergebnis verfälscht wurde. Nach [N3] ist diese Farbschicht jedoch vernachlässigbar. Außerdem kann angenommen werden, dass sich schon nach der ersten translatorischen Bewegung des Schienenfahrwerks zum Gleis ein Abrieb bzw. ein Abplatzen dieser Farbschicht einstellen wird.

3.2.3.5 Erdungsanlage der mobilen Geräte

Die bodenseitigen Platten des ausgeglichenen Raupenfahrwerks des Absetzers entsprechen isoliert betrachtet der Erdungsanlage. Sie sind demnach die örtlich abgegrenzte Gesamtheit aller miteinander leitend verbundener elektrisch leitfähiger Teile, die den Blitzstrom in die Erde ableiten und dort verteilen.

Folgend werden grundlegenden Begriffe der Erdung im Allgemeinen sowie des Blitzschutzes erläutert.

Das elektrisch leitfähige Erdreich und der Teil der Erde, der sich im elektrischen Kontakt mit einem Erder befindet, werden als Erde bezeichnet. Darüber hinaus ist unter Erde nicht nur der Ort sondern auch das Material zu verstehen. Daraus abgeleitet ist ein Erder ein in den Boden eingebrachtes elektrisch leitfähiges Bauteil, das aufgrund seiner Nutzung einen künstlichen aber auch natürlichen Kontakt mit dem Erdreich herstellt. Werden, wie oben erwähnt, diese Erder elektrisch leitfähig miteinander verbunden, entsteht eine Erdungsanlage.

Durch den Stromeintritt in das Erdreich wird nach Formel 4 eine Erdungsspannung U_E in V auftreten, die sich zwischen der Erdungsanlage und der Bezugserde als Potentialtrichter zeigt. Hierbei beginnt die Bezugserde an den Auslaufenden des Potentialtrichters. Da sich hier keine merklichen Änderungen von U_E zeigen, wird dieser Bereich durch Vereinbarung im elektrischen Potential null gesetzt. Die Widerstandskomponenten, die den Spannungshub verursachen, sind zum einen der spezifische Erdwiderstand ρ_E in Ωm , der aufgrund seiner Stoffzusammensetzung, wobei der Stoff sich zwischen den Seitenflächen bei Annahme eines Erdwürfels mit der Kantenlängen von 1m befindet, und jahreszeitlich-umweltbedingten Schwankungen variiert. Zum anderen ist es der zwischen Erdungsschiene und Erder zur Erde auftretende Erdungswiderstand, welcher sein Maximum im Ausbreitungswiderstand R_A in Ω findet. Dieser Wirkwiderstand resultiert aus dem spezifischem Erdwiderstand und der Art bzw. geometrischen Form der Erdungsanlage zwischen Erder und Bezugserde.

Das Überbrücken des Wirkwiderstandes im Boden durch den Menschen führt zu gefährlichen und damit lebensbedrohlichen Spannungen beim Berühren der Ableitung oder dem radialen Schreiten im Potentialtrichter. Hierbei entsteht die Berührungsspannung durch das Überbrücken von Hand zu Hand bzw. Hand zu Fuß im Abstand von 1m zur Ableitung, wobei der Stromfluss durch das Körperzentrum und somit auch durch das Herz erfolgt. Bei der Schrittspannung hingegen fließt der Strom über eine Schrittlänge von einem 1m von Fuß zu Fuß, sodass wie im weiteren Verlauf beschrieben, das menschliche Herz nur anteilig dem vollen Körperstrom ausgesetzt ist.

Anmerkung: Der in der Blitzforschung verwendete Begriff Stoßerdungswiderstand, resultiert aus dem aperiodischen Stromstoß des Blitzes. Aus Gründen der Bodenionisation, des Wärmeeinflusses im Erdreich, des Skineffektes oder der Ausdehnung der Erdungsanlage kann dieser Wert kleiner oder größer als der Ausbreitungswiderstand sein [3]. Hier gilt die vereinfachte Annahme, dass Ausbreitungswiderstand und Stoßerdungswiderstand gleich sind.

3.2.3.5.1 Spezifischer Erdwiderstand, Erderform und Ausbreitungswiderstand

Bestimmen des spezifischen Erdwiderstandes

Der für den Ausbreitungswiderstand und die daraus resultierende Erdungsspannung maßgebende Faktor steht unter dem Einfluss der Bodenzusammensetzung, der Bodenfeuchtigkeit und der Temperatur. Nach [4] und [11] zeigten umfangreiche Messungen, dass aufgrund des negativen Temperaturkoeffizienten des Erdbodens das Maximum im Winter und ein Minimum im Sommer erreicht werden. Hierbei wurde für Eingrabbtiefen des Oberflächenerders $t_E < 1,5m$ zwischen diesen Extremen eine Abweichung von $\Delta \rho_E = 60\%$ ermittelt.

Beim Heranziehen der genormten Werte für den spezifischen Erdwiderstand fällt außerdem die hohe Streuung, zu sehen in Tab. 13, zwischen den einzelnen Bodenarten auf. Diese lässt sich mit der Feuchtigkeit des Erdbodens begründen. Zweifelsohne entspricht ein geringer ρ_E einer ebenso geringen Erdungsspannung. Dennoch steigt die Aggressivität mit abnehmendem spezifischem Erdwiderstand, sodass beim Absenken $100 > \rho_E \geq 10 \Omega m$ die Korrosion nach [11] aufgrund der galvanischen Elementbildung stetig zunimmt.

Der Absetzer steht zumeist auf einem Terrain, das sich aus steinhaltiger Erde und Lehm zusammensetzt. Eine Bestimmung durch Mittelung des Erdwiderstandes ist für eine theoretische Betrachtung ausreichend, muss jedoch praktisch mit der Messmethode nach WENNER begründet sein um den genauen spezifischen Erdwiderstand zu erhalten. Diese Messmethode bedient sich einer Erdungsmessbrücke mit 4 Messsonden (Erdspieße mit 30 bis 50cm Länge), die im gleichen Abstand a in m zueinander auf einer Linie in den Boden eingebracht sind. Mit Hilfe eines geeigneten Messgeräts wird der Widerstand R in Ω zwischen den Messsonden, wie es in An7_Abb. 1 erklärt ist, ermittelt und ergibt über Formel 25 den spezifischen Erdwiderstand. Dieser Erdwiderstand entspricht einer Schicht beginnend an der Erdoberfläche mit der Dicke, die identisch ist mit dem Abstand, a .

$$\rho_E = 2\pi * a * R$$

Formel 25

Bodenart	Werte aus der VDE in Ωm	Werte aus der Praxis in Ωm
Moor, Sumpf	5 bis 40	5 bis 60
Lehm, Ton, Humus	20 bis 200	20 bis 300
Sand	200 bis 2500	20 bis 2000
Erde steinig		100 bis 2000
Kies	2000 bis 3000	200 bis 1500
Kalk		500 bis 1000
Granit	bis 50000	1000 bis 50000
Verwitterter Fels	< 1000	600 bis 1200
Sandstein	2000 bis 3000	2000 bis 3000
Quellwasser, sehr sauber		≈ 1000
Leitungswasser		≈ 100
Schmutzwasser		≈ 10
Meerwasser		$\approx 0,3$

Tab. 13: Spezifischer Erdwiderstand nach [4] und [11]

Erderform und Ausbreitungswiderstand

Die Erderform des ortsveränderlichen Absetzers lässt sich nur annähernd mit der eines Oberflächenerders beschreiben, welcher zudem in der Regel horizontal in 0,5...1m Tiefe im Erdreich eingebettet ist. Jedoch beruht die Berechnung seines Ausbreitungswiderstandes R_A wegen des Austrocknens der Bodenschicht im Sommer und des Gefrierens im Winter auf der Theorie, dass dieser Erder auf der Bodenoberfläche verlegt ist und über die Länge des Oberflächenerders l_0 in m und dem Radius des Erderstabes bzw. dem Viertel des Erdungsbandes r_0 in m mit der Formel 26 bestimmt wird [4].

$$R_{A_0} = \frac{q_E}{\pi * l_0} * \ln \frac{l_0}{r_0} \quad \text{Formel 26}$$

Zudem entsprechen die Platten des Fahrwerks, durch ihre große Ausdehnung in der Breite, mehr dem Prinzip eines Strahlenerders R_{A_S} , Formel 27. Dieser ist ein Verbund aus Oberflächenerdern, dessen Schenkel im rechten Winkel zueinander stehen und erreicht relativ niedrige Ausbreitungswiderstände bei besonders schlecht leitendem Erdboden [4].

$$R_{A_S} = \frac{q_E}{4\pi * l_0} * \ln \frac{l_0}{r_0} + 1,75 \quad \text{Formel 27}$$

Füllt man die Abstände zwischen diesen Schenkeln auf, sodass eine Platte entsteht, ist die Annahme eines Plattenerders mit der Länge l_p in m und der Breite b_p in m schlüssig und lässt sich wie folgt in Formel 28 darstellen.

$$R_{Ap} = \frac{Q_E}{4,5 * \sqrt{l_p * b_p}}$$

Formel 28

3.2.3.5.2 Vergleich des theoretischen und praktischen Ausbreitungswiderstandes

Zustand der Anlage

Der Absetzer der K+S GmbH Zielitz steht aufgrund der permanenten Förderung von Salz und des begrenzten Platzbedarfs auf einer durch ihn angehäuften Halde. Das Stehen auf diesem aggressiven Erdboden ist Hauptmerkmal für das erhöhte und sichtbare Maß an Korrosionsschäden an den Raupenplatten, erdbodennahen Gerätekomponenten sowie den Steckverbindungen zwischen den Platten.

Die Position des Absetzers mit seinem Aufnahmeband und des beschickenden Fördersystems sowie die Maße eines Ausschnitts der Halde und die Position der Messpunkte sind An7_Abb. 2 zu entnehmen.

Faktoren der Messung

Der spezifische Erdwiderstand wurde, nach der in Punkt 3.2.3.5.1 beschriebenen WENNER-Methode, nach An7_Abb. 1, mit dem Messgerät Fluke 1625 ermittelt. Hierbei fanden die dem Gerät beiliegenden Erdspeiße, welche in einem Abstand $a = 0,66m$ zueinander wenige Zentimeter tief eingeschlagen wurden, Verwendung. Die Messung 3, zu sehen in Tab. 14, stand unter dem Einfluss der sich in der Nähe befindlichen metallenen Konstruktion und wird bei der Mittelwertbildung ausgeschlossen.

Der Ausbreitungswiderstand wurde durch die Spannungsfallmethode unter Verwendung des Fluke 1625 bestimmt. Wobei, wie aus An8 zu entnehmen ist, das Raupenfahrwerk den Erder darstellt und die verwendeten Erdspeiße die Sonde und den Hilfserder. Hierbei wurde das Raupenfahrwerk erneut über die Klemmverbindung und einer Krokodilklemme nach An6_Abb. 2 an das Messgerät angeschlossen. Der Anschluss der Messleitungen an die Erdspeiße erfolgte über das Stecken in die in den Erdspeißkopf eingearbeitete Bohrung.

Messung: spezifischer Erdwiderstand und Ausbreitungswiderstand

Die Tab. 14 zeigt sowohl die ermittelten Werte für den Ausbreitungswiderstand als auch die der Messung des spezifischen Erdwiderstandes unter Verwendung der Formel 25.

Messung	1	2	3	4	5	Mittelwert	Bemerkung
$Q_{E\text{Mess}}$ in Ωm	41,47	45,78	21,73	41,47	40,22	42,24	$\overline{Q_E}$ ohne 3
$R_{A\text{Mess}}$ in Ω	2,43	2,428	2,4	2,37	2,36	2,4	-

Tab. 14: Messung des spezifischen Erdwiderstandes und Ausbreitungswiderstandes

Berechnung unter Verwendung theoretischer und gemessener Werte

In den folgenden Berechnungen werden zwei verschieden große Raupenfahrwerke, die zum einen den Einsatz in einem Gebiet mit lehmhaltigem Boden und zum anderen die praktische Messreihe des spezifischen Erdwiderstandes und die des Ausbreitungswiderstandes unter Verwendung der Tab. 14 mit An7_Abb. 1, 2 und An8_Abb. 1 in einem Gebiet mit sehr aggressivem Erdreich zeigen, analysiert. Mit Formel 4 und Tab. 6 wird anschließend die maximal auftretende Erdungsspannung ermittelt.

Annahme:		l_0	r_0	l_P	b_P	\hat{I}_{BSKIII}
Raupe		9,4m	0,83m	9,4m	3,3m	100kA
ϱ_E in Ωm	300					
Messung:		Mittelwert	l_{0Mess}	r_{0Mess}	l_{PMess}	b_{PMess}
Raupe			5,4m	0,56m	5,4m	2,24m
$\overline{\varrho}_{EMess}$ in Ωm	42,24					
\overline{R}_{AMess} in Ω	2,4					
Berechnung:		Formel:				Lösung:
<i>beide Raupen</i>						
R_{A0} -Oberflächenerder		$R_{A0} = \frac{\overline{\varrho}_{EMess}}{\pi * 2 * l_0} * \ln \frac{2 * l_0}{r_0}$				15,88 Ω
R_{Ap} -Plattenerder		$R_{Ap} = \frac{\overline{\varrho}_{EMess}}{4,5 * \sqrt{2 * l_P * b_P}}$				8,46 Ω
Erdungsspannung		$U_E = R_{Ap} * \hat{I}_{BSKIII}$				846kV
Berechnung nach Messung:		Formel:				Lösung:
<i>beide Raupen</i>						
R_{A0} -Oberflächenerder		$R_{A0Mess2} = \frac{\overline{\varrho}_{EMess}}{\pi * 2 * l_{0Mess}} * \ln \frac{2 * l_{0Mess}}{r_{0Mess}}$				3,68 Ω
R_{Ap} -Plattenerder		$R_{ApMess2} = \frac{\overline{\varrho}_{EMess}}{4,5 * \sqrt{2 * l_{PMess} * b_{PMess}}}$				1,9 Ω
<i>eine Raupe</i>						
R_{A0} -Oberflächenerder		$R_{A0Mess1} = \frac{\overline{\varrho}_{EMess}}{\pi * l_{0Mess}} * \ln \frac{l_{0Mess}}{r_{0Mess}}$				5,64 Ω
R_{Ap} -Plattenerder		$R_{ApMess1} = \frac{\overline{\varrho}_{EMess}}{4,5 * \sqrt{l_{PMess} * b_{PMess}}}$				2,7 Ω
Erdungsspannung		$U_E = R_{ApMess1} * \hat{I}_{BSKIII}$				270kV
theoretisch		$U_E = R_{ApMess1} * \hat{I}_{BSKIII}$				270kV
praktisch		$U_E = \overline{R}_{AMess} * \hat{I}_{BSKIII}$				240kV

Vergleich und Wertung

Aus der vorangestellten Messung und Berechnung des Ausbreitungswiderstandes, ist ersichtlich, dass der Ausbreitungswiderstand annähernd einem Plattenerder entspricht. Hierbei zeigen sich nur geringe Abweichungen zwischen der Betrachtung einer Raupe und der beider Raupen. Aufgrund der Messung an einer solchen untypischen Erdungsanlage bleibt es jedoch fraglich, wie der transiente Blitzstrom, der im Gegensatz zum Messstrom zum Gleitüberschlag bzw. zum Durchschlagen isolierter Schichten neigt, an einer kleinen Stelle punktuell oder, wie hier betrachtet, über die gesamte Fläche des Erders in das Erdreich übertragen wird.

Im weiteren Verlauf der Berechnung ist unter Verwendung der Plattenerdtheorie erkennbar, dass neben dem spezifischen Erdwiderstand die Geometrie des Erders die Erdungsspannung entscheidend beeinflusst. Jedoch bedeutet dies nicht zwingend, dass hierdurch gefährliche Schritt- und Berührungsspannungen vermieden werden.

3.2.3.5.3 Vorgabe der Blitzschutznorm und resultierende Gefahr für den Menschen

Die Erdungsanlage des Raupenfahrwerks, entspricht einer horizontalen Erderanordnung zweier Plattenerder und ist nach [N3] dem Erder Typ A zugeordnet. Dieser beruht je nach BSK auf einer Mindestlänge, die in Abb. 11 zu sehen ist. Hieraus ist zu entnehmen, dass die BSK III und IV lediglich einer Erderlänge unabhängig vom Erdwiderstand von $l_E = 5m$ bedürfen. Zudem fordert die Norm bei konsequenter Durchführung des Blitzschutzpotentialausgleichs, siehe hierzu Kap.3.2.4.1, keinen besonderen Wert des Ausbreitungswiderstandes, wobei ein $R_A \leq 10\Omega$ empfohlen wird.

Dieser Vorgabe entsprechen alle mobilen Geräte der FAM. Wobei der Bandwagen, welcher über ein starres Raupensystem verfügt, die kürzeste Länge aufweist.

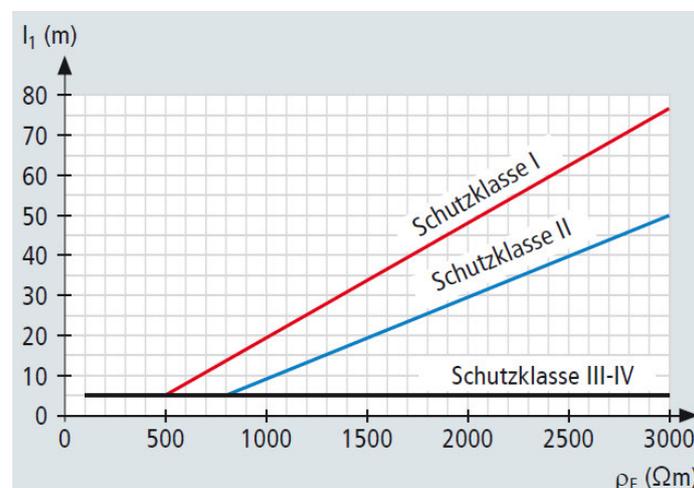


Abb. 11: Erderlänge nach [N3] aus [4]

Im Bezug auf die Gefährdung des Menschen bei einem Blitzeinschlag muss der Norm mit dieser Aussage widersprochen werden, da in diesem Fall die auch bei niedrigen spezifischen Erdwiderständen auftretende Berührungs- und Schrittspannung hohe Werte annimmt. Durch die Berechnung der Erdungsspannungen, wie im Punkt 3.2.3.5.2 durchgeführt, und der An9_Abb. 1 wird die Gefahr am Aufstieg des Absetzers unter Anwendung der Methode des Halbkugelerders dargestellt.

In [4] werden mögliche Schrittspannungsgrenzwerte aus verschiedenen Quellen gelistet, die einer theoretischen Überlegung eines positiven Erstblitzstroms aus Tab. 2 entsprechen. Mit dem „Hugo-Modell“ wurde darin anhand der Finite-Elemente-Methode eine maximale Stromdichte von $J_S = 1,2A/m^2$ im Herz durch eine Körperstromsimulation für eine Schrittspannung von $U_S = 1000V$ ermittelt. Diese Stromdichte entspricht einem Gesamtstrom durch das Herz von $I_S = 7,5mA$. Die Rückrechnung der Schrittspannung auf den maximalen Wert des Herzstroms $I_{M_{max}} = 200mA$ bei 10/350 μs -Impulsform führt zu einem Schrittspannungsmaximum von $U_{S_{max}} = 26,6kV$. Die Normvorgabe aus [N10] beschränkt sich auf einen Wert von $U_{S_{max}} = 25kV$, sodass für diesen Wert keine Todesfolge bei einem gesunden Menschen durch einen positiven Erstblitz zu erwarten ist. Dennoch ist die Höhe der Berührungsspannung U_{Tp} am Aufstieg des Absetzers, ebenfalls zu sehen in An9_Abb. 1, lebensgefährlich. Die Möglichkeiten der Begrenzung und der Vermeidung werden im Punkt 3.2.3.7 diskutiert.

3.2.3.6 Erdungsanlage in Kraftwerken

3.2.3.6.1 Einführung

Auch im Aufgabenbereich der Projektplanung für Kraftwerke muss die FAM Maßnahmen ergreifen um eine normgerechte Erdungsanlage zu gewährleisten. Denn im Gegensatz zu den Blitzschutz-Erdungsanlagen, welche für den standardisierten Fall des Blitzeinschlages und dessen maximale transiente Stromhöhe ausgelegt sind, fallen bei Erdungsanlagen in Kraftwerken folgende Aspekte zur Auslegung an:

- ⇒ Sternpunktbehandlung
- ⇒ Netzform
- ⇒ Kurzschlussstrom und Betriebsfrequenz
- ⇒ Abschaltzeit
- ⇒ Auftretende Berührungs- und Schrittspannung
- ⇒ Mechanische Festigkeit und Korrosion des Erders

3.2.3.6.2 Sternpunktbehandlung und Netzform

Die in Großanlagen eingesetzten Netze für die Hoch- und Mittelspannung (HS/MS) unterscheiden sich in der Art der Sternpunktbehandlung. Sie beschreibt die Erdungsart des Generators oder Transformators des vorgeschalteten Mittelspannungsnetzes und ist in vier Arten eingeteilt:

- ⇒ isoliert Sternpunkterdung (ISPE)
- ⇒ Resonanzsternpunkterdung, Erdschlusskompensation (RSPE)
- ⇒ Starre und niederohmige Sternpunkterdung (SSPE & NOSPE)

Die Abschaltzeit des Fehlers in Form eines Erdschlusses einer Leitung, durch Schutzorgane initiiert, beträgt in Netzen der SSPE & NOSPE im allgemeinen Fall weniger als 0,2 Sekunden und stellt auch gleichzeitig den höchsten Kurzschlussstrom dar. Während der einfache Erdschluss in den Netzen der ISPE und RSPE durchaus mehr als 10 Sekunden anstehen kann, liegt der schlimmste anzunehmende Kurzschlussstrom bei doppeltem Erdschluss aufgrund des Kurzschluss zweier Leitungen mit der Erde vor.

Netze der Niederspannung (NS) werden wiederum in drei typische Formen der Erdung unterteilt, wobei hier neben der Erdung des Transformatorensternpunktes niederspannungsseitig, auch die Erdungsart des im Netz befindlichen Körpers ausschlaggebend ist. Sie sind gekennzeichnet nach [11] durch:

Erster Buchstabe:

- ⇒ T direkte Erdung eines Punkt bzw. des Sternpunktes bei Drehstromnetzen
- ⇒ I Isolierung aller spannungsführenden Teile oder Verbindung mit der Erde über Impedanz (ohmsch-induktives Bauelement)

Zweiter Buchstabe:

- ⇒ T Körper ist direkt geerdet
- ⇒ N Körper ist direkt über die Betriebserde verbunden

3.2.3.6.3 Dimensionierung der Erdungsanlage in Abhängigkeit von Kurzschlussstrom und Abschaltzeit

Der im Fehlerfall fließende Strom, darf zu keiner Zeit zu einer im Leiter hervorgerufenen unzulässig hohen Erwärmung führen. Um diese Forderung der [N6] zu erfüllen, muss der Leiter entweder dem Dauerstrom I_d in A oder dem Kurzschlussstrom I_k in A über die Fehlerdauer t_F in s standhalten. Für Erdungsanlagen gilt die folgende Endtemperatur $\vartheta_E = 300^\circ C$, wobei die Umgebungstemperatur ϑ_U ortsspezifisch variieren kann. Mit Hilfe der Tab. 15 und der Bedingung, dass der Fehler nach $t_{F_{max}} = 5s$ abgeschaltet wird, kann der Erdungsleiterquerschnitt A_{EL} in mm^2 mit Formel 29 berechnet werden.

$$A_{EL} = \frac{I}{K} * \sqrt{\frac{t_F}{\ln \frac{(\vartheta_E + \beta)}{(\vartheta_U + \beta)}}}$$

Formel 29

Werkstoff	β in $^\circ C$	Q_C in $\frac{J}{^\circ C * mm^3}$	q_{20} in Ωmm	K in $A * \sqrt{s} / mm^2$
Kupfer	234,5	$3,45 * 10^{-3}$	$17,241 * 10^{-6}$	226
Aluminium	228	$2,5 * 10^{-3}$	$28,264 * 10^{-6}$	148
Stahl	202	$3,8 * 10^{-3}$	$138 * 10^{-6}$	78

Tab. 15: Werkstoffkonstanten nach [N6] und [11]

Bei längeren Abschaltzeiten wie bei Netzen der ISPE oder RSPE muss der Wert aus [N6] entnommen werden. Die einfachen Kurzschlussströme sind bei dieser Behandlung im Allgemeinen kleiner, sodass der Querschnitt über den auftretenden Dauerstrom ermittelt wird. Ferner bedeutet dies aber auch, dass zumindest der normierte Querschnitt der [N3_Tab.7] eingehalten werden muss. Dieser entspricht einem Erdungsseil aus Kupfer von $q_{Cu_{ESmin}} = 50mm^2$.

Dimensionierung des Erdungsleiters nach [12] und [N11]

Aufgrund der Tatsache, dass meist ein Zusammenschluss der Erdungsanlagen des Hoch- und Niederspannungsnetzes auch unter Betracht der Vermeidung einer gefährlichen Erdungsspannung erfolgt, muss die gemeinsame Erdungsanlage bzw. ihre Erdungsleitung der höchsten Einzelanforderung, welches der Erdschluss eines Leiters oder Kabel ist, standhalten.

Für die beiden Fälle des Erdschlusses im HS/MS-Netz aber auch des Erdschlusses im NS-Netz werden in der Folge verschiedene Verfahren vorgestellt, die in den Quellen [12] und [N13] beschrieben bzw. erwähnt werden.

Hierfür verweist [12] auf eine vereinfachte Berechnung für Netze mit ISPE oder RSPE.

Bei Anlagen mit Netzennennspannungen über $U_n > 1000V$ mit einer Netzkurzschlussleistung S_k'' des Hochspannungsnetzes und einer maximalen Fehlerdauer $t_F < 1s$ wird über die Formel 30 und Tab. 16 der zweipolige Erdkurzschlussstrom I_{k2E}'' ermittelt.

$$I_{k2E}'' = \frac{S_k''}{2 * U_n} \quad \text{Formel 30}$$

U_n in kV	$S_{k_{max}}''$ in MVA	$S_{k_{min}}''$ in MVA	$I_{k_{max}}''$ in kA	$I_{k_{min}}''$ in kA
6	400	100	40	10
20	700	170	40	10
20	1000	200	29	6
110	5000	1000	26	5

Tab. 16: Richtwerte für Netzkurzschlussleitungen

Weiterhin verweist [12] auf die vereinfachte Berechnung in TN- und TT-Netzen.

Bei Anlagen mit Netzennennspannungen unter $U_n < 1000V$ mit einer Netzkurzschlussleistung S_k'' des Hochspannungsnetzes und dem Zugrundelegen der Fehlerdauer $t_F = 0,5s$ kann über die Formel 31 und Tab. 17 der einpolige Erdkurzschlussstrom I_{k1E}'' mittels Formel 32 errechnet werden.

$$I_{k1E}'' = \frac{\sqrt{3} * c * U_n}{2 * Z_Q + Z_T} \quad \text{Formel 31}$$

$$Z_Q = 1,1 * \frac{U_n^2}{S_k} \quad Z_T = u_{kr} * \frac{U_n^2}{S_T} \quad \text{Formel 32}$$

S_T = Transformatorenleistung in MVA

u_{kr} = Kurzschlussspannungsfaktor der Transformatoren

Netznominalspannung U_n	Spannungsfaktor c für I_k'' nach [N14]
Niederspannung 230/400 V	1
Mittel und Hochspannungsanlagen 1kV bis 35kV	1,1

Tab. 17: Richtwerte für Spannungsfaktoren in Abhängigkeit von der Netzspannung

Die Querschnittsdimensionierung erfolgt für die Seite der HS/MS aber auch der NS über die Formel 33, die den Parametern der Formel 29 entspricht, wobei die Stromdichte für G in A/mm^2 aus der [N6_AnD] entnommen wird oder wie hier in Abb. 12 dargestellt ist. Die adiabatische Erwärmung ist ihr zugrunde gelegt.

$$A_{EL} = \frac{I_k''}{G}$$

Formel 33

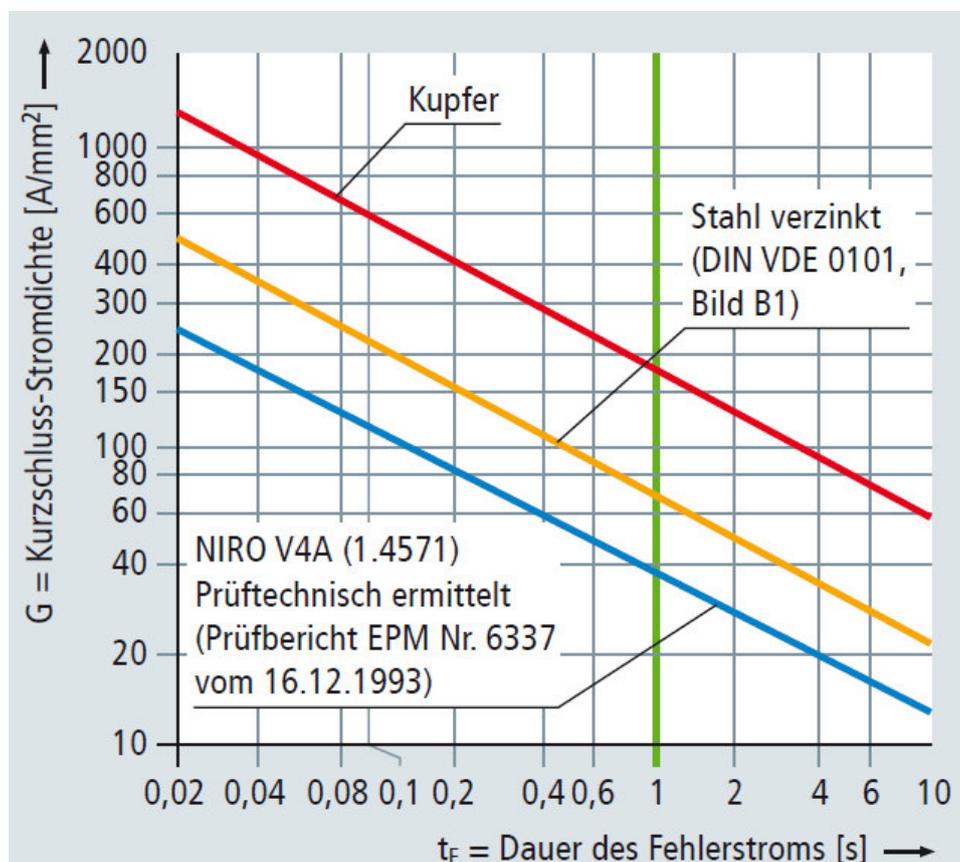


Abb. 12: Strombelastbarkeit von Erderwerkstoffen nach [N6] aus [4]

In [N11] wird auf die [N15] – dem Pendant zur deutschen [N13] – zur Auslegung der Erdungsanlage für den größtmöglichen Kurzschlussstrom verwiesen. Diese berechnet den Querschnitt des Erdungsleiters eines Maschennetzes in ähnlicher Art und wird in Formel 34 gezeigt.

$$A_{EL} = I / \sqrt{TCAP * \frac{0,0001}{t_c * a_r * \varrho_r} * \ln \frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}} \quad \text{Formel 34}$$

- I = Kurzschlussstrom in kA
 $TCAP = Q_c$ = volumetrische Wärmekapazität in $J/(cm^3 * ^\circ C)$ nach [N15] bzw. Tab. 15
 $t_c = t_F$ = Abschaltzeit des Erdschlusses (Fehlerzeit) in s
 $K_0 = \beta$ = Werkstoffkonstante siehe Tab. 15
 $T_m = \vartheta_S$ = Schmelztemperatur in $^\circ C$ siehe Tab. 5
 $T_a = \vartheta_U$ = Umgebungstemperatur in $^\circ C$
 $\varrho_r = \varrho_{20}$ = spezifischer Erdungsleiterwiderstand bei Referenztemperatur z.B. Tab. 15
 $a_r = \frac{1}{\beta + \vartheta_U}$ = thermischer Widerstandkoeffizient in $1/^\circ C$

Im interkontinentalen Normenvergleich zu der in [N6] und [N13] enthaltenen Formel 29 und Formel 35 ist der Unterschied bei großen Strömen immens. Formel 35 wird hierbei für die Dimensionierung des isolierten Potentialausgleichleiters bzw. des Schutzleiters eines Betriebsmittels verwendet und ist Bestandteil der [N13].

$$A_{EL} = \frac{I}{K} * \sqrt{t_F} \quad \text{Formel 35}$$

So zeigt Abb. 13 den Unterschied von der deutschen bzw. europäischen zur amerikanischen Normung.

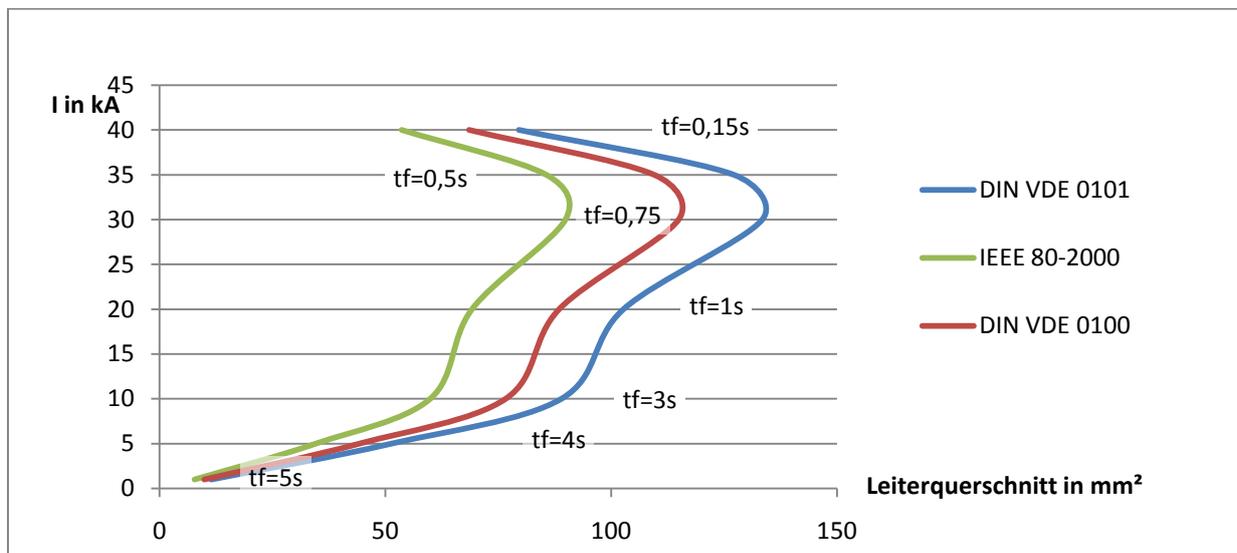


Abb. 13: Leiterquerschnitt in Abhängigkeit von Kurzschlussstrom und Abschaltzeit

Aufgrund der Vermaschung des Erders und seiner nach Kirchhoff beruhenden Stromaufteilung pro Knotenpunkt, kann dieses Abweichen nachvollzogen werden, da zumindest eine Stromaufteilung mit $k_c = 0,5$ angenommen werden kann.

Der Stromaufteilungskoeffizient k_c nach Formel 41 wird in „3.2.4.2 Trennungsabstand“ beschrieben.

3.2.3.6.4 Voraussetzungen zur Vermeidung von gefährlichen Schritt- und Berührungsspannungen

Im Erdschlussfall und beim Ableiten des Blitzstromes muss eine gefahrlose Schritt- und Berührungsspannung durch einen niedrigen Ausbreitungswiderstand mit Hilfe einer vermaschten Stromableitung und Potentialsteuerung gewährleistet sein. Hierfür gibt

Abb. 14 Aufschluss über den Potentialverlauf an Erdern.

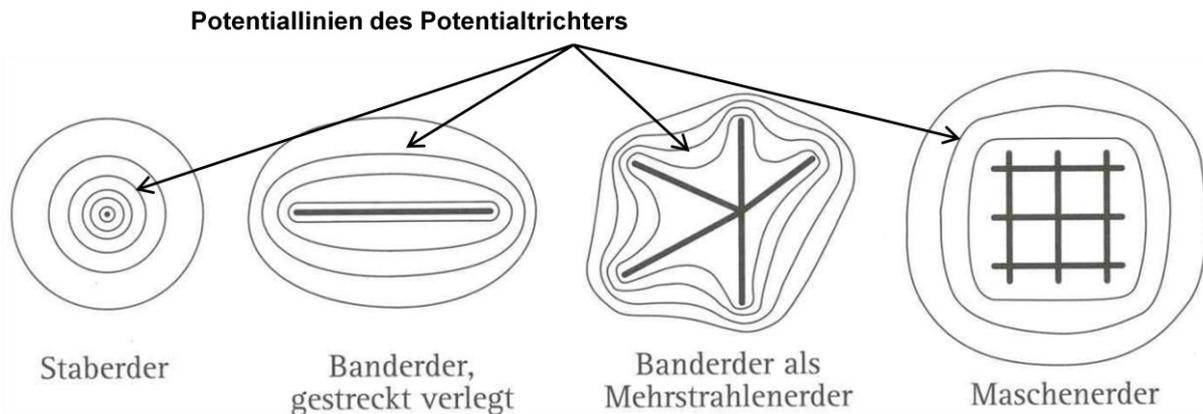


Abb. 14: Potentialverlauf an Erdern [11]

Nach [N3], [N11] und auch [N12] sind Erder des Typs B in Kraftwerksanlagen dem Typ A vorzuziehen. Zu ihnen gehören die geschlossenen Oberflächenerder, welche sich unterteilen in Ring- und Maschenerder, sowie der nach [N13] für jeden Neubau einzusetzende Fundamenterder. Zuzüglich sind aus Gründen der Begrenzung von gefährlichen Erdungsspannungen in Bereichen mit hohem Personenverkehr Steuererder einzubinden.

Aufgrund der Komplexität von Erdungsanlagen und der Kundenforderung kann nur eine allgemeine Aussage zu den Schritt- und Berührungsspannungen getroffen werden, die im Einzelnen durch Software wie z.B. dem Programm *Erdung* oder auch mittels weiterer Analyseschritte der [N6] überprüft werden müssen. Somit sollten ohne Fehlerabschaltung und ohne Verwendung weiterer Maßnahmen -wie der hochohmigen Isolierung der Oberfläche oder zu tragender Schutzausrüstung- bei einer Netzfrequenz von $f_N = 50\text{Hz}$ im NS-Bereich $U_{TpNS} \leq 50\text{V}$, im MS-Bereich $U_{TpMS} \leq 75\text{V}$ oder die zulässige Erdungsspannung U_E , die den Wert $U_E \leq 2 * U_{TpMS}$ bei Messung wiedergibt, eingehalten werden.

In [N11] wird wiederum ein Berechnungsverfahren nach [N15] aufgeführt um durch den Einsatz eines Maschenerders, der die einzelnen Gebäude, Anlagen und Installationen untereinander verbindet, das gesamte Kraftwerksgelände vor gefährlichen Schritt- und Berührungsspannungen zu schützen. Hierbei fällt auf, dass sich die Berechnungsmethoden

der Erdungswiderstände des Maschenerders nach Formel 36 [N15] zur Formel 37 [N6] wie folgt unterschieden:

$$R_G = \varrho_E * \left[\frac{1}{L_c} + \frac{1}{\sqrt{20 * A_0}} * \left(1 + \frac{1}{1 + t_v * \sqrt{20/A_0}} \right) \right] \quad \text{Formel 36}$$

$$R_{A_M} \approx \varrho_E * \left(\frac{1}{2 * 1,13 * \sqrt{A_0}} + \frac{1}{L_c} \right) \quad \text{Formel 37}$$

- $R_G = R_{A_M} =$ Ausbreitungswiderstand in Ω
 $\varrho_E =$ spezifischer Erdbodenwiderstand in Ωm
 $L_c =$ Gesamtlänge des Erdungsleiters in m
 $t_v =$ mittlere Verlegetiefe in m
 $A_0 =$ Fläche der Erdungsanlage in m^2 (Annahme: Kreisfläche)

Analyse

$$R_{A_M} = R_G$$

$$\begin{aligned}
 \varrho_E * \left(\frac{1}{2 * 1,13 * \sqrt{A_0}} + \frac{1}{L_c} \right) &= \varrho_E * \left[\frac{1}{L_c} + \frac{1}{\sqrt{20 * A_0}} * \left(1 + \frac{1}{1 + t_v * \sqrt{20/A_0}} \right) \right] && : \varrho_E \\
 \frac{1}{2 * 1,13 * \sqrt{A_0}} + \frac{1}{L_c} &= \frac{1}{L_c} + \frac{1}{\sqrt{20 * A_0}} * \left(1 + \frac{1}{1 + t_v * \sqrt{20/A_0}} \right) && - L_c \\
 \frac{1}{2,26 * \sqrt{A_0}} &= \frac{1}{\sqrt{20 * A_0}} * \left(1 + \frac{1}{1 + t_v * \sqrt{20/A_0}} \right) && * 2,26\sqrt{A_0} \\
 1 &= \frac{1}{1,98} * \left(1 + \frac{1}{1 + t_v * \sqrt{20/A_0}} \right) && \text{Annahme:} \\
 &&& A_0 = \pi * r^2 \\
 X &= \frac{1}{1,98} * \left(1 + \frac{1}{1 + t_v * \sqrt{20/(\pi * r^2)}} \right) \\
 \lim_{r \rightarrow \infty} X &= \frac{1}{1,98} * \left(1 + \frac{1}{1 + 0} \right) \approx 1
 \end{aligned}$$

Fazit

Die Grenzwertbetrachtung zeigt, dass [N3], [N6] und [N13] im Gegensatz zur [N15] die Auslegung der Erdungsanlage und eine weitere Berechnung der sich einstellenden Schritt- und Berührungsspannung über das Heranziehen des Ausbreitungswiderstandes vollziehen. [N15] berechnet den tatsächlichen Erdungswiderstand, sodass weiterfolgend spezielle Formeln angewendet werden müssen um die eigentliche Berührungs- bzw. Schrittspannung zu errechnen. Diese Berechnungen sind jedoch nicht Bestandteil der Bachelorarbeit.

3.2.3.6.5 Mechanische Festigkeit und Korrosion

Weiterhin ist der in der Erde eingebrachte Erder vor Korrosion zu schützen, sodass er einen langlebigen Schutz gewährleisten kann. Hierbei führt der Einsatz gleichedler Erdermaterialien bzw. Stoffverbindungen, die sich in der chemischen Spannungsreihe nahezu gleichen, zur Minimierung der Korrosion durch die galvanische Elementbildung. Außerdem sind über Schutzmaßnahmen eventuelle Streuströme, die ebenfalls die Korrosion beschleunigen, zu minimieren oder durch direkte Verbindung von Quelle und Senke aufzuheben.

Um die galvanische Elementbildung zu vermeiden, werden vorzugsweise Erdungsleiter aus Kupfer oder NIRO (Tab. 5) im ungeschützten Erdreich verwendet. Hingegen sollte verzinkter Bandstahl nur bei Fundamenterdern eingesetzt werden.

Die mechanische Festigkeit ist unter Beachtung von [N3], [N6] und [N19] gegeben.

3.2.3.6.6 Koordinierung der Blitzschutzerdungsanlage zu weiteren Normen und Richtlinien

Um die Störeinträge durch Potentialdifferenzen zwischen den einzelnen Gebäuden der Kraftwerksanlage zu minimieren ist eine vermaschte Erdungsanlage mit niedriger Impedanz anzustreben. Hierfür sind nach [N11] und [N12] Erdseile $q_{CuES} = 70mm^2$, so lang die Berechnung nach Formel 29 kein anderes Ergebnis liefert und den Mindestanforderung der [N3] entspricht, einzubinden.

Bei Gebäuden sind, wie es [N13] fordert, Fundamenterder nach Vorgabe von [N19] im Beton selbst oder bei isolierender Dämmung unterhalb der Trennschicht einzusetzen. Ihre Maschenweite (MW) variiert je nach Grad des Schutzes der Leittechnik aber auch der Durchschlagmöglichkeit der Trennschicht zwischen 5m und 20m. Bei Trennschichten wie die Perimeterdämmung oder die geschlossene Wanne muss zudem ein Ringerder aus NIRO mit einer MW 10m aus nichtrostendem Material aus Gründen der genannten Funkenbildung zwischen beiden Erdern durchgesetzt werden. Im Fundament darf, wenn der Erder aus Korrosionsgründen allseits dicht von 5cm überdeckendem Beton umschlossen ist, verzinkter Fachbandstahl mit $q_{StFl} \geq 3,5 \times 30mm^2$ eingesetzt werden, der je nach MW geklemmt oder querschnittgleich untereinander verschweißt ist und mit der Bewehrung der Fundamentplatte alle 2m [N19] geklemmt oder verschweißt wird. Der Fundamenterder ist hochkant zu verlegen [N19] und die einfache Verrödelung mit der Bewehrung gilt als nicht ausreichend für die Verwendung als Blitzschutzerder, [N3] und [N12]. Der Fundamenterder und der Ringerder verfügen über nichtrostende Anschlussfahnen, die an allen Gebäudeecken und in Abständen von 10m mit einer Länge von 1,5m aus dem Erdboden herausgeführt werden.

Des Weiteren ist zum Anschluss an die Haupterdungsschiene (HES) eine Fahne des Fundamenterders in das Gebäudeinnere zu führen. Die Nutzung von Erdungsfestpunkten (EFP), an denen die Anschlussfahnen angeschlossen sind, ist zu empfehlen. Darüber hinaus werden EFP eingesetzt um Fundament- und Ringerder miteinander im Erdreich zu verbinden.

Weiterhin werden die Gebäude mit einem Ringerder versehen, der mit einem Abstand von 1m zum Gebäude in Form eines Erdseils verlegt ist und im radialen Verlauf alle zehn Meter bzw. bei kürzeren Gebäudelängen an den Eckpunkten an die herauszuführenden Anschlüsse des Fundamenterders anzuschließen ist. Seine Verlegetiefe $t_v = 0,5 \dots 1m$ im Erdreich sollte frostgeschützt sein und zudem in einem gewachsenen Boden erfolgen.

Zwischen den Gebäuden werden Erdseile als Oberflächenerder gezogen, die die gleiche Verlegetiefe wie der Ringerder aufweisen, und zudem auch für den Schutz erdverlegter Kabel dienen. Die Maschenweite der allgemeinen Kraftwerkserdungsanlage sollte nicht nur aus Gründen niedriger Impedanz sondern auch aus Gründen der elektromagnetischen Verträglichkeit $w_M \leq 20 \times 20m$ im Umreis des Gebäudes von 30m nicht überschreiten [N3] und [N12]. Die Erdseile sind an den entsprechenden Knotenpunkten der Anschlussstellen mit dem Ring- bzw. Fundamenterder über Klemmenverbindung elektrisch leitfähig zu verbinden.

Weiterhin ist in [N11] und [N12] zu lesen, dass Bandbrückenstützen ebenfalls durch Fundamenterder nach [N19] in Form eines Ringerders mit einer Mindestlänge von 2,5m nach [N3B1_Bild.127] nach obiger Erläuterung zu erden sind. Wobei die aus dem Fundament herausragende Anschlussfahne an die metallene Bandstütze anzuschlagen ist. Die Verbindung zu weiteren Stützen erfolgt zweckmäßig und im Sinne der Vermaschung geradlinig.

Gleisanlagen und Kranbahnen sind aufgrund ihres großen Leiterquerschnitts und der raumgreifenden potentiellen Spannungsverschleppung in die kraftwerksinterne Erdungsanlage mit einzubeziehen. Hierfür werden sie alle 20m mit einem Erdungseil an das Erdungsmaschennetz der Kraftwerksanlage angeschlossen, solange der Betreiber oder die [N6] es nicht verbietet.

In An11_Abb. 1 wird die Kraftwerkserdungsanlage gezeigt.

3.2.3.6.7 Globales Erdungssystem

In vielen Fällen in denen sich die Trennung von Erdungsanlagen der HS/MS von denen der NS durch $d_{accept} \leq 20m$ [N6] nicht vereinbaren lässt, wie es in Gebieten mit dichter Bebauung durch eine Vielzahl unterschiedlicher Erder bzw. Erdungsanlagen der Fall ist, wird empfohlen die Erdungsanlagen zusammenzuschließen [N6]. Aufgrund dieser Tatsache und der Erkenntnis, dass, wie im Punkt 3.2.3.6.6 beschriebene großflächige Erdungsnetzwerk, eine sehr nahe Anbindung der FAM-Bandbrücken und der stationären Fördergeräte an das Kraftwerk besteht, sollte ein Zusammenschluss zum globalen Erdungssystem in Betracht gezogen werden. Hierbei gelten folgende Bedingungen der Formel 38 und Formel 39, wobei die Erdungsspannung U_E dem doppelten Wert der Berührungsspannung U_{Tp} bzw. höchstzulässigen Fehlerspannung U_f in Abb. 15 entspricht.

Nach [N6] und [11]

$$R_A = \frac{U_E}{I_k} = \frac{2 * U_{Tp}}{I_k} \leq \frac{75V}{I_C} \quad \text{Formel 38}$$

$$R_A = \frac{U_E}{I_k} = \frac{2 * U_{Tp}}{I_k} \leq \frac{75V}{I_{Rest}} \quad \text{Formel 39}$$

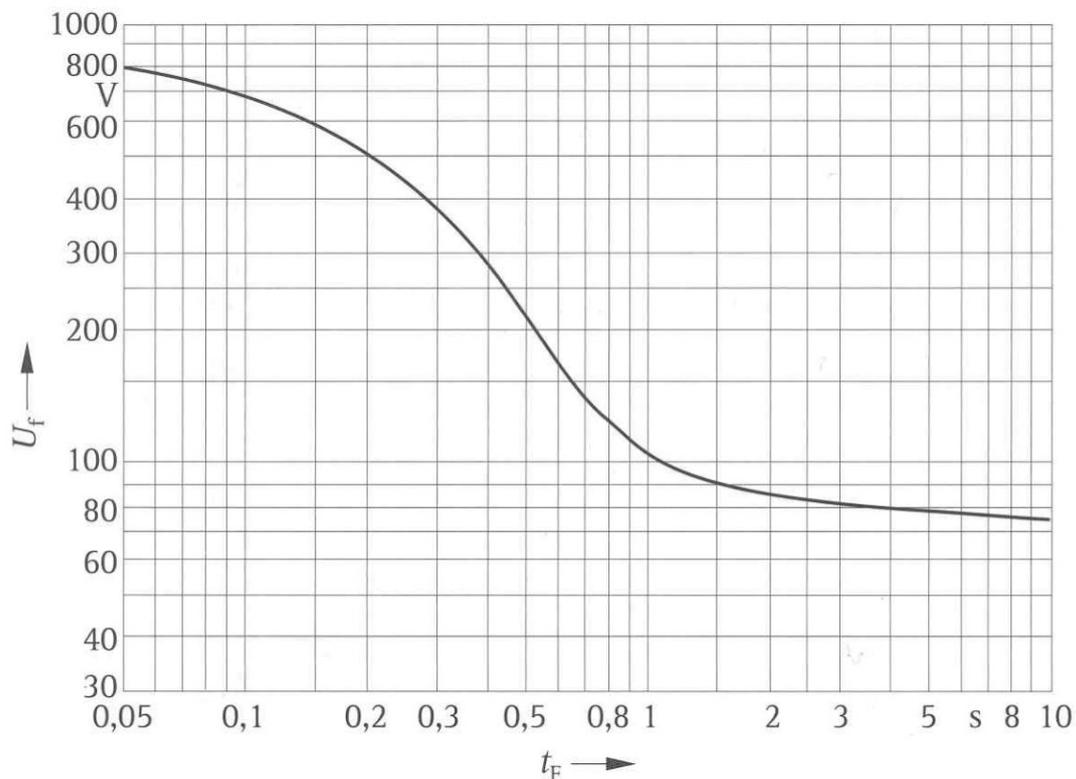


Abb. 15: Höchste zulässige Berührungsspannung U_{Tp} für begrenzte Stromflussdauer nach [N6] aus [11]

3.2.3.7 Minimierung der Erdungsspannung

3.2.3.7.1 Ortsveränderliche Geräte

Durch die Nutzung weiterer Erder kann der Ausbreitungswiderstand und dadurch auch die Erdungsspannung weiter herabgesenkt werden. Somit ist im Bereich der mobilen Geräte die funktionale Verbindung des Aufnahmebandes mit dem Bandschleifenwagen, zu sehen in An2_Abb. 5, mittels Erdungsseil $q_{Cu} = 50mm^2$ zu erweitern. Hierdurch vergrößert sich die Erdungsanlage des Absetzers und verkleinert den Ausbreitungswiderstand, da der Bandschleifenwagen über die an den Schienen niederohmig montierten Schwellen mit dem Erdreich verbunden ist. Darüber hinaus wird durch diese Maßnahme auch ein FPA zwischen zwei aktiven Geräten hergestellt.

Weitere Elemente, die die Berührungs- und Schrittspannung senken, sind wie die Potentialsteuerung oder das Beschichten der Erdoberfläche mit einem Material, das einen spezifischen Übergangswiderstand von $R_{Ü} \geq 100k\Omega$ besitzt, wie es eine 5cm-dicke Asphaltsschicht oder eine 15cm-dicke Schicht aus Kies [N3] aufweisen, im Bezug zum mobilen auf Raupen fahrenden Absetzer nicht denkbar.

Hierdurch kommt es, wie es im Punkt 3.2.3.5.3 beschrieben und in An9_Abb. 1 demonstriert ist, zu einer hohen Schritt- und einer tödlichen Berührungsspannung, welche unbedingt durch den Einsatz einer Sonde am Aufstieg begrenzt werden muss. Diese Sonde kann im einfachsten Fall aus einer den Erdboden berührenden Kugel und einem Erdseil bestehen, welches elektrisch leitfähig mit dem Aufstieg über ASE verbunden wird. Darüber hinaus muss mit einem Warnschild und einer Arbeitsschutzbelehrung auf die resultierende Gefahr bei Nahgewitter hingewiesen werden, sodass, wie im Punkt „3.2.3.3.2 Gefahr für Menschen“ geschildert ist, das Aufsuchen von Schutzbereichen oberste Priorität bei Gewitter hat.

3.2.3.7.2 Ortsfeste Geräte und Anlagen

Bei einem ortsfesten Gerät oder einer Anlage wird eine weitere Minimierung der Erdungsspannung erreicht, wenn die Erdungsanlage mit benachbarten Erdungsanlagen oder natürlichen Erdern im Umkreis $d_{accept} \leq 20m$ über Erdungsleitungen, die im Erdboden verlegt sind, zusammengeschlossen werden. Dieser Abstand beruht auf der allgemeinen Annahme, dass erst ab diesem Punkt die Bezugs Erde erreicht ist. Dies kann seitens der Inhaber oder aufgrund der [N6_Kap.9.4] untersagt sein. Dennoch ist die Maßnahme: „Globales Erdungssystem“ ein zu bevorzugendes Verfahren, da hierdurch weitere Maßnahmen zur Senkung der Berührungsspannung entfallen [N6_Kap.9.2].

So kann z.B. nach [N3B2_Kap.12] ein ortsfestes Schienensystem an benachbarte Erdungsanlagen, wie im Punkt 3.2.3.4.3 „Gleisanlagen“ erläutert, vorzugsweise mit den ASE des Flachbandstahls angeschlossen werden.

In den zu bevorzugenden Maschenweiten $m_W = 20m \times 20m$ [N3] einer Kraftwerkserdungsanlage gelten Schritt- und Berührungsspannung als eingehalten, wenn eine schnelle Fehlerabschaltung erfolgt [N6_K9.2]. Im Übergang vom Gebiet mit in das ohne Erdungsanlage besteht dennoch die Gefahr gefährlicher Erdungsspannungen. Hierfür empfehlen die [N3] und [N6], wie in Punkt 3.2.3.7.1 erwähnt, die Bodenisolation oder auch die Potentialsteuerung. Die Potentialsteuerung erfolgt über maximal vier Steuererder in Form von Ringen. Sie werden in einem Bereich mit Personenverkehr eingesetzt und sind in einem Abstand von jeweils 3m seitlich versetzt und 0,5m tiefer zueinander in der Erde vom ersten Ringerder verlegt. Diese Anordnung gilt im Bereich der Energieversorgung als erdungsspannungssenkend.

Jedoch ist bei Blitzeinschlag, so [13], diese Anordnung, die im Simulationsmodell den Fundamenterder eines Gebäudes mit dem Abmaß $2 \dots 10m \times 2 \dots 50m$ erweitert, aufgrund der Oberflächennähe der ersten Steuererder bei kleinen Gebäudekantenlängen lebensbedrohlich. In diesem Fall sollte eine Standortisolation aus Kosten- und Umweltgründen vorzugsweise mit einer 15cm-dicken Kiesschicht anstelle einer 5cm-dicken Asphaltsschicht durchgeführt oder die maximale Anzahl der Steuererder eingesetzt werden. Hierbei erzielt eine tiefere Verlegung der Potentialsteuerung, als die in [N3] und [N6] beschriebene, im Allgemeinen bessere Ergebnisse. Da letzteres sehr aufwendig ist, eignet sich hier vielmehr der Einsatz von Tiefenerdern mit einem Beginn auf Höhe der Unterkante des Fundamentes. Dieser kann durch schräge Anordnung eine weitere Senkung herbeiführen. In An12 ist hierzu ein Auszug aus [13] zu sehen.

Daraus folgend sind alleinstehende Gebäude oder auch Anlageteile, die nicht Teil eines großflächigen Maschenerdes sind und nur kleine Gebäudeabmessungen aufweisen, siehe An12, durch Steuererder in Form von auf der Fundamentsohle beginnenden schräg in den Untergrund verlaufenden Tiefenerdern oder einer Bodenisolation auszurüsten. Hierbei müssen der Aufwand und die dadurch entstehenden Kosten abgewogen und mit dem Betreiber abgestimmt werden.

3.2.4 Innerer Blitzschutz

3.2.4.1 Blitzschutzpotentialausgleich

Die Vermeidung unkontrollierter Überschläge des durch den Blitzeinschlag hervorgerufenen Spannungsfalls am Erdungswiderstand zwischen den elektrischen und metallenen Installationen, die in das Gebäude geführt werden, und der Erdungsanlage sowie den magnetisch-induzierten Überspannungen, die beim Ableiten des Blitzstromes zwischen dem äußeren LPS und leitenden Gebäudeteilen und Installationen sowie Einrichtungen der Energie- und Informationstechnik durch Näherungen entstehen, ist Aufgabe des inneren Blitzschutzes.

Der Blitzschutzpotentialausgleich (BPA) reduziert den durch den Blitzstrom verursachten Potentialunterschied zwischen der Erdungsanlage, den metallenen und elektrischen Installationen im Einfuhrbereich der baulichen Anlage. Hierfür werden nach [N3] neben den in der Tab. 18 aufgeführten Mindestmaßen für Potentialausgleichsleiter (PAL), Überspannungsschutzgeräte (SPD- Surge Protection Device) oder Trennfunkensrecken eingesetzt. Hierbei steht der Schutz vor gefährlichen Berührungsspannungen neben der Vermeidung eines Isolationsdurchschlags der Energieversorgungs- und Datenleitungen im Vordergrund. Außerdem führt der Nah- und Ferneinschlag eines Blitzes, wie in Kap. „2.2 Der Blitz“ und in Abb. 4 beschrieben, zu gefährlichen Blitzströmen und Überspannungen in den eingeführten Versorgungsleitungen. Deshalb kann nur die konsequente Durchführung des BPA auch beim Nichtvorhandensein und nach Risikomanagement nicht notwendigem äußerem LPS vor den Ausfall der inneren Systeme schützen.

Schutzklasse des LPS	Werkstoff	Querschnitt in mm^2	
		grob ¹	fein ²
I bis IV	Kupfer	16	6
	Aluminium	25	10
	Stahl	50	16

Mindestmaße von Leitern für die Verbindung von

1: verschiedenen Erdungsschienen miteinander oder der Erdungsanlage

2: inneren metallenen Installationen mit der Erdungsschiene

Tab. 18: Mindestmaße für Potentialausgleichsleiter für BPA

Beim Vergleich des BPA mit den Vorgaben zum Schutzpotentialausgleich nach [N13] stellt sich aufgrund der höheren Strombelastung des BPA-Leiters gegenüber dem Schutzpotentialausgleichsleiter des Fehlerstroms lediglich die Verwendung eines höheren Mindestquerschnitts heraus. Hierbei muss in Kraftwerksanlagen dennoch auf den erhöhten

Fehlerstrom I und seiner adiabatischen Leitererwärmung während der Fehlerdauer t_F verwiesen werden, der die Querschnittdimensionierung unter Verwendung der Tab. 15 mit der Formel 35 bestimmt.

Die Verbindung muss auf Höhe des Erdniveaus aber auch im Untergeschoss nach Tab. 18 bzw. Formel 35 oder entsprechenden Schutzorganen zwischen der Haupterdungsschiene (HES) -früher: Potentialausgleichsschiene- und den nun aufgeführten leitfähigen Systemen im Eintrittsbereich in die bauliche Anlage erfolgen.

An die HES sind beziehungsweise auf die Produktpalette der FAM nach [3] unmittelbar anzuschließen:

- ⇒ Leiter für den Hauptpotentialausgleich nach [N13]
- ⇒ Förderbrücken und Krane
- ⇒ Fundamenterder und Blitzschutzender
- ⇒ Metallene Wasserverbrauchsleitung und Abwasserleitungen
- ⇒ Zentrale Heizungs-, Lüftungs- und Entstaubungsanlage
- ⇒ Gasinnenleitung
- ⇒ Kabelkanäle und –Schirme sowie Leitungsschirme und Schirmrohre
- ⇒ Erdungsleitung für Antennen nach VDE 0855 Teil 1
- ⇒ Erdungsleitung für Fernmeldeanlagen nach VDE 0800 Teil 2
- ⇒ Metallmäntel von Starkstromkabeln bis 1000V
- ⇒ Schutzleiter der Elektroanlage nach [N13]
- ⇒ Erdungsanlagen von Starkstromanlagen über 1kV nach [N6], wenn keine unzulässig hohe Erdungsspannung verschleppt werden kann

Nur über Trennfunkstrecken dürfen verbunden werden:

- ⇒ Erdungsanlagen von Starkstromanlagen über 1kV nach [N6], wenn unzulässig hohe Erdungsspannungen verschleppt werden können
- ⇒ Bahnerde bei Wechselstrom- und Gleichstrombahnen nach VDE 0115, wobei bei Gleisen der Deutschen Bahn eine schriftliche Genehmigung vorliegen muss
- ⇒ Anlagen mit kathodischem Korrosionsschutz und Streustrom-Schutzmaßnahmen nach VDE 0150

Nur über Überspannungsschutzgeräte dürfen verbunden werden:

- ⇒ unter Spannung stehende Leiter von Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1kV
- ⇒ der Neutralleiter in TT-Systemen
- ⇒ alle aktiven Leiter von Fernmeldeanlagen

Darüber hinaus sind nach [N3_Kap.6.2] alle an die zu schützende bauliche Anlage angeschlossenen Leiter jeder Leitung direkt oder über SPD mit der Erdungsschiene zu verbinden. Wobei alle spannungsführenden Leiter grundsätzlich mit SPD angeschlossen werden.

Außerdem werden sämtliche metallenen Installationen im Innern der baulichen Anlage, wie Führungsschienen von Aufzügen, Treppen, Schirme und Kanäle, Sprinkleranlagen, Krangerüste, Wasser- und Gasleitungen, Lüftungs- und Klimakanäle und weitere über Potentialausgleichsleiter(PAL) angeschlossen.

Während bei ortsveränderlichen Geräten der FAM wie dem Verbund aus Absetzer und Bandschleifenwagen diese Maßnahmen aufgrund des nahezu autarken Systems, das lediglich über die Versorgungsleitungen und seinen Erdungsanlagen, beide zu sehen in Abb. 8 und An2_Abb. 3, mit der Umgebung verbunden ist, kann bei Großanlagen wie den Kraftwerksprojekten, wie es aus An10_Abb. 6 und An11_Abb. 1 zu entnehmen ist, nicht auf die durchgehenden Metallkonstruktion oder dem festen Eintrittsort aller Leitungen oder metallener Installationen in das E-Haus oder der Fahrerkabine, die sofort beschaltet werden können, verwiesen werden. Ferner sind hier durch die Vorgaben der Inhaber oder Betreiber weitergehende Maßnahmen und Vorschriften, die über die Blitzschutznorm hinausgehen, zu betrachten. Sie werden in den Punkten „3.2.5 Schutz gegen die elektromagnetischen Impulse des Blitzes“ und „3.2.6 Koordinierung des Potentialausgleichs in Kraftwerken“ verglichen und angepasst.

3.2.4.2 Trennungsabstand

Der Turm der Kraftwerksanlage, nach den Abbildungen von An10, ist nicht nur durch den Energiegehalt des Blitzes einer Beschädigung, sondern auch durch das Auftreten gefährlicher Näherungen zwischen Ableitung und den metallenen Installationen, die zur elektrischen Funkenbildung führen, ausgesetzt.

Der Aufbau eines Blitzschutzsystems nach dem Maschenverfahren auf dem Dach nach Tab. 9 bietet einen Schutz, der durch das Setzen von Fangstangen und Seilen um die Entstaubung herum, diese selbst mit einschließt.

Der Trennungsabstand s in m, welcher zwischen der FE und AE zur Entstaubung eingehalten werden muss, kann durch die Feststellung der Länge l_s in m des kürzesten Strompfades vom Einschlagpunkt zur nächsten Potentialausgleichebene, dem Stromaufteilungskoeffizienten k_c und unter Berücksichtigung des Induktionsfaktors k_i sowie des zwischen der Näherung befindlichen Materials über den Faktor k_m nach Formel 40 ermittelt werden.

$$s = k_i * \frac{k_c}{k_m} * l_s \quad \text{Formel 40}$$

Um nun den Trennungsabstand zu berechnen stehen dem Blitzschutzplaner nach [N3] verschiedene Modelle zur Verfügung. Diese nehmen Bezug auf den Stromaufteilungskoeffizienten k_c . Sie gliedern sich in den vereinfachten Ansatz und den detaillierten Ansatz und gehen von einem Erdertyp B aus, [N3].

Mit dem vereinfachten Ansatz nach [N3] und [4] kann eine Schätzung aus den Koeffizienten der Tab. 19 und Formel 40 vorgenommen werden. Sie ist, wie später bewiesen wird, meist unzureichend genau.

Induktionsfaktor nach BSK	k_i	Material	k_m	Anzahl N_A	k_c
<i>I</i>	0,08	Luft	1	1 Ableitung	1
<i>II</i>	0,06	Beton	0,5	2 Ableitungen	0,66
<i>III</i>	0,04	Klinker	0,5	3 und mehr Ableitungen	0,44

Tab. 19: Koeffizienten des Trennungsabstandes

Der detaillierte Ansatz unterscheidet sich in der Betrachtung des Koeffizienten der Stromaufteilung k_c . Hierbei wird angenommen, dass sich der Blitzstrom beim Ableiten an jedem Knotenpunkt der sich kreuzenden FE oder AE anteilig auf die aus dem Knotenpunkt herausführenden Ableitwege aufteilt, sodass nach Kirchhoff der in den Knotenpunkt einfließende Strom, gleich der Summe der aus dem Knotenpunkt herausfließende Ströme ist. Aus dieser Annahme heraus lässt sich pro Knoten der Faktor k_c über die Anzahl der Ableitungen mit Formel 41 ermitteln.

$$k_{c_i} = 1/N_A \quad \text{Formel 41}$$

Nun wird der Trennungsabstand wie in Verwendung der Formel 40 über jede Teillänge l_{s_j} in m mit dem Materialkoeffizient k_m und dem Induktionsfaktor k_i , wie es Formel 42 wiedergibt, berechnet.

$$s = \frac{k_i(k_{c_1} * l_1 + k_{c_2} * l_2 + \dots k_{c_n} * l_n)}{k_m} \quad \text{Formel 42}$$

Des Weiteren lässt sich der Materialkoeffizient k_m bei einer aus verschiedenen Materialien bestehenden Häuserwand genauer betrachten. Jedoch empfiehlt [4] die übergreifende Verwendung des schlechtesten Wertes im Bereich der Näherung.

In der folgenden Berechnung werden zum einen der Trennungsabstand unter der Annahme eines Blitzes in die Fangstange neben der Entstaubung und zum anderen in die Attika, beide zu sehen in An10_Abb. 5 und An10_Abb. 6, erörtert. Die Attika bildet hierbei die erste Ringleitung.

Annahme:	<i>BSK III</i>	k_i	$k_{m_{Luft}}$	$k_{m_{Fest}}$	k_{c_e}	k_{c_d}	
		0,04	1	0,5	0,44	0,33	
Leitungslängen		Position					
l_{ES} in m	77,25	Entstaubung					
l_{Kran} in m	51,9	Kran					
Berechnung: Vereinfacht		Formel:			Lösung:		
Entstaubung		$s_{ES} = k_i * \frac{k_{c_e}}{k_{m_{Luft}}} * l_{ES}$			$s_{ES} = 1,36m$		
Kran		$s_{Kran} = k_i * \frac{k_{c_e}}{k_{m_{Fest}}} * l_{Kran}$			$s_{Kran} = 1,82m$		
Berechnung: Detailliert					Anzahl Ringleitung: N_{Ring}		
Unterteilung der Leitungslängen					1	2	3
Entstaubung:	$l_{ES1} = 13,25m$	$l_{ES2} = 10m$	$l_{ES3} = 54m$	l_{ES3}	$\frac{l_{ES3}}{2}$	$\frac{l_{ES3}}{3}$	
Kran:	$l_{Kran} = 51,9m$			l_{Kran}	$\frac{l_{Kran}}{2}$	$\frac{l_{Kran}}{3}$	
Formel Entstaubung:					Lösung:		
		$s_{ES_j} = \frac{k_i}{k_{m_{Luft}}} * \left(l_{ES1} + l_{ES2} * k_{c_d} + \sum_{j=1}^{N_{Ring}} l_{ES_j} * k_{c_d}^{j+1} \right)$			0,9m	0,82m	0,78m
Formel Kran:					Lösung:		
		$s_{Kran} = \frac{k_i}{k_{m_{Fest}}} * \sum_{j=1}^{N_{Ring}} l_{Kran_j} * k_{c_d}^j$			1,37m	0,9m	0,76m

Im Vergleich der beiden Verfahren untereinander wird die enorme Abweichung zwischen dem vereinfachten und dem detaillierten Ansatz deutlich. Wobei der detaillierte Ansatz klar den Nutzen einer zusätzlichen Ringleitung herausstellt.

Ein Verzicht auf die Ringleitung oder eine ungenügende Planung im Vorfeld bedeuten, wie es der vereinfachte Berechnungsansatz wiedergibt, dass ein Trennungsabstand von $s = 1,36m$ zum Schornstein der Entstaubung eingehalten werden muss. Dies hat zur Folge, dass die Fangstangen, die sich um der Entstaubung befinden, nach Formel 18 vergrößert werden müssen, wobei dies zusätzlich ihre Abspannung erschwert. Weiterhin zeigt An10_Abb. 8, dass der Trennungsabstand zu einzelnen Komponenten der Entstaubung nicht eingehalten werden kann, da sie wegen der linkseitigen attikanahen Positionierung den

Trennungsabstand nicht einhalten würden. Darüber hinaus ist ein Verschieben der Entstaubung (An10_Abb. 8 und An10_Abb. 9) aus konstruktionstechnischer Sicht nicht möglich. Um die Problematik auch im Bezug auf den Kran (An10_Abb. 2) und den zu den Geräten führenden Versorgungsleitungen zu demonstrieren zeigt Abb. 16 einen Vergleich zwischen den Trennungsabständen der einfachen Ableitungsmethodik und der Verwendung der Stahlbewehrung. Aus ihm und An10 ist ersichtlich, dass nicht nur die Gesamtlänge l_s , sondern auch die Bausubstanz des Turms eine elektrische Funkenbildung auch beim Vermaschen der Ableitungen durch Ringleitungen bei Nichtnutzung der Stahlbewehrung befürworten. Dies kann zu Ausfällen des Krans und auch der Entstaubung führen. Wobei letzterer dramatische Auswirkungen auf die Anreicherung von einer explosionsfähigen Staubkonzentration hätte.

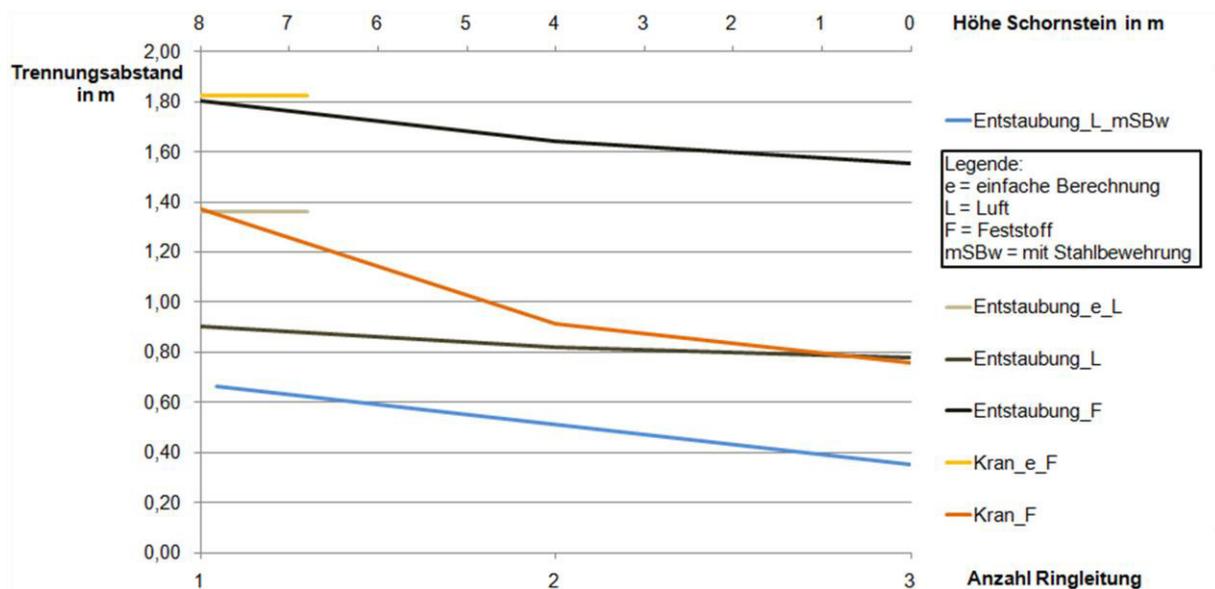


Abb. 16: Vergleich des Trennungsabstandes mit und ohne Nutzung der Stahlbewehrung

Die Verwendung der Stahlbewehrung im Beton des Turms, zu sehen in An10_Abb. 11, ist nicht nur aus Sicht des Trennungsabstandes vorzuziehen, sondern auch ein zu bevorzugendes Verfahren um den Bedingungen hinsichtlich [N4] zu entsprechen. Des Weiteren können auch alle weiteren gefährlichen Näherungen beim Ableiten des Blitzstromes zwischen AE und den metallenen Installation vermieden werden, sodass er wie der Absetzer der Forderung nach [N3_Kap.6.3] gerecht wird.

Außerdem geben die Berechnung und Abb. 16 einen Aufschluss über die untere Grenze des Trennungsabstandes zur Entstaubung. Hierbei ist allein die Länge der Induktionsschleife $l_{ES1_{min}} = 7,825m$, zu sehen in An10_Abb. 3 zwischen der FE und dem Schornstein der Entstaubung und vergleichend An10_Abb. 9, ausschlaggebend.

3.2.5 Schutz gegen die elektromagnetischen Impulse des Blitzes

3.2.5.1 Blitzschutzzonen

Elektrische und elektronische Systeme sind aufgrund eines elektromagnetischen Impulses (EMP) den galvanischen, induktiven oder auch kapazitiven Folgen durch Kopplung leitungsgeführter Stoßwellen oder der Strahlung ausgesetzt. Hierbei sind die Auswirkungen des elektromagnetischen Impulses des Blitzes (LEMP) gegenüber denen des SEMP (Switching-EMP), der hervorgerufen wird durch Schaltheftungen, und des NEMP (Nuclear-EMP), welcher aus einer nuklearen Explosion herrührt, weitaus größer. Die Abb. 4 aber auch die An2_Abb. 3 und An10_Abb. 6 zeigen, wie in Kap.2 beschrieben, die Allgegenwärtigkeit des LEMP bei jeder Form des Blitzeinschlages.

Für die bedeutenden LEMP-Effekte gibt [3] und [N4] einen Frequenzbereich von einigen 100Hz ... MHz an. In ihnen gelten die in Tab. 2 und Tab. 3 aufgelisteten Werte des Gefährdungspegels I für den ersten positiven und negativen Stoßstrom sowie dem nachfolgenden negativen Stoßstrom.

Mit ihnen und der Formel 14 soll durch Formel 43 die Überspannung und Formel 44 der Kurzschlussstrom beim Naheinschlag in die schützende FE der Hindernisbefeuung auf dem Dach des Turms, zu sehen in An10_Abb. 5 und An10_Abb. 6, bei der Annahme einer Installationsschleife zwischen Energie- und Datenleitung dargestellt werden.

Annahme:	\hat{I} in kA	$\Delta t = T_1$ in μs	Bezeichnung
$\hat{I}_{f(+)}$	200	10	positiver Erststromstoß
$\hat{I}_{f(-)}$	100	1	negativer Erststromstoß
$\hat{I}_{s(-)}$	50	0,25	negativer Folgestromstoß
$A_{Schleife}$ in m^2	1		quadratische Installationsschleife
s_a in m	1		Abstand FE zur Hindernisbefeuung
μ in Vs/Am	$4\pi * 10^{-7}$		Permeabilität
r_{Leiter} in mm	0,69	$q_{Cu} = 1,5mm^2$	Leiterradius Energie- und Datenleitung
L_{ind} in Vs/A	$4,9 * 10^{-6}$		Eigeninduktivität der Schleife

Berechnung:	Formel:	Lösung:		
Höchstwert für:		$\hat{I}_{f(+)}$	$\hat{I}_{f(-)}$	$\hat{I}_{s(-)}$
Magnetfeld	$H_{0,max} = \frac{\hat{I}_i}{2 * \pi * s_a}$	31,8 kA/m	15,9 kA/m	7,9 kA/m
Überspannung	$U = \mu * A_{Schleife} * \frac{H_{0,max}}{T_1}$ Formel 43	4 kV	20 kV	40 kV
Kurzschlussstrom	$I = \mu * A_{Schleife} * \frac{H_{0,max}}{L_{ind}}$ Formel 44	7,7 kA	3,8 kA	1,9 kA

3.2.5.2.2 Potentialausgleich

Wie der BPA erfolgt auch der PA von Energieversorgungs- und Datenleitungen sowie den eingeführten metallenen Installationen an der Zonengrenze innerhalb der höheren LPZ. Hierdurch wird erreicht, dass die vom Blitz induzierten Stoßströme und -spannungen gedämpft und dadurch elektrische und elektronische Betriebsmittel je nach Grad ihrer Empfindlichkeit geschützt werden.

Ein Potentialausgleichnetzwerk in Form einer Maschen- oder Sternanordnung ist nach [N4] anzustreben. Ersteres gilt hierbei in großflächigen Zonen bzw. Ebenen als Optimum und erfüllt durch die Vernetzung aller metallenen Installationen mit einer MW $w_M = 5m$ und der Anbindung an den Erdsammelleiter die Aufgabe des PA aber auch der Schirmung der elektrischen und elektronischen Betriebsmittel. Jedoch ist aufgrund der Bildung von Installationsschleifen eine Sternanordnung gerade in kleinen Bereichen mit sensibler Leittechnik vorzuziehen. Hier ist darauf zu achten, dass der PAL und die VL eines Betriebsmittels oder Schaltschranks parallel und nahe zueinander verlegt werden. Da der Eintritt der Leitungen hier nur an einer einzigen Stelle erfolgen darf, wird an dieser Stelle ein Erdbezugspunkt in Form einer PAS gesetzt.

3.2.5.2.3 Überspannungsschutz

Der Einsatz von SPD erfolgt zweckmäßig gestaffelt. So sind im Übergang von $LPZ 0_A$ zu $LPZ 1$ Blitzstromableiter -SPD-Typ I- maßgebend und Bestandteil des BPA [N3]. Diese Funkenstrecken wirken wie ein Schalter, der beim Anliegen eines Blitzstoßstroms mit der Wellenform $100kA 10/350\mu s$ schließt. Durch diesen niederimpedanten Kanal wird primär bei Einschlag in das äußere LPS Potentialgleichheit durch Stromaufteilung zwischen den angeschlossenen aktiven Adern und die elektrisch leitfähigen Installationen über die HES gewährleistet. Sekundär sind bei Blitzeinschlag in die oder neben die Versorgungsleitung aber auch durch Wolke-Wolke-Blitze induzierte Blitzströme respektive Überspannungen zu erwarten, die zur Erde hin durch das SPD-Typ I abgeleitet werden müssen. Aufgrund des „Wellenbrechers“ [4] sind beim weiteren Durchschreiten der Zonen $LPZ 0_B$ zu $LPZ 1$ zu $LPZ 2$ nur noch verminderte Stoßströme der Wellenform $20kA 8/20\mu s$ zu erwarten so [N4]. Unterverteilungen und auch Senken werden mittels Metalloxidvaristoren und Suppressordioden die in SPD vom Typ II und Typ III eingesetzt werden, geschützt.

[N11] und [N12] verlangen den Einsatz von SPD bei Beschaltung aktiver in die $LPZ 1$ und höher eingeführten Leitungen. Jedoch verweist [N11] zusätzlich darauf diesen durch geeignete Leitungsführung und Schirmung zu begrenzen.

Im Hinblick auf die ortsveränderlichen Geräte der FAM, wie in „3.2.4.1 Blitzschutzpotentialausgleich“ erwähnt, eignen sich durch die Konzentration der von außen eingeführten Leitungen in einem Bereich und der mangelnden Koordinierungsmöglichkeit der SPD-Typen zueinander SPD vom Typ I und Typ II in einer Einheit. Diese Kombiableiter werden wie die einfachen Blitzstromableiter direkt nach der Netzsicherung aber vor weiteren Sicherungselementen wie Lasttrennschalter oder Fehlerstromschutzschalter der Energieversorgung auf den je nach Netzform aktiven Leitern geschaltet. Hierbei ist unbedingt darauf zu achten, dass weder eine parallele Verlegung zu nachfolgenden Leitungen noch eine Gesamtlänge von $l_{SPD_{ges}} \leq 0,5m$ der ableitenden Erdungsleitung bis zur HES im Schaltschrank überschritten wird. Beim Unterlassen dieser Maßnahmen, wie in „2.2 Der Blitz“ aufgeführt und in Abb. 4 zu sehen, werden durch die Stromsteilheit des Blitzes und der Induktivität des Leiters wiederum Überspannungen in benachbarte Leitungen induziert. Die im praktischen Gebrauch verwendete 1kV/m-Regel [N4] zeigt klar, wie sehr die Leitungslänge begrenzt werden muss, damit nicht nur die Induktion in die benachbarten Installationsschleifen sondern auch das SPD nicht überlastet wird.

Aufgrund dieser Tatsache verlangen [N11] und [N12] den Einbau eines metallenen Blitzschutzkastens, der direkt mit der Gebäudebewehrung zu verbinden ist, im unmittelbaren Eintrittsbereich der Leitungen in das Kraftwerksgebäude, wenn die aufnehmende Schaltanlage diese Bedingung nicht erfüllt. Dies trifft auch bei Geräten der Informations- und Leittechnik zu, die im Außenbereich der Anlage bzw. im Bereich der $LPZ 0_{A/B}$ aufgestellt und deren Leitungen in das Gebäude und somit in die $LPZ 1$ und/oder $LPZ 2$ geführt sind.

Weiterhin sind Betriebsmittel wie die Scheinwerfer in An2_Abb. 4, die Hindernisbefeuerung auf dem Dach des Turms An10_Abb. 6 oder vergleichsweise im exponierten Freibereich platzierte Anemometer zumindest dem vollen EMP oder dem ganzen oder anteiligen Blitzstrom ausgesetzt. Hier muss sich im geringsten Fall, wenn das Betriebsmittel im SW-Bereich und demnach in der $LPZ 0_B$ steht, eine Beschaltung mit SPD-Typ II ergeben.

3.2.5.3 Magnetische Schirmung und Leitungsführung

3.2.5.3.1 Magnetische Schirmung

Das magnetische Feld H in A/m ist in aller Regel die dominierende Störgröße des LEMP, sodass eine Gebäude-, Geräte- oder Leitungsschirmung die elektrische Komponente des LEMP ebenfalls ausreichend reduziert [3]. In „2.4 Konflikt des Konstrukteurs“ wird ein blechdosenartiger Schirm beschrieben, der die Anlage in jeglicher Hinsicht einhüllt, somit den Faradayischen Käfig bewirkt und den EMP bei richtigem PA an der Zonengrenze auslöscht.

Diese Schirmwirkung tritt bei den nahezu geschlossenen E-Häusern des Absetzers und Bandschleifenwagens auf, wobei ein zweiter Schirm aufgrund der Verwendung von Stahlschaltschränken in den E-Häusern eine weitere EMP-Schwächung zur Folge hat.

In [N4] und [4] wird die Näherung Formel 45a/b erwähnt um mit ihr den entsprechenden Schirmfaktor SF in dB in Abhängigkeit von der Frequenz des Stoßstroms für ein Maschennetz bestehend aus der Stahlarmierung im Beton eines Kraftwerksgebäudes zu bestimmen.

Dieses Netz sollte zumindest über blitzstromtragfähige verzinkte Stahlstäbe mit Stabradius r_c in m oder Flachbänder in einer MW von $w_M = 5m$ verfügen, die alle an ihren Knotenpunkten mit sich und der Stahlarmierung geklemmt oder verschweißt werden.

Stahl, Kupfer, Aluminium $SF_{1MHz} = 20 * \log_{10}(8,5/w_M)$ **Formel 45a**

Stahl $SF_{25kHz} = \frac{SF_{1MHz}}{\sqrt{1 + 18 * 10^{-6}/r_c^2}}$ **Formel 45b**

Darüber hinaus ist eine feste Verbindung durch das Verrödeln pro Meter mit Bewehrung ausreichend [N4]. Außerdem sind bei Betonfertigbauplatten die Dehnfugen zwischen ihnen mit Erdseilen zu überbrücken [N12], was wiederum den Einsatz von Erdungsfestpunkten (EFP) fordert.

Die Tab. 20 zeigt verschiedene SF für einen Stabdurchmesser $r_c = 10mm$, die unter anderem die Forderung von [N12] mit $w_{M[N12]} = 3m$ enthält. Des Weiteren sollen in ihr gleichzeitig Formel 46 und Formel 47a/b eingesetzt werden. Formel 46 beschreibt das magnetische Feld H_1 in A/m bei Naheinschlag innerhalb des Schirms in Abhängigkeit vom SF. Weiterhin weist [N4] darauf hin, dass ein Mindestabstand vom Schirm eingehalten werden muss, sodass erst nach diesem das Schutzvolumen mit entsprechendem SF für elektrische oder elektronische Betriebsmittel eingehalten ist. Der Abstand $d_{s/1}$ in m für den Direkteinschlag ist abhängig von der Maschenweite und vom SF und kann mit Formel 47a/b berechnet werden. Außerdem ist $d_{s/1}$ im Vergleich zum Mindestabstand $d_{s/2}$, der bei Naheinschlägen gilt, bei kleinen MW größer.

$$H_{1max} = \frac{H_{0max}}{10^{\frac{SF}{20}}} \quad \text{Formel 46}$$

für $SF \geq 10$ $d_{s/1} = w_M * \frac{SF}{10} > d_{s/2} = w_M^{\frac{SF}{10}}$ **Formel 47a**

für $SF < 10$ $d_{s/1} = w_M = d_{s/2}$ **Formel 47b**

w_M in m	SF_{25kHz}	SF_{1MHz}	$H_{1maxf (+)_{1MHz}}$ in A/m	$d_{s/1}$ in m
0,1	35,5	38,6	374,5	0,4
0,5	22,7	24,6	1872,4	1,3
1	17,1	18,6	3744,8	1,9
3	8,3	9,0	11234,5	3
5	4,2	4,6	18724,1	5

Tab. 20: Maschenweiten, Schirmfaktoren, Abstände bei Nah- und Direkteinschlag

Neben der Gebäudeschirmung wird in [N11] und [N12] die Leitungsschirmung für die Leittechnik gefordert. Sie kann durch Kabelkanäle oder bewehrte Trassen, die beidseitig an den PA angeschlossen sind, erfolgen. Hierbei ist ein Folienschirm ausreichend. Falls eine Verlegung nicht in diesen Trassen möglich ist, muss der Schirm blitzstromtragfähig sein. Bei besonders störungsempfindlichen Leitungen muss eine doppelte Schirmung erfolgen. Weiterhin wird auf den Einsatz isolierender Schnittstellen für die Informationstechnik verwiesen. Wobei hier der Einsatz eines LWL-Kabels (Lichtwellenleiter) ohne metallene Seele, aufgrund der nichtwirkenden Induktion, im Vordergrund steht.

3.2.5.3.2 Leitungsführung

Wie im Überspannungsschutz beschrieben, muss zur einfachen Beschaltung der Leitungen ein konzentrierter Gebäudeeintritt an der HES ermöglicht werden. Falls dies nicht möglich ist, wie es in Gebäuden von Kraftwerksanlagen der Fall ist, erfolgt der Zusammenschluss der getrennten HES über den Erdsammelleiter respektive den Ringpotentialausgleichs. Darüber hinaus entspricht die Forderung von [N4], [N11] und [N12] des gemeinsamen Verlegens von Leitungen der Informations- und Energietechnik, welche die gleiche Senke bedienen, aufgrund der Minimierung der Induktionsschleife der Leitungsführung der FAM. Außerdem wird durch das in metallenen Kabelkanälen nahe Verlegen an den geerdeten natürlichen Komponenten der ortsveränderlichen Geräte eine schirmende Wirkung erreicht [N4], die durch die Deckelung der Kanäle in der $LPZ 0_B$ weiter verstärkt wird und das elektromagnetische Feld durch diesen Schirmrohrransatz nahezu ausschließt. Trennsteg in den Kanälen ermöglichen zudem, dass eine Störung der Leitungen untereinander kompensiert wird.

Ein weiterer Aspekt zur Minimierung der Installationsschleifen gilt dem Mitführen eines Erdungsseils auf den Kabeltrassen (KT) respektive der elektrisch leitfähigen Verbindung der Schienenstöße untereinander und der Schwellen, wie in „3.2.3.4.3 Betrachtungen zum Funktionspotentialausgleich – Gleisanlagen“ beschrieben, bei mobilen Anlagen. Hierdurch wird die Installationsschleife zwischen der Versorgungsleitung und der Erdverbindung von der Absetzer-Erdungsanlage zum Transformatorhaus (An2_Abb. 3) minimiert.

Die Leitungsführung von nichtgeschirmten Leitungen zwischen Gebäuden, so ist in [N4], [N11] und [N12] zu lesen, erfolgt in metallenen oder in bewehrten Kabelkanälen. Wobei hier von einer gemeinsamer LPZ bei PA der Kanäle oder auch der Schirme während des Gebäudeeintritts ausgegangen werden kann und eine Beschaltung durch SPD entfällt [N4] und [N11]. Im Bereich des inneren Blitzschutzes hat die Endverkabelung in offenen Kabelschutzrohren oder -Kanälen zu erfolgen und bei Führung im Außenbereich in geschlossenen [N12]. Ein Erdseil $q_{Cu} = 70mm^2$, das 0,3...0,4m über erdverlegte Kabel geführt wird, minimiert ebenfalls den Beschaltungsaufwand. Die erdverlegten Trassen werden, wenn ihre Breite aus dem Schutzwinkel austritt, mit einem weiteren Erdungsseil gesichert, das mit dem parallel geführten Erdseil alle 5m leitend verbunden wird [N12].

Die EMV-gerechte Verlegung verlangt außerdem, dass Reserveadern von Datenleitungen in jedem Fall auf das Schirmpotential des Schrankens aufzulegen sind [N12].

3.2.5.4 Problematik ortsveränderliche Geräte

3.2.5.4.1 Allgemeine Betrachtung

Der Blitzschutzpotentialausgleich (BPA) erfolgt an den Zonengrenzen von $LPZ 0_{A/B}$ zu $LPZ 1 \dots n$.

Diese Aussage der [N4] ist für Kraftwerksprojekte leicht zu realisieren, da die Leitungsführung im Stahlskelett, wie es aus An10_Abb. 6 und An10_Abb. 11 zu entnehmen ist, eine entsprechende Schirmung neben dem äußeren Blitzschutz durch die MW des Stahlbau-Fachwerks besteht. Darüber hinaus führt der Einsatz von gedeckelten und blitzstromtragfähigen Kabelkanälen, wie es [N11] und [N12] bei der Leitungsführung zwischen Gebäuden fordern, zur Einhaltung der LPZ, wenn diese an der HES im Eintrittsbereich entsprechend dimensioniert angeschlossen werden. Eine weitere Beschaltung durch SPD oder eine Schirmung der Leitungen, die zwischen den Gebäuden verlegt sind, entfällt.

Das E-Haus des Absetzers definiert, wie es An4_Abb. 2 zeigt, die $LPZ 1/2$. Die Leitungsführung zu den Betriebsmitteln erfolgt im Schutzbereich $LPZ 0_B$, sodass der BPA pro Ader im Zonenübergang $LPZ 0_B$ zu $LPZ 1/2$ erfolgen muss [N4]. Hierdurch resultiert neben dem Auflegen der nichtaktiven Adern ein zusätzlicher Kostenaufwand durch die SPD-Beschaltung der aktiven Adern. Wie im Risikomanagement in An1 zu lesen ist, liegt der Gesamtpreis der inneren Systeme bei $P_{E-Technik} = 300000€$. Eine SPD-Typ-II-Beschaltung der aktiven Adern, die in das E-Haus eingeführt sind, kostet nach [17] im Mittelwert $\bar{K}_{Energie} = 70€$ bzw. $\bar{K}_{Daten} = 30€$. Abb. 18 zeigt hierfür eine Hochrechnung, die sowohl die Zwecke der Energieversorgung als auch die der Datenerfassung sowie in Kombination

übernehmen kann. Weiterhin werden die Kosten der Schutzbeschaltung zweier typischer Geräte aufgelistet. Hierbei steht lediglich aufgrund der Anlagensicherheit der Schutz des E-Hauses im Vordergrund, sodass nur, wie An13_Abb. 3 und An13_Abb. 4 zeigen, die in das E-Haus eingeführten Leitungen sofort beschaltet werden. Ferner sind, wie aus dem charakteristischen Modell nach Abb. 17 zu entnehmen ist, die durch den LEMP verursachten Überspannungen gefährlich für die Betriebsmittel der einzelnen Stationen, somit liegt die Schutzbeschaltung derer im Ermessen des Konstrukteurs.

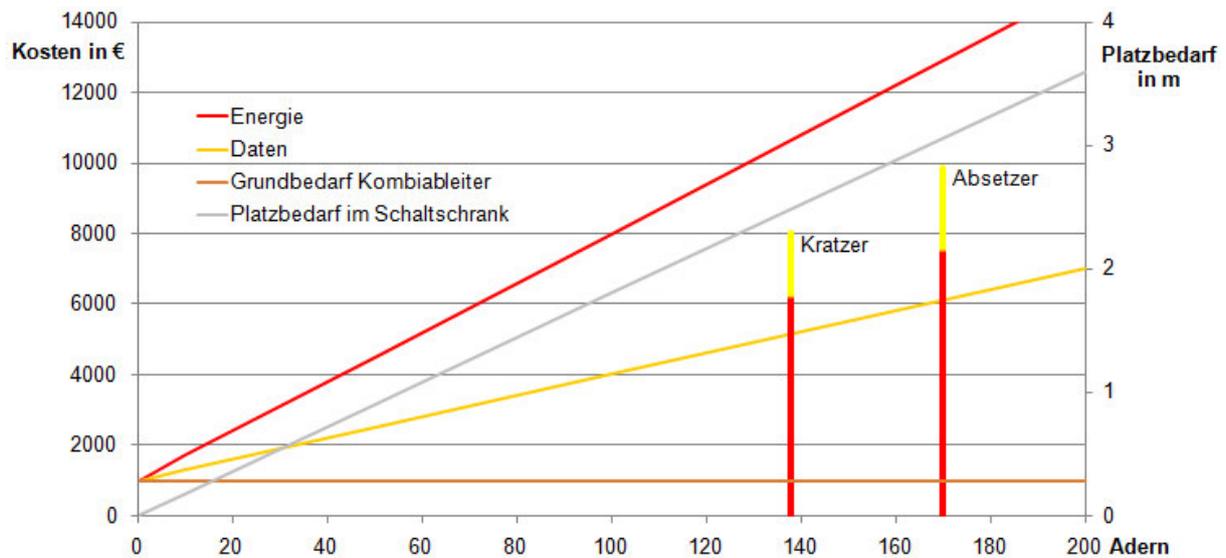


Abb. 18: Kosten für Schutzbeschaltung aktiver Adern in Richtung E-Haus

Darüber hinaus entsteht durch den Einsatz der Klemmen ein zusätzlicher Platzbedarf im Schaltschrank respektive in einem separat installierten Blitzschutzkasten. Zudem sind nach [N4] alle nicht-aktiven Adern auf die HES bzw. PA aufzulegen. Beim Aufsummieren dieser Faktoren, auch unter dem Aspekt, dass hierdurch der Planungsaufwand enorm gesteigert wird, sind das Einhalten des intern vorgegebenen Budgetanteils von etwa 10% und die daraus resultierende Wettbewerbsorientierung schwierig.

3.2.5.4.2 Lösungsvorschlag

Aufgrund der komplett elektrisch leitfähig-durchverbundenen Stahlkonstruktion, gilt die Annahme eines Nullpotentials in sämtlichen Bereichen des Absetzers, die über eine ausreichende Dimensionierung des Stahlbaus verfügen, zur HES im E-Haus. Ein definiert über FE eingefangener Blitz, der in den tragenden Stahlbau mit einem ausreichenden Trennungsabstand zu anderen Betriebsmitteln oder Leitungen eingeleitet wird, ruft dadurch nahezu keine Potentialdifferenz hervor. Zudem ist wegen der Aufteilung des Blitzstroms im querschnittgroßen Träger die Induktion nach Formel 6 und die Gegeninduktivität der Leiterschleifen nach Formel 7, durch den mit dem Stahlbau elektrisch leitfähig verbundenen

Kabelkanal, in dem die Leitungen verlegt sind, nahezu ausgeschlossen. Darüber hinaus wird der Blitzstrom anteilig über die Schutz- und Potentialausgleichleiter der Betriebsmittel getragen, sodass sich diese wiederum im Nullpotential befinden.

Um den Beschaltungsaufwand auf ein verträgliches Maß zu minimieren, sind Vorkehrungen zu treffen, die den Blitz gezielt und in Entfernung zu Leitungen und Betriebsmitteln einfangen sowie ableiten und vor allem die Wirkungen des LEMP minimieren. Hierfür müssen, wie es die Vorbetrachtungen im Kap.3.2.5 ergaben, blitzstromtragfähige Leitungsschirme oder gedeckelte Kabelkanäle im Freibereich wie auf dem Abwurfband des Absetzers eingesetzt werden. Sie müssen einen BPA im Bereich der Quelle und Senke aufweisen und darüber hinaus so dicht wie möglich am Stahlbau verlegt werden sowie über das Klemmen oder Schrauben mit ihm elektrisch leitfähig verbunden sein. Energieversorgungs- und Datenleitungen, die eine Senke bedienen, sind gemeinsam und dicht beieinander zu verlegen um damit Induktionsschleifen zu vermeiden. Weiterhin müssen die Senken entsprechend mit Blechschirmen versehen werden, die wiederum elektrisch leitfähig mit dem Stahlbau verbunden sind.

Das Ergebnis der Maßnahme ist die Reduzierung des LEMP in einem Volumen, das der $LPZ 0_B$ entspricht, sodass man hierbei vom „Ausstülpen“ der $LPZ 1$ spricht. Alle aus ihr herausragenden Betriebsmittel, wie die in „3.2.5.2.3 Überspannungsschutz“ beschriebenen, müssen dennoch vor der Zusammenführung mit anderen Leitungen in einem aufgestellten Blitzschutzkasten beschaltet werden.

3.2.6 Koordinierung des Potentialausgleichs in Kraftwerken

Der Potentialausgleich (PA) reduziert den durch den Kurzschlussstrom verursachten Potentialunterschied zwischen der Erdungsanlage, den metallenen und elektrischen Installationen sowie Betriebsmitteln, den aktiven Geräten und den wandelnden energietechnischen Anlagen wie Transformatoren und Generatoren im Gebäudeinneren. Seine Hauptaufgabe besteht darin die Berührungsspannung zwischen zwei leitfähigen Elementen bei Kurz- bzw. Körperschluss zu minimieren. Dadurch wird dem elektrischen Schlag entgegengewirkt und zusätzlich bei richtiger Dimensionierung des Potentialausgleichleiters (PAL) eine schnelle Fehlerabschaltung durch einen ausreichend großen Kurzschlussstrom ermöglicht.

Der prägende Charakter des Potentialausgleichs ist hierbei: „So kurz und so gut wie möglich“

In [N11] und [N12] wird auf die Nutzung der leitenden Bewehrung im Beton verwiesen, sodass die elektrischen Anlagen und Betriebsmittel mit Nennspannungen $U_n \geq 1kV$ sowie die metallenen Installationen an ihr über Erdungsfestpunkte (EFP) und den daran leitfähig

verbundenen Erdungsschienen bzw. der Erdsammelleitungen (ESL) einfach oder mehrfach angeschlossen werden. Die Dimensionierung der PAL und ESL erfolgt hierbei generell über Formel 29 [N6]. Die Kraftwerksbetreiber geben für sie unterschiedliche Standardgrößen vor. Im Allgemeinen, so [12], werden hierfür Flachbänder aus verzinktem Stahl oder Kupfer mit den Querschnitten $q_{Fe_{Fl}} = 3,5 \times 30 \dots 5 \times 40 \text{ mm}^2$ und $q_{Cu_{Fl}} = 3,5 \times 30 \dots 10 \times 40 \text{ mm}^2$ eingesetzt. Sie werden in einer Höhe von $h = 0,6 \dots 0,8 \text{ m}$ installiert und sind alle 10-15m mit den Anschlussfahnen des Fundamenterders oder die an ihm angeschlossenen EFP im Untergeschoss und auf Erdbodenniveau installiert. Ebenso ist wegen der Vielzahl von elektrischen Betriebsmitteln respektive metallenen Installationen und ihrer räumlichen Distanz zueinander in Obergeschossen deren Anschluss über ESL und EFP sinnvoll. -Dazu muss die Bewehrung des Betons zusätzlich über Flachbänder verfügen die nach Blitz- oder Kurzschlussstrom ausgelegt und alle 3m mit der Bewehrung geklemmt sind [12].- An den ESL werden über Erdungsseile aus Kupfer auf kürzestem Weg alle aktiven Geräte und Anlagen und deren Gehäuse oder Schutzvorrichtungen einfach oder mehrfach geerdet. Hierbei beschreiben [N12] und [N11] identische Maßnahmen, sodass eine Auflistung, zu sehen in Tab. 21, erfolgen kann.

KT der Leittechnik werden an den Stößen und NS-KT zusätzlich alle 20m an die ESL angeschlossen. [N12] und [12] definieren übereinstimmend, dass bei MS-KT zudem noch ein Erdungsseil $q_{Cu_{ES}} = 70 \dots 95 \text{ mm}^2$ auf ihnen mitzuführen ist. Vorzugsweise sollte es alle 10m leitend mit der KT verbunden sein. Weiterhin so [N12] und [12] soll die Überbrückung von Stoßstellen mit entsprechenden Formstücken sicher über Schrauben und gezahnten Kontaktscheiben, sie sind Teil der ASE, ausgeführt sein. Während [N12] die KT dadurch als Erweiterung der ESL ansieht und somit mögliche Anschlusslängen der Betriebsmittel-PAL deutlich verkürzt werden, ist in [N11] nur der direkte Anschluss erlaubt.

Sonstige metallene Installationen werden über $q_{St_{Fl}} = 70 \text{ mm}^2$ an die ESL angeschlossen und falls sie Isolierstücke enthalten einfach oder mit Funkenstrecke überbrückt.

Zusätzliche Maßnahmen müssen vorwiegend bei metallenen Installationen getroffen werden. So zeigt Tab. 21, dass unter Umständen auch Rahmen oder Stelzenböden spezifikationsabhängig verschweißt werden müssen. Darüber hinaus sind an Rohren, Treppen, Geländer, Podesten und Türen Anschlussfahnen durch Schweißen anzubringen, die es ermöglichen ohne weiteren Aufwand PAL über ASE zu befestigen.

	Erdungsseilanzahl					q_{Cu}
	HS	MS	NS	Zusatz		
				1	2	
Schaltanlage	2+			F29	ED	70mm ²
Gehäuse von Maschinen & Eigenbedarfstransformatoren	2+			F29	ED	
Sternpunkt und SPD von Maschinentransformator				F29		
Generatorgehäuse				F29	ED	
Schaltanlage		2		SL	EL	
Transformatoren			2			
Sternpunkt Transformatoren			2			
Grundrahmen von Schaltschränken, Wartepulte und Tafeln			2	A5/S	E	
Stelzenboden			1	A5	VS	
Geräte und Betriebsmittel			1	SL		
Legende: 2+ mindestens 2 A und Zahl Abstand in <i>m</i> zum nächsten Anschluss an die Erdungssammelleitung E an den Enden bzw. Ecken ED an den Eckpunkten und diagonal zueinander EL Erdungsleitung mitgeführt auf MS-Kabeltrasse F und Zahl Dimensionierung nach Formel S Verschweißen mit SL über Schutzleiter des Versorgungs- und Einspeisekabels VS Verbindung durch Schrauben M10 und Zahnscheiben						

Tab. 21: Erdungs- und Potentialausgleichsmaßnahmen elektrischer Betriebsmittel und Trassierung

ASE zum Anschluss der PAL an die Betriebsmittel und Installationen sind grundsätzlich Schraube, Mutter M8...M10 und gezahnte Kontaktscheibe. Weiterhin müssen die mit metallenen Installationen verschweißten Anschlussfahnen zum einen lang genug sein, damit sie ausreichend, wie in [N12] beschrieben, aus der Rohrisolierung herausragen, und zum anderen im Querschnitt aber auch in ihrer Lochgröße den Kundenforderungen entsprechen. Schraubverbindungen sind im Rahmen des PA auf die ESL konform.

3.3 Auswahl und Definition – Voraussetzung für Blitzschutzrichtlinie

3.3.1 Ergebnisse der Betrachtungen

Die Phase der Planung und Analyse in Kap.3.2 zeigte, dass die FAM Maßnahmen ergreifen muss um Mensch und Maschine vor den Wirkungen des Blitzes zu schützen. Hierbei stellte nicht nur der Direkteinschlag sondern auch der Nah- und Ferneinschlag, wie in An2_Abb. 3 oder vereinfacht in Abb. 4 zu sehen aber auch die Berechnung zur Sensibilisierung zum LEMP, im Punkt „3.2.5.1 Blitzschutzzonen“ nachgewiesen, ein enormes Zerstörungspotential dar. Aus diesem Grund muss eine Koordinierung des äußeren und inneren Blitzschutz zwischen den FAM-Abteilungen des Maschinenbaus und der Elektrotechnik im Vordergrund stehen. Insbesondere bei Kraftwerksanlagen bedarf es einer konzentrierten Planung und Koordinierung zu den Ausführungsbestimmungen der Betreiber.

Grundsätzlich hat bei Bestimmung der BA in der Vertrags- und Planungsphase eine Einschätzung der Blitzgefährdung, eine folgende Stärken- und Schwächenanalyse sowie das Einteilen der Blitzschutzzonen zu erfolgen. Das Vorgehen nach Abb. 9 unter Verwendung der [N1] und [N2] ist hierbei unter Anfertigung des Risikomanagement zu empfehlen.

Die nachfolgende charakterliche Zusammenfassung des Blitzschutzes unterteilt sich in die ortsveränderlichen Geräte und die Kraftwerksanlagen. Aus ihr ergeben sich vorbetrachtend die Bestimmungen der Blitzschutzrichtlinie. Hierbei sind [N3] und [N4] maßgebend. Darüber hinaus beruhen die Kraftwerksanlagen auf den Grundsätzen der ortsveränderlichen Geräte, sodass in diesem Bereich eine Erweiterung der Kriterien des Punktes 3.3.2 erfolgt.

3.3.2 Blitzschutz – Ortsveränderliche Geräte und Förderbrücken

3.3.2.1 Fangeinrichtung

Grundsatz:

Durch das Risikomanagement im Punkt 3.2.2 entsprechen die ortsveränderlichen Geräte der FAM der *BSK III*, sodass die zugehörigen Werte aus den Tab. 6, Tab. 8 und Tab. 9 maßgebend sind. Darüber ist der Einsatz des BKV mindestens an einer 2D-Zeichnung besser jedoch an einer 3D-Zeichnung auszuführen um die Einschlagpunkte des Blitzes zu kennzeichnen. Hierbei ist es von Nöten, so zeigte es die Untersuchung im Punkt 3.2.3.3.3, dass Bereiche, die eine erhöhte mechanische Festigkeit, hier ist die Seilabspannung (Abb. 10) zu nennen, aufweisen müssen und durch den gezielten Einsatz von FE geschützt werden. Darüber hinaus sind generell definierte Einschlagpunkte zu setzen um den Blitz ortsbezogen einzufangen, dadurch seine physikalischen Wirkungen zu begrenzen und die tragende Stahlkonstruktion vor Korrosion zu schützen. Dafür werden FE zumindest an den

Ecken und im Verlauf an Kanten des Geräts auf der höchsten Ebene installiert. Ihre Höhe beträgt $h_{FE_{min}} = 0,5m$. FE besitzen einen Mindestquerschnitt von $q_{FE_{St}} = 50mm^2$ und sind mit der metallenen Konstruktion vorzugsweise mit ASE, bestehend aus Schraube/Mutter M10 und Kontaktscheibe, zu verschrauben oder querschnittgleich auf einer Länge von 50mm zu verschweißen. Aufgrund der auftretenden Windlast können im Einzelnen größere Abmessungen oder eine Abspannung erforderlich sein. Wenn das graphische BKV zu aufwendig ist, wird das BKV wie folgt angewendet:

Methode: „Blitzkugeldurchhang“

Ziel ist die FE so zu platzieren, dass die Blitzkugel das zu schützende Volumen nicht berührt.

Hierbei sind unter anderem die Form und Höhe des Gerätes ausschlaggebend, sodass der Einsatz des Verfahrens nun an flachen Ebenen und gewölbten Flächen gezeigt wird. Beide finden ihre Anwendung im Produktportfolio der FAM.

Der Durchhang p in m der Blitzkugel zwischen den im Abstand d in m voneinander entfernten FE, berechenbar mit Formel 18, steht unter dem Einfluss der FE-Höhe h in m auf der zu schützenden Ebene oder Fläche.

Anmerkung: Die Enddurchschlagstrecke bzw. der Blitzkugelradius r in m wird während der Betrachtung Methode: „Blitzkugeldurchhang“ zu R in m .

Flache Ebenen und Dächer:

In Verbindung mit An14_Abb. 1 gilt für flache Ebenen Formel 48:

$$h > p \quad \text{Formel 48}$$

Es folgt mit Formel 18 aus Formel 48 die Formel 49:

$$h > p = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{d_1}{2}\right)^2} \quad \text{Formel 49}$$

Gewölbte Fläche:

Der Durchhang für ein gewölbtes Dach kann graphisch oder wie hier rechnerisch gelöst werden.

In Verbindung mit An14_Abb. 1 gilt für gewölbte Dächer aus Metall Formel 50:

$$h > p_{\Sigma}(d_1; d_2) = p_1(d_1) + p_2(d_2) \quad \text{Formel 50}$$

Durch das Festsetzen des Abstandes der FE zueinander oder der Höhe der senkrecht auf der gewölbten Fläche positionierten FE kann der jeweils andere Parameter errechnet werden.

Verfahren nach gewähltem Abstand:

Hierbei sind die Formel 50 und Formel 52 zur Bestimmung der Höhe zu nutzen.

$$d_1 = d_2 \quad \text{Formel 51}$$

Es folgt daraus die Höhe mit Formel 51 in Formel 52:

$$h > p_z(d_1 = d_2) = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{d_1}{2}\right)^2} + R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{d_1}{2}\right)^2} \quad \text{Formel 52}$$

Die Höhe erlaubt nun das Setzen der nächsten Fangstange im Abstand d_1 .

Verfahren nach Höhe der konfektionierten FE:

Bei senkrechter Positionierung der FE auf der gewölbten Fläche entsteht über den Kosinussatz Formel 53 beim Umstellen nach α in °:

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{c^2 + b^2 - a^2}{2 * c * b}\right) \quad \text{Formel 53}$$

Das Auflösen nach der Höhe des ungleichmäßigen Dreiecks ergibt d_2 über die Formel 54.

$$d_2 = 2 * b * \sin \alpha \quad \text{Formel 54}$$

Durch Definition am rechtwinkligen Dreieck wird y in m aus Formel 55 bestimmt:

$$y = h * \sin \alpha \quad \text{Formel 55}$$

d_1 in m wird abschließend aus Formel 56 errechnet:

$$d_1 = d_2 - 2 * y \quad \text{Formel 56}$$

Zusätzliche Maßnahmen:

Bereiche mit Personenaufenthalt

Für diese Bereiche gilt die *BSK I*.

Es zeigte sich, dass das Begehen der Anlagenteile: „Laufbühne und Steigleiter“ des Absetzers aber auch des Bandschleifenwagens nach Punkt „3.2.3.3.2 Gefahr für Menschen“ im Bezug auf die Abb. 10 und den An2_Abb. 1 bis 4 während eines Gewitters lebensbedrohlich ist. Hier muss, da eine Isolierung des LPS gegenüber dem Menschen wie am Pylon oder den Laufbühnen des Abwurfbandes zu aufwendig wäre, ein striktes Aufenthaltsverbot durch Warnschilder aber auch durch eine Arbeitsschutzbelehrung aufgezeigt werden. Dabei sollte zusätzlich darauf verwiesen werden, dass bei Nahgewitter (10s zwischen Blitz und Donner [N18]) nur Schutzräume wie das E-Haus oder die Fahrerkabine und Bereiche auf der BA, die allseits in ihrem Schutzwinkel inkl. Handbereich + Trennungsabstand [N13] liegen, aufgesucht werden dürfen. Ein Verlassen dieser Schutzbereiche kann zur Gefährdung durch Blitzschlag aber auch zu gefährlichen Berührungsspannungen führen. Gefährliche Schrittspannungen sind nur auf dem Gerät bei durchgehender elektrischer Verbindung der Laufgitterroste und Metallkonstruktion nicht zu erwarten.

E-Haus und Kabine

E-Häuser und Kabinen bestehen aus Metallblechen, die mit ihrer tragenden Konstruktion vollkommen oder dicht verschweißt sind. Sie sind damit elektrisch durchverbunden. Wenn möglich, sind sie in den Schutzbereich der Anlage oder der zusätzlich installierten FE zu verschieben, die ebenfalls über das BKV oder das SWV zu ermitteln sind. Hierbei sollte vorzugsweise darauf geachtet, dass die Schutzbereiche nach BSK I und II bemessen sind um die Zonen vor dem direkten Einfluss des Blitzstromes zu schützen. Darüber hinaus muss auch bei der Bewegung des Geräts und seiner Komponenten ein ständiger Schutz bestehen.

Falls ein Verschieben der E-Häuser und Kabinen nicht gewährleistet ist, muss eine Erweiterung des Daches im Fall des Unterfahrens durch FE-Variation erfolgen.

Hier zeigte Punkt 3.2.3.3.3 mit [14], dass die Komponenten über ein zu schwaches Dach verfügen. Die auftretende Durchlöcherung bei Blitzeinschlag kann im einfachsten Fall mit einer Blechstärkenerhöhung nach Tab. 8 auf $t_{St\ Blech} \geq 4mm$ erfolgen. Dieser Schutz ist bei der Nutzung eines zusätzlichen Sonnendachs aus Stahl $t_{St\ Blech} \geq 0,5mm$, befestigt mit ASE, die einen minimalen Querschnitt von $q_{min} = 50mm^2$ aufweisen, das in Gebieten mit hohen Temperaturen eingesetzt wird, geboten.

Bei einem Quadranten-Schiffsbelader (QSL), zu sehen in An13_Abb. 2, dessen Kabine dem Blitzeinschlag ausgesetzt ist, werden, wenn nicht schon durch den Schutz der Beleuchtungsmasten, die sie umringen, und der Hydraulikeinheit, die sie bewegt, geschützt, FE platziert.

Ein überlegenswerter Aspekt, der bei E-Häusern angewendet und auch bei einer Vorortmontage durchgeführt werden kann, wäre das MV in Variation mit der Methode: „Blitzkugeldurchhang“. Ein Schutz vor den physikalischen Wirkungen des Blitzes ist hier durch das Hinzunehmen eines Winkelstahls 70x50x6, der durch das Anflanschen mit geeigneten ASE des kurzen Schenkels auf die lange Kante der tragenden Konstruktion des Daches nach BSK III, für eine E-Hausbreite von 5m gewährleistet.

Förderbrücken

Überdachungen in flacher oder gewölbter Form von Förderbrücken zum Schutz des Förderguts oder Einhausungen zum Schutz von Spannantrieben und weiteren Maschinen weisen ebenfalls zu geringe Blechstärken auf. Im Fall der Durchlöcherungsvermeidung muss entweder über eine Blechstärkenenerhöhung, FE in Form von Fangstangen oder geklemmten Fangdrähten mit Querschnitten nach Tab. 8 entschieden werden. Fangstangen und –Drähte sind hierbei effizienter, sodass ihre Auslegung mit der Methode: „Blitzkugeldurchhang“ durchgeführt wird. Das Anschlagen an die Überdachung erfolgt bei Drähten meterweise über ASE, sodass bei Überdachungen aus Metall beim gesicherten elektrischen Kontakt ein Verbinden nach MW aus Tab. 9 entfällt.

Elektrische Betriebsmittel und Versorgungsleitungen im Außenbereich

Priorität: $LPZ 0_B$ und Schirmung

Die elektrischen Betriebsmittel und deren Versorgungsleitungen sind soweit es geht im Schutzwinkel der Anlage und im Nahbereich der tragenden metallenen Stahlkonstruktion zu installieren. Für die Bestimmung des Schutzbereichs ist An4_Abb. 1 und das BKV sowie SWV maßgebend. Hierdurch wird in erster Linie der Direkteinschlag ausgeschlossen. Darüber hinaus sind metallische Abdeckhauben bei der Wahl des Betriebsmittels zu bevorzugen. Bei der Installation an das Gerät ist eine metallene Konsole, die über das Lochbild des Betriebsmittels verfügt zu empfehlen auf der direkt das Kabelschutzrohr oder der Kabelkanal aufgesetzt ist. Beide sind leitfähig mit der Konsole und diese mit der Tragkonstruktion zu verbinden. Die beiden Maßnahmen der Schirmung und die Verlegung in die $LPZ 0_B$ verringern den Beschaltungsaufwand drastisch, sodass im Freibereich bei Direkteinschlag wie auf dem Abwurfband des Absetzers die Kabelkanäle zu deckeln sind.

Des Weiteren ist das allgemeine Energieversorgungskabel des Geräts auch im Schutzwinkel der Anlage, in einem durch FE abgespannt-geschützten Bereich oder in einem gedeckelten Kabelkanal zu verlegen. Eine Kombination der Maßnahmen ist vorteilhaft. Bei Erdverlegung erfolgt die Verlegung in 1m Tiefe, sodass ein darüber geführtes Erdseil aus Kupfer mit Querschnitt nach Kurzschlussstrom und typischer Verlegtiefe von 0,5m, diese in seinen Schutzwinkel stellt. Das Erdseil ist in das örtliche Maschennetz alle 20m zu integrieren.

Kabeltrommeln sind ebenfalls im Schutzbereich der Anlage oder durch eine Überdachung allseits gegen den direkten Blitzeinschlag zu schützen.

Der Kabelabspannbock erhält eine FE, die diesen um mindestens 0,5m überragt.

Ebenso sind Scheinwerfer und Beleuchtungsmasten, die aus Gründen der Ausleuchtung nicht in den Schutzwinkel der metallenen Konstruktion gestellt werden können, mit dieser FE, ggf. im Nahbereich mit einer höheren FE, sodass der Blitz seinen Hauptschaden in Entfernung zu ihr ausübt, auszurüsten. Die Masten der Scheinwerfer oder der Leuchten bestehen, falls ein Verlegen der FE nicht ausgeführt werden kann, aus blitzstromtragfähigen Stahlrohren, in denen die Versorgungsleitung eingelegt ist und die FE angeschlagen wird. Die Stahlrohre werden bodenseitig mit der metallenen Hauptkonstruktion über ASE entsprechend der auftretenden Windlast verschraubt.

Ex-Schutzzonen

Ex-Schutzzonen, die in blitzeinschlaggefährdeten Bereichen liegen, weisen eine erhöhte Explosionsgefährdung auf, sie sind innerhalb ihres Gefahrenbereichs und des maximalen Temperaturanstieges querschnittgroß auszulegen. Das Einfangen des Blitzes erfolgt hier außerhalb des Gefahrenbereichs mit FE $q_{st} = 176mm^2$. Der temperaturbedingte Funkenflug bzw. das Sprühen der FE darf zu keiner Zeit in diesen Gefahrenbereich wirken.

Hydraulisches Hubwerk

Bei Hubwerken, die vergleichend mit denen von QSL oder denen von Bandwagen im einschlaggefährdeten Bereich liegen, sind FE zu setzen, die den Direkteinschlag in die Komponenten vermeiden.

3.3.2.2 Ableitungseinrichtung

Grundsatz:

Nach [N3_Kap.4] gelten die natürlichen Komponenten der Stahlkonstruktion als blitzstromtragfähig, sodass weitere Ableitungen entfallen. Im Rahmen des Punktes 3.2.3.4 Funktionspotentialausgleich (FPA) und der Ableitung des Blitzes sind Gelenke und Lager, die nicht schon anderweitig überbrückt sind, wie durch Kabelkanäle oder PAL, mit Erdseilen $q_{Cu} = 25mm^2$ und ASE, Schraube/Mutter M10, Anschlussfahne und Kontaktscheibe, elektrisch leitfähig zu verbinden.

Anmerkung 1: Der Potentialausgleich (PA) der Betriebsmittel kann einfach und zusätzlich über die querschnittgroße Stahlkonstruktion erfolgen, wenn ein sicherer Strompfad nachgewiesen wurde.

Anmerkung 2: Die Vielzahl der speisenden Versorgungsleitungen der Betriebsmittel auf dem Gerät gelten als zusätzliche Ableitung. Zudem dient der Schutzleiter respektive der Kabelschirm des speisenden MS-Energieversorgungskabels des Geräts als Ableitung, wodurch er blitzstromtragfähig ausgelegt werden muss. Als Maß dient hier ein Schirm- oder Schutzleiterquerschnitt von $q_{Cu} \geq 16mm^2$.

Zusätzliche Maßnahmen

Hydraulisches Hubwerk

Hubwerke, die ohne FE blitzeinschlaggefährdet sind, werden bei kurzen Abmessungen mit Erdungsseilen und ASE überbrückt. Lange Abmessungen, bei denen der Seildurchhang zur Beschädigung des Seils führen kann, werden durch eine Andruckrolle, einen Schleifschuh (oder ein Teleskoprohr mit Erdungsseil pro Segment (muss nach [N5] geprüft werden)) geschützt. Das Anschlagen derer über ASE erfolgt am Kopf der Zylinderstange und unterhalb des Auges.

Hubwerke, die ohne FE als nicht blitzeinschlaggefährdet gelten, erhalten keinen zusätzlichen PA.

Triebsätze

Die Triebsätze in Schienen- und Raupenfahrwerken werden hingegen nicht mit Schleifschuhen überbrückt. Vielmehr sollte darauf geachtet werden, dass ein farbfreier elektrischer Kontakt zwischen Rad und Gleis besteht.

Anmerkung: In Projekten des angloamerikanischen Raums wird dem Kunden die elektrische Leitfähigkeit der Triebsätze rechnerisch aber auch praktisch nachgewiesen, sodass der Schleifschuh generell entfällt.

Übergabestation

Ortsveränderliche Geräte mit einer gemeinsamen Schnittstelle, zu sehen in An2_Abb. 3 und An2_Abb. 5 wie zwischen Absetzer und Bandschleifenwagen, sind elektrisch leitfähig mit Erdungsseil $q_{Cu} = 50mm^2$ und ASE über Anschlussfahne zu verbinden.

Treppen und Gerüste

Die Rahmen von Treppen und Gerüsten sind über eine blitzstrom- oder kurzschlussstragfähige Schraubverbindung, mit Anschlussfahnen und Erdungsseil untereinander an den Stößen zu verbinden, falls dies nicht schon durch eine querschnittgleiche Schweißverbindung geschehen ist.

3.3.2.3 Erdungsanlage

Grundsatz:

Bei ortsveränderlichen Geräten und Förderbrücken wird der Zusammenschluss zu benachbarten Geräten, metallenen Anlageteilen, Erdern und Erdungsanlagen auf kürzestem Wege gesucht um eine großflächige Aufteilung des Blitzstromes zu gewährleisten, solange es im Sinne $d_{accept} \leq 20m$ nach [N6] erlaubt ist.

Die Erdungsanlage beginnt im Übergang von Fahrwerk zur Erdoberfläche.

Anmerkung: Aufgrund der Beobachtung zu Beginn der Messung des FPA sind stationäre Gleissysteme sofort mit der Erdungsanlage zu verbinden. Hierdurch wird eine Potentialverschleppung, die zu gefährlichen Berührungsspannungen führen kann, falls ein Blitz in das Gerät oder in das Gleis einschlägt, vermieden.

Zusätzliche Maßnahmen

Gleisanlagen

Sind Gleise auf metallenen Schwellen montiert, die durch ihren temporär-lokalen Einsatz nicht an die Erdungsanlage angeschlossen sind, wird jede Schwelle mit der Schiene durch ein Erdungsseil mit $q_{Cu} = 50mm^2$ über ASE verbunden. Somit wird erreicht, dass neben dem FPA zwischen den Schienen die Schwellen als Teile der Erdungsanlage fungieren.

Der FPA zwischen den Schienenstößen erfolgt gemäß [N3B2_Kap.12] durch Flachband $q_{StFl} = 3,5 \times 30 \text{mm}^2$ mit zwei Schrauben M10, Unterlegscheibe sowie Federring.

Das Gleis muss darüber hinaus, falls eine Erdungsanlage oder ein Erder vorhanden ist, zu Beginn und am Ende und zusätzlich alle 20m die Möglichkeit des Anschlusses an die Erdungsanlage bieten. Hierfür sind querschnittgroße Anschlussfahnen vorzusehen, die entsprechend dem maximal-möglichen Fehlerstroms auszulegen sind. Beim Zusammenschluss der Gleisanlage mit anderen „Erthern“ gilt der Abstand $d_{accept} \leq 20\text{m}$ zu den „Erthern“ und die einzuhaltenden Forderungen nach [N6].

Sind Gleise nicht auf elektrisch leitfähigen Schwellen montiert, wie es bei der Verlegung auf Beton- oder Holzschwellen der Fall ist, werden sie, wie oben beschrieben, miteinander im Potential ausgeglichen. Darüber hinaus werden sie an den Enden der Gleisanlage und abschnittsweise alle 20m mit einem Erder vom Typ A geerdet. Der Zusammenschluss mit anderen Erthern und Erdungsanlagen im Umkreis von 20m muss unter Beachtung der [N6] erfolgen.

Aufstieg

Der Aufstieg wird mit einer Sonde ausgerüstet. Sie besteht aus einer den Erdboden berührenden Metallkugel oder einem Flachband. Über ein Erdungsseil und ASE sind sie mit dem Aufstieg elektrisch leitfähig zu verbinden. Weiterhin muss ein Warnschild und eine Arbeitsschutzbelehrung vor der Gefahr des Potentialtrichters warnen, ein Verlassen des Absetzers bei Nahgewitter verbieten und das Aufsuchen eines Schutzbereiches gebieten.

Förderbrücken

Die Auslegung des Fundamenterders hat über [N19] zu erfolgen.

Üblicherweise stehen Förderbrücken in Kraftwerken, sodass zum einen der Querschnitt des Fundamenterders nach der Forderung des Betreibers oder dem höchsten Kurzschlussstrom auszulegen ist und zum anderen die Verlegetiefe des örtlichen Maschenerders beachtet werden muss. Die Erdung von Stützen der Förderbrücken erfolgt mit [N3B1_AnE und Bild 127] durch einen Fundamenterder. Dieser wird mit einem verzinkten Flachband $q_{StFl} \geq 3,5 \times 30 \text{mm}^2$ in Form eines Ringerders auf Höhe des untersten Geschosses ausgerüstet. Für ihn gilt eine Mindestlänge des Flachbandes von $l_{StFl} \geq 2,5\text{m}$. Dieser ist bei gerader Verlegung alle 30mm mit der Bewehrung über Bewehrungsklemmen geklemmt. An den Eckpunkten erfolgt das elektrisch leitfähige Verbinden mit den Stoßenden des Flachbandes und der Bewehrung. Eine Anschlussfahne, die ebenfalls über die Klemmverbindung mit dem Flachband verbunden wird, ist mit einer Länge von 1,5m aus dem Erdboden herauszuführen

und an die Stahlstütze durch Schweißen oder Schraubverbindung über die Potentialausgleichsschiene in einer Höhe von 0,4m über dem Sockel zu montieren. Der Anschluss an den Maschenerder sowie die Verbindung zu weiteren Stützen erfolgt ebenfalls zweckmäßig über die Klemmverbindung und im Sinne der Vermaschung geradlinig. (An11_Abb. 1)

3.3.2.4 Innerer Blitzschutz

Grundsatz:

Der Blitzschutzpotentialausgleich (BPA) erfolgt an den Zonengrenzen von $LPZ 0_{A/B}$ zu $LPZ 1 \dots n$.

Der Trennungsabstand ist beim Schutz durch FE von exponiert-stehenden Betriebsmitteln und MSR-Technik einzuhalten.

Maßnahmen:

Energieversorgung der ortsveränderlichen Geräte

Wie in An2_Abb. 1 und An2_Abb. 3 zu sehen ist, ist ein Direkteinschlag in das Energieversorgungskabel und die Freileitung aber auch in angeschlossenen Geräte möglich. Die anteiligen Blitzströme durch den sogenannten Naheinschlag aber auch induzierte Überspannungen durch das elektromagnetische Feld werden in die Schaltanlage des Schutzvolumens zum einen über die Erdungsanlage und zum anderen über das Energieversorgungskabel getragen. Es muss ausgeschlossen werden, dass diese transienten Stoßströme oder Überspannungen im E-Haus Schäden verursachen. Aufgrund der mangelnden Koordinierungsmöglichkeit erfolgt der Einsatz eines SPD vom Typ I und II im Format eines Kombibleiters für das 400V-Netz und für das 690V-Netz in einem ohne zusätzliche Leitungslänge koordiniertem System aus beiden im Eintrittsbereich dieser Leitungen in das E-Haus.

Ist das nicht möglich, wird ein zusätzlicher metallener Blitzschutzkasten im oder am E-Haus kurz vor den Eintrittsbereich gesetzt.

Installations- und Auswahlkriterien für das Überspannungsschutzgerät

Koordinierung:

Um zu Verhindern, dass die untergeordneten von den übergeordneten SPD beim Ableiten der Störenergie nicht ausreichend entlastet werden und es dadurch zum einen zu einer Zerstörung des SPD und zum anderen zu weiteren Überspannungswanderwellen im nachfolgenden Netz kommen kann, sind ausschließlich zueinander koordinierte SPD bzw. Kombibleiter von einem Hersteller zu verwenden.

Einbauort:

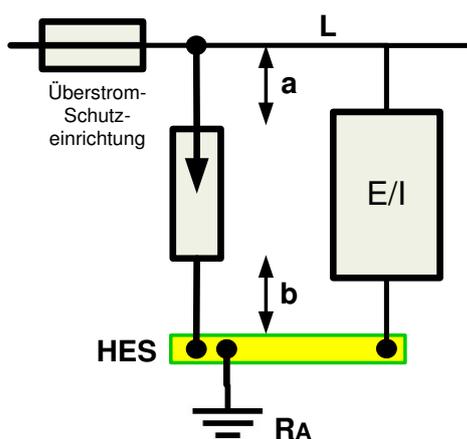
Der Einbauort des SPD resultiert aus der Blitzschutzzoneneinteilung und ist dementsprechend nach Tab. 22 zu bemessen.

	LPZ 0 _A zu 1	LPZ 0 _A zu 2	LPZ 0 _B zu 1	LPZ 1 zu 2	LPZ 2 zu 3
SPD	Typ I	Typ I+II, Kombi	Typ II	Typ II	Typ III
q_{Cu}	16mm ²	16mm ²	6mm ²	6mm ²	6mm ²
l_{max}	0,5m				

Tab. 22: Einbauort, Leitermindestquerschnitt und Leitungslänge

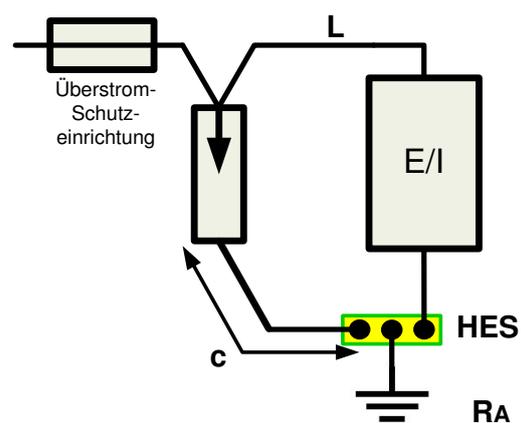
Installation und Anschlussschema:

Die Installation erfolgt unter Einhaltung der Anschlusslänge mit Abb. 19 und Abb. 20. Die netzsystemtypischen Anschlussschemen sind aus Tab. 23 zu entnehmen.



$$l_{max} = a + b \leq 0,5m$$

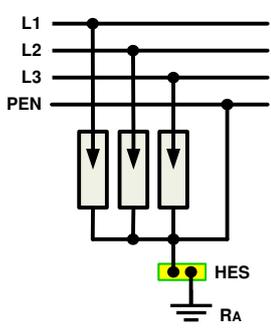
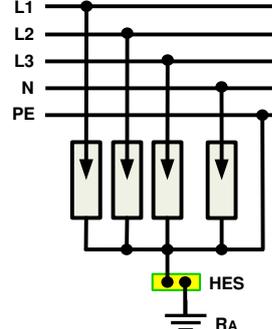
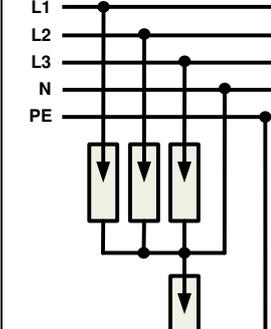
Abb. 19: Stichverdrahtung



$$l_{max} = c \leq 0,5m$$

Abb. 20: V-Verdrahtung

Anmerkung: SPD für 40mm-Sammelschienensystem minimiert die Leitungslänge

Anschlusschema	A	B ¹⁾	C
SPD zwischen			
jedem L und N	nicht anwendbar	nicht anwendbar	zwingend gefordert
jedem L und PEN	zwingend gefordert	nicht anwendbar	nicht anwendbar
jedem L und PE	nicht anwendbar	zwingend gefordert	nicht anwendbar
jedem L und PE (IT)	zwingend gefordert	zwingend gefordert	nicht anwendbar
N und PE	nicht anwendbar	zwingend gefordert	zwingend gefordert
L und L	optional	optional	optional
Schaltungsvariante	„3+0“	„4+0“	„3+1“
System	TN-C und IT ohne N	TN-S und IT mit N	TT, TN-S und IT mit N
Darstellung	 <p>Abb. 21: 3+0</p>	 <p>Abb. 22: 4+0</p>	 <p>Abb. 23: 3+1</p>
1 = in Deutschland nicht erlaubt [11]			

Tab. 23: Anschlusschema nach [11]

Schutzpegel U_p :

Der Schutzpegel beschreibt den höchsten Momentanwert der Spannung an den Klemmen eines SPD und gibt Auskunft über den Restpegel der begrenzten Überspannung [4].

Der Mindestwert von 230/400V-Drehstromsystemen unter 2,5kV gilt nur für Betriebsmittel der festen Installation. Die in Endstromkreisen eingesetzten Verbraucher bedürfen eines Schutzpegels von $U_p \leq 1,5kV$. Durch den Einsatz zueinander koordinierter SPD vom Typ I und Typ II oder dem erwähnten Kombiableiter wird dieser Mindestschutzpegel erreicht.

Dauernde Betriebsspannung U_c :

U_c vom SPD muss im Bezug zur eingesetzten Netzform gleich oder höher sein als die in Tab. 24 aufgelisteten Werte.

SPD zwischen	Netzform des Verteilungsnetzes			
	TN-System	TT-System	IT-System mit mitgeführtem N	IT-System ohne mitgeführtem N
L zu N	$1,1 * U_0$	$1,1 * U_0$	$1,1 * U_0$	NA
L zu PE	$1,1 * U_0$	$1,1 * U_0$	U	$1,1 * U_0$
N zu PE	$U_0^{1)}$	$U_0^{1)}$	$U_0^{1)}$	NA
L zu PEN	$1,1 * U_0$	NA	NA	NA
L zu L	$1,1 * U$	$1,1 * U$	$1,1 * U$	$1,1 * U$
U_0 =Spannung zwischen L-N		U =Spannung zwischen L-L		NA =nicht anwendbar
1 = ungünstigster Betriebsfall; 10%Toleranz wird nicht berücksichtigt				

Tab. 24: Maximal zulässige dauernde Betriebsspannung nach Netzform nach [11]

Nennableitstrom und Blitzstrom:

Die Auswahl im Rahmen des zu erwartenden Stoßstroms unterteilt in den Nennableitstrom I_n und den Blitzstrom I_{imp} erfolgt nach Tab. 25.

SPD-Typ	Strom	Anschlussschema	A und B	C zwischen N und PE	
		Wellenform	mindestens	Drehstrom	Wechselstrom
I	I_{imp}	10/350 μ s	12,5kA	50kA	25kA
II	I_n	8/20 μ s	5kA	20kA	50kA

Tab. 25: Nennableitstrom und Blitzstrom nach Anschlussschema und Schaltungsvariante nach [11]

Kurzschlussfestigkeit:

Die Überstromschutzeinrichtung schützt vor dem betriebsfrequenten, prospektiven Kurzschlussstrom, der über das SPD bei Versagen fließen kann. Sie ist entsprechend der Herstellerangaben auszuwählen und kann aufgrund ihres Einsatzes vor dem SPD in zwei Kategorien unterteilt werden. Zum einen ist hier die Versorgungssicherheit zu nennen und zum anderen die Aufrechterhaltung des Schutzes bei Überspannungen. In beiden Fällen ist die Selektivität der Überstromschutzeinrichtungen sicherzustellen [11].

Der Wert des betriebsfrequenten und prospektiven Kurzschlussstromes, der von dem Überspannungsschutzgerät bei Vorschaltung seiner zugeordneten maximalen Vorsicherung beherrscht wird.

Folgestromlöschvermögen und Folgestrombegrenzung:

Das Durchzünden des SPD bzw. das Schließen des „SPD-Schalters“ beim Ableiten eines Blitzstroms führt zu einem Kurzschluss der Leiter gegen Erde. Hierdurch kommt es zu einem Netzfolgestrom, der in etwa einem Kurzschluss an der Einbaustelle des SPD entspricht [11]. Im Allgemeinen konzipieren die Hersteller ihre SPD so, dass der Folgestrom gelöscht werden kann, sodass darauf geachtet werden muss, dass das Folgestromlöschvermögen größer ist als der im Netz auftretende prospektive Kurzschlussstrom.

Die SPD, die zwischen N und PE in TN- und TT-Systemen angeschlossen sind, müssen ein Folgestromlöschvermögen von mindestens 100A aufweisen [N13].

Durch den Einsatz von Funkenstrecken wird der Netzfolgestrom stark begrenzt, sodass die Anlagenverfügbarkeit sogar bei niedrigem Schutzpegel wegen des nicht Auslösens eines übergeordneten Schutzelements (Sicherung) erhalten bleibt.

TOV-Spannung:

Die Temporary Over Voltage (TOV) bezeichnet die Resistenz des SPD vor den vom Netz verursachten zeitweiligen Überspannungen. Hierbei gilt nach [4] für,

$$\Rightarrow \text{L-N-Pfad in TN- und TT-Systemen } U_{TOV}(t \leq 5s) = 1,45xU_{L-PE}$$

$$\Rightarrow \text{N-PE-Pfad von TT-Systemen } U_{TOV}(t \leq 200ms) = 1200V$$

Weiterhin muss das SPD bei Überschreitung dieser Zeit entweder sicher ausfallen (TOV-Sicherheit) oder TOV-fest (TOV-Festigkeit) sein. Letzteres bietet den Vorteil, dass es auch während der temporären Überspannung den Ableitvorgang einer transienten Überspannung, die diese weit übertrifft, gewährleistet.

Exponierte aus der Metallkonstruktion herausragende Betriebsmittel und MSR-Technik

Aufgrund der exponierten Positionierung ist ein anteiliger Blitzstrom und eine vom LEMP induzierten Überspannung in den Versorgungsleitern zu erwarten. Eine Beschaltung mit SPD- Typ II oder mit Kombiableiter muss im Eintrittsbereich in die höhere Zone zwangsläufig erfolgen. Der Kombiableiter wird in Bereichen eingesetzt in denen das Betriebsmittel direkt an der FE befestigt ist, wie z.B. die in An13_Abb. 2 gezeigten Beleuchtungsmasten der Fahrerkabine in der LPZ 0_A. Die Beschaltung der Versorgungsleitungen aller die Kabine umringenden Beleuchtungsmasten erfolgt vor dem Zusammenführen mit weiteren Leitungen in einem Blitzschutzkasten. Hierbei ist das Stahlskelett unterhalb der Kabine entsprechend vorzubereiten und an ihm gleichzeitig der Anschluss des Erdungsleiters vorzusehen.

Die Ableiter vom Typ II werden eingesetzt, wo die querschnittgroße ableitende Stahlkonstruktion lediglich nicht die Aufgabe der Schirmung übernehmen kann. In An13_Abb. 2 steht hierfür bspw. der sich in $LPZ 0_B$ befindliche unterhalb der Seilabspannung mittig aufgestellte Beleuchtungsmast.

3.3.2.5 Schutzmaßnahmen gegen den elektromagnetischen Impuls

Grundsatz:

Der Potentialausgleich durch die Beschaltung aktiver Adern und das Auflegen der nicht aktiven Adern erfolgt wie das Bilden eines Faradayischen Käfigs um das Schutzvolumen an jeder Zonengrenze.

Maßnahmen:

Die Deckelung der Kabelkanäle erfolgt im Freibereich der Anlage, sodass die $LPZ 1$, wie in Punkt 3.2.5.4.2 beschrieben, ausgestülpt wird. Weiterhin sind die Versorgungsleitungen der Elektro- und Informationstechnik für ein Betriebsmittel bzw. eine zu bedienende Senke zusammen zu verlegen. Werden Leitungen der HS/MS gleichzeitig mit den vorher genannten in den Kanälen oder Schirmrohren geführt, ist die „Trennung von Systemen“ aufgrund der elektromagnetischen Störung der Leitungen untereinander durch einen eingesetzten metallischen Trennsteg unumgänglich.

Der Einsatz von LWL-Kabeln, die ganz und gar keine metallenen Komponenten aufweisen, ist bei besonders empfindlichen Systemen zu bevorzugen.

Außerdem sind die Betriebsmittel so anzuordnen, dass sie durch den Stahlbau oder zusätzlichen Metallblechen, die sie umschließen, geschirmt sind.

3.3.3 Blitzschutz – Kraftwerksanlagen

3.3.3.1 Rückblick und Grundlage der Ausführung

Die Bewehrung bildet das „Rückgrat“ der baulichen Anlage.

Die Erfassung der Kraftwerksrichtlinien [N11] und [N12] zeigte, dass der Blitzstrom gegenüber dem Kurzschlussstrom klar in den Hintergrund gestellt wird, sodass lediglich der LEMP im Bezug auf den Blitz beherrscht werden muss. Außerdem wurde in den Punkten 3.2.3.6 und 3.2.4...6 umfassend auf die anzuwendenden Auslegungskriterien eingegangen, sodass im weiteren Verlauf und aufgrund der Komplexität der Kraftwerksprojekte ein Abriss erfolgt, der durch die Abbildungen in An15 ergänzt wird.

Auslegungsfaktoren:

Folgende Faktoren sind bei der Auslegung der Ableitung und der Verteilung des Stromes in die Erde, dem Potentialausgleich (PA) und dem LEMP zu beachten.

- ⇒ Kraftwerksrichtlinie und Vorgaben des Betreibers, wie z.B.
 - Blitzschutzklasse
 - Mindestquerschnitte
 - einzusetzende Werkstoffe und Materialien
 - Dimension des Potentialausgleichs
 - Maschenweite der Gebäudeschirmung
- ⇒ Maximaler Kurzschlussstrom der eingesetzten Anlage nach [N6] und [N13]
- ⇒ Verwendung und Position von Betriebsmitteln und der Leittechnik
- ⇒ Zeichnerische Darstellung des Blitzschutzsystem nach [N3B3]
- ⇒ Erdungsanlage nach [N6], [N13] und Fundamenterder zusätzlich nach [N19]

3.3.3.2 Erweiterung der Fangeinrichtung

Das Kraftwerksgebäude ist nach der vom Kunden vorgegebenen Blitzschutzklasse zu schützen. Hierfür wird auf dem Dach das Maschenverfahren unter Nutzung der Attika angewendet. Sind Geräte und Betriebsmittel auf dem Dach installiert, werden sie durch zusätzliche FE unter Anwendung des Trennungsabstandes, siehe Punkt 3.2.4.2, geschützt und in das Maschennetz integriert.

Flachdächer mit Personenaufenthalt:

Flachdächer, die während eines Gewitters begehbar sein müssen, werden mit FE, die an den Ecken und entsprechend dem Abstand der Ableitungen nach Tab. 9 die Dachkanten in ihrer Länge unterteilen, geplant. Hierbei muss nach der Methode: „Blitzkugeldurchhang“ eine Mindesthöhe eingehalten werden, die unter Verwendung des längsten Abstandes, sprich der Diagonalen bei Annahme einer rechteckigen oder quadratischen Grundfläche (An14), der FE zueinander berechnet wird. Der Personenschutz ist mit einer Standortisolierung durch das Beschichten der Dachoberfläche (Material mit $R_{\dot{U}} \geq 100k\Omega$, entspricht $t_{Kies} = 15cm$, $t_{Asphalt} = 5cm$ oder entsprechender Gehwegplatten) zu realisieren. Die Ableitungen der Fangstangen sind nach außen über die Attika zu führen und durch Planung von EFP direkt mit der Stahlarmierung im Beton zu verbinden. Bei großen Dachflächen können zudem Fangseile eingesetzt werden, die den Durchhang minimieren. Hierbei ist nach Berechnung des detaillierten Trennungsabstandes s_d in m eine Mindesthöhe zwischen Dachoberfläche und Fangseil von $2,5m + s_d$ zu gewährleisten [N3] und [4].

3.3.3.3 Erweiterung der Ableitung

Der zu erwartende Kurzschlussstrom ist für die Dimensionierung des Ableiters in der Stahlbewehrung ausschlaggebend. Weisen die Armierungsstäbe den Mindestquerschnitt auf, müssen sie zumindest alle 2-3 Meter miteinander stromtragfähig verklemmt sein, um eine ausreichende Stromaufteilung zu gewährleisten. Es ist darauf zu achten, dass die Ableitungen der Bewehrung mit einem Abstand entsprechend der BSK-Maschenweite durchgehend vom Dach bis zum Übergabepunkt in Höhe des Erdreiches verbunden sind. Trifft einer der Punkte nicht zu, muss ein verzinktes Flachband entsprechend der Ableitungsabstände nach Tab. 9 mit $q_{ST_{Fl}} \geq 3,5 \times 30mm^2$ eingesetzt werden. Außerdem sind weitere natürliche Komponenten, wie tragende Stahlträger, bei der Auslegung der Ableitungen mit einzubeziehen. Um Seiteneinschläge aufgrund der Gebäudehöhe kontrolliert einzufangen, sind im einschlaggefährdeten Bereich äußere Ableitungen zu installieren. Sie werden pro Geschosshöhe mit der Bewehrung der Deckenplatten über EFP verbunden. Ist die innere Anlage gegenüber dem EMP störanfällig, beträgt die Maschenweite (MW) des eingelegten mit der Bewehrung verklemmten Bandstahls höchstens $w_M \leq 5m \times 5m$, ansonsten maximal 15m. Darüber hinaus wird das Flachband meterweise mit der Bewehrung verrödelt.

3.3.3.4 Erweiterung der Erdungsanlage

Fundamenterder

Für jeden Neubau ist grundsätzlich die Verwendung eines Fundamenterders maßgebend [N13], der nach [N19] ausgelegt wird. Die Maschenweite beträgt in Abhängigkeit von der Leittechnik oder bei einer „robusten“ Anlage $5m \times 5m \leq w_M \leq 20m \times 20m$ und wird durch einen Ringerder bei Verwendung von Trennschichten unterhalb der Wanne bzw. Dämmschicht mit einer $w_M \leq 10m$ ergänzt. Wenn sichergestellt werden kann, dass der Fundamenterder allseits dicht mit 5cm Beton überdeckt ist, wobei er hochkant verlegt wird und alle 2m mit der Bewehrung geklemmt ist, kann je nach Kurzschlussstrom $q_{St_{Fl}} \geq 3,5 \times 30mm^2$ eingesetzt werden. Ansonsten wird NIRO verwendet.

Die Anschlussfahnen des Fundamenterders besitzen eine Länge von 1,5m und sind bei Verlegung im Gebäude aus verzinktem Flachbandstahl und außerhalb aus NIRO. Der Einsatz von EFP ist hierbei einerseits aus Korrosionsgründen und andererseits aus dem baustellenbedingten Verschleiß vorzuziehen. EFP und Anschlussfahnen werden pro 10m-Gebäudeumfang geplant. Der Anschluss der HES erfolgt an einem EFP.

Ringerder

Der Ringerder umläuft das Gebäude in einem Abstand von 1m und wird mit dem Fundamenterder über Erdseile angeschlagen am EFP verbunden. Seine Verlegetiefe beträgt 0,5m und sein Erdseilquerschnitt mindestens $q_{Cu_{ES}} \geq 70mm^2$.

Maschenerder

Der Maschenerder besitzt eine MW von 20m x 20m und ist zwischen den Gebäuden, Gleisanlagen, Förderbrücken und sonstigen metallenen Strukturen in einer Tiefe von 0,5m im FAM-Wirkbereich auf dem Kraftwerksgelände zu verlegen. Ist darüber hinaus die Möglichkeit gegeben den Ausbreitungswiderstand durch das Einbeziehen anderer Erdungsanlagen zu minimieren, so ist nach [N6] zu prüfen, ob der Abstand zu diesen $d_{accept} \leq 20m$ nicht übersteigt und dies auch im gegenseitigen Einvernehmen mit dem Betreiber geschieht. Außerdem muss beim Zusammenschluss zu einem globalen Erdungssystem rechnerisch nachgewiesen werden, dass die Erdungsanlage im Übergang zum erderrfreien Gebiet keine unzulässig hohe Berührungs- bzw. Schrittspannungen nach Formel 38 und Formel 39 in Verbindung mit Abb. 15 auftreten.

3.3.3.5 Erweiterung des Blitzschutz-Potentialausgleichs

In jeder Etage und in jedem Raum eines Gebäudes wird mindestens ein EFP gesetzt, der mit einer HES respektive Potentialausgleichsschiene mit dem nach Formel 29 [N6] berechneten Querschnitt dimensioniert wird, jedoch ist mindestens $q_{FeFl} = q_{CuFl} \geq 3,5 \times 30 \text{mm}^2$ einzusetzen. Bei einer großen Anzahl von Geräten, Betriebsmitteln, Schaltanlagen und sonstigen metallenen Installationen muss ein Erdsammelleiter (ESL) eingesetzt werden, der zudem alle 10m an einem dafür installierten EFP angeschlagen ist. Der ESL wird, wenn keine Vorgabe nach Aufbau eines Potentialausgleichsnetzwerkes besteht, als Potentialausgleichsringleiter in der Ebene geführt.

Wie Tab. 21 zeigt, müssen nicht nur Schaltanlagen sondern z.B. auch Transformatoren mehrfach geerdet werden. Hierfür werden entsprechende EFP geplant, die die ESL tragen und in ihrer Häufigkeit mindestens der Anzahl der erforderlichen Erdseile, wie sie aus Tab. 21 zu entnehmen sind, des Gerätes mit dem höchsten Kurzschlussstrom entsprechen.

Der Anschluss der Betriebsmittel bzw. der metallenen Installationen an die ESL muss mit Schraube/Mutter M10 und Kontaktscheibe oder einer geeigneten Klemmverbindung ausgeführt sein. Wahlweise ist eine am Betriebsmittel oder der metallenen Installation angeschweißte oder verschraubte nach Kurzschlussstrom dimensionierte Anschlussfahne anzubringen, an die das Erdseil anzuschließen ist. Sie wird zukünftig als Grundplatte mit der Kantenlänge 40mm bzw. bei Rohrisolation 100mm aus einem Flachband $q_{StFl} = 5 \times 40 \text{mm}^2$ geschnitten und an die metallene Installation querschnittgleich einzeln oder mehrfach je nach Vorgabe des Betreibers geschweißt.

Als ESL gelten zusätzlich die querschnittgroßen eingeführten Stahlskelette der Förderbrücken, die natürlichen Komponenten des Gebäudes und die Kabeltrassen (KT), auf denen im Gebäude, beim Tragen von MS-Kabel, ein $q_{CuES} \geq 70 \text{mm}^2$ mitgeführt und alle 10m mit ihr verbunden wird. Die KT wird an den Stößen und im weiteren Verlauf alle 20m mit der ESL über Erdungsseil verbunden.

3.4. Prüfung, Wartung und Dokumentation

3.4.1 Prüfung

Durch die Prüfung wird sichergestellt, dass die Komponenten des äußeren und inneren Blitzschutzes dem Stand der Technik entsprechen.

Die Prüfung umfasst hierbei:

- ⇒ Dokumenteneinsicht
- ⇒ Sichtprüfung
- ⇒ Messungen
- ⇒ Protokollierung in einem Prüfbericht

Die Phase der Planung und Analyse zeigte, dass der Blitz nicht nur zu einem Verlust im Bereich der Elektrotechnik sondern auch im Bereich des Maschinenbaus führen kann. Deswegen ist es notwendig Wiederholungsprüfungen einzuführen, die eine Inspektion der kompletten Anlage erfordern.

Der Zeitabstand der Wiederholungsprüfungen richtet sich so [N3B3] prinzipiell nach:

- ⇒ der Klassifizierung der baulichen Anlage oder des zu schützenden Bereiches, speziell hinsichtlich der Schadenfolgewirkungen und der BSK
- ⇒ den örtlichen Umgebungsbedingungen, z.B.: Korrosionsgefahr
- ⇒ den eingesetzten Werkstoffen der Blitzschutzsystembauteile
- ⇒ der Art der Oberfläche, an der die Blitzschutzbauteile befestigt sind
- ⇒ Zustand des Erdbodens und zusammenhängenden Korrosionsgeschwindigkeit

Hieraus folgen Prüfintervalle deren Verfahren in [N3B3] beschrieben und in Tab. 26 dargestellt sind.

Prüfung	Sichtung & Begehung	Umfassend	bei kritischen Situationen, wie		
			Leittechnik	nach BE	Ex-Bereich
BSK	Jahre	Jahre			
I und II	1	2	jährlich	umgehend	6 Monate
III und IV	2	4			
Anmerkung:	Unter kritischen Situationen werden zusätzlich störanfällige Systeme und Bereiche mit hohem Personenverkehr verstanden				

Tab. 26: Prüfintervalle nach [N3B3]

3.4.2 Wartung

Wird ein direkter Blitzeinschlag beobachtet, erfolgt nach Tab. 26 eine umgehende Prüfung an der Einschlagstelle. Falls sich bei dieser Prüfung wie z.B. beim Blitzeinschlag in die Seilabspannung eine gefährliche Ausschmelzung ergeben hat, müssen Maßnahmen zur Wartung und Reparatur ergriffen werden.

Darüber hinaus muss in aggressiven Umgebungen die Aufrechterhaltung der schützenden Konservierung erfolgen.

Sämtliche Blitzschutzbauteile werden auf ordnungsgemäße Position, Befestigung und Funktion überprüft und ggf. ausgetauscht. Ein elektrischer Durchgang muss sichergestellt und/oder ein Schutz gewährleistet sein.

3.4.3 Dokumentation

In [N3B3] sind Vorgaben zur Dokumentationsanfertigung gelistet, die bei jeder Prüfung zu erheben sind.

Weiterhin wird in ihr die zeichnerische Darstellung eines Blitzschutzsystems zugrunde gelegt. In Bezug auf die ortsveränderlichen Geräte, werden diese Symbole nicht eingesetzt, da aufgrund der flächengroßen FE und AE eine zeichnerische Darstellung lediglich durch zusätzliche FE ergänzt würde. Im Bereich der Gebäude von Kraftwerksanlagen wird diese Darstellungsform als Typical eingeführt.

4. Blitzschutzrichtlinie

4.1. Aufbau und Gestaltung der FAM-Richtlinie

4.1.1 Vergleich der Werknormen

Maßgebend für die FAM-Richtlinien sind die einheitliche Verwendung des Richtlinienkopfes und die Bezeichnung der Werknorm mit Nummer und Benennung. Es folgt eine Auflistung des Inhalts und der zitierten Standards, die wiederum in Gültigkeit und Bearbeitung unterteilt werden. Um das genormte Sachgebiet für den Leser vorzustellen, ist einleitend eine allgemeine Sicht auf Planung, Ausführung, Verwendung von Berechnungsprogrammen und die Dokumentation gegeben. Im weiteren Verlauf werden zunächst das Hauptprodukt und seine Dimensionierung beschrieben, bevor es nachfolgend in Einsatzgebiete unterteilt wird.

4.1.2 Vorgehensweise, Gestaltung und Ausführung

Aufgrund der Komplexität des Blitzschutzes ist eine strukturierte Vorgehensweise nach Abb. 6 und Abb. 9 vorzunehmen, obgleich der Konstrukteur ein Werkzeug braucht, das durch einfache Darstellung, Beschreibung und Ausführungsdetails das Thema Blitzschutz und Erdung aufgreift. Zudem verlangt die Vermaschung des äußeren und inneren Blitzschutzes sowie den Schutzmaßnahmen gegen den LEMP ein unbedingtes Systemdenken zwischen den Ingenieuren des Stahl- und Maschinenbaus und der Elektrotechnik. Eine Unterteilung der Richtlinie in diesen Bereichen würde zu einer Abgrenzung untereinander führen und das Gesamtsystem wäre nicht überschaubar. Aus diesem Grund wird jedes ortsveränderliche Gerät und die Kraftwerksanlage in ihrer Grundform einzeln betrachtet und darüber hinaus in Aufstellungsort und in spezielle Konstruktionskomponenten unterschieden.

Aus dieser Grundlage heraus erfolgt, wie in Punkt 4.1.1 beschrieben, die Grundform und Einleitung, anschließend ist eine Übersicht aus Piktogrammen, welche die Analyse, Planung, Ausführung und Prüfung des Blitzschutzes und der Erdung in Form eines Auswahlmenüs darstellt. Hinter den Piktogrammen stehen die anzuwendenden Verfahren zum äußeren und inneren Blitzschutz, dafür werden Berechnungshilfen und Tabellen aufgezeigt und normative Verweise wiedergegeben, weiterhin sind die Geräte mit angewendetem Lösungskonzept abgebildet, aus ihnen folgen Hauptbaugruppen und spezielle Betrachtungen, die den Konstrukteur anhand der Ergebnisse dieser Bachelorarbeit zum Thema Blitzschutz sensibilisieren sollen.

Im Rahmen des Erstellens der Blitzschutzrichtlinie müssen im weiteren Verlauf Konstruktions- und Ausführungsschritte mit den einzelnen FAM-Bereichen abgestimmt

werden um eine bestmögliche Auslegung zu gewährleisten. Hieraus wird ein allumfassendes Baukastensystem entworfen, das wiederum ein Bestandteil der Blitzschutzrichtlinie wird.

Abb. 24 zeigt schematisch die Grundstruktur der Blitzschutzrichtlinie und gibt gleichzeitig einen Aufschluss darüber, wie umfassend eine Koordinierung der Konstruktionsschnittstellen erfolgen muss.

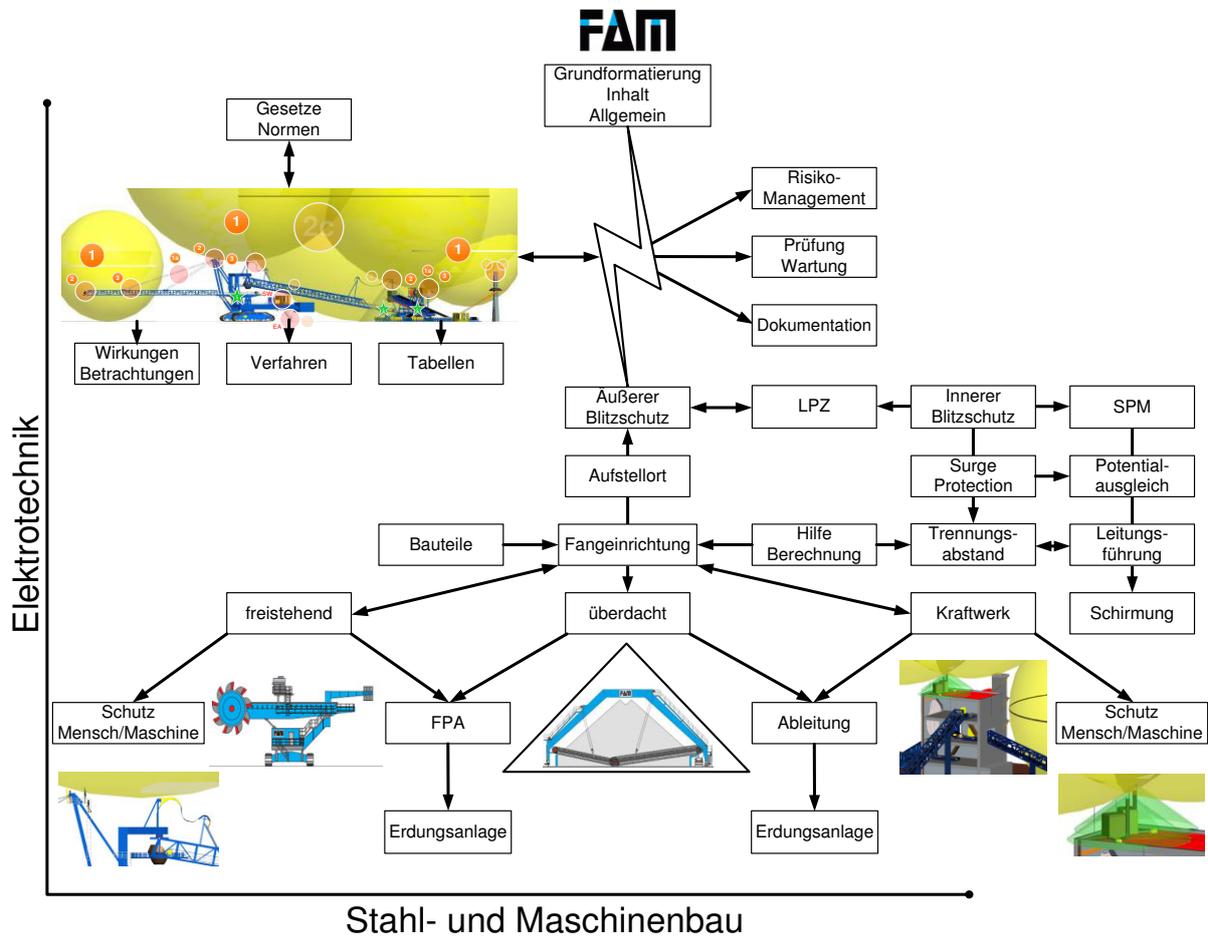
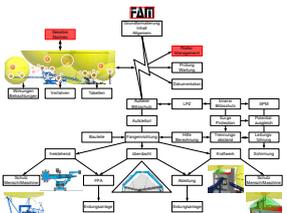
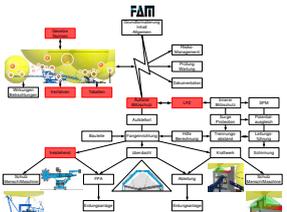
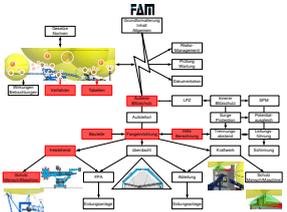
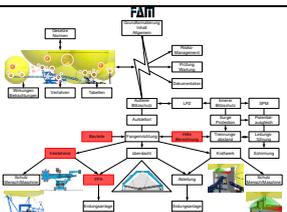
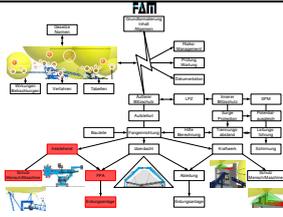
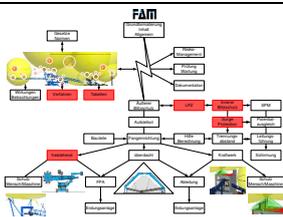
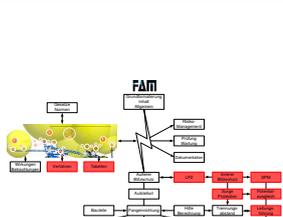
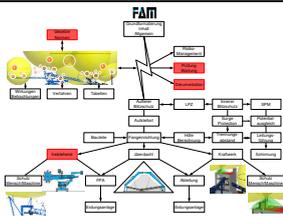
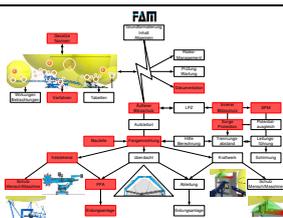


Abb. 24: Übersicht des Auswahlménüs der Blitzschutzrichtlinie

4.2 Anwenden der Blitzschutzrichtlinie an einem Beispiel

Nachfolgend wird die Benutzung der Blitzschutzrichtlinie unter Verwendung der „Abb. 24: Übersicht des Auswahlmenüs der Blitzschutzrichtlinie“ in Tab. 27 dargestellt.

Punkt	Aufgabe	Position und Beispiel
1	<p>Vertragsverhandlung</p> <p>Gesetze und Normen</p> <p>Vorgabe des Betreibers</p> <p>Aufstellort und ortsspezifische Kriterien</p> <p>Erkennen der Blitzgefährdung</p> <p>Ausfüllen der Checkliste aus An1_Tab. 1</p> <p>Risikomanagement</p> <p>Bestimmen der Blitzschutzklasse</p>	
2.0	<p>Einteilen der Blitzschutzzonen (An4_Abb. 2) und bestimmen des äußeren Blitzschutzes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ⇒ Auswahl des zu betrachtenden Geräts oder der Anlage, normativer Verweis ⇒ Setzen definierter Einschlagpunkte ⇒ Verschieben der elektrischen Betriebsmittel in den Schutzwinkel des Stahlskeletts 	
2.1	<p>Personengefährdung im Freibereich, auf den Laufbühnen und Steigleitern:</p> <ul style="list-style-type: none"> ⇒ Aufstellen von Warnschildern (Abb. 25) ⇒ Dokumentation ⇒ Arbeitsschutzbelehrung und Sicherheitsbereiche 	 <p>Abb. 25: Warnschild 1</p>
2.2	<p>Schutz von elektrischen Einrichtungen, Betriebsmitteln, Maschinen und Installationen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ⇒ Dimensionierung der Fangeinrichtung ⇒ Ausreichende Materialstärke nach Tab. 8 ⇒ Platzierung nach Berechnung ⇒ Verwendung einheitlicher Blitzschutzbauteile 	
3.	<p>Funktionspotentialausgleich:</p> <ul style="list-style-type: none"> ⇒ Analyse der Verbindungen ⇒ Anschlagen von Erdseilen unter Verwendung einheitlicher Blitzschutzbauteile 	

4.0	<p>Art der Erdungsanlage</p> <ul style="list-style-type: none"> ⇒ Raupenfahrwerk ⇒ Erder Typ A 	
4.1	<p>Personengefährdung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ⇒ Aufstellen von Warnschildern (Abb. 26) ⇒ Dokumentation ⇒ Arbeitsschutzbelehrung und Sicherheitsbereiche ⇒ Setzen einer Sonde, die im Zugangsbereich vor gefährlichen Berührungsspannungen schützt 	 <p>Abb. 26: Warnschild 2</p>
5.	<p>Innerer Blitzschutz:</p> <ul style="list-style-type: none"> ⇒ Anschluss des Energieversorgungskabels 400V/690V über SPD Typ I+II (Kombiableiter) im Eintrittsbereich in das E-Haus nach Installations- und Auswahlkriterien 	
6.	<p>Schutzmaßnahmen gegen LEMP:</p> <ul style="list-style-type: none"> ⇒ Ausstülpen der LPZ 1 ⇒ Zusammenverlegen von Energie- und Datenleitungen in gedeckelten Kabelkanälen. ⇒ Schirmung von Senken ⇒ Beschaltung von Leitungen exponiert stehender Betriebsmittel in einem Blitzschutzkasten verlagert auf der Stahlkonstruktion. 	
7.	<p>Dokumentation:</p> <ul style="list-style-type: none"> ⇒ Zeichnung des Blitzschutzsystems ⇒ Festlegen von Prüfungs- und Wartungsintervalle ⇒ Übergabe der Dokumente an den Kunden ⇒ Revisionen und Änderungen vornehmen 	
8.	<p>Ausführung</p>	
9.	<p>Kontrolle und Prüfen des Aufbaus:</p> <ul style="list-style-type: none"> ⇒ Zeichnungen überprüfen und anpassen ⇒ Kontrolle der installierten Blitzschutzbauteile ⇒ Widerstandsmessung durchführen ⇒ Protokollierung und Übergabe an den Kunden 	

Tab. 27: Anwenden der Blitzschutzrichtlinie

5. Abschließende Betrachtung und Ausblick

Im Rahmen der Bachelorarbeit, aus deren Betrachtungen die Blitzschutzrichtlinie im Nachhinein entsteht, wurde die Produktpalette der FAM analysiert und anhand zweier Demonstrationsmodelle wiedergegeben. Aufgrund der Höhe und des Alleinstehens der Anlagen und Geräte gelten sie als besonders blitzeinschlaggefährdet. Graphische Modelle und Rechnungen zeigten die Schwächen des FAM-Portfolios auf. Hierbei stach insbesondere die Personengefährdung hervor, welche durch den Aufenthalt im Freibereich des Geräts oder der Anlage besteht. Im weiteren Verlauf zeigten einfache Maßnahmen, wie elektrische Betriebsmittel in den Schutzbereich der Anlage verschoben werden können um somit die physikalischen Wirkungen des Blitzes bei einem Direkteinschlag auszuschließen.

Die Untersuchung des Funktionspotentialausgleich ergab, dass die Stahlskelette in Verbindung mit ihren Lagern und Gelenken der ortsveränderlichen Geräte einen geringen Durchgangswiderstand aufweisen, der der Blitzschutznorm entspricht, und somit ein Ableiten ohne Verwendung weiterer Hilfsmittel, unter der These: „Funktionspotentialausgleich durch Flächenpressung“, ermöglicht. Es bleibt dennoch die Gefahr des Verschweißens im Blitzfall der Lagerstellen bestehen, da auch unter Zuhilfenahme eines Erdungsseils ein bedeutender Strom über die Kugeldrehverbindung oder die Triebsätze des Schienensystems fließen wird. Das Verteilen des Blitzstroms in die Erde führt durch den großen Ausbreitungswiderstand, welcher an einem Raupenfahrwerk betrachtet wurde, zu gefährlichen Schritt- und Berührungsspannungen bei Blitzeinschlag. Hier müssen Vorkehrungen und weitere Messungen ergriffen werden, die die realen Auswirkungen des Potentialtrichters aufzeigen und zudem diese durch den Einsatz einer Sonde begrenzen. Darüber hinaus ergab die Koordinierung externer Richtlinien mit den Normen des Blitzschutzes und der Erdung ein Spektrum an Maßnahmen, die im Bereich des Kraftwerksengineering getroffen werden müssen, um aus ihnen eine einheitliche Auslegung in der Blitzschutzrichtlinie zu generieren.

Zudem zeigte die Sensibilisierung zum Trennungsabstand und dem elektromagnetischen Impuls des Blitzes, dass ohne eine koordinierte und kontrollierte Bearbeitung erhebliche Schäden in der elektrischen Anlage auftreten können. Weiterhin wurde durch die Problematik der ortsveränderlichen Geräte eine wirtschaftlich-wettbewerbsorientierte Betrachtung des Beschaltungsaufwandes aktiver Adern dargestellt, welche den Kostenaufwand mit dem Ausstülpen der Blitzschutzzone minimieren kann. Das Schirmpotential der metallenen Anlage sollte den konkreten Einsatz dieser Maßnahmen in einer weiteren praktischen Untersuchung begründen.

Die Definition der Typicals und der Aufbau der Blitzschutzrichtlinie wurden abschließend vorgestellt und gegliedert, sodass hieraus die FAM-Werknorm entstehen wird.

II. Literaturverzeichnis

1	MUSEUM FÜR ENERGIEGESCHICHTEN: AUSSTELLUNG ELEKTRIZITÄT SAMMELBLATT NR.11, HANNOVER, WWW.ENERGIEGESCHICHTE.DE
2	TROMMER/HAMPE: BLITZSCHUTZANLAGEN PLANEN-BAUEN-PRÜFEN, VERLAG: RUDOLF MÜLLER, KÖLN 2005
3	HASSE/WIESINGER/ZISCHANK: HANDBUCH FÜR BLITZSCHUTZ UND ERDUNG, PFLAUM VERLAG, MÜNCHEN-BAD KISSINGEN-BERLIN-HEIDELBERG 2006
4	DEHN+SÖHNE: BLITZPLANER, VERLAG: DEHN+SÖHNE, NEUMARKT 2013
5	ROCK: GRUNDSÄTZE DES BLITZ- UND ÜBERSpannungSSCHUTZES, VORLESUNG: TECHNISCHE UNIVERSITÄT, ILMENAU 2011
6	FACHGEBIET HOCHSPANNUNGSTECHNIK: KAPITEL 1, VORLESUNG: TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT, DARMSTADT
7	DEHN+SÖHNE: ÜBERSpannungSSCHUTZ, UE-HAUPTKATALOG 2012/2013 UND 2013/2014
8	HÜGIN, POINTNER, WOLLENBERG: ERRICHTEN VON STARKSTROMANLAGEN MIT NENNspannungen ÜBER 1kV, VDE-VERLAG 1994
9	FAM UNTERNEHMENSPROFIL
10	SCHAEFFLER TECHNOLOGIES GMBH & CO. KG: TPI 206 - STROMISOLIERENDE LAGER, WÄLZLAGER ZUR VERMEIDUNG VON STROMDURCHGANGSSCHÄDEN, SCHAEFFLER 2011
11	GERHARD KIEFER/HERIBERT SCHMOLKE: VDE 100 UND DIE PRAXIS, VDE-VERLAG, BERLIN-OFFENBACH 2011
12	WETTINGFELD: ERDUNG UND POTENTIALAUSGLEICH IN INDUSTRIEANLAGEN, VERBAND DEUTSCHER BLITZSCHUTZFIRMEN E.V 2009
13	SUCHANEK: UNTERSUCHUNG AN BLITZSCHUTZERDUNGSANLAGEN UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DER SCHRITTSPANNUNG, HTTP://TUPRINTS.ULB.TU-DARMSTADT.DE/3735/
14	ZUSAMMENFASSUNG E-HAUS-BESCHAFFENHEIT AUS DEN FAM-PROJEKTEN: 1130506 – HALLASSA MAROKKO, 117667 – BUFFINLAND, 109794 – EFT STANARI
15	BIEGELMEIER: WIRKUNGEN DES ELEKTRISCHEN STROMES AUF MENSCHEN UND NUTZTIERE, VDE-VERLAG GMBH, BERLIN-OFFENBACH 1986
16	BERGER, ANDERSON, KRÖNINGER: PARAMETERS OF LIGHTNING FLASHES, CIGRE ELECTRA NR 41, 1975
17	DEHN+SÖHNE: PREISLISTE – ÜBERSpannungSSCHUTZ, BLITZSCHUTZ/ERDUNG, 2014
18	ROCK: PRÜFGENERATOREN ZUR SIMULATION VON BLITZIMPULSSTRÖMEN IM LABOR UND IHRE WECHSELWIRKUNG MIT DEN PRÜFobjekten, UNIVERSITÄTSVERLAG ILMENAU, 2012

III. Normenverzeichnis

N1	IEC 62305-1	BLITZSCHUTZ TEIL 1: ALLGEMEINE GRUNDSÄTZE, 2011
N2	IEC 62305-2	BLITZSCHUTZ TEIL 2: RISIKO-MANAGEMENT, 2012
N2B1		BEIBLATT 1: BLITZGEFÄHRDUNG IN DEUTSCHLAND
N2B2		BEIBLATT 2: BERECHNUNGSHILFE ZUR ABSCHÄTZUNG DES SCHADENRISIKO FÜR BAULICHEN ANLAGEN
N2B3		BEIBLATT 3: ZUSÄTZLICHE INFORMATIONEN ZU ANWENDUNG DER IEC 62305-2
N3	IEC 62305-3	BLITZSCHUTZ TEIL 3: SCHUTZ VON BAULICHEN ANLAGEN UND PERSONEN, 2011
N3B1		BEIBLATT 1: ZUSÄTZLICHE INFORMATIONEN ZUR ANWENDUNG DER IEC 62305-3
N3B2		BEIBLATT 2: ZUSÄTZLICHE INFORMATIONEN FÜR BESONDERE BAULICHE ANLAGEN
N3B3		BEIBLATT 3: ZUSÄTZLICHE INFORMATIONEN FÜR DIE PRÜFUNG UND WARTUNG VON BLITZSCHUTZSYSTEMEN
N3B4		BEIBLATT 4: VERWENDUNG VON METALLDÄCHERN IN BLITZSCHUTZSYSTEMEN
N4	IEC 62305-4	BLITZSCHUTZ TEIL 4: ELEKTRISCHE UND ELEKTRONISCHE SYSTEME IN BAULICHEN ANLAGEN, 2011
N4B1		BEIBLATT 1: VERTEILUNG DES BLITZSTROMS
N5	DIN EN 62561	NORMENREIHE: BLITZSCHUTZSYSTEMBAUTEILE, 2013
N6	DIN VDE 0101	NORMENREIHE: STARKSTROMANLAGEN MIT NENNWECHSELSPANNUNGEN ÜBER 1kV, 2010
N7	2010:2010-09 (04)	VERTRAUEN DURCH SICHERHEIT SCHADENVERHÜTUNG GMBH – GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E.V., 2010
N8	FMS 10302	FAM WERKSNORM: BENENNUNG VON FINALERZEUGNISSEN, GERÄTE TECHNIK MAGDEBURG 2002
N9	FMS12110/01	FAM WERKSNORM: GURTFÖRDERER PROJEKTIERUNGSRICHTLINIEN, MAGDEBURG 2007
N10	IEC 60479	NORMENREIHE: WIRKUNGEN DES STROMES AUF MENSCHEN UND TIERE
N11	TR-ES27	STEAG ENCOTEC TECHNISCHE RICHTLINIE: ERDUNG UND BLITZSCHUTZ
N12	QMPS_030_REV.1	EON STANDARDSPEZIFIKATION FÜR KRAFTWERKE: TECHNISCHE VORSCHRIFTEN FÜR ERDUNGS- UND BLITZSCHUTZMAßNAHMEN
N13	DIN VDE 0100	NORMENREIHE: ERRICHTEN VON NIEDERSPANNUNGSANLAGEN, 2010
N14	DIN VDE 0102	KURZSCHLUSSSTRÖME IN DREHSTROMNETZEN, 2002
N15	IEEE 80-2000	GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING, 2000
N16	LBO-LSA §45	LANDESBAUORDNUNG DES LANDES SACHSEN-ANHALT, 2013
N17	Q07-010_TS 06	TECHNICAL SPECIFICATION – ELECTRICAL WORKS – ABBOT POINT COAL TERMINAL – PORTS CORPORATION OF QUEENSLAND LIMITED, 2007
N18	VDE 0105	BETRIEB VON ELEKTRISCHEN ANLAGEN, 2009
N19	DIN 18014	FUNDAMENTENTERDER – ALLGEMEINE PLANUNGSGRUNDLAGEN, 2012

IV. Abkürzungsverzeichnis

ABB.	ABBILDUNG
AE	ABLEITUNGSEINRICHTUNG
AL	ALUMINIUM
AN	ANHANG
ASE	ANSCHLAGELEMENTE
BA	BAULICHE ANLAGE
BE	BLITZEINSCHLAG
BKV	BLITZKUGELVERFAHREN
BLIDS	BLITZINFORMATIONSDIENST DER FIRMA SIEMENS
BPA	BLITZSCHUTZPOTENTIALAUSGLEICH
BSK	BLITZSCHUTZKLASSE
CIGRE	CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ELECTRIQUES
CU	KUPFER
EA	ERDUNGSANLAGE
EFP	ERDUNGSFESTPUNKT
EL	ERDUNGSLEITER
EMP	ELECTROMAGNETIC PULSE - ELEKTROMAGNETISCHER IMPULS
EMV	ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT
ES	ERDUNGSSEIL
ESE	EARLY STREAMER EMISSION - VORZEITIGE INITIIERUNG EINER FANGENTLADUNG
ESL	ERDUNGSSAMMELLEITER
EUCLID	EUROPEAN COOPERATION FOR LIGHTNING DETECTION
EVA	EINGABE VERARBEITUNG AUSGABE
FAM	FÖRDERANLAGEN UND BAUMSCHASCHINEN GMBH MAGDEBURG
FE	FANGEINRICHTUNG
FE	EISEN
FL	FLACHBAND
FPA	FUNKTIONSPOTENTIALAUSGLEICH
GPA	GESELLSCHAFT FÜR PROZESSAUTOMATION MBH
HES	HAUPTERDUNGSSCHIENE
HS	HOCHSPANNUNG
KAP.	KAPITEL
KT	KABELTRASSEN
LEMP	LIGHTNING ELECTROMAGNETIC PULSE - ELEKTROMAGNETISCHER IMPULS DES BLITZES
LP	LIGHNING PROTECTION - BLITZSCHUTZ
LPS	LIGHTNING PROTECTION SYSTEM - BLITZSCHUTZSYSTEM
LPZ	LIGHTNING PROTECTION ZONE - BLITZSCHUTZZONE
LWL	LICHTWELLENLEITER

MS	MITTELSpannung
MV	MASCHENVERFAHREN
MW	MASCHENWEITE
NEMP	NUCLEAR ELECTROMAGNETIC PULSE - ELEKTROMAGNETISCHER IMPULS EINER NUKLEAREN EXPLOSION
NIRO	NICHTROSTENDER STAHL
NS	NIEDERSpannung
PA	POTENTIALAUSGLEICH
PAL	POTENTIALAUSGLEICHSLIMITER
QSL	QUADRANT SHIPLOADER - QUADRANTEN-SCHIFFSBELOADER
SEMP	SWITCHING ELECTROMAGNETIC PULSE - ELEKTROMAGNETISCHER IMPULS EINER SCHALTHANDLUNG
SF	SCHIRMFaktor
SL	SHIPLOADER - SCHIFFSBELOADER
SPD	SURGE PROTECTION DEVICE - ÜBERSpannungSSCHUTZSYSTEM
SPM	SURGE PROTECTION MEASURES - SCHUTZMAßNAHMEN GEGEN LEMP
ST	STACKER - ABSEtZER
ST	STAHL
SW	SCHUTZWINKEL
SWV	SCHUTZWINKELVERFAHREN
TAB.	TABELLE
TC	TRIPPER CAR - BANDSCHLEIFENWAGEN
TOV	TEMPORARY OVER VOLTAGE – ZEITWEILIGE ÜBERSpannung
VDS	VERTRAUEN DURCH SICHERHEIT GMBH EINE INSTITUTION DES GESAMTVERBANDES DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT
VL	VERSORGUNGSLEITUNG

V. Formelzeichenverzeichnis

Die Formelzeichen sind nach Gliederungspunkten aufgelistet.

PUNKT	FORMELZEICHEN	BEZEICHNUNG	EINHEIT
2.2.1	i, I	Blitzstrom	kA
	Q'	Längenbezogenen Ladung	As
	r	Enddurchschlagstrecke	m
	v	Vorwachsengeschwindigkeit	km/h
2.2.2	$i(t)$	Blitzstrom	kA
	\hat{i}	Blitzstromscheitelwert	kA
	di/dt	mittlere Steilheit	$kA/\mu s$
	Q_{Lang}	Ladung des Langzeitstromes	As
	$Q_{Sto\beta}$	Ladung des Stoßstromes	As
	T_1, τ_1	Stirnzeit	μs
	T_2, τ_2	Rückenhalbwertszeit	μs
	T_{Lang}	Dauer des Langzeitstromes	s
	W/R	Spezifische Energie	MJ/Ω
2.2.3.1	$\hat{i}(t)$	Stromscheitelwert	kA
	R	ohmscher Widerstand	Ω
	U	Spannung	V
2.2.3.2	d	Abstand zwischen den Leitern	m
	$F(t)$	Kraft	N
	l	Länge bei parallelem Verlauf	m
	$i^2(t)$	Blitzstromquadrat	kA^2
2.2.3.3	a	Abstand bis zur Mitte der Ableitung	m
	b	Breite der Leiterschleife	m
	di/dt	mittlere Steilheit	$kA/\mu s$
	l	Länge des parallelen Verlaufs	m
	M	Gegeninduktivität	$\mu Vs/A$
	U_{ind}	Induzierte Rechteckspannung	V
2.3.3.4.1	$i(t)$	Blitzstrom	kA
	Q_{Blitz}	Summe aus $Q_{Sto\beta} + Q_{Lang}$	As
	Q_{Lang}	Ladung des Langzeitstromes	As
	$Q_{Sto\beta}$	Ladung des Stoßstromes	As

Punkt	Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit		
2.3.3.4.2	C_W	Spezifische Wärmekapazität	$J/(kg * K)$		
	$i^2(t)$	Blitzstromquadrat	kA^2		
	q	allg. Leiterquerschnitt	m^2		
	R	ohmscher Widerstand	Ω		
	T_2	Rückenhalbwertszeit	μs		
	W/R	Spezifische Energie	MJ/Ω		
	α	Temperaturkoeffizient des Widerstandes	$1/K$		
	γ	Massendichte	kg/m^3		
	ϱ	Spezifische ohmscher Widerstand bei Umgebungstemperatur	Ωm		
	ϑ_S	Schmelztemperatur	$^{\circ}C$		
	ϑ_U	Umgebungstemperatur	$^{\circ}C$		
	$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz aus $\vartheta_S - \vartheta_U$	K		
2.2.3.4.3	C_S	Spezifische Schmelzwärme	J/kg		
	C_W	Spezifische Wärmekapazität	$J/(kg * K)$		
	Q_{Blitz}	Summe aus $Q_{Sto\beta} + Q_{Lang}$	As		
	$U_{A,K}$	Anoden-/Kathodenspannungsfall	V		
	W	Lichtbogenenergie	Ws		
	V	Volumen	m^3		
	γ	Massendichte	kg/m^3		
	ϑ_S	Schmelztemperatur	$^{\circ}C$		
	ϑ_U	Umgebungstemperatur	$^{\circ}C$		
2.2.3.4.4	H_0	Magnetisches Feld	kA/m		
	I_0	Erststromstoß	kA		
	s_a	Abstand vom Einschlagort	m		
3.2.2	L	Eintretende Verlust			
	N	Häufigkeit von Blitzeinschlägen			
	P	Schadenwahrscheinlichkeit			
	R	Risiko			
	Fußnoten	A	Elektrischer Schlag	I	BE neben VL
		B	Physikalische Schäden	L	BE in VL
		C	Ausfall innerer Systeme	M	BE neben BA
		D	BE in BA	T	akzeptierbares
		DJ	BE in benachbarte BA	U	Elektrischer Schlag

Punkt	Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit		
3.2.2					
	Fußnoten	V	Physikalische Schäden	1	Verlust von Menschenleben
		W	Ausfall innerer Systeme	4	Wirtschaftliche Verluste
3.2.3.1		q	Querschnitt		mm^2
		t_1	Blechstärke die Durchlöcherung bei BE verhindert		mm
		t_2	Durchlöcherung bei BE möglich		mm
		$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz aus $\vartheta_S - \vartheta_U$		K
3.2.3.1.1		d	Abstand zwischen FE		m
		p	Durchhang der Blitzkugel		m
		r, r_{BSK}	Enddurchschlagsstrecke		m
		φ	Schutzwinkel		$^\circ$
3.2.3.3.2		$b_{Schleife}$	Breite der Leiterschleife		m
		h_{Mmax}	Maximale Griffhöhe des Menschen		m
		\hat{I}_{BSKI}	Blitzstromsichelwert des BSK I		kA
		I_{Mmax}	maximaler Körperstrom durch Mensch		mA
		di/dt	mittlere Steilheit		$kA/\mu s$
		m_{AE}	Masse der Ableitung		kg
		M	Gegeninduktivität		μH
		q_{AE}	Querschnitt der Ableitung		mm^2
		r_{Rund}	Radius der Ableitung		mm
		R_{AE}	Widerstand der Ableitung		Ω
		R_{Mensch}	Körperwiderstand des Menschen		Ω
		U_{ind}	Induzierte Rechteckspannung		V
		γ	Massendichte		kg/m^3
		ρ_{AE}	Spezifische ohmscher Widerstand der Ableitung		Ωm
3.2.3.3.3		C_S	Spezifische Schmelzwärme		J/kg
		C_W	Spezifische Wärmekapazität		$J/(kg * K)$
		\hat{I}	Blitzstromsichelwert		kA
		Q_{Blitz}	Summe aus $Q_{Sto\beta} + Q_{Lang}$		As
		Q_{Lang}	Ladung des Langzeitstromes		As

Punkt	Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
3.2.3.3.3	$Q_{Sto\beta}$	Ladung des Stoßstromes	As
	r_{BK}	Blitzkugelradius	m
	r_1, r_2	Radien eines Kegelstumpfes	mm
	t_{LochHK}	Radius einer Halbkugel	mm
	t_{LochKS}	Höhe eines Kegelstumpfes	mm
	T_2	Rückenhalbwertszeit	μs
	$U_{A,K}$	Anoden-/Kathodenspannungsfall	V
	V	Volumen	m^3
	ϑ_S	Schmelztemperatur	$^{\circ}C$
	ϑ_U	Umgebungstemperatur	$^{\circ}C$
3.2.3.3.4	$\hat{I}_{0/\infty}$	Stoßstromscheitelwert mit Steilheit $S = 0/\infty$	kA
	r_{in}	Innenradius des Rohres	mm
	$R_G = R_K$	Gleichstromwiderstand=Kopplungswiderstand	Ω
	t_{Rohr}	Stärke des Rohres	mm
	$U_{L/m}$	Längsspannung pro Meter	V/m
	ρ_{Rohr}	Spezifische ohmscher Widerstand Rohrmaterial	Ωm
3.2.3.4.2	G	Stromdichte	A/m
	I	Strom	A
	q	Querschnitt	mm^2
3.2.3.4.3	a_B	Berührungsflächenbreite	mm
	$A, A_{ges} = q$	Berührungsfläche	mm
	E	Elastizitätsmodul	N/mm^2
	$F_G, F_{W\ddot{a}l z}$	Gewichtskraft auf Lager	kN
	\bar{g}	mittlerer Fallbeschleunigung auf der Erde	m/s^2
	l_{LB}	Berührungslänge des Wälzkörpers	mm
	m_{ges}	Gesamtmasse auf KDV	kg
	N	Anzahl	–
	p_0	maximale Spannung / Flächenpressung	N/mm^2
	$r_{W\ddot{a}l z}$	Wälzkörperradius	mm
	ν	Querkontraktionszahl	–

Punkt	Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit		
3.2.3.4.4	l, l_i	Länge	mm		
	I_{Mess}	Messstrom	mA		
	q, q_i, q_{IPE}	Querschnitt	mm ²		
	R, R_i, R_{ges}	Widerstand	Ω		
	Fußnoten	Abband	Abwurfband	1 – 23	Teilwiderstände (An5)
		$L - R$	L-Rahmen	max	maximal
		P	Portal	Mess _{mit}	mit Überbrückung
		$S, S.1$	Schienenfahrwerk	Mess _{ohne}	ohne Überbrückung
		ϱ_{FE}	spezifisch ohmscher Widerstand von Eisen		Ωm
3.2.3.5.1	a	Abstand zwischen Erdspeießen		m	
3.2.3.5.2	l	Länge des Erders		m	
	r	viertel Breite des Erdungsbandes		m	
	R, R_A	Erdungswiderstand, Ausbreitungswiderstand		Ω	
	Fußnoten	O	Oberflächenerder	Mess	gemessen
		P	Plattenerder	1	Eine Raupe
		S	Strahlenerder	2	Zwei / beide Raupen
		U_E	Erdungsspannung		V
		$\varrho_E, \varrho_{E\ ohne\ 3}$	spezifischer Erdwiderstand		Ωm
3.2.3.5.2	I_{Mmax}	maximaler Körperstrom durch Mensch		mA	
	I_S	schrittspannungsbedingter Stromfluss durch Herz		mA	
	J_S	schrittspannungsbedingter Stromdichte im Herz		mA/m ²	
	U_S, U_{Smax}	Schrittspannung		kV	
3.3.3.6.3	α_r	thermischer Widerstandskoeffizient		1/°C	
	A_{EL}	Querschnitt Erdungsleiter		mm ²	
	c	Spannungsfaktor		%	
	G	Stromdichte		A/mm ²	
	I, I''_k	Kurzschlussstrom		A	
	I_d	Dauerstrom		A	
	I''_{k1E}, I''_{k2E}	einpolige, zweipolige Kurzschlussstrom		A	
	I''_{min}, I''_{max}	minimaler, maximaler Kurzschlussstrom		A	
	k_c	Stromaufteilungskoeffizient		–	
	K	Werkstoffkonstante		√s/mm ²	
	K_0, β	Werkstoffkonstante		°C	
	$S''_k, S''_{kmin}, S''_{kmax}$	Netz Kurzschlussleistung HS, minimale, maximale		VA	

Punkt	Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit		
3.3.3.6.3	S_T''	Transformatorenleistung	VA		
	$Q_c, TCAP$	volumetrische Wärmekapazität	J/(cm ³ °C)		
	t_c, t_F	Fehlerdauer, Abschaltzeit	s		
	T_a, ϑ_U	Umgebungstemperatur	°C		
	T_a, ϑ_S	Schmelztemperatur	°C		
	u_{kr}	Kurzschlussspannungsfaktor der Transformatoren	%		
	U_n	Netznominalspannung	V		
	ρ_r, ρ_{20}	spezifischer Erdungsleiterwiderstand	Ωm		
	ϑ_E	Endtemperatur	°C		
3.3.3.6.4	A_O	Fläche der Erdungsanlage	m ²		
	L_c	Gesamtlänge des Erdungsleiters	m		
	R_G, R_{AM}	Ausbreitungswiderstand	Ω		
	t_v	Verlegetiefe	m		
	ρ_E	spezifischer Erdwiderstand	Ωm		
3.2.3.6.7	I_C	Kurzschlussstrom ISPE	A		
	I_k	Kurzschlussstrom	A		
	I_{Rest}	Kurzschlussstrom RSPE	A		
	R_A	Ausbreitungswiderstand	Ω		
	U_E	Erdungsspannung	V		
	U_{Tp}	Berührungsspannung	V		
3.2.4.2	k_c	Stromaufteilungskoeffizient	–		
	k_i	Induktionsfaktor	–		
	k_m	Materialfaktor	–		
	l	Länge der Leitung	m		
	N_A, N_{Ring}	Anzahl	–		
	s	Trennungsabstand	m		
	Fußnote	d	detailliert	$Kran$	Kran
		e	vereinfacht	$Luft$	in Luft
		ES	Entstaubung	1 ... n	Abschnitt
		$Fest$	im Feststoff		
3.2.5.1	$A_{Schleife}$	quadratische Installationsschleife	m ²		
	H_{0max}	maximal wirkendes Magnetfeld	A/m		
	L_{ind}	Eigeninduktivität der Schleife	Vs/A		
	$\hat{I}_{f(+)}, \hat{I}_{f(-)}$	positiver, negativer Erststromstoß	kA		

Punkt	Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
3.2.5.1	$\hat{I}_{S(-)}$	negativer Folgestromstoß	kA
	I	Kurzschlussstrom	kA
	q_{Cu}	Querschnitt Kupferader	mm^2
	r_{Leiter}	Leiterradius	mm
	s_a	Abstand	m
	T_1	Stirnzeit	μs
	U	Überspannung	V
	μ	Permeabilität	Vs/Am
3.2.5.3	$d_{s/1}, d_{s/2}$	Abstand	m
	H_{0max}, H_{1max}	maximal wirkendes Magnetfeld	A/m
	SF_{25kHz}, SF_{1Mhz}	Schirmfaktor für Frequenzbereich	–
	r_c	Stabradius	mm
	w_M	Maschenweite	m
3.3.2.1	a, b, c, x, y	Länge einer Dreiecksseite	m
	d_1, d_2	Abstand zwischen FE	m
	h	Höhe FE	m
	p, p_1, p_2, p_Σ	Durchhang der Blitzkugel	m
	R	Blitzkugelradius bzw. Enddurchschlagstrecke	m
	r	Radius gewölbte Fläche	m
	α	Winkel des Dreiecks	°
3.3.2.4	a, b, c, l_{max}	Leitungslänge, maximale	m
	I_{imp}	Blitzstrom	kA
	I_n	Nennableitstrom	kA
	t	Dauer der Überspannung	s
	U	Spannung zwischen den Außenleitern	V
	U_c	Dauernde Betriebsspannung	V
	U_{L-PE}	Spannung zwischen Außen- und Schutzleiter	V
	U_p	Schutzpegel	kV
	U_{TOV}	zeitweilige Überspannung	V
	U_0	Spannung zwischen Außen- und Neutralleiter	V

VI. Abbildungsverzeichnis

ABB. 1: ERSTES BLITZABLEITEREXPERIMENT [1]	4
ABB. 2: GRAFISCHE DARSTELLUNG BLITZSTROM-PARAMETERWERTE (NACH PROF. K. BERGER) AUS [18]..	9
ABB. 3: ANALYTISCHE DARSTELLUNG DES BLITZSTROMES	11
ABB. 4: ZUSAMMENFASSUNG WIRKUNGEN EINES BLITZES NACH [7]	16
ABB. 5: KONFLIKT DES KONSTRUKTEURS	17
ABB. 6: BLITZSCHUTZNORM UND KOORDINIERUNG.....	18
ABB. 7: EVA-PRINZIP DER FAM NACH [9]	20
ABB. 8: ABSETZER MIT BANDSCHLEIFENWAGEN.....	21
ABB. 9: PLANUNG UND ANALYSE NACH [2].....	22
ABB. 10: DEMONSTRATION BLITZEINSCHLAG AM ABSETZER	28
ABB. 11: ERDERLÄNGE NACH [N3] AUS [4]	51
ABB. 12: STROMBELASTBARKEIT VON ERDERWERKSTOFFEN NACH [N6] AUS [4].....	56
ABB. 13: LEITERQUERSCHNITT IN ABHÄNGIGKEIT VON KURZSCHLUSSTROM UND ABSCHALTZEIT	57
ABB. 14: POTENTIALVERLAUF AN ERDERN [11].....	58
ABB. 15: HÖCHSTE ZULÄSSIGE BERÜHRUNGSSPANNUNG UTP FÜR BEGRENZTE STROMFLUSSDAUER NACH [N6] AUS [11].....	62
ABB. 16: VERGLEICH DES TRENNUNGSABSTANDES MIT UND OHNE NUTZUNG DER STAHLBEWEHRUNG	70
ABB. 17: LPZ-EINTEILUNG	72
ABB. 18: KOSTEN FÜR SCHUTZBESCHALTUNG AKTIVER ADERN IN RICHTUNG E-HAUS	78
ABB. 19: STICHVERDRAHTUNG	92
ABB. 20: V-VERDRAHTUNG	92
ABB. 21: 3+0.....	93
ABB. 22: 4+0.....	93
ABB. 23: 3+1.....	93
ABB. 24: ÜBERSICHT DES AUSWAHLMENÜS DER BLITZSCHUTZRICHTLINIE.....	104
ABB. 25: WARNSCHILD 1	105
ABB. 26: WARNSCHILD 2.....	106

VII. Tabellenverzeichnis

TAB. 1: ENDDURCHSCHLAGSTRECKE DES BLITZES NACH [3].....	8
TAB. 2: PARAMETER ERSTBLITZSTROM [N1].....	10
TAB. 3: PARAMETER FOLGEBLITZSTROM [N1].....	10
TAB. 4: PARAMETER BLITZLANGZEITSTROM [N1]	10
TAB. 5: KENNWERTE VON MATERIALIEN [3]	14
TAB. 6: ZUSAMMENFASSUNG BLITZPARAMETER [N1]	15
TAB. 7: BERECHNETE WERTE DER EINZELNEN RISIKOKOMPONENTEN [N2].....	23
TAB. 8: AUSLEGUNG VON FANGEINRICHTUNGEN UND ABLEITUNGEN NACH [N3].....	25
TAB. 9: AUSLEGUNGSKRITERIEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER BLITZSCHUTZKLASSE	27
TAB. 10: GESAMTWIDERSTANDSMESSUNG	43
TAB. 11: MESSUNG KDV.....	43
TAB. 12: MESSUNG SCHIENENFAHRWERK	44
TAB. 13: SPEZIFISCHER ERDWIDERSTAND NACH [4] UND [11].....	48
TAB. 14: MESSUNG DES SPEZIFISCHEN ERDWIDERSTANDES UND AUSBREITUNGSWIDERSTANDES.....	49
TAB. 15: WERKSTOFFKONSTANTEN NACH [N6] UND [11]	54
TAB. 16: RICHTWERTE FÜR NETZKURZSCHLUSSLEITUNGEN	55
TAB. 17: RICHTWERTE FÜR SPANNUNGSFAKTOREN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER NETZSPANNUNG	56
TAB. 18: MINDESTMAßE FÜR POTENTIALAUSGLEICHSLEITER FÜR BPA.....	65
TAB. 19: KOEFFIZIENTEN DES TRENNUNGSABSTANDES.....	68
TAB. 20: MASCHENWEITEN, SCHIRMFAKTOREN, ABSTÄNDE BEI NAH- UND DIREKTEINSCHLAG	76
TAB. 21: ERDUNGS- UND POTENTIALAUSGLEICHSMABNAHMEN ELEKTRISCHER BETRIEBSMITTEL UND TRASSIERUNG	81
TAB. 22: EINBAUORT, LEITERMINDESTQUERSCHNITT UND LEITUNGSLÄNGE.....	92
TAB. 23: ANSCHLUSSSCHEMA NACH [11].....	93
TAB. 24: MAXIMAL ZULÄSSIGE DAUERENDE BETRIEBSSPANNUNG NACH NETZFORM NACH [11].....	94
TAB. 25: NENNABLEITSTROM UND BLITZSTROM NACH ANSCHLUSSSCHEMA UND SCHALTUNGSVARIANTE NACH [11].....	94
TAB. 26: PRÜFINTERVALLE NACH [N3B3]	101
TAB. 27: ANWENDEN DER BLITZSCHUTZRICHTLINIE.....	106

VIII. Anhang

An1 Checkliste und Risikomanagement

AN1_TAB. 1:CHECKLISTE.....	II
AN1_ABB. 1: GLOBALE UND INSTALLATIONSPARAMETER	III
AN1_ABB. 2: BLITZSCHUTZPARAMETER	III
AN1_ABB. 3: KALKULATION UND RISIKOANALYSE	IV
AN1_ABB. 4: VERLUST VON MENSCHENLEBEN DETAILLIERT	IV
AN1_ABB. 5: WIRTSCHAFTLICHE VERLUSTE DETAILLIERT	V

An2 Darstellung Blitzeinschlag Absetzer und Bandschleifenwagen

AN2_ABB. 1: PYLON UND OBERBAU	VI
AN2_ABB. 2: KABELTROMMEL UND E-HAUS MIT KLIMAANLAGE	VI
AN2_ABB. 3: GESAMTANSICHT BLITZGEFÄHRDUNG ABSETZER (ST) MIT BANDSCHLEIFENWAGEN (TC)	VI
AN2_ABB. 4: ABWURFBAND	VI
AN2_ABB. 5: ÜBERGABESTATION TC AUF ST.....	VI
AN2_ABB. 6: KONSTRUKTIONSZEICHNUNG ABSETZER	VII

An3 Beweisführung Blitzeinschlag in Kabine

AN3_ABB. 1: KABINE VON OBEN	VIII
AN3_ABB. 2: KABINE VON HINTEN.....	VIII
AN3_ABB. 3: KABINE VON VORN	VIII

An4 Schutzwinkel Absetzer und Bandschleifenwagen

AN4_ABB. 1: SCHUTZWINKEL ABSETZER UND BANDSCHLEIFENWAGEN.....	IX
AN4_ABB. 2: BLITZSCHUTZZONEN BANDSCHLEIFENWAGEN UND ABSETZER.....	X

An5 Ersatzschaltbild Absetzer für Funktionspotentialausgleich Widerstände

AN5_ABB. 1: TECHNISCHES DATENBLATT ABSETZER MANNHEIM	XI
AN5_ABB. 2: KDV VOLLANSICHT.....	XI
AN5_ABB. 3: KDV DETAILANSICHT.....	XII
AN5_ABB. 4: ERSATZSCHALTBILD ABSETZER FÜR FUNKTIONSPOTENTIALAUSGLEICH	XIII
AN5_ABB. 5: MESSPUNKTE AN KUGELDREHVERBINDUNG	XIV
AN5_ABB. 6: ERSATZSCHALTBILD SCHIENENFAHRWERK.....	XIV

An6 Anordnung der Klemmverbindung

AN6_ABB. 1: SCHEMATISCHER AUFBAU ZUM MESSEN UND ÜBERBRÜCKEN EINER STECKVERBINDUNG	XV
AN6_ABB. 2: KLEMMVERBINDUNG	XV

An7 Bestimmung spezifischen Erdwiderstand

AN7_ABB. 1: ELEKTRODENANORDNUNG NACH WENNER FÜR FLUKE 1625.....	XVI
AN7_ABB. 2: MESSPUNKTE: SPEZIFISCHER ERDWIDERSTAND	XVI

An8 Bestimmung Ausbreitungswiderstand

AN8_ABB. 1: MESSPUNKTE: AUSBREITUNGSWIDERSTAND FÜR FLUKE 1625.....	XVII
--	------

An9 Spannungsverlauf am Absetzer

AN9_ABB. 1: SPANNUNGSVERLAUF AM ABSETZER NACH METHODE DES HALBKUGELERDERS XVIII

An10 Darstellung Kraftwerksgebäude

AN10_ABB. 1: RECHTS XIX

AN10_ABB. 2: VORDERSEITE XIX

AN10_ABB. 3: LINKS XIX

AN10_ABB. 4: RÜCKSEITE XIX

AN10_ABB. 5: DRAUFSICHT XIX

AN10_ABB. 6: BLITZSCHUTZ ENTSTAUBUNG XIX

AN10_ABB. 7: ANLAGENÜBERSICHT XIX

AN10_ABB. 8: DACHAUFBAU XX

AN10_ABB. 9: ENTSTAUBUNG XX

AN10_ABB. 10: BLITZSCHUTZZONEN AM TURM XXI

AN10_ABB. 11: NUTZEN DER BEWEHRUNG ALS ABLEITUNG XXI

An11 Darstellung eines Erdungsmaschennetzes

AN11_ABB. 1: ERDUNGSMASCHENNETZ MIT MW 20M X 20M UND 30M X 30M XXII

An12 Untersuchung an Blitzschutzerdungsanlagen

AN12_ABB. 1: AUSZUG DISSERTATION SUCHANEK [13] XXIII

An13 Projektdarstellung

AN13_ABB. 1: SCHIFFSENTLADER XXIV

AN13_ABB. 2: QUADRANTEN SCHIFFSBELADER XXV

AN13_ABB. 3: ABSETZER MIT PRINZIPIENDARSTELLUNG DER SCHUTZBESCHALTUNG XXVI

AN13_ABB. 4: KRATZER IN FRONT- UND SEITENANSICHT XXVI

An14 Positionierung von Fangeinrichtungen auf Dächern

AN14_ABB. 1: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG ZUM DURCHHANG EINER BLITZKUGEL XXVII

An15 Potentialausgleich und Nutzen der Bewehrung

AN15_ABB. 1: UNTERGESCHOSS MIT FUNDAMENTERDER NACH AN10 XXVIII

AN15_ABB. 2: OBERGESCHOSS MIT EINGEFÜHRTEN FÖRDERBÄNDERN NACH AN10 XXIX

Anhang 1: Risikomanagement

Checkliste

Eingabeparameter		Symbol	Wert			Bemerkung
Global						Absetzer An2_Abb. 6
Erdblitzdichte		N_G	20			Positive Schätzung
Maße der baulichen Anlage		$L; W; H$	$L = 120m; W = 16m; H = 23m$			$H_p = H$
Standortfaktor		C_D	1			freistehend
Versorgungsleitungen			EV	IT	TK	
Installationsfaktor		C_I	1	1		
Leitungstypfaktor		C_T	0,2	1		EV hat Transformator MS/NS
Umgebungsfaktor		C_E	1	1		Land
Leitungslänge		L_L	100	100		von BSW zu Absetzer
Art der Leitung		X_{Typ}	a	b		MS- & Profibus-Kabel
Schirmung der Leitung		X_{Shield}	b	b		L-Schirm $R \leq \frac{20\Omega}{km}$
Spannungsfestigkeit des Systems		U_W	1	1		unbekannt → $U_W \leq 1kV$
Verbundene Anlage						
Lagefaktor der verbundenen Anlage		C_{DJ}	1	1		freistehend
Maße der verbundenen Anlage		$L_j; W_j; H_j$	$L_j = 45m; W_j = 6m; H_j = 12,5m$			$H_{pj} = H_j$
Zeiten, Werte und Kosten			E-Haus	Anlage	allgemein	Zonennamen
Aufenthaltszeit		t_Z	8760	8760	8760	Personen in der Zone
Anzahl		n_Z	3	1	3	Personen in der Zone
Wert Gebäude		c_b			3.000.000€	
Wert Inhalt		c_c			300.000€	
Wert System		c_s			300.000€	
Verluste						
Menschenleben L1	(S1)	L_{TA}	0,01	0,01	0,01	Standardwerte außen
	(S3)	L_{TU}	0,01	0,01	0,01	Standardwerte innen
		L_F	0,02	0,02	0,02	Industrie
		h_Z	0	0	0	keine Panikgefahr
Wirtschaftlich L4	(S1)	L_{TA}	0,01	0,01	0,01	Standardwerte außen
	(S3)	L_{TU}	0,01	0,01	0,01	Standardwerte innen
		L_F	0,5	0,5	0,5	Industrie
		L_0	0,01	0,01	0,01	Industrie

Schutz		Wert			Bemerkung
Äußere räumliche Schirmung von LPZ 1	K_{S1}	0			Blechschild $t_B \geq 0,1mm$
Blitzschutzsystem	P_B	0,1			LPS nach BSK III
Potentialausgleich am Gebäudeeintritt	P_{EB}	0,5			Ja, LPL III zu IV
Schirmung, Erdung Isolation	X_{SYS}	1			Innere Systeme durch Schaltschrank geschirmt
		E-Haus	Anlage	allgemein	
Innere räumliche Schirmung von LPZ 2	K_{S2}	0	1	1	E-Haus Schaltschrank
Kontaktwiderstand des Bodens	r_t	0,0001	0,1	0,1	E-Haus $R = 10 \dots 100k\Omega$ Anlage $R \leq 1k\Omega$
Schutz gegen Schock (S1)	P_{TA}	0	0,01	0,01	Warnhinweise: Aufstieg Pylon Potentialsteuerung: Laufbühnen
Schutz gegen Schock (S3)	P_{TU}	0	0,01	0,01	Elektrische Isolation und Verlegung im und am Stahlbau (PA)
Feuerrisiko	r_f	0,001	0	0,001	Geringes Feuerrisiko
Brandschutzmaßnahmen	r_p	0,5	0,5	0,5	Feuerlöscher
Akzeptiertes Risiko		Normvorgabe		Vorgabe durch Betreiber	
Verlust von Menschenleben L1	R_t	10^{-5}		?	

An1_Tab. 1:Checkliste

Risikoauswertung mit [N2B2]

DIN EN 62305-2 Bbl 2 (VDE 0185-305-2 Bbl 2)

Risiko-Management für bauliche Anlagen

RAS v5.04

1	Sprache	Deutsch	Hinweise zur Benutzung Eingabeformulare öffnen: Grüne Taste anklicken Eingabedaten: (gelb) Ausgabedaten: (blau)												
A) Allgemein															
2	Objekt											Datum	31.01.2014		
3	Global	Blitz	Bauliche Anlage					Finanzen			Tolerierbares Risiko RT x1E-5				
		NG	CD	L	W	H	HP	Unit	i	a	m	L1	L2	L3	L4
		5,00	1	120	16	23		EUR	4,0%	5,0%	1,0%	1	100	10	10
4	Leitung	Zahl	Leitung							Angeschlossene Anlagen					
		2	CI	CT	CE	LL	Xtyp	Xshd	Uw	CDJ	LJ	WJ	HJ	HPJ	
	EV	1	1	0,2	1	100	a	b	1	1	45	6	12,5		
	Daten	2	0,5	1	1	100	b	b	1	1	45	6	12,5		
				1	1	1	0	a	a	1	1				
			1	1	1	0	a	a	1	1					
5	Zone	Zahl	L1: Personen		L2: Nutzer		L3: Werte (EUR)			L4: Werte (EUR)					
		2	tz	nz	nz	cb	cc	Total	ca	cb	cc	cs	Total		
	E-Haus	Z1	8.760	1							1,000E+05	2,000E+05	3,000E+05		
	Anlage	Z2	8.760	3						3,000E+06	2,000E+05	1,000E+05	3,300E+06		
	Total		4						3,000E+06	3,000E+05	3,000E+05	3,600E+06			
6	Verlust		L1			L2		L3	L4						
			LTA	LTU	LF	hz	LO	LF	LO	LF	LTA	LTU	LF	LO	
	E-Haus	Z1		0,01	0,02	1					0,01	0,01	0,5	0,01	
	Anlage	Z2	0,01	0,01	0,02	1					0,01	0,01	0,5	0,01	
						1									
					1										
7	Flächen	Flächen (Graphisches Verfahren)				Leitung		1=EV	2=Daten						
		Bauliche Anlage						AL*							
		AD*						AI*							
		AM*						ADJ*							

An1_Abb. 1: globale und Installationsparameter

B) Blitzschutz																		
			Ohne Schutz				Mit Schutz				Kosten (EUR)							
8	Global	Global Faktoren			Leitung Faktoren													
		KS1	PB	PEB	Xsys				Xcon									
		1	1	1	1	2	0	0	0	0	1	2	a	a	a	a		
			0,1	0,05	1	1	0	0	a	a	a	a						
		10000																
9	Zone	9 = Zone						10 = Leitung										
		KS2	rt	PTA	PTU	rf	rp	1=EV		2=Daten		KS3	PSPD	KS3	PSPD	KS3	PSPD	
		1	1	1	1	1	1	KS3	PSPD	KS3	PSPD	KS3	PSPD	KS3	PSPD	KS3	PSPD	
		E-Haus	1	1	0	0	0	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		Anlage	1	1	0,01	0,01	0	0,5	0,0001	0,05	0,0001	0,05	1	1	1	1	1	1
							1000	1500	1000	1500								
10		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

An1_Abb. 2: Blitzschutzparameter

11	Finanzen	L4: Nutzen	Werte (EUR)		Jährliche Werte (EUR)			Ersparnis
			ct	CP	CL	CRL	CPM	
			3.600.000	15.000	456.696	272	1.500	454.924

12	Gefährliche Ereignisse	Faktoren				Flächen		Gefährliche Ereignisse				
		Bauliche Anlage		KS4	PLD	PLI	AD	AM	N1	N2	N3	N4
		Leitung					35.645	921.398				
		1	#NAME?	1	1	AL	AI	ADJ	NL	NI	NDJ	0,013
2	#NAME?	1	1	4.000	400.000	8.513	0,004	0,400	0,009	0,053	1,000	
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

13	Ergebnis	Risiko x1E-5								Ergebnis			
		RA	RU	RB	RV	RC	RM	RW	RZ	R	RT		
Ohne Schutz	L1	133,669	16,269	356,451	130,154					636,5	1	R>RT	Mehr Schutz nötig !!!
	L2									100	10		
	L3									10	10		
	L4			8911,28	3253,86	14,85	383,92	5,42	116,67	12686,0	10	10	
Mit Schutz	L1	0,134								0,1	1	R<=RT	Schutz ausreichend
	L2									100	10		
	L3									10	10		
	L4					1,448		0,271	5,633	7,6	10	R<=RT	

An1_Abb. 3: Kalkulation und Risikoanalyse

L1 - Verlust von Menschenleben				>>> Tolerierbares Risiko <<<			
Verlust	Z1	Z2					
LTA		0,01	0,01	Verletzung von Lebewesen (S1)	Tab C.2		
LTU	0,01		0,01	Verletzung von Lebewesen (S3)	Tab C.2		
LF	0,02	0,02	0,02	Physikalische Schäden	Tab C.2		
hz	1	1		Faktor für spezielles Risiko	Tab C.6		
LO				Ausfälle von el. Systemen	Tab C.2		

Risiko		Ohne Schutz							
x1E-5	RA	RU	RB	RV	RC	RM	RW	RZ	Total
Z1		16,27	89,11	32,54					137,92
Z2	133,67		267,34	97,62					498,62
Total	133,67	16,27	356,45	130,15	0,00	0,00	0,00	0,00	636,54

L1 - Verlust von Menschenleben		R	RT	Ergebnis - Tolerierbares Risiko	
Ohne Schutz		636,54	1,00	R>RT	Mehr Schutz nötig !!!

Risiko		Mit Schutz							
x1E-5	RA	RU	RB	RV	RC	RM	RW	RZ	Total
Z1									
Z2	0,13								0,13
Total	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13

L1 - Verlust von Menschenleben		R	RT	Ergebnis - Tolerierbares Risiko	
Mit Schutz		0,13	1,00	R<=RT	Schutz ausreichend

An1_Abb. 4: Verlust von Menschenleben detailliert

L4 - Wirtschaftliche Verluste	>>> Nutzen <<<
--------------------------------------	---

Verlust	Z1	Z2			
LTA		0,01	0,01		Verletzung von Lebewesen (S1) Tab C.12
LTU	0,01		0,01		Verletzung von Lebewesen (S3) Tab C.12
LF	0,5	0,5	0,5		Physikalische Schäden Tab C.12
LO	0,01	0,01	0,01		Ausfälle von el. Systemen Tab C.12

Risiko		Ohne Schutz							
x1E-5	RA	RU	RB	RV	RC	RM	RW	RZ	Total
Z1			742,61	271,15	9,90	255,94	3,62	77,78	1361,00
Z2			8168,67	2982,70	4,95	127,97	1,81	38,89	11325,00
Total	0,00	0,00	8911,28	3253,86	14,85	383,92	5,42	116,67	12686,00

L4 - Wirtschaftliche Verluste	R	RT		
Ohne Schutz	12686,00	10,00		

Risiko		Mit Schutz							
x1E-5	RA	RU	RB	RV	RC	RM	RW	RZ	Total
Z1					0,97		0,18	3,89	5,04
Z2					0,48		0,09	1,94	2,52
Total	0,00	0,00	0,00	0,00	1,45	0,00	0,27	5,83	7,55

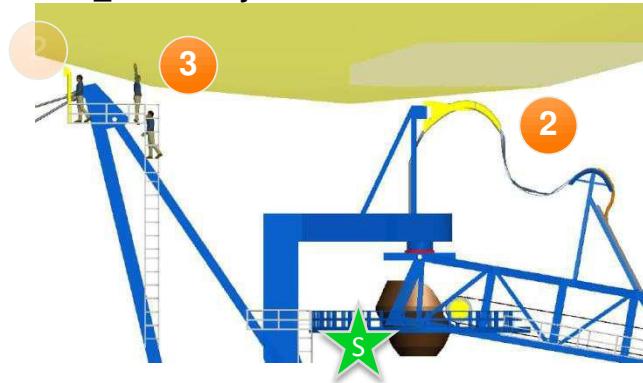
L4 - Wirtschaftliche Verluste	R	RT		
Mit Schutz	7,55	10,00		

Währungseinheit	EUR	Ergebnis - Nutzen
CP	15.000	Gesamtkosten: Blitzschutz
CL	456.696	Jährliche Kosten: Verlust (Ohne Schutz) (D.2)
CRL	272	Jährliche Kosten: Verlust (Mit Schutz) (D.4)
CPM	1.500	Jährliche Kosten: Blitzschutz (D.5)
SM	454.924	Ersparnis (D.6)

An1_Abb. 5: Wirtschaftliche Verluste detailliert

Anhang 2: Darstellung Blitzschlag Absetzer und Bandschleifenwagen

An2_Abb. 1: Pylon und Oberbau



Lebensgefahr:
 1. BE in Menschen
 2. BE in Aufstieg oder Scheinwerfer

Überspannungsschäden
 1. BE in Versorgungsleitung
 2. BE in Scheinwerfer

An2_Abb. 2: Kabeltrommel und E-Haus mit Klimaanlage



Überspannungsschäden
 1. BE in Klimaanlage

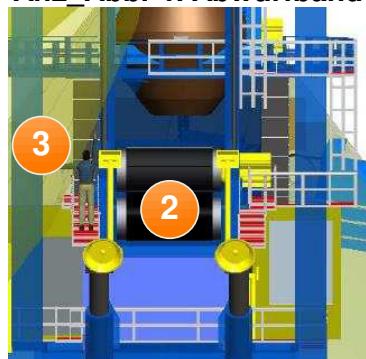
Physikalische Schäden
 1. BE in E-Haus
 2. BE in Klimaanlage

Lebensgefahr:
 1. BE in Menschen
 2. BE in Aufstieg und Laufgang

An2_Abb. 3: Gesamtansicht Blitzgefährdung Absetzer (ST) mit Bandschleifenwagen (TC)



An2_Abb. 4: Abwurfband



Lebensgefahr:
 1. BE in Menschen
 2. Schrittspannung und Berührungsspannung
 BE in Aufstieg und Scheinwerfer

Überspannungsschaden
 1. BE in Scheinwerfer
 2. BE in Ultraschallsensor

An2_Abb. 5: Übergabestation TC auf ST

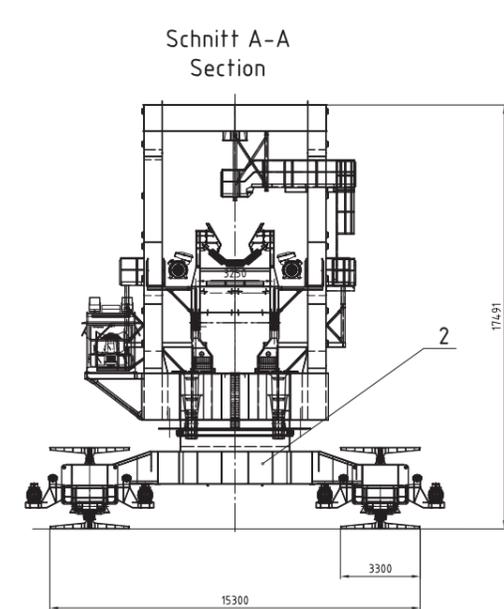
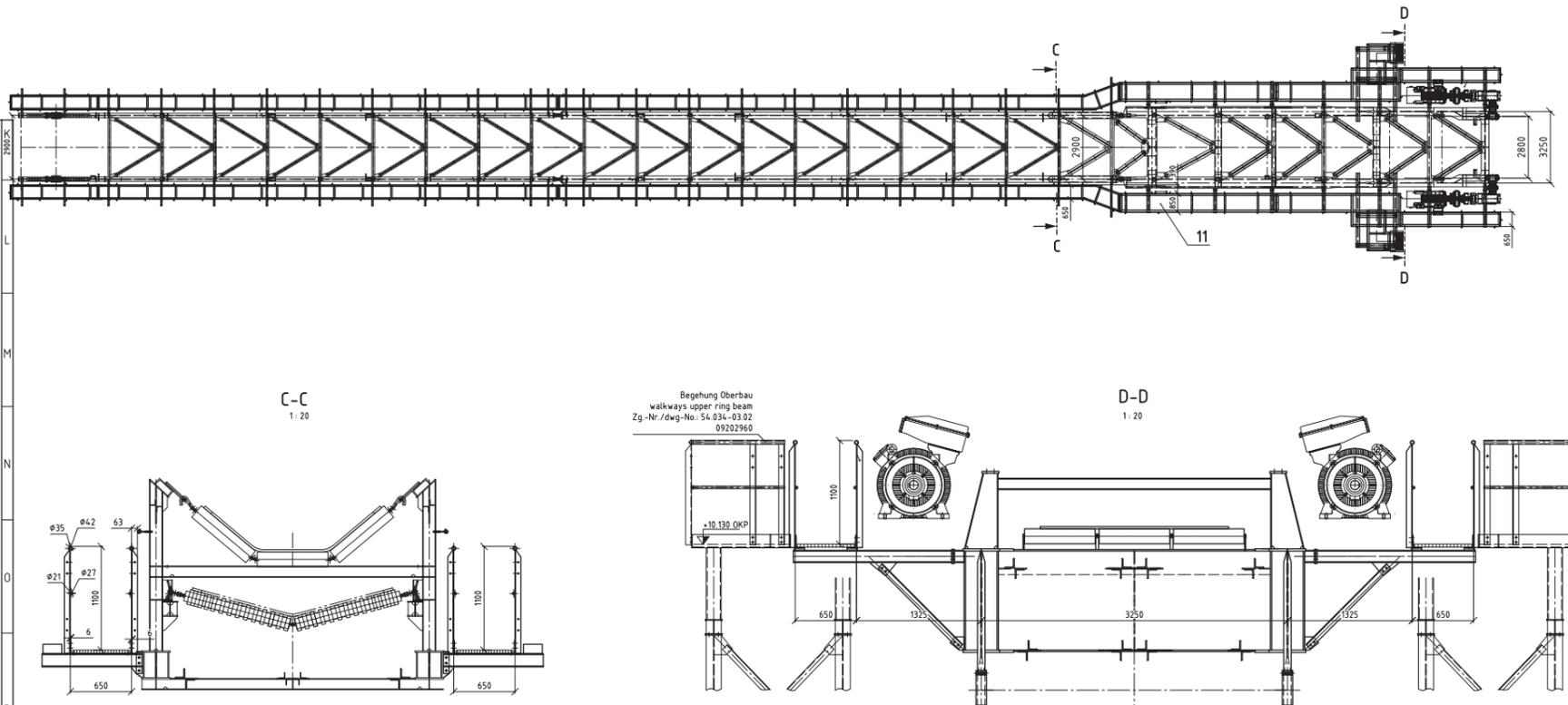
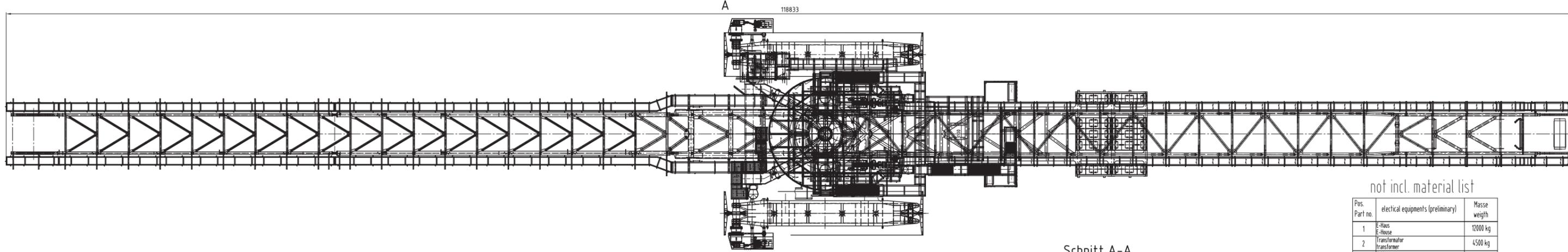
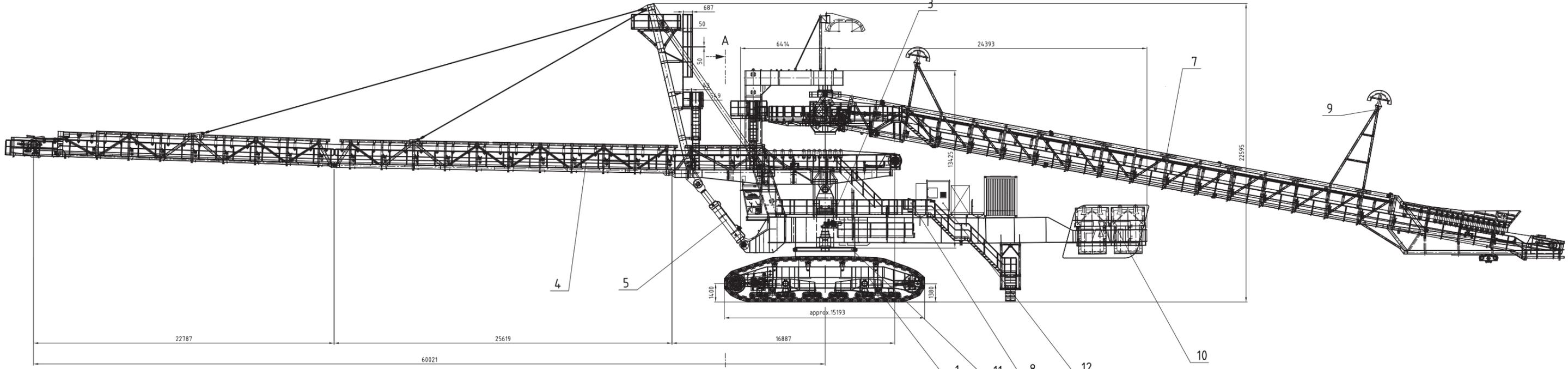


Überspannungsschaden
 1. BE in Energieversorgungskabel
 2. BE in Bandmotor

Kabelabspannvorrichtung bildet Schutzwinkel aus
 1. Mensch und Maschine in diesem Bereich vor direkten BE geschützt

Legende:

- Blitzkugel BSK III
- Lauffläche für Menschen
- E-Technik -Verlagerung
- Schutzbereich für Mensch und Maschine
- EA Beschaffenheit Erdungsanlage?
- Blitzkugel BSK I
- Stahlbau als FE und AE
- Energieversorgungskabel
- Blitzwirkungen (Kap.2 und Abbildung 4)
- SW E-Haus im Schutzwinkel?



not incl. material list

Pos. Part no.	electrical equipments (preliminary)	Masse weigh
1	E-Haus E-House	12000 kg
2	Transformator transformer	4500 kg
3	Kabine cabin	1200 kg
4	Sonstige Kabel, Feldgeräte etc. other E-Equipments	2000 kg
Summe / total		19700kg

Pos. Part no.	Material- no.	Zeichn.- no.	Bezeichnung	Grösse	Norm	Werkstoff	Einzel- Masse	Gesamt- Masse	Bemerkungen
45	2						0.000		
43	2						0.000		
42	1	0920540	S1834-04-02.16				375.000	375.000	
37	1	0920541	S1834-04-02.11				570.000	570.000	
31	1						0.000		
30	2						0.000		
29	2						0.000		
25	2						0.000		
24	2						0.000		
23	2						0.000		
21	8						0.000		
19	2						0.000		
18	1						0.000		
17	2						0.000		
16	2						0.000		
15	1						0.000		
14	2						0.000		
13	1						0.000		
12	1	0920552	Wsp. für Galle				2570.000	2570.000	
11	1	0920500	Verlängerung Lagerbohrung support roller bearing				590.000	590.000	
10	1	0920196	Reibschleife roller main unit				4500.000	4500.000	
9	1	0920753	2. Ein. C. Felle second electrical equipment				5000.000	5000.000	
8	1	0920500	Verlängerung Schleifrolle roller support roller				9040.000	9040.000	
7	1	0920546	2. Ein. Kabinenschleifer second roller carriage				11655.000	11655.000	
6	8						0.000		
5	1	0920391	Werkze. Abfänger tool work system spreader				29000.000	29000.000	
4	1	0920734	2. Ein. Kabinenschleifer second roller carriage				125730.000	125730.000	
3	1	0920793	Wsp. für Galle roller support roller				262702.000	262702.000	
2	1	0920293	Werkze. Abfänger tool work system spreader				55000.000	55000.000	
1	1	0920583	Wsp. für Galle roller support roller				24500.000	24500.000	

System 12100 spreader 51.034

Aenderungen sind nur in CAD erlaubt!
Make Modifications only by CAD!

Massstab/Scale 1:50
Masse/Weight 838143 kg

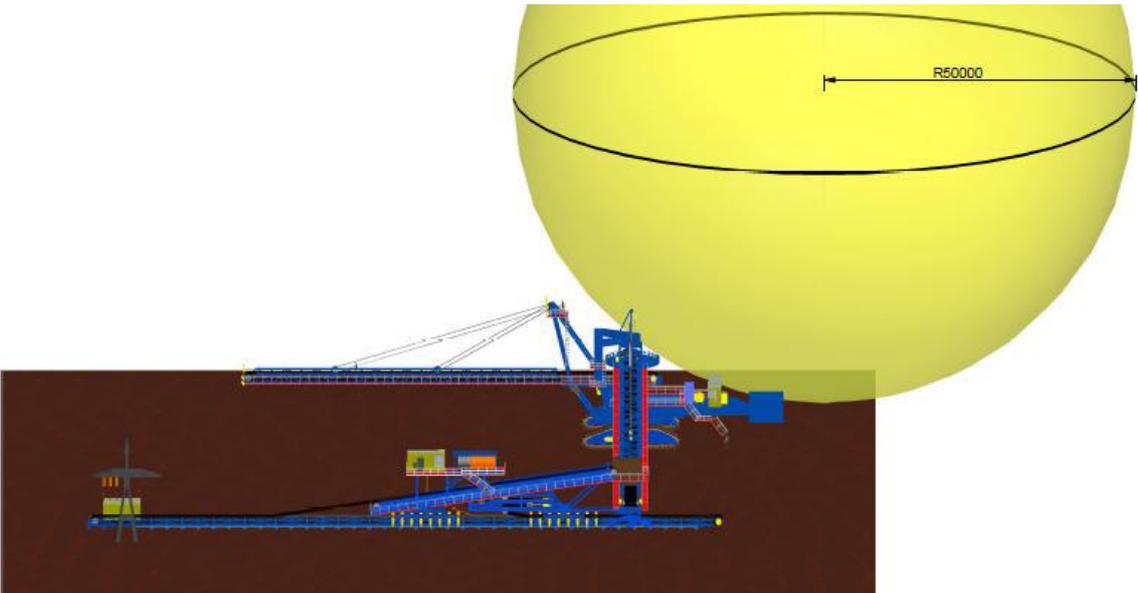
AGL
Angren/ Rep. Uzbekistan

Absetzer Hauptgerät
spreader main unit

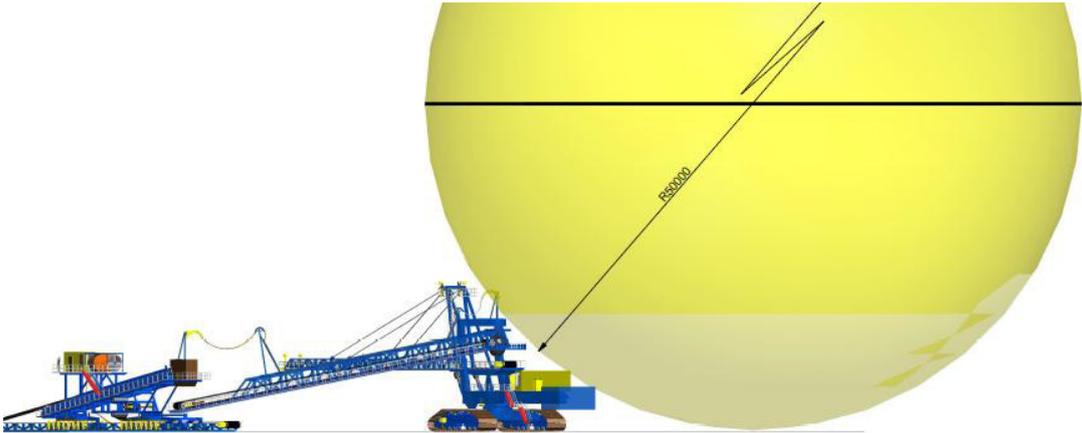
09217136

FAM
Magdeburger Förderanlagen
und Baumaschinen GmbH

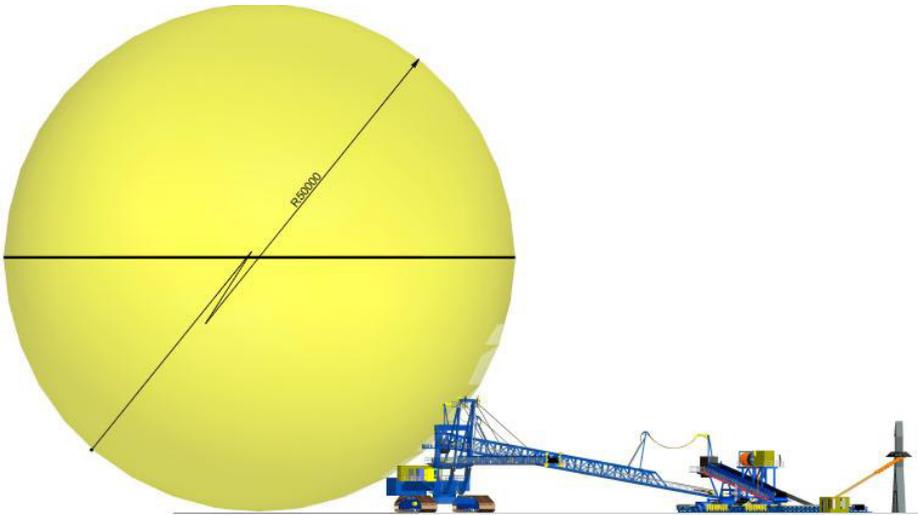
Anhang 3: Beweisführung Blitzeinschlag in E-Haus



An3_Abb. 1: Kabine von oben

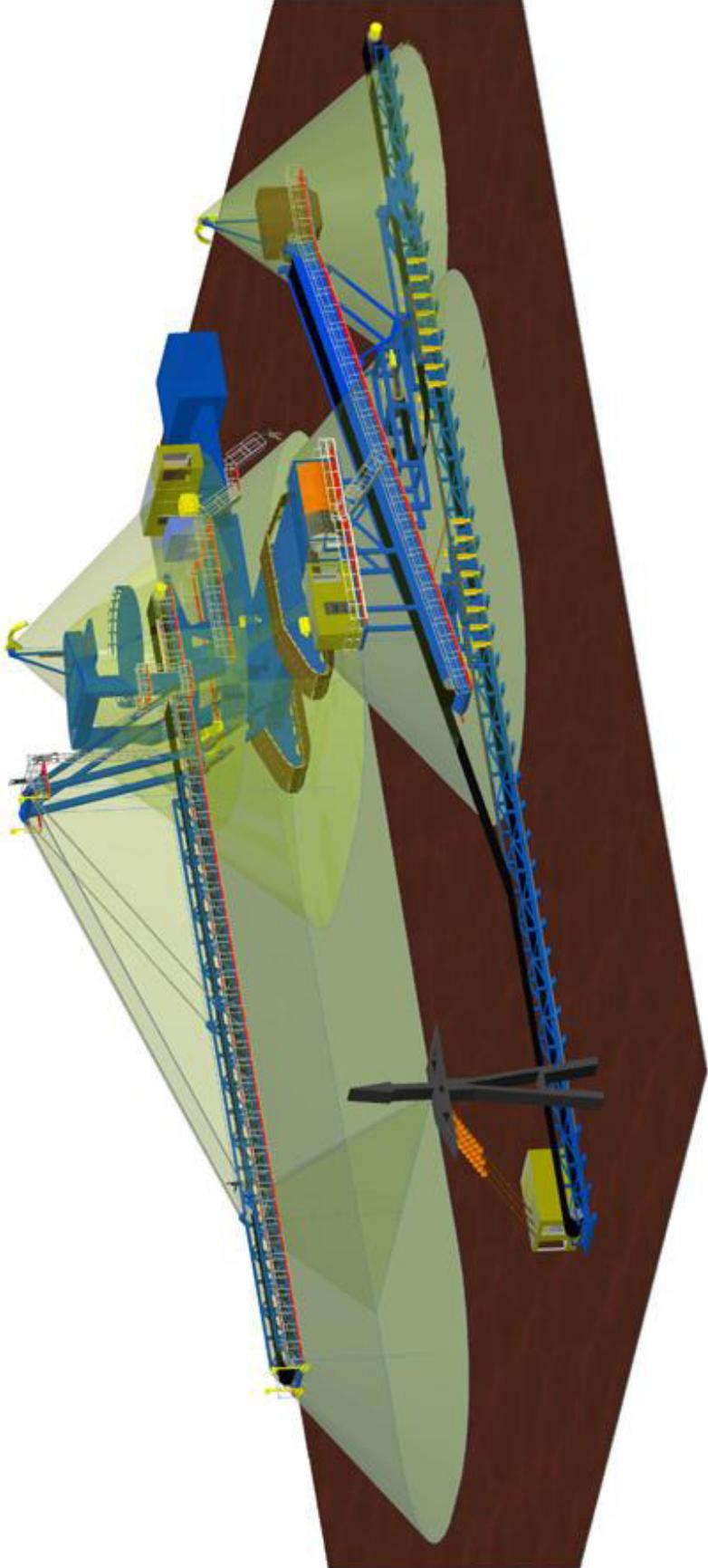


An3_Abb. 2: Kabine von hinten

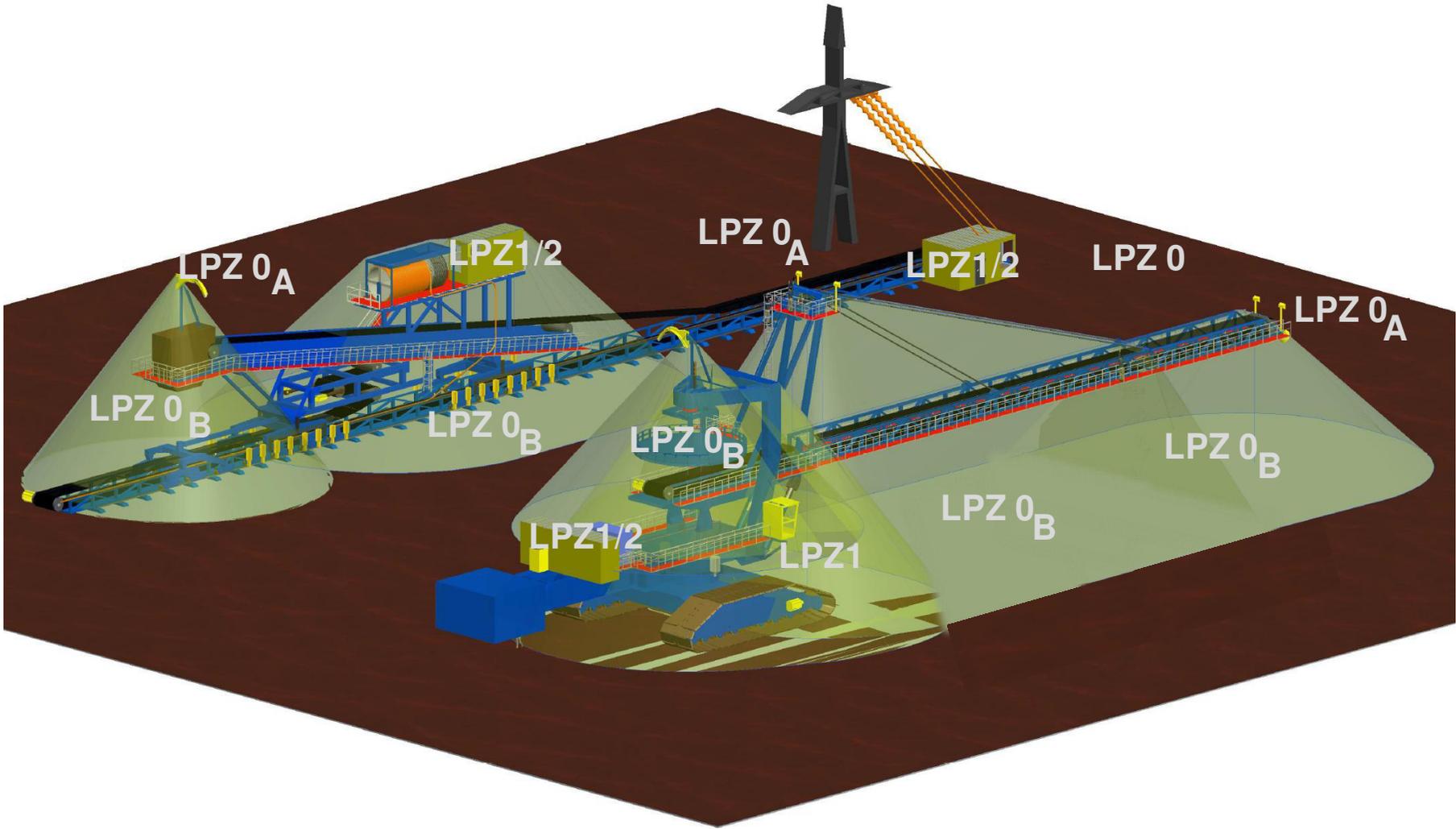


An3_Abb. 3: Kabine von vorn

Anhang 4: Schutzwinkel und Blitzschutzzonen der mobilen Geräte

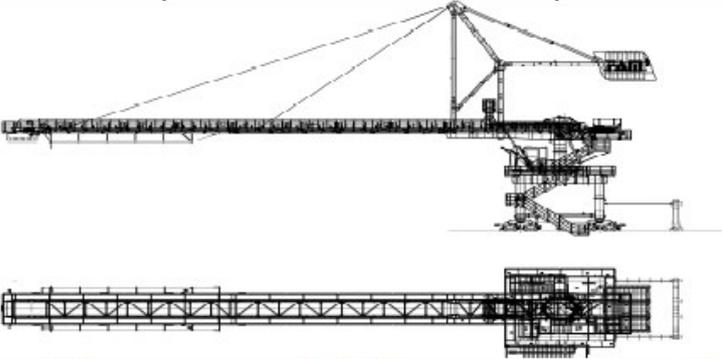


An4_Abb. 1: Schutzwinkel Absetzer und Bandschleifenwagen

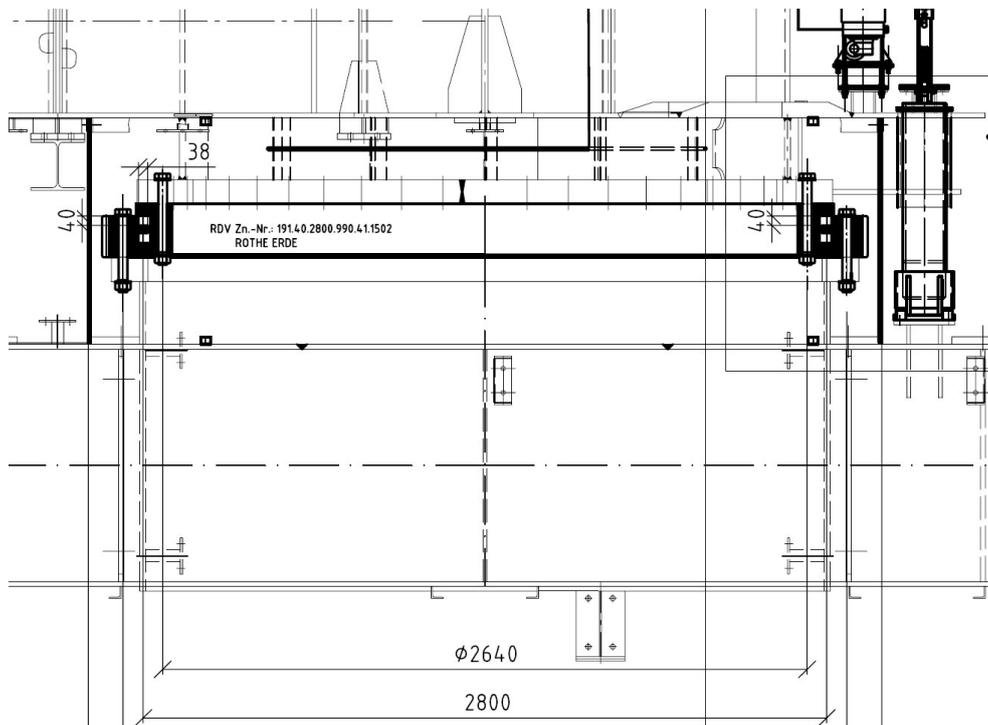


An4_Abb. 2: Blitzschutzonen Bandschleifenwagen und Absetzer

Anhang 5: Funktionspotentialausgleich

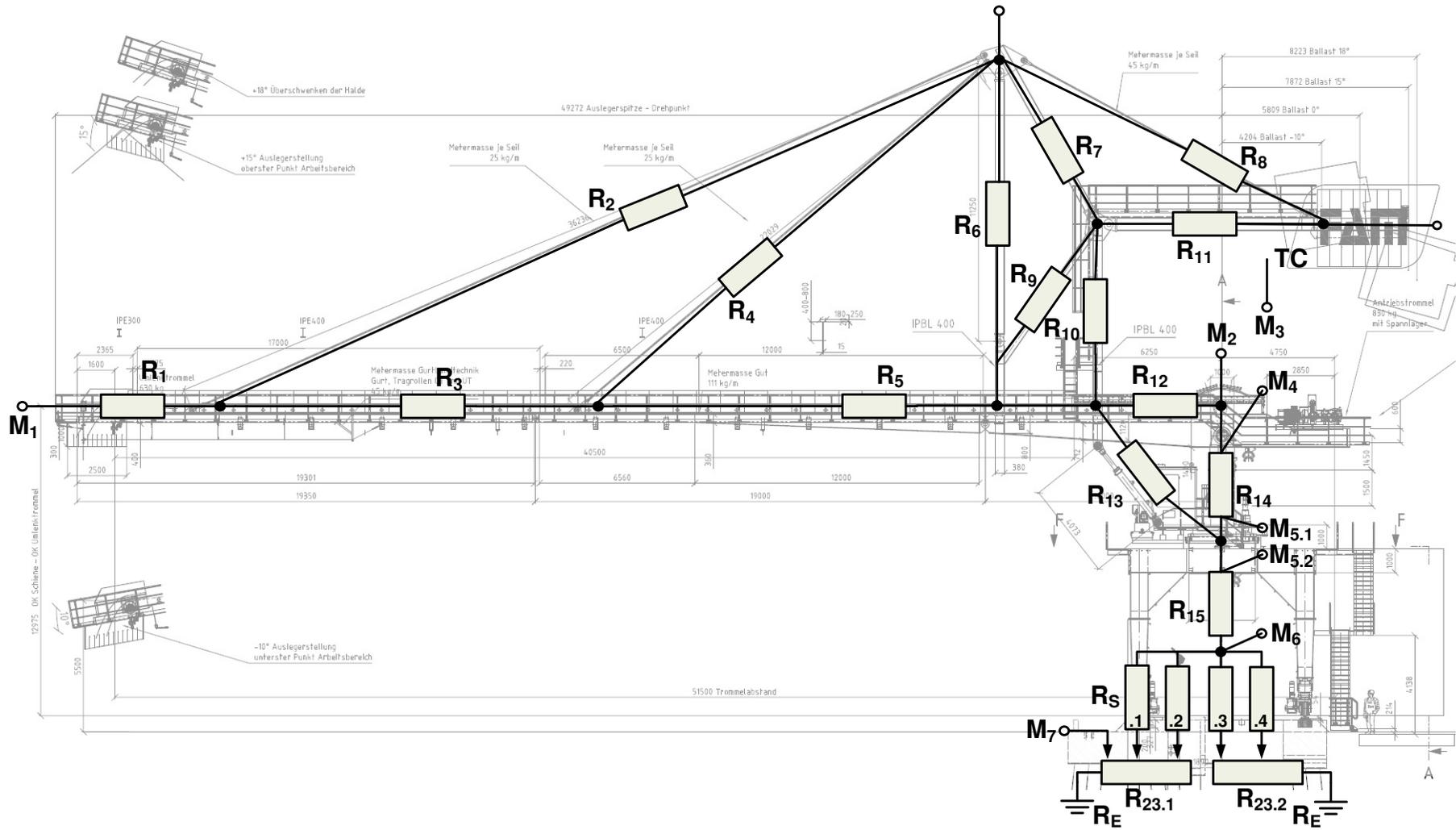
Auftrag:	112929	Technisches Datenblatt		 Magdeburger Förderanlagen und Baumaschinen
Kunde:	Mannheim	420.54		
Baujahr:	2013	Bandabsetzer ST 1100.47		
				
Land:	BRD		Baugruppe	Masse
Förderleistung:	1100,0	[t/h]	1 Fahrwerk Festseite	11800
Fördergut:	Kohle		2 Fahrwerk Losseite	11800
Körnung:	0-50 (85%) 50-200(15%)	[mm]	3 Portal Bandabsetzer	53000
Schüttdichte:	0,8	[t/m ³]	4 L-Rahmen	17300
Schüttwinkel:	35-40	[°]	5 Gegengewichtsausleger	12000
			6 KDV Oberbau	5800
Stahlbauprofile:	DIN		7 Absetzer Stahlbau	28200
Berechnungs- vorschriften	ISO,EN		8 Absetzer Begehung	11800
Schutzgrad:			9 Gurtbandförderer	15100
			10 Pylon	21800
			11 Hydraulikanlage	3580
			12 E-Teile Bandabsetzer	2000
			13 Beschilderung	2870
			14 Ballast	129000
			15 Schienen Bandabsetzer	
			16 Gruben Abdeckung	
Summer der Massen in Kg:				325850

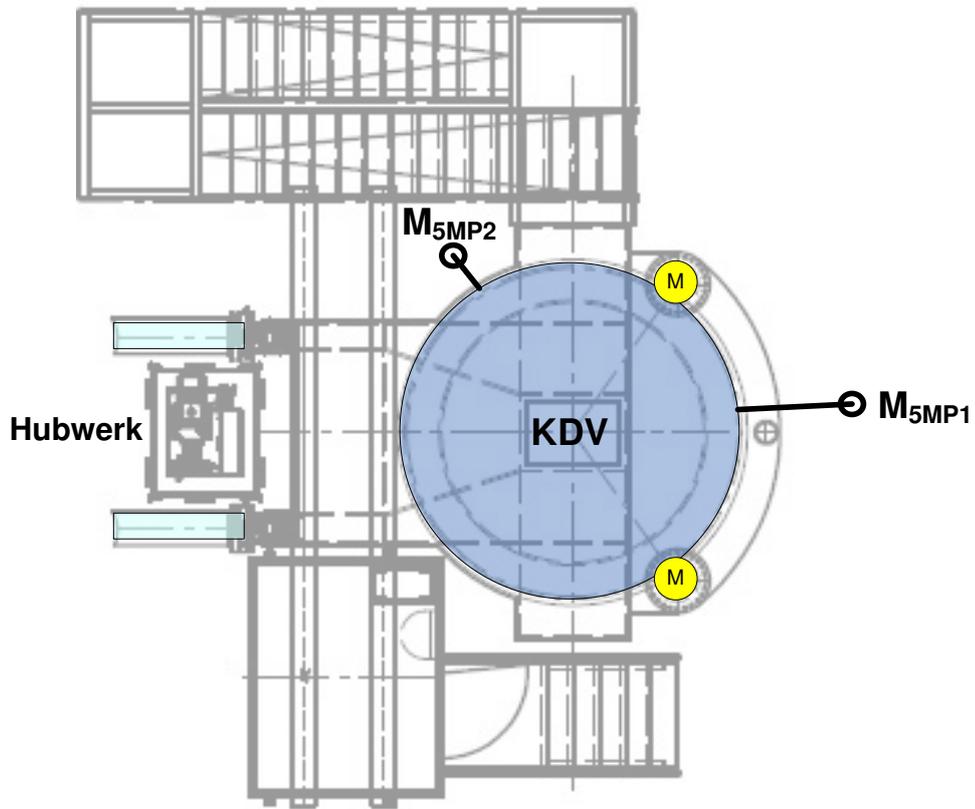
An5_Abb. 1: Technisches Datenblatt Absetzer Mannheim



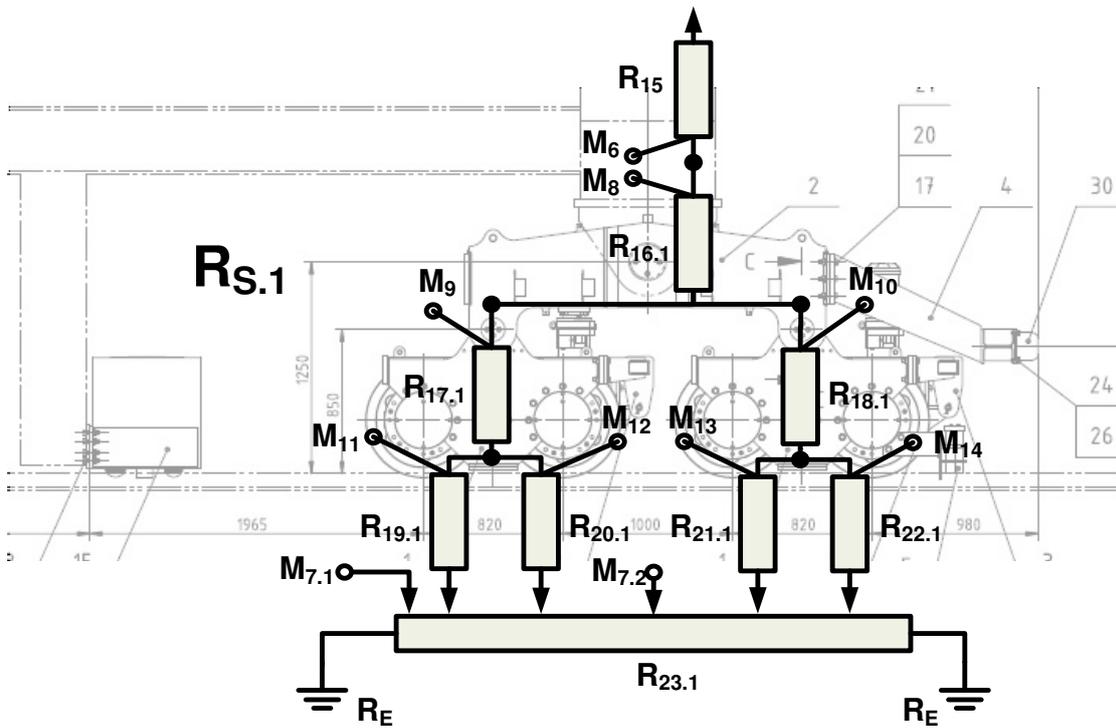
An5_Abb. 2: KDV Vollansicht

Ans_Abb. 4: Ersatzschaltbild Absetzer für Funktionspotentialausgleich



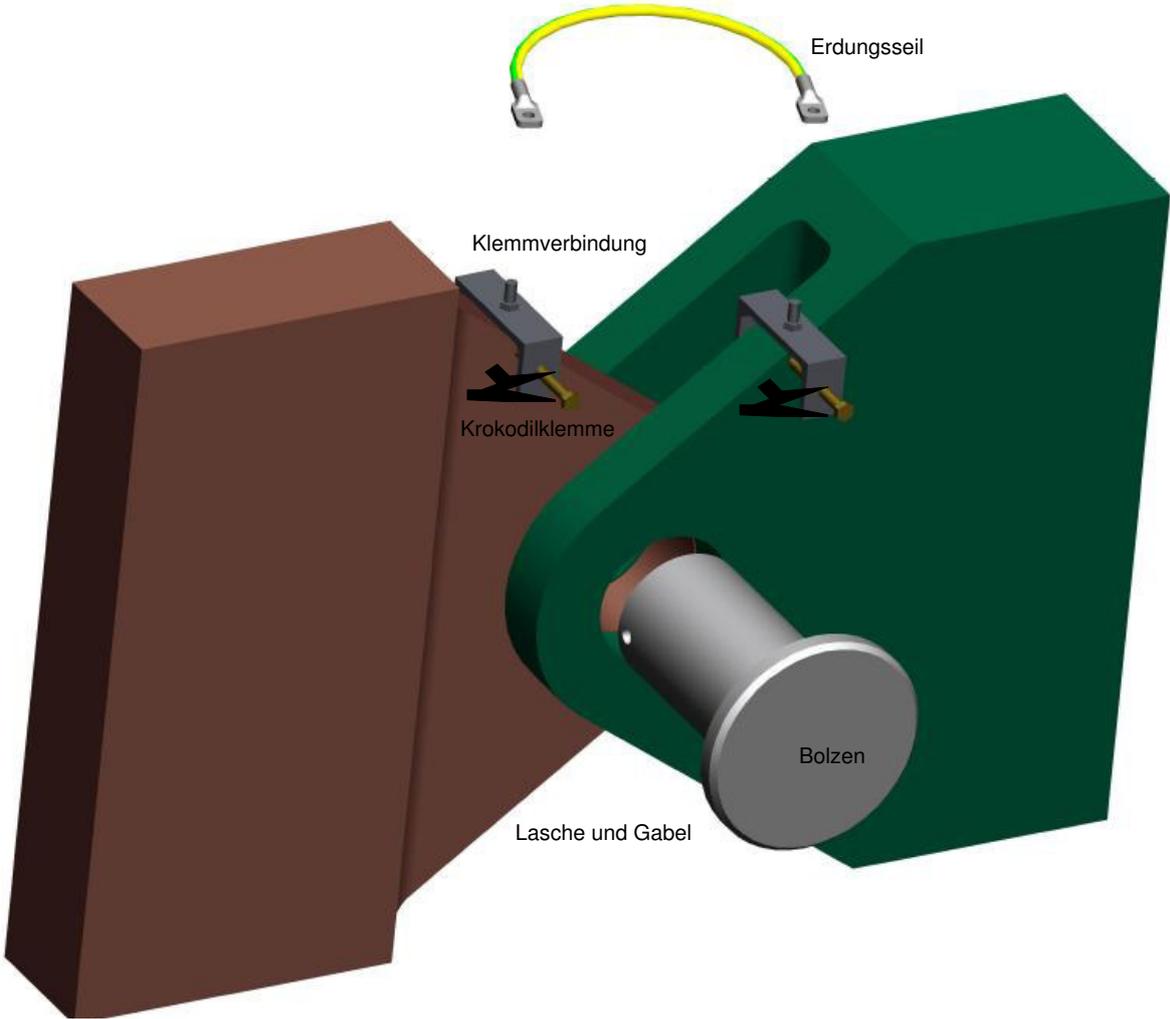


An5_Abb. 5: Messpunkte an Kugeldrehverbindung

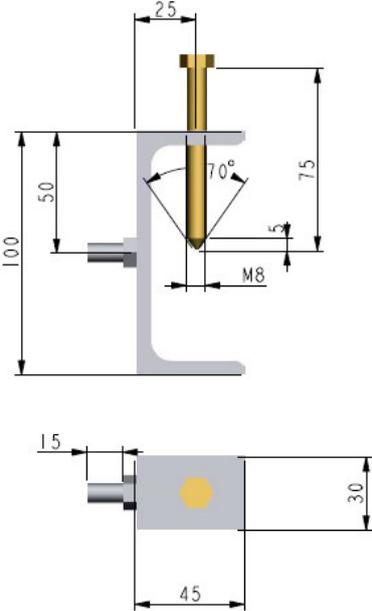


An5_Abb. 6: Ersatzschaltbild Schienenfahrwerk

Anhang 6: Anordnung Klemmverbindung

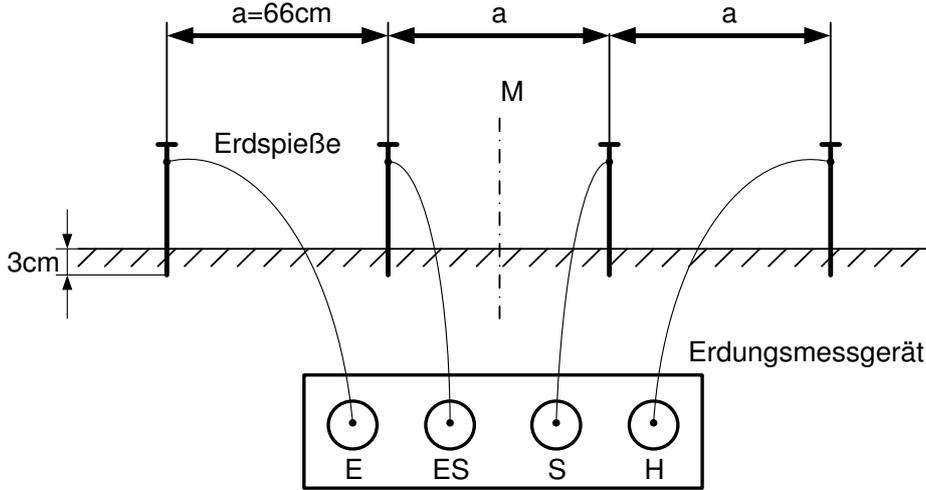


An6_Abb. 1: Schematischer Aufbau zum Messen und Überbrücken einer Steckverbindung

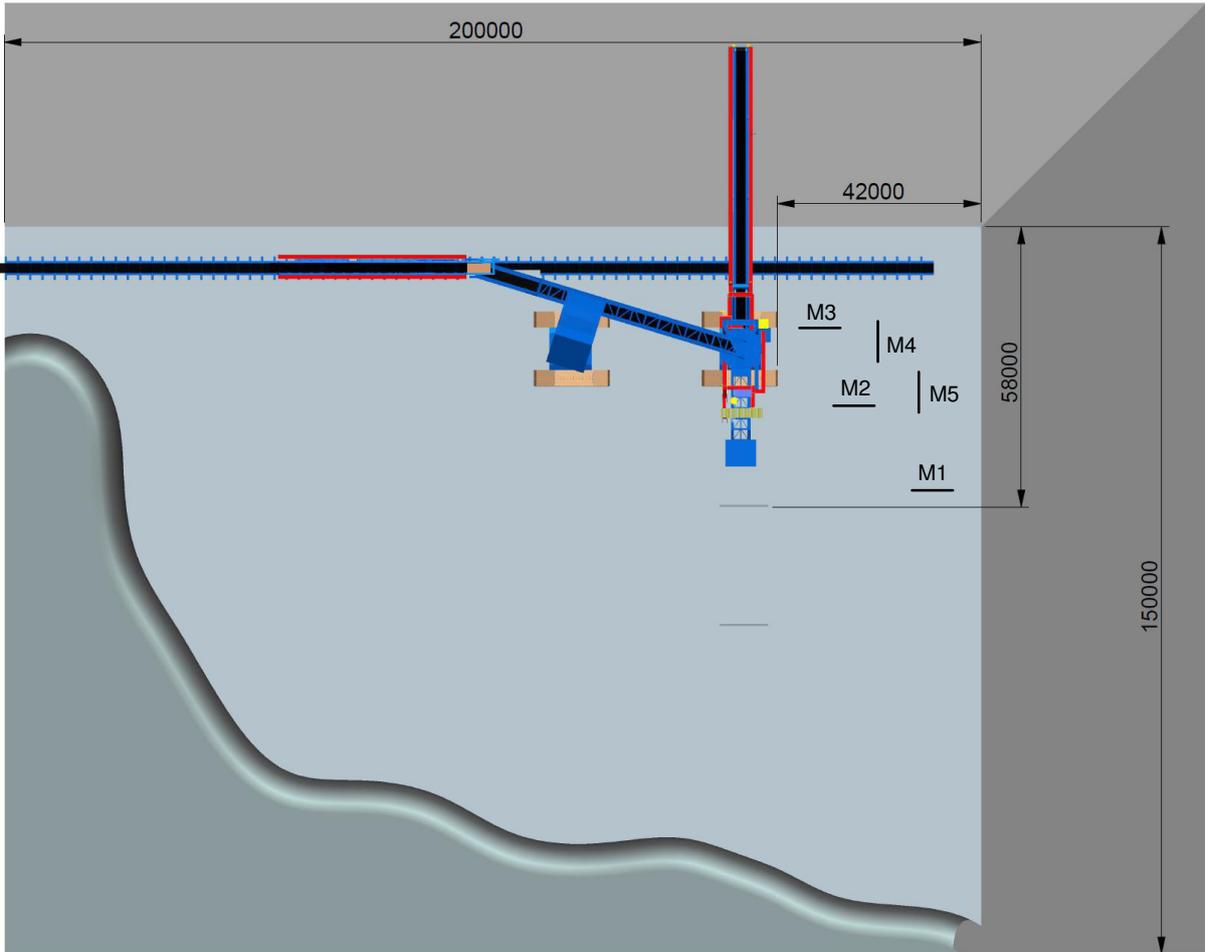


An6_Abb. 2: Klemmverbindung

Anhang 7: Bestimmung spezifischer Erdwiderstand nach Wenner

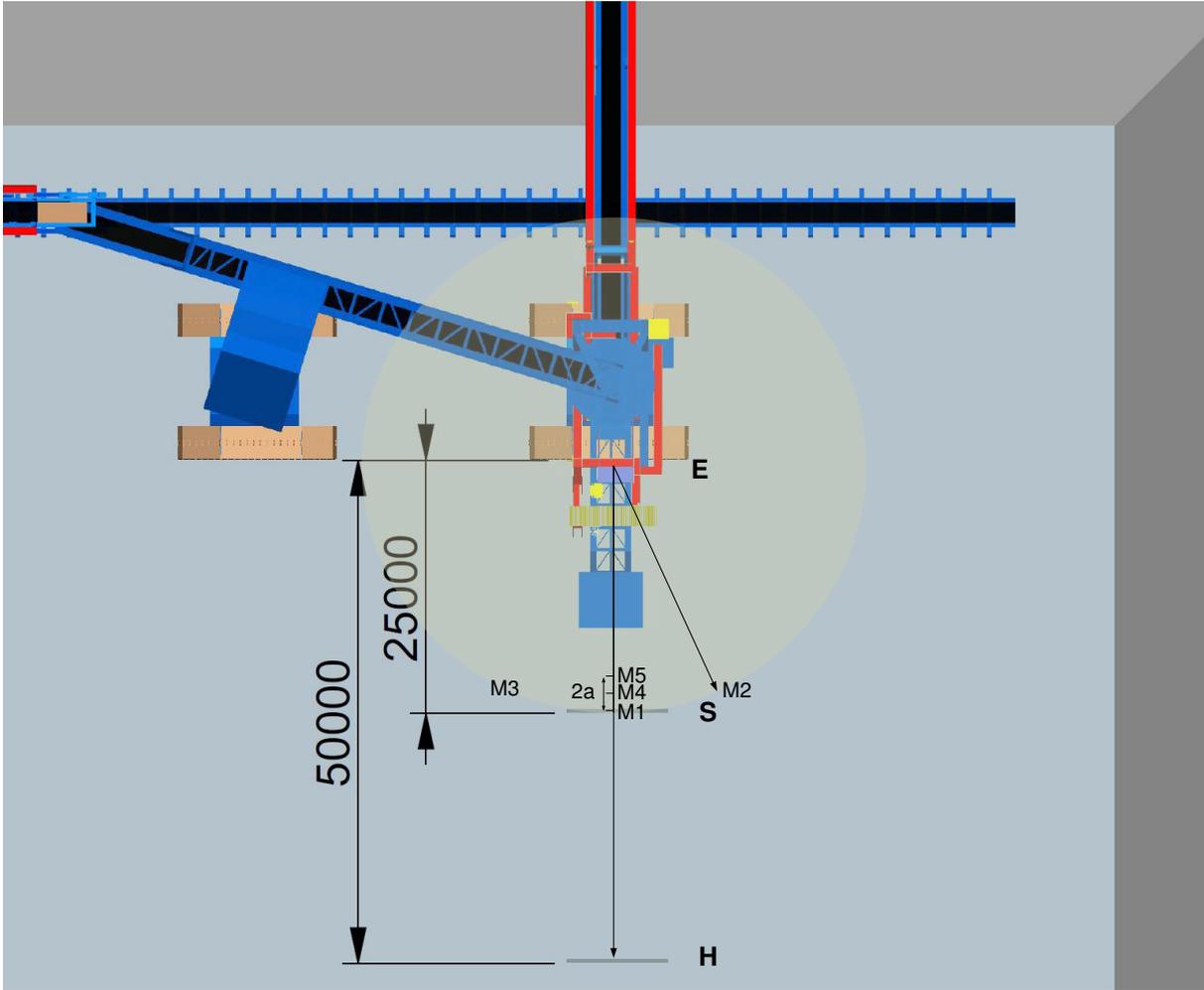


An7_Abb. 1: Elektrodenanordnung nach Wenner für Fluke 1625



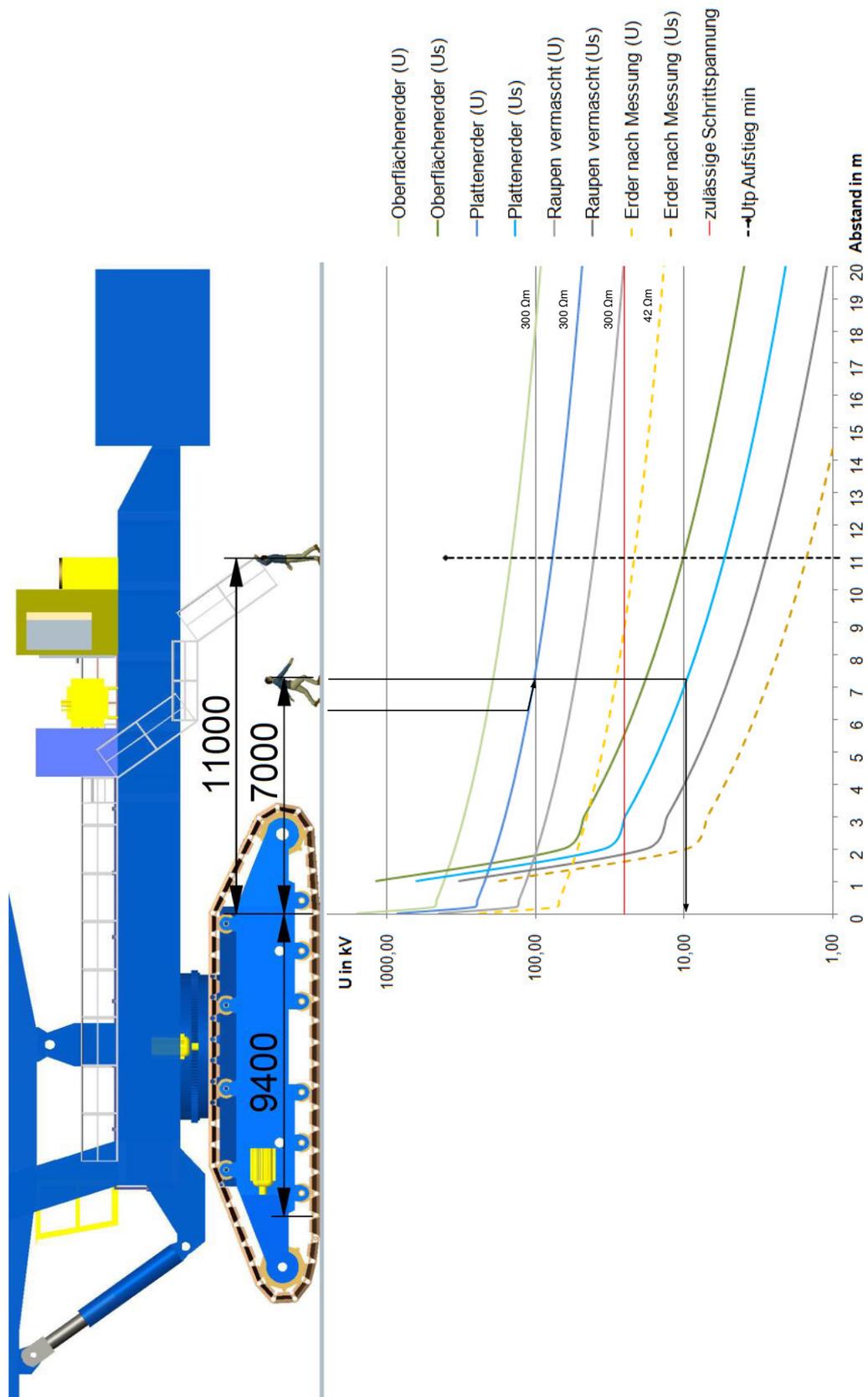
An7_Abb. 2: Messpunkte: spezifischer Erdwiderstand

Anhang 8: Bestimmung Ausbreitungswiderstand



An8_Abb. 1: Messpunkte: Ausbreitungswiderstand für Fluke 1625

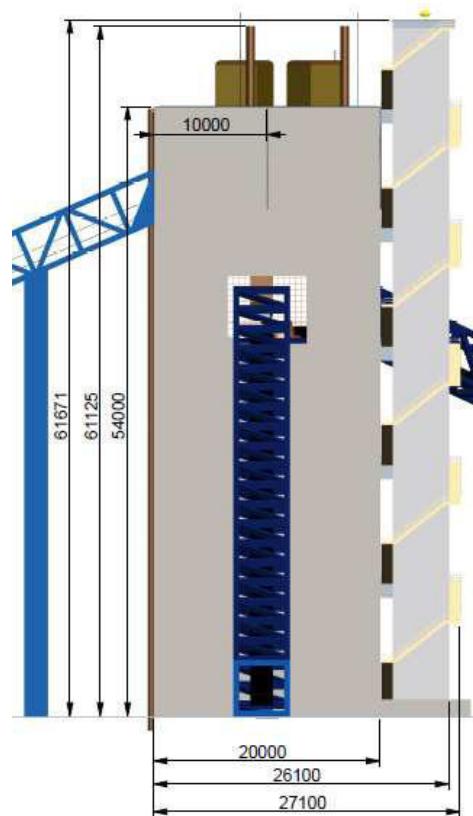
Anhang 9: Spannungsverlauf am Absetzer



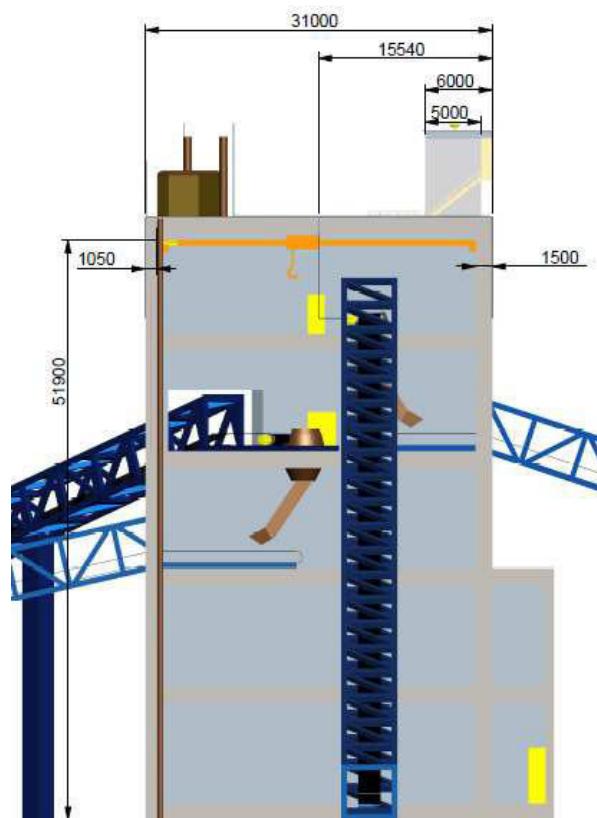
An9_Abb. 1: Spannungsverlauf am Absetzer nach Methode des Halbkugelerders

Anhang 10: Darstellung eines Kraftwerkgebäudes

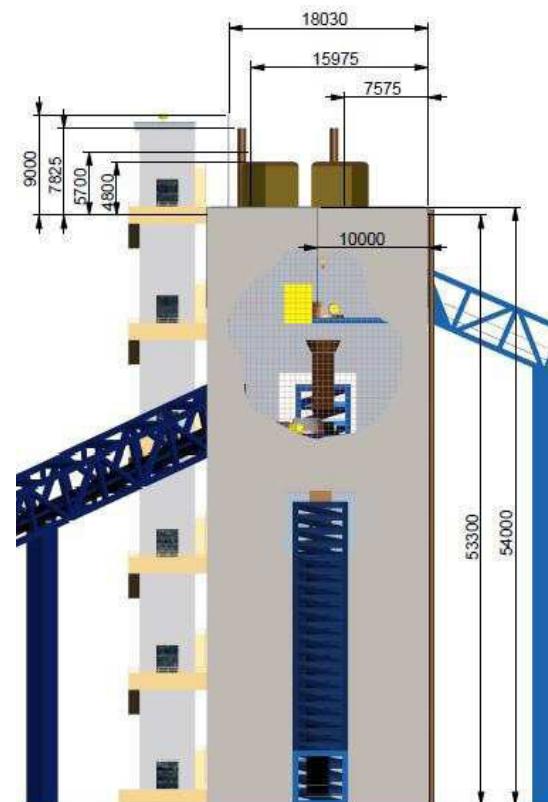
An10_Abb. 1: Rechts



An10_Abb. 2: Vorderseite



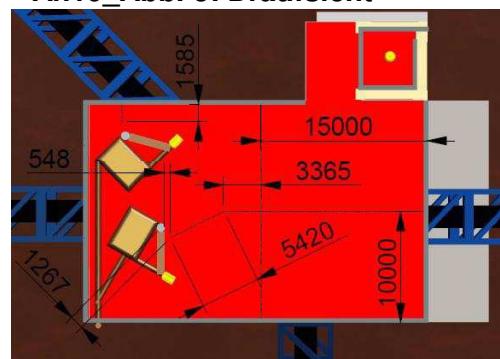
An10_Abb. 3: Links



An10_Abb. 4: Rückseite



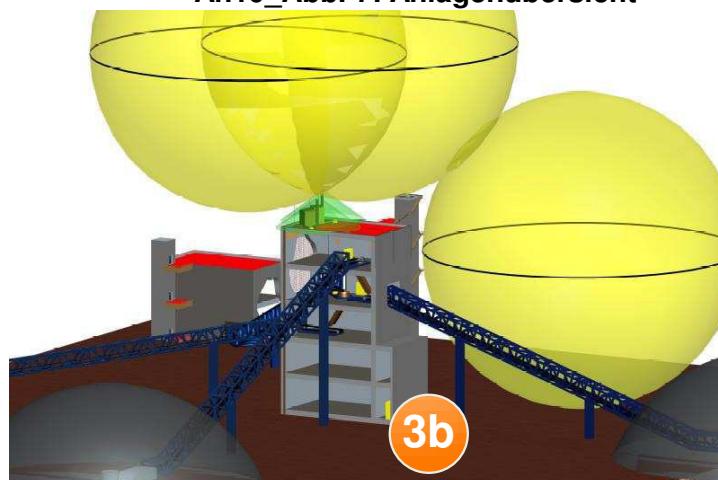
An10_Abb. 5: Draufsicht



An10_Abb. 6: Blitzschutz Entstaubung

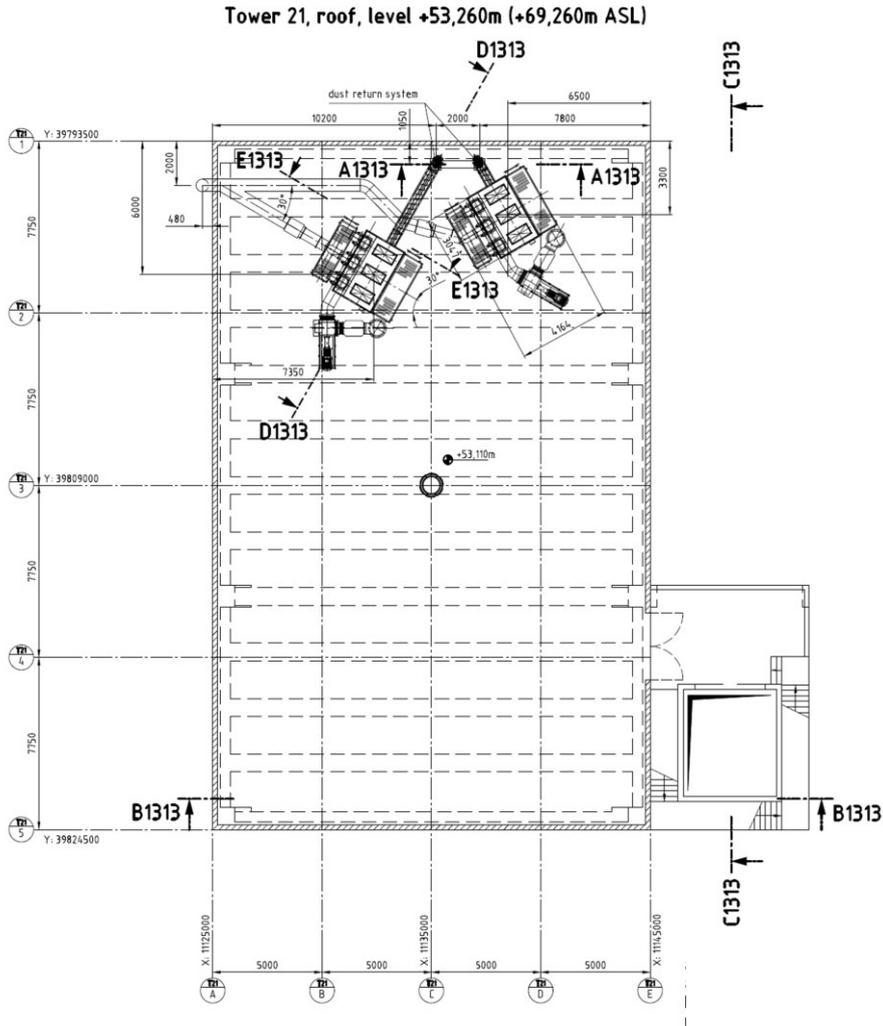


An10_Abb. 7: Anlagenübersicht



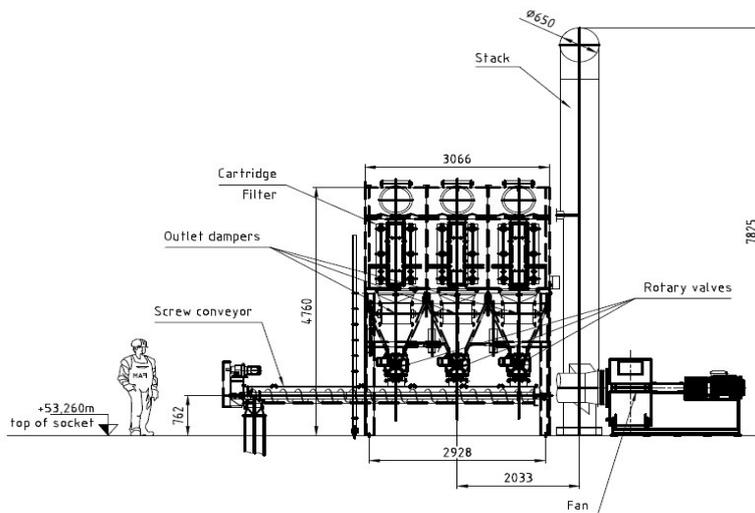
Legende:

-  Blitzkugel BSK III
-  Lauffläche für Menschen
-  Stahlbau als FE und AE
-  E-Technik -Verlagerung
-  Schutzbereich für Mensch und Maschine
-  Blitzwirkungen (Kap.2 und Abbildung 4)

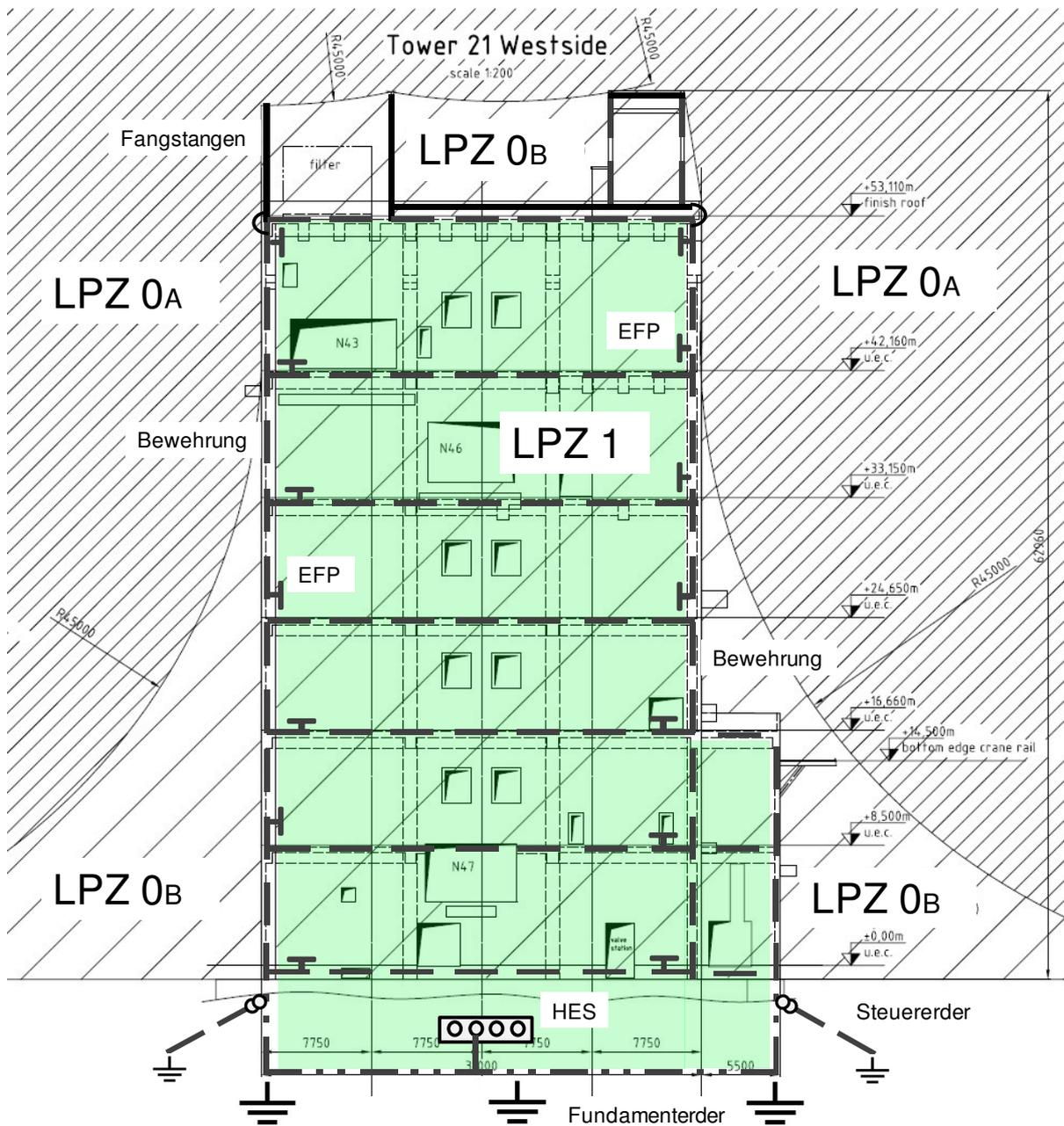


An10_Abb. 8: Dachaufbau

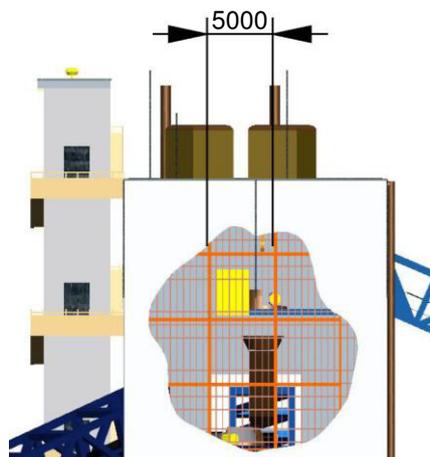
Schnitt D1313-D1313
Section
 scale 1:50



An10_Abb. 9: Entstaubung

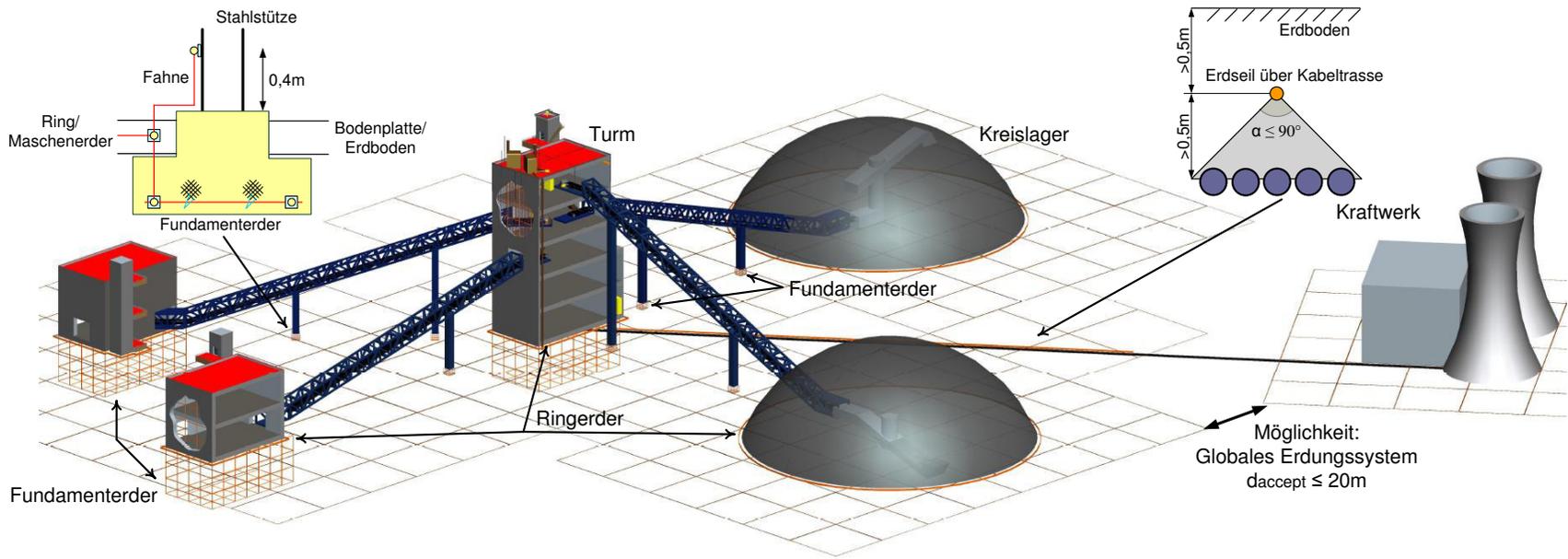


An10_Abb. 10: Blitzschutzonen am Turm



An10_Abb. 11: Nutzen der Bewehrung als Ableitung

Anhang 11 : Darstellung eines Erdungsmaschennetz

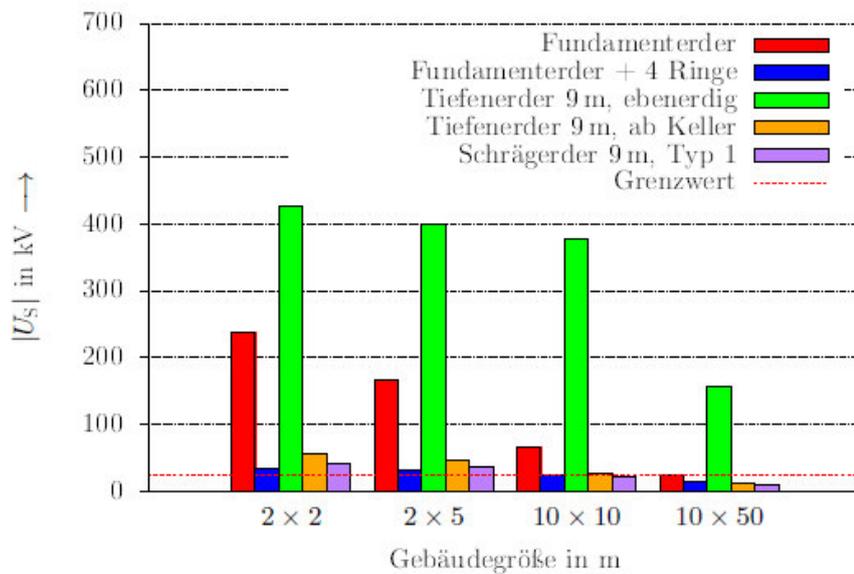


An11_Abb. 1 : Erdungsmaschennetz mit MW 20m x 20m und 30m x 30m

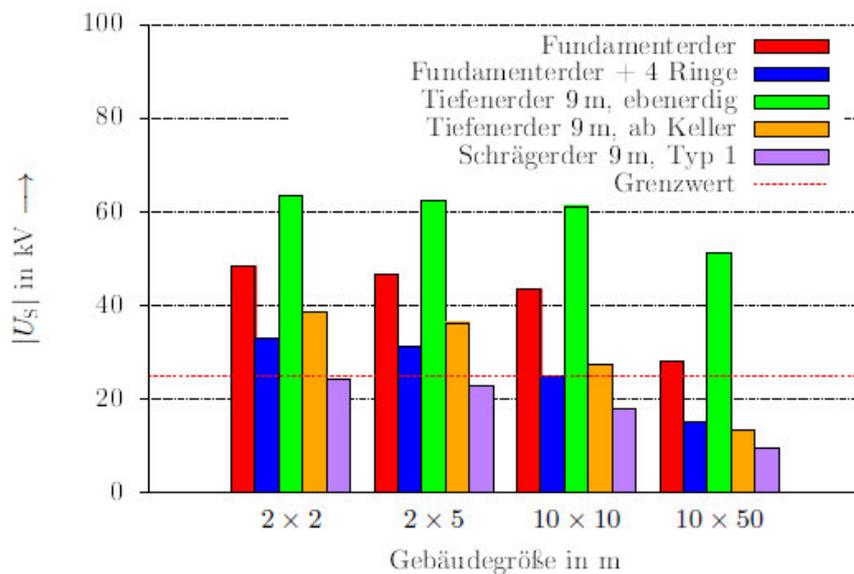
Anhang 12: Untersuchung an Blitzschutzerdungsanlagen

Die Abbildung An12_1 zeigt einen Auszug aus der Dissertation von Suchanek:

„Die Untersuchung an Blitzschutzerdungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Schrittspannung“ [13].



(a) linearer Boden ($\rho_{\text{Erde}} = 1000 \Omega\text{m}$)

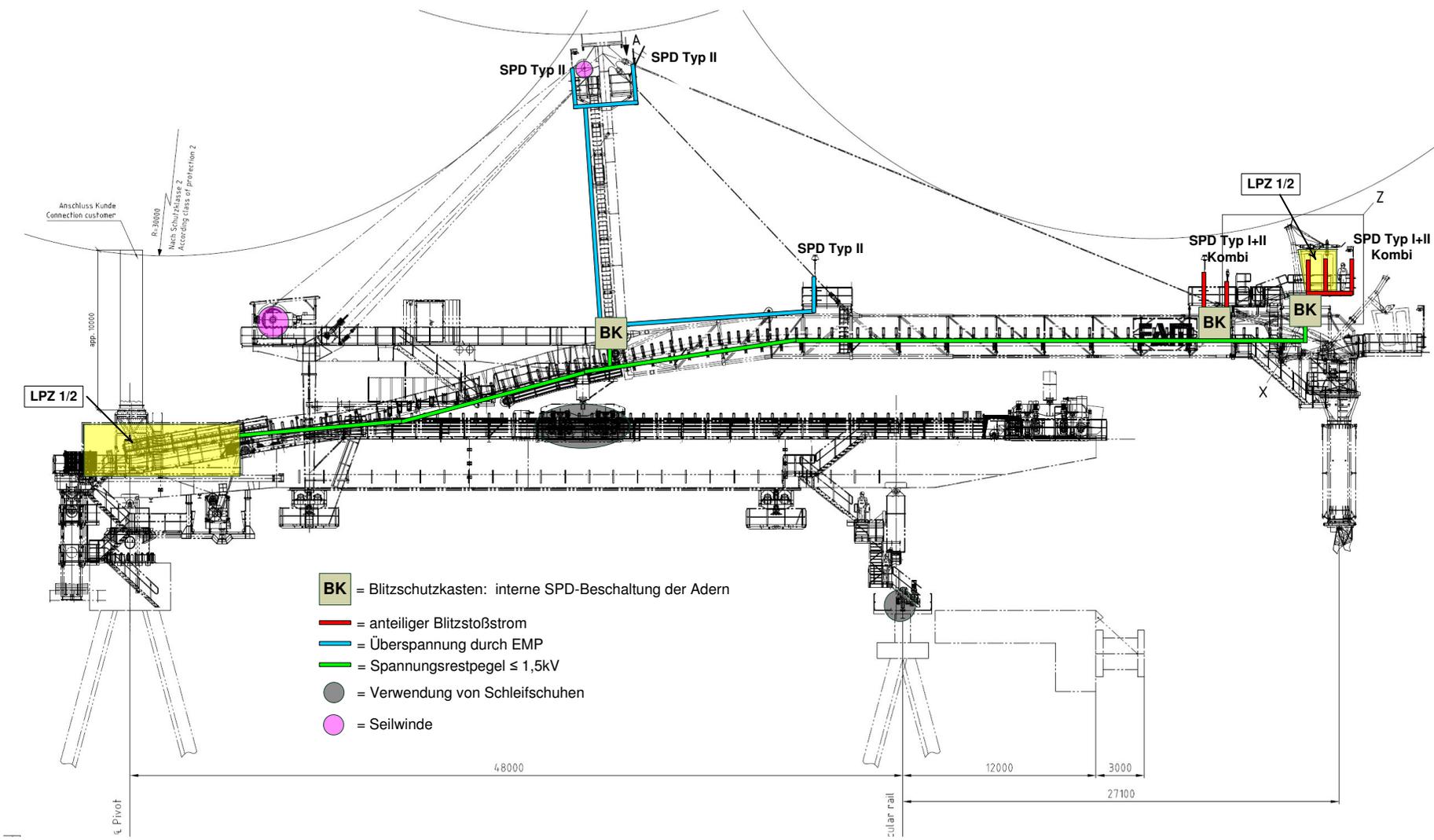


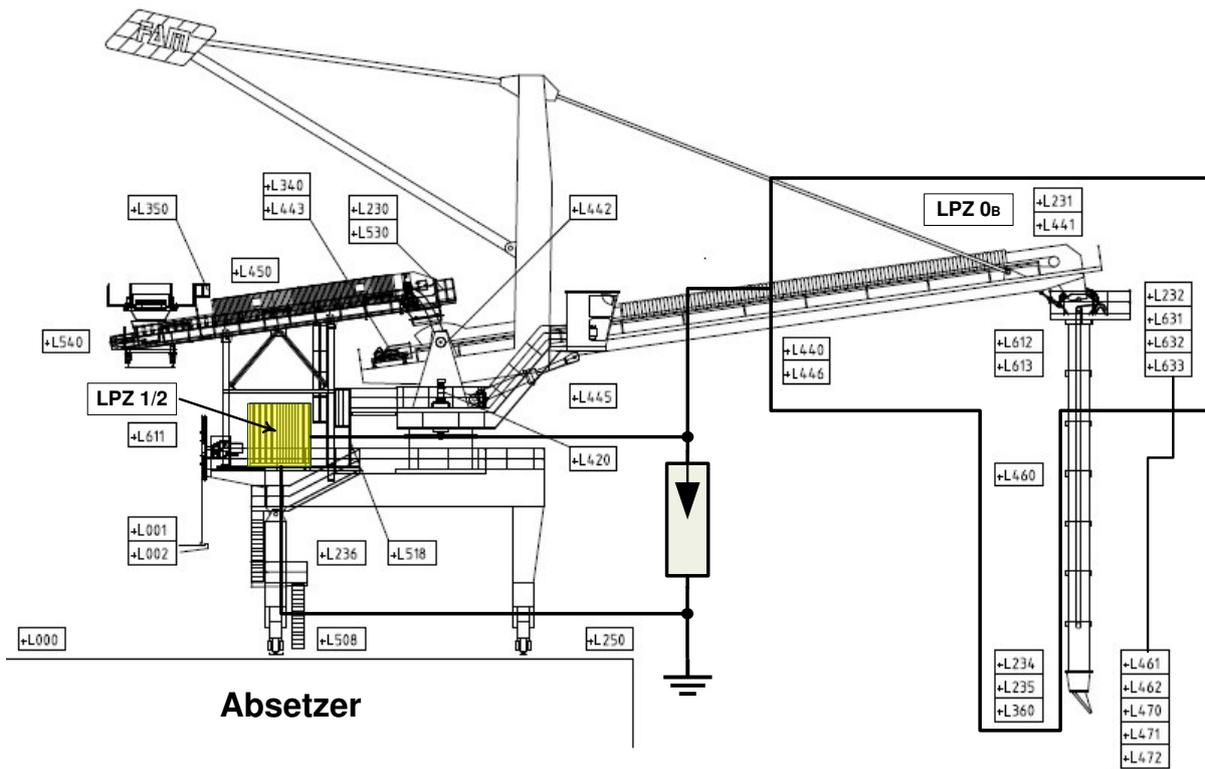
(b) nichtlinearer Boden ($\sigma_{\text{Erde}} = 1 \dots 10 \text{ mS/m}$ gem. Abb. 6.3)

Abbildung 8.1.: Maximal auftretende Schrittspannungen bei ausgewählten Erdungsanlagen und unterschiedlichen Gebäudegrößen für $I = 200 \text{ kA}$

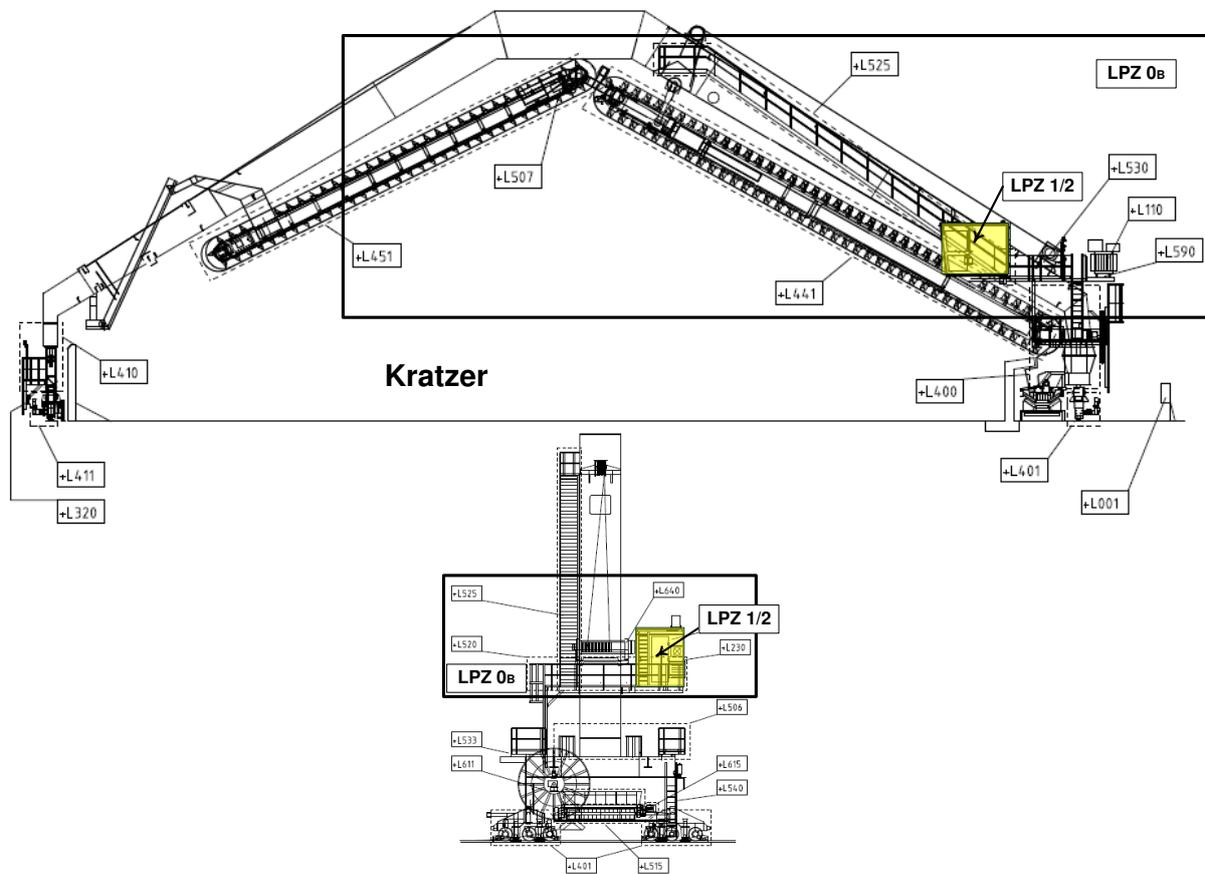
An12_Abb. 1: Auszug Dissertation Suchanek [13]

An13_Abb. 2: Quadranten Schiffsbelader



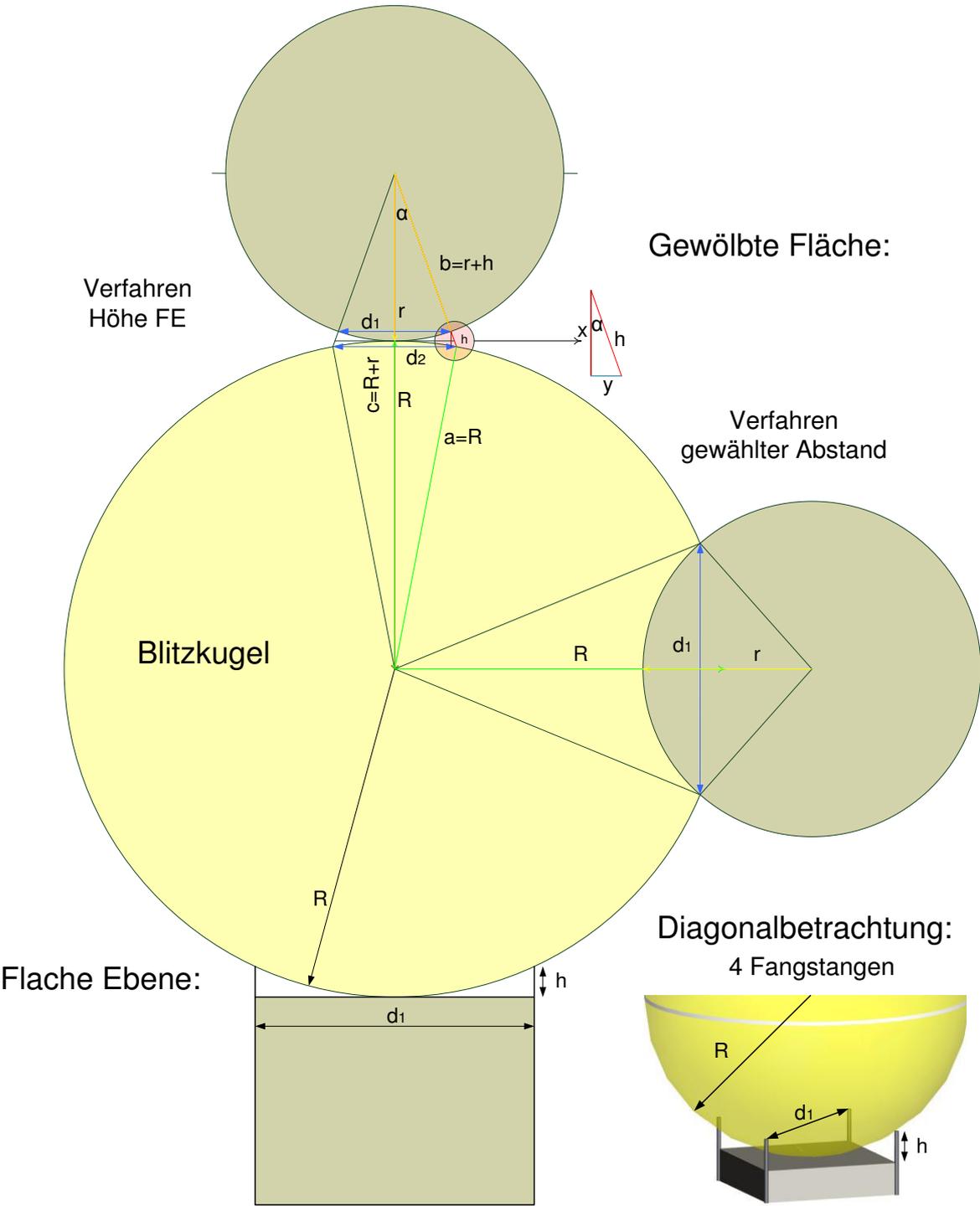


An13_Abb. 3: Absetzer mit Prinzipdarstellung der Schutzbeschaltung



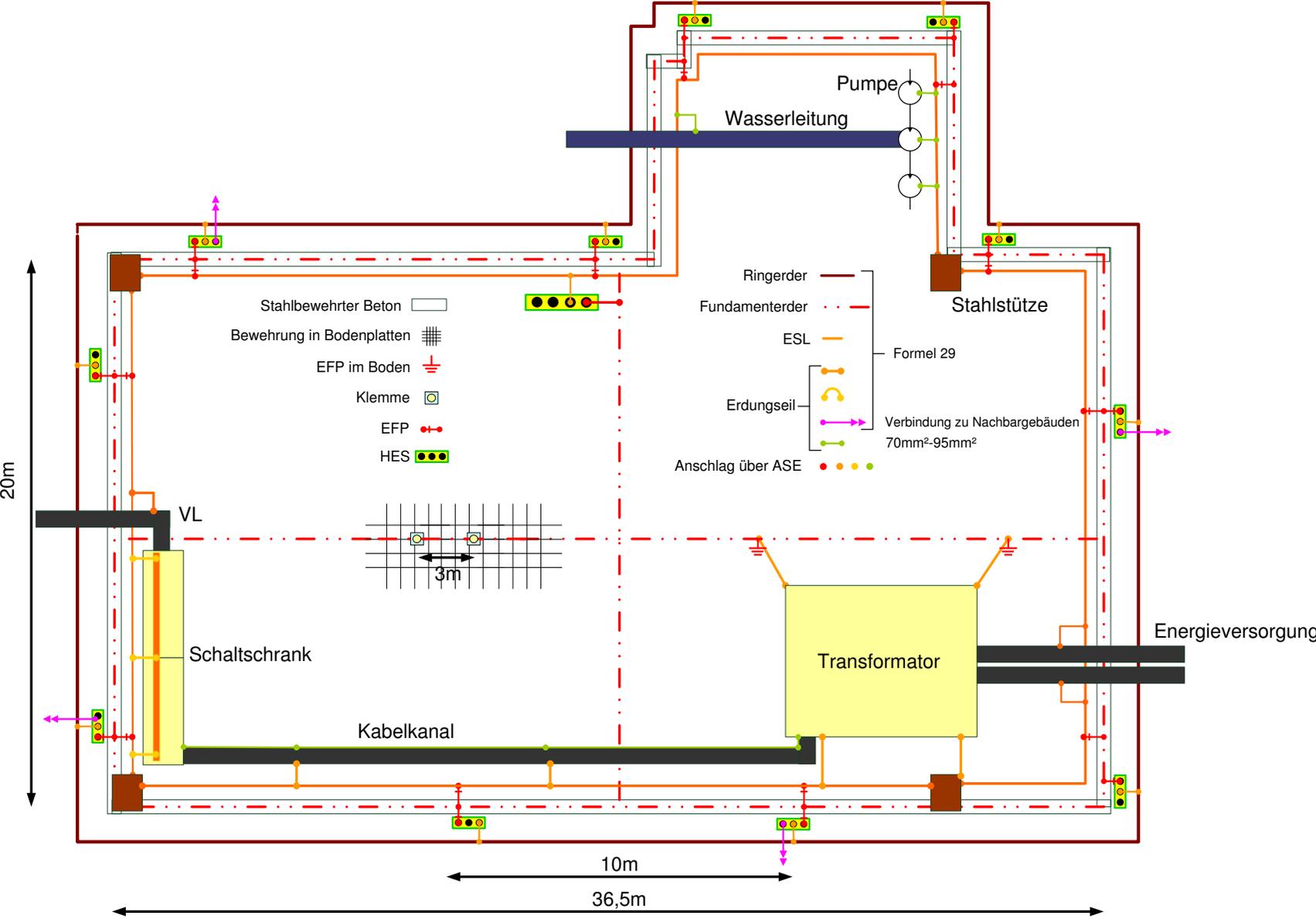
An13_Abb. 4: Kratzer in Front- und Seitenansicht

Anhang 14: Positionierung von Fangeinrichtungen auf Dächern



An14_Abb. 1: Schematische Darstellung zum Durchhang einer Blitzkugel

Anhang 15: Potentialausgleich in Kraftwerksgebäuden



An15_Abb. 1: Untergeschoss mit Fundamenterder nach An10

An15_Abb. 2: Obergeschoss mit eingeführten Förderbändern nach An10

