



Forschungstiftung Strom
und Mobilkommunikation
Research Foundation Electricity
and Mobile Communication

Tel. +41 (0)44 632 59 78
Fax: +41 (0)44 632 11 98
info@mobile-research.ethz.ch
www.mobile-research.ethz.ch

Literaturbericht, März 2016

Kriechströme

Stand des Wissens

Dr. Gregor Dürrenberger

Forschungstiftung Strom und Mobilkommunikation
c/o ETH Zürich, Gloriastrasse 35
8092 Zürich

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG.....	4
1 BEGRIFFE UND ABKÜRZUNGEN	6
1.1 Begriffe	6
1.2 Abkürzungen, Einheiten	10
2 KRIECHSTRÖME – TECHNISCHER HINTERGRUND	12
2.1 Abgrenzung.....	12
2.2 Konduktive oder systembedingte Kriechströme	12
2.2.1 Netzanschlussart	12
2.2.2 Elektroinstallation	13
2.2.3 Nicht-lineare Verbraucher	15
2.2.4 Eisenbahnlinien	15
2.3 Kriechströme aufgrund kapazitiver und induktiver Einkopplung von HSL-Feldern	16
2.3.1 Kapazitive Einkopplung	16
2.3.2 Induktive Einkopplung.....	16
2.4 Häufigkeit und Grössenordnung von Kriechströmen.....	18
2.4.1 Systembedingte Spannungen und Kriechströme.....	18
2.4.2 Von HSL induzierte Spannungen und Ströme	19
3 KRIECHSTRÖME UND VIEH – STAND DER ERKENNTNISSE	23
3.1 Situation in Ställen.....	23
3.1.1 Ein Fallbeispiel.....	23
3.1.2 Messungen in Ställen	23
3.2 Wirkungen	24
3.2.1 Direkte Auswirkungen: Wahrnehmung und Verhalten	25
3.2.2 Indirekte Auswirkungen	27
3.3 Risikowahrnehmung.....	30
4 KRIECHSTRÖME UND MENSCHLICHE GESUNDHEIT	32
4.1 Physiologie.....	32
4.2 Die Kontaktstromhypothese	34
4.2.1 Die Hypothese	34
4.2.2 Die Expositionsfrage.....	35
4.2.3 Die Dosisfrage	35

4.2.4	Die Wirkungsfrage.....	36
4.2.5	Daten zu Kinderleukämie	38
5	KRIECHSTRÖME – OFFENE FRAGEN.....	39
6	ANHANG – WEISUNG ESTI BETREFFEND ERDFEHLERSTRÖMEN IN MELKSTÄNDEN.....	40
	LITERATURVERZEICHNIS	43
	FIGURENVERZEICHNIS.....	46
	TABELLENVERZEICHNIS.....	46

Zusammenfassung

Das Thema „Kriechströme“ wird in der wissenschaftlichen Literatur in technischer Hinsicht recht breit behandelt, in biologischer Hinsicht liegen weniger Studien vor. In dieser Literaturarbeit werden die wichtigsten Erkenntnisse aus den Publikationen zu Kriechstrom, insbesondere aus Artikeln der letzten zwei Jahrzehnte, zusammengestellt. Das Hauptgewicht liegt bei biologischen Arbeiten. Es wird zunächst dargestellt, (i) wie Kriechströme zustande kommen und (ii) welche Stromstärken (bzw. Spannungen) man im Alltag antreffen kann. Sodann kommen biologische und gesundheitliche Effekte zur Sprache. Die meisten Studien drehen sich dabei (iii) um das Vieh. Eine kleine Anzahl Arbeiten untersucht auch (iv) mögliche Risiken beim Menschen, genauer: Kinderleukämie.

Als Kriechstrom bezeichnen wir einen Strom, der nicht über das elektrische Leitungsnetz fließt, sondern über andere leitfähige Medien wie Sanitärinstallationen, im Boden verlegte Metallrohre oder das Erdreich. Die Ursache eines Kriechstroms kann ein technischer Fehler sein, eine systembedingte Eigenschaft der Elektroinstallation, oder ein externes magnetisches Wechselfeld, welches in einem leitfähigen Medium eine Spannung induziert und damit einen Strom erzeugt.

Grundsätzlich verursacht unser Verteilnetz Kriechströme zwischen den Erdungsstellen. Über den Netz-PEN-Leiter (PEN-Leiter: kombinierter Neutral- und Schutzleiter), der üblicherweise bis an den Hausanschlusskasten geführt wird, können Rückströme in die Schutzleiter der Gebäude-Elektroinstallation fließen, die sich als Kriechströme auf die in die Schutzerdungen einbezogenen Metallstrukturen (Versorgungsrohre, Armierungen) verteilen. Je nach Ausführung der Elektroinstallation kommen diese Rückströme mehr oder weniger „gut“ zum Tragen. Sie sind auch bei fachgerechter Installation nicht vollständig zu vermeiden. Sodann können Kriechströme auch von aussen über vorbelastete Metallinfrastrukturen (Wasser- oder Gasversorgung, Kanalisation) in Gebäude eingeschleppt werden.

Immer bedeutsamer werden für die Kriechstromproblematik sog. nicht-lineare Verbraucher. Das sind Geräte, die mittels elektronischer Bauteile die sinusförmige Netzspannung in andere, anwendungsbedingte Spannungs- (und Strom-)verläufe umwandeln. Zu solchen Geräten zählen Netzteile, elektronische Vorschaltgeräte, Frequenzumrichter zur Steuerung von Elektromotoren oder Induktionsherde. Heute sind beinahe alle am Stromnetz angeschlossenen Geräte nicht-lineare Verbraucher. Sie produzieren sog. Oberwellenströme, welche die Neutralleiter belasten und sich bei ungünstiger Elektroinstallation über die Schutzleiter als Kriechströme im Gebäude ausbreiten können.

Kriechströme können auch „drahtlos“ verursacht werden, nämlich über kapazitive Einkopplung des elektrischen bzw. induktive Einkopplung des magnetischen Feldes von Stromleitungen, insbesondere Hochspannungsleitungen. Im Vergleich zur drahtgebundenen (konduktiven) Verursachung spielen induktiv und kapazitiv bewirkte Kriechströme eine untergeordnete Rolle. Die kapazitive Kopplung ist wenig bedeutsam, weil elektrische Felder meist auf geerdete Oberflächen treffen.

Die induktive Verursachung ist insofern zu beachten, als Magnetfelder fast alle Materialien problemlos durchdringen. Das Magnetfeld einer Hochspannungsleitung kann deshalb auch Kriechströme im Erdreich oder in Gebäuden generieren. Entscheidend ist dabei der sog. magnetische Fluss, das ist das durch eine bestimmte Fläche „fliessende“ Magnetfeld. Je grösser der Fluss, desto grösser ist die in einem Leiter (der diese Fläche abdeckt oder umschliesst) induzierte Spannung – und desto grösser der damit verknüpfte Stromfluss. Dabei ist es egal, ob es sich um einen idealen Leiter (Metall) oder um einen widerstandsbehafteten Leiter (Erdreich, Tier, Mensch) handelt. Der Schutz vor Strömen, die durch induktive Einkopplung entstehen, ist bei speziellen Anwendungen angezeigt: dazu zählen in erster Linie Grosssysteme (Rohrleitungen/Pipelines, lange Zäune) die parallel zu und nahe bei Hochspannungsleitungs-Trassen verlegt sind. Für Gebäude und Wohnungen sind induzierte Spannungen nur in Ausnahmefällen, wenn das Gebäude sehr nahe bei einem Starkstromtrasse liegt und gleichzeitig Hausinstallationen grosse Induktionsschleifen bilden, von Bedeutung.

In Gebäuden sind deshalb primär systembedingte Ursachen für Kriechströme verantwortlich. Mit dem heute üblichen Netzanschluss (TN-C) und bei nicht fachgerecht ausgeführter Elektroinstallation treten „eigenverursachte“ Kriechströme auf, das sind Neutralleiter-Rückströme, die über die hausinternen Schutzleiter auf die Erdungsstrukturen eines Gebäudes (Wasserleitungen, Gasleitungen, Heizungsrohre) fliessen.

Betreffend den Wirkungen von Kriechströmen unterscheiden wir zwischen Effekten bei Tieren und Menschen.

Tiere. In Ställen sind in ungünstigen Fällen beträchtliche Kriechströme auf Metallstrukturen, etwa Melkständen, möglich. Entscheidend ist der Strom, der durch das Tier fliesst. Dieser hängt ab, erstens, von der abgegriffenen Spannung (z.B. wenn eine Kuh mit dem Maul eine unter Spannung stehende Metallstruktur, z.B. eine Tränke, berührt und so via Körper und Hufe eine Erdung entsteht), und zweitens vom elektrischen Widerstand des Tieres. Dieser ist geringer als derjenige des Menschen, weshalb Kühe sensibler auf Kriechströme reagieren können.

Experimente haben gezeigt, dass die Unterschiede in der Sensibilität zwischen den Tieren sehr gross sind (bis Faktor 10). Man geht davon aus, dass die untere Wahrnehmungsschwelle von Körperströmen bei etwa 1 mA liegt. Verhaltensreaktionen zeigen Tiere ab ca. 3 mA, aktives Ausweichverhalten beginnt ab ca. 5 mA. Nach einer Anpassungszeit von einigen Tagen gewöhnen sich die meisten Tiere an Ströme von wenigen mA und zeigen keine Auffälligkeiten mehr.

Wenn die Ströme (bzw. Spannungen) ausreichend gross sind, können sie Wohlbefinden und Milchleistung negativ beeinflussen. Die grosse Mehrzahl der vorliegenden Arbeiten konnte bis in den Bereich um 4-5 V Berührungsspannung bzw. 4-5 mA Körperstrom hinsichtlich Produktivität und Qualität (somatischer Zellgehalt der Milch) keine Auffälligkeiten feststellen, auch kein gehäuftes Auftreten von Mastitis (Euterentzündung). Einzelne Tiere zeigten jedoch abweichende Befunde. Produktionseinbussen beruhen nicht auf (bekannten) schädigenden Wirkungen des Stroms, sondern auf Verhaltensänderungen der Tiere (Reduktion der Wasser- und/oder Nahrungsaufnahme wegen Meidens von unter Spannung stehenden Tränken und/oder Futterkrippen).

Menschen. Wir nehmen Kriechströme in aller Regel nicht wahr. Die Werte liegen typischerweise unterhalb der Wahrnehmungsschwelle. Wie viel Strom durch den Körper fliesst, wenn man durch Berühren einer unter Spannung stehenden Installation einen Kriechstromkreis generiert, ist wie oben am Fall der Kühe erwähnt, eine Frage der Spannung und des Widerstandes (Impedanz), den der Körper dem Wechselstrom bietet. Die Variabilität des Widerstands ist sehr gross, abhängig von den Kontaktbedingungen (Geometrie, Hautzustand), der Erdung (Untergrund, Kleidung, Schuhe) und der Person (Alter, Gewicht). Die wichtigste Rolle spielt neben der Kleidung (v.a. Schuhwerk) die Haut, deren Impedanz stark schwankt.

In Ausnahmefällen können Berührungsspannungen so gross sein, dass sie Körperströme im Bereich von Zehntel mA verursachen. Solche Stromstärken können insbesondere bei Handkontakt im Knochenmark des Unterarms elektrische Feldstärken bewirken, die biologisch relevant sind (wenige V/m). Magnetfelder, selbst wenn sie den Immissionsgrenzwert übersteigen, sind dagegen zu schwach, um vergleichbar grosse Feldstärken zu induzieren. Es wird spekuliert, dass solche Körperströme bei Kindern die Blutbildung im Knochenmark negativ beeinflussen könnten und so zu einer Erhöhung des kindlichen Leukämierisikos beitragen. Allerdings gilt es zu betonen, dass es sich dabei um eine Hypothese handelt, die weder experimentell noch mit Bevölkerungsstudien belegt ist. Zudem sind die Bedingungen, welche zu solchen Strömen führen, zunehmend selten, denn im Sanitärbereich verwendet man immer häufiger Kunststoffrohre.

Folgender Forschungsbedarf und Begleitaktivitäten können vor diesem Hintergrund identifiziert werden: (i) Abklärung Bedarf für eine Standesaufnahme oder ein Monitoring von Art, Ausmass und Entwicklungsdynamik des „Kriechstromproblems“ in der Schweiz. (ii) Dokumentation „Situation auf Schweizer Höfen“. (iii) Unterstützung von Studien zur Abklärung der Relevanz der Kontaktstromhypothese. (iv) Wissens- und Risikokommunikation, sowie Bereitstellen von Informations- und/oder Weiterbildungsmaterialien.

1 Begriffe und Abkürzungen

1.1 Begriffe

Anlageerdung

Erdung einer Hochspannungsanlage.

Berührungsspannung

Spannung zwischen einem berührten Teil und der Erde. Ursache können elektrostatische oder elektrochemische Potenziale sein (elektrostatisch aufgeladene Teile; Potenziale zwischen unterschiedlichen Metallen), unter (ordentlicher) elektrischer Spannung stehende Leitungen, oder Erdungsspannungen.

Berührungsstrom

Der beim Berühren von unter Spannung stehenden Teilen durch den Körper (Mensch, Tier) fließende Strom. Ursache von Berührungsströmen sind Berührungsspannungen. Synonym verwendet: Körperstrom, Kontaktstrom.

Bezugserde

Teil des Erdreiches, der so weit ausserhalb des Einflussbereiches der Erder liegt, dass keine vom Erdungsstrom herrührende Spannungen auftreten.

Dosis

Die im Körper (oder einem interessierenden Teil des Körpers) wirksamen elektrischen Felder (niederfrequente EMF) bzw. absorbierte elektromagnetische Strahlung (hochfrequente EMF) – sowie davon abgeleitete Grössen (wie z.B. Stromdichte oder SAR) – aufgrund der Exposition des Körpers; peak oder zeitlich und räumlich gemittelt.

Elektromagnetische Felder

Elektromagnetische Felder (EMF) umfassen im Frequenzspektrum statische Felder und Wechselfelder bis zu 300 GHz, wobei es sich bei dieser Frequenz um eine rein definitorische Grenze handelt. EMFs sind Teil der sog. nicht-ionisierenden Strahlung (NIS). NIS umfasst jedoch auch Frequenzen oberhalb 300 GHz (THz-Strahlung, Infrarot, sichtbares Licht) und endet im Bereich der UV-Strahlung.

Emission

Das von einer Anlage oder einem Gerät abgegebene elektromagnetische Feld, peak oder zeitlich gemittelt. Im niederfrequenten Bereich sind vor allem die Magnetfeldemissionen relevant, denn sie können in leitfähigen Materialien Spannungen (und damit auch Ströme) induzieren. Für Anlagen, die nahe an besonders empfindlichen Orten wie Wohnungen, Büros, Schulen etc. stehen, schreibt der Gesetzgeber in der entsprechenden Verordnung (NISV) maximal zulässige Emissionen vor. Magnetfeldemissionen können Kriechströme verursachen. Letztere sind fast durchwegs unerwünscht, insbesondere in Bauernhöfen, wo sie sich auf die Befindlichkeit und die Produktivität des Viehs auswirken können.

Erdung

Die Gesamtheit aller miteinander verbundenen Erder und Erdungsleitungen. Dazu gehören auch: metallene Rohrleitungen, Fundamentarmierungen, metallene Umhüllungen von Kabeln, Erdseile.

Exposition

Die am Ort eines Menschen (Tieres) vorliegende elektrische oder magnetische Feldstärke bzw. Flussdichte. Der „Ort des Menschen“ impliziert ein Referenzvolumen (ganzer Körper oder ein Teil des Körpers – als Grenzfall auch ein Referenzpunkt). Für ein einmal festgelegtes Referenzvolumen kann die maximale Exposition (peak) oder eine zeitlich gemittelte Exposition bestimmt werden. Die zeitliche Mittelung ist immer auch eine „räumliche“, weil sich Menschen (Tiere) bewegen. Bei einer grossräumig gegebenen Immissionsverteilung im Raum kann die Exposition zwischen Menschen (Tieren) differieren, abhängig von deren Aufenthaltsmustern.

Fehlerstrom

Mit Fehlerstrom ist meist ein Strom gemeint, der bei Versagen einer Installation (z.B. Isolationsverlust) entsteht. Manchmal wird auch im Zusammenhang mit Fehlströmen von Fehlerstrom gesprochen. So wird etwa Kriechstrom durch das Erdreich auch als Erdfehlerstrom bezeichnet.

Fehlstrom

Ein aufgrund systembedingter Eigenschaften nicht auf elektrischen Leitungen fließender Strom, sondern über leitfähige Teile wie Sanitärinstallationen, im Boden verlegte Metallrohre oder das Erdreich fließender Strom. In der Praxis ist der häufigste Fall bei Elektroinstallationen zu finden, in denen Neutralleiter und Schutzleiter kombiniert als PEN-Leiter verwendet werden (sog. TN-C System). Zwischen den verschiedenen Erdungspunkten des PEN-Leiters können Kriechströme fließen (man bezeichnet sie manchmal auch als Differenzströme). Sie können beträchtliche Stärke annehmen, die Spannungen liegen aber nahe bei Null. In einem System, das Neutral- und Schutzleiter getrennt führt (sog. TN-S System) fließen die Rückströme fast vollständig über den Neutralleiter.

Funktionspotenzialausgleich

In der neuen NIN (Niederspannungs-Installations-Norm) wird zwischen Schutzpotenzialausgleich und Funktionspotenzialausgleich unterschieden. Ersterer dient dem Schutz vor elektrischen Schlägen, siehe oben, letzterer dem Schutz der Funktionalität von Installationen und Geräten gegenüber elektromagnetischen Störungen. Er soll verhindern, dass Oberwellenströme über geschirmte Kabel Störungen verursachen. Es wird empfohlen, Schutz- und Funktionserdung getrennt zu führen.

Harmonische

Jede beliebige Signalform kann durch Addition von Sinusschwingungen erzeugt werden. Signale, wie wir sie typischerweise in unseren Stromnetzen finden, sind periodisch (der zeitliche Verlauf wiederholt sich) und symmetrisch zur Nulllinie. Solche Signale sind zusammengesetzt aus einer Grundschiwingung (50 Hz), die der Wiederholungsperiode des Signals entspricht, sowie ganzzahligen (1, 2, 3, etc.) Vielfachen der Grundschiwingung. Vielfache einer Grundschiwingung nennt man Oberschwingungen, Oberwellen oder Harmonische. Je nach Komplexität des Signals sind die Anzahl und der Energieanteil der Harmonischen am Gesamtsignal grösser oder kleiner. Der Anteil an Harmonischen (sog. THD – total harmonic distortion) darf im Stromnetz 8 % nicht überschreiten. Die nullte Harmonische bewirkt eine Verschiebung des Signals gegenüber der Nullachse, was bedeutet, dass das Gesamtsignal einen Gleichstromanteil enthält. Nicht-ganzzahlige Harmonische (1.5, 3.87 etc.), auch Zwischenharmonische genannt, verzerren das Signal derart, dass es nicht mehr mit 50 Hz periodisch ist.

Immission

Die an einem Ort im Raum vorliegende elektrische oder magnetische Feldstärke bzw. Flussdichte, peak oder zeitlich gemittelt. Die Feldstärkewerte können z. B. in Immissionskatastern erfasst und / oder (bei dichtem Messnetz und / oder rechnerischen Simulationen) auf Karten visualisiert werden. Aus gesundheitlicher Sicht interessieren vor allem die Magnetfeldimmissionen. Niederfrequente elektrische Felder, wie wir sie im Alltag antreffen, werden als gesundheitlich unproblematisch er-

achtet. Der Gesetzgeber limitiert in der NISV (Verordnung zum Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung) die von Anlagen verursachten magnetischen und elektrischen Feldimmissionen für alle Orte, an denen sich Menschen aufhalten können.

Induktive Kopplung

Kontaktlose Energieübertragung mit Hilfe eines magnetischen Wechselfeldes.

Kapazitive Kopplung

Kontaktlose Energieübertragung mit Hilfe eines elektrischen Wechselfeldes.

Kriechstrom

Ein Strom, der nicht über das elektrische Leitungsnetz fließt, sondern über andere leitfähige Medien wie Sanitärinstallationen, im Boden verlegte Metallrohre, Erdreich, nasse Stallböden, etc. Die Ursache eines Kriechstroms kann ein Fehler in der Elektroinstallation sein, eine systembedingte Eigenschaft der Stromversorgung, oder ein externes magnetisches Wechselfeld, welches den Strom induziert (Wirbelstrom). Kriechströme können auch zwischen Metallen mit unterschiedlichen elektrischen Potenzialen als Gleichströme fließen. Als Synonyme für Kriechstrom finden sich in der Literatur auch: Fehlstrom, Fehlerstrom, Streustrom, Störstrom oder vagabundierender Strom. Diese Begriffe haben oft leicht unterschiedliche Bedeutungen und / oder sind umgangssprachlich gefasst.

Konduktive Kopplung

Energieübertragung mit Hilfe einer elektrisch leitfähigen, galvanischen Verbindung.

Kontaktstrom

In diesem Bericht als Synonym für Berührungstrom oder Körperstrom verwendet.

Nichtlineare Verbraucher

Geräte, die mit elektronischen Bauteilen die sinusförmige Netzspannung in andere Spannungsverläufe umwandeln, wobei sich der Strom nicht mehr proportional (linear) zur Spannung verhält. Netzteile, die für den Betrieb von elektronischen Konsumgütern aus Wechselspannung Gleichspannung herstellen, sind Beispiele solcher Verbraucher, oder elektronische Vorschaltgeräte, welche die in einem Netzteil erzeugte Gleichspannung in eine Betriebsfrequenz umwandeln, wie das etwa in Energiesparlampen geschieht. Auch Frequenzumrichter zur Steuerung von Elektromotoren oder Induktionsherde sind nichtlineare Verbraucher. Um die nicht-sinusförmigen Spannungsverläufe zu erhalten, müssen Oberwellen erzeugt werden (siehe unter „Harmonische“), welche das Stromnetz als „dirty electricity“ belasten („verschmutzen“).

Oberwellenstrom

Störströme, die aufgrund nichtlinearer Verbraucher in einem TN-C System auf dem PEN-Leiter fließen. Sie können EMV-Probleme verursachen, wenn sie ausreichend gross sind. In einem TN-S System treten diese Probleme nicht auf; ein Problem bleibt jedoch die Belastung des Neutralleiters durch den Oberwellenstrom. Insbesondere die 3. Harmonische ist kritisch, denn sie addiert sich in einem Dreiphasensystem im Neutralleiter zu einem Gesamtstrom, der grösser sein kann als der Strom in einer einzelnen Phase. Oberwellenströme können sich über die Erdung auch als Kriechströme auf metallene Installationen des Hauses ausbreiten.

Schrittspannung

Potenzialdifferenz in der Erde, der man sich mit einem Schritt (bei Mensch 1m, bei Kühen 1.5 m) aussetzt.

Schutzpotenzialausgleich, Schutzerdung

Erdung aller leitfähigen Installationen (elektrische Leitungen, zu- und wegführende sowie interne Rohre, Apparate, etc.) eines Gebäudes, um Menschen vor elektrischen Schlägen (statische Aufladungen, Fehlfunktionen elektrischer Anlagen / Geräte) zu schützen. Via Erdungsschiene werden allfällige Ströme über Fundament-, Anlagen- oder Gebäuderder der Erde zugeleitet. Bei Ställen empfiehlt das ESTI einen zentralen Erdungspunkt (ZEP) ausserhalb des Stalles einzurichten. An diesem soll (im üblichen TN-C-S System) der PEN-Leiter der Anschlussleitung und der Schutzleiter der hausinternen Installation geerdet werden, um hausgemachte Kriechströme zu verhindern.

TN-System

Schutzmassnahme, bei welcher Fehlerströme über Schutzleiter (PE- oder PEN-Leiter) an die Speisestelle zurückgeführt werden.

TN-C System

Ein Elektroinstallationssystem, in dem der Neutralleiter und der Schutzleiter als ein Leiter (PEN-Leiter) kombiniert geführt werden. Der Begriff kommt aus dem französischen und bedeutet: terre neutre combiné. In einem TN-C System führt damit der PEN-Leiter den Betriebsstrom als Rückstrom zur Trafostation. Weil der PEN-Leiter an mehreren Orten geerdet ist, finden kleine Anteile der Betriebsströme (Rückströme) immer auch zwischen den Erdungspunkten einen Weg in Form von Kriechströmen.

TN-S System

Ein Elektroinstallationssystem, in dem der Neutralleiter und der Schutzleiter als zwei getrennte Leiter geführt werden. Der Begriff kommt aus dem französischen und bedeutet: terre neutre séparé. In einem TN-S System führt damit der Neutralleiter den Betriebsstrom als Rückstrom zur Trafostation und der Schutzleiter ist stromfrei. Weil in einem TN-S System alle Betriebsströme leitungsgebunden geführt werden, ist die Installation im wesentlichen kriechstromfrei. Nur im Fehlerfall werden Betriebsströme über den Schutzleiter zur Erde abgeführt. Für einen Netzanschluss im TN-S System sind somit fünfadrig Kabel nötig (3 Phasen, Neutralleiter, Schutzleiter).

TN-C-S System

Ein Elektroinstallationssystem, in dem das TN-S System bei der Hausinstallation (ab Hausanschlusspunkt) eingerichtet ist, die Rückstrecke ab Hausanschlusskasten jedoch als TN-C System ausgelegt ist. Kriechströme beschränken sich somit auf Strecken ab Hausanschlusskasten. Allerdings können vom Hausanschlusspunkt her Kriechströme über den Schutzleiter den Weg „zurück ins Haus“ finden. Eine vollständig kriechstromfreie Gebäudeinstallation ist nur möglich, wenn auch der Netzanschluss im TN-S System vorliegt.

TT-System

Schutzmassnahme, bei welcher Fehlerströme über einen örtlichen Erder und das Erdreich an die Speisestelle zurückfliessen.

Vagabundierender Strom

Wir verwenden den Begriff als Synonym zu „Kriechstrom“. Häufig sind mit vagabundierenden Strömen Oberwellenströme gemeint.

Wirbelstrom

Ein durch Induktion in einem leitfähigen Material entstandener Strom. Meist wird der Begriff für (kreisförmige) Ströme in Metallteilen (Transformatoren, Wirbelstrombremsen, Induktionspfannen) oder in Menschen und Tieren verwendet. Im vorliegenden Kontext bezeichnen wir alle durch Induktion entstandenen Ströme als Wirbelströme (oder auch: „induzierter Strom“).

1.2 Abkürzungen, Einheiten

A

Ampère, häufig: mA (ein Tausendstel Ampère), kA (Tausend Ampère). Einheit der Stromstärke

AGW

Anlagegrenzwert

BAFU

Bundesamt für Umwelt

DC

Direct Current (Gleichstrom)

EMF

Elektromagnetisches Feld

EMV

Elektromagnetische Verträglichkeit

ESTI

Eidgenössisches Starkstrominspektorat

ETH

Eidg. Technische Hochschule

FSM

Forschungstiftung Strom und Mobilkommunikation

HSL

Hochspannungsleitung

Hz

Hertz, Einheit der Frequenz (Schwingungen pro Sekunde)

IGW

Immissionsgrenzwert

NIN

Niederspannung-Installations-Norm

NIS

Nicht-ionisierende Strahlung

NISV

Verordnung zum Schutz vor Nicht-Ionisierender Strahlung

PEN

Kombinierter Schutz- (PE – protective earth) und Neutralleiter (N)

SAR

Spezifische Absorptionsrate

SCC

Somatic Cell Count (Somatischer Zellgehalt)

T

Tesla, häufig: μT (ein Millionstel Tesla). Einheit der magnetischen Flussdichte

THD

Total Harmonic Distortion (gesamt harmonische Verzerrung)

TN-C

Terre Neutre Combiné

TN-C-S

Terre Neutre Combiné et Separé

TN-S

Terre Neutre Separé

V

Volt, häufig: mV (ein Tausendstel Volt), kV (Tausend Volt). Einheit der elektrischen Spannung

V/m

Volt pro Meter. Einheit der elektrischen Feldstärke

VNB

Verteilnetzbetreiber

WHO

Weltgesundheitsorganisation

ZEP

Zentraler Erdungspunkt

Ω

Omega, Zeichen für Ohm. Einheit des elektrischen Widerstands

2 Kriechströme – technischer Hintergrund¹

2.1 Abgrenzung

Als Kriechstrom bezeichnen wir einen Strom, der nicht über das elektrische Leitungsnetz fliesst, sondern über andere leitfähige Medien wie Sanitärinstallationen, im Boden verlegte Metallrohre oder das Erdreich. Die Ursache eines Kriechstroms kann ein Fehler in der Elektroinstallation sein, eine systembedingte Eigenschaft der Elektroinstallation, oder ein externes magnetisches Wechselfeld, welches den Strom induziert.

In diesem Bericht werden Kriechströme betrachtet, die „systembedingt“ (durch die Netzanschlussart, die Art der Hausinstallation und die Art der angeschlossenen Verbraucher) verursacht werden oder durch induktive bzw. kapazitive Einkopplung in externe Felder von Hochspannungsleitungen oder von Fahrleitungen von Eisenbahnen entstehen. Kriechströme, die das Resultat einer Fehlfunktion der Elektroinstallation sind (Fehlerströme), werden nicht berücksichtigt. Ebenfalls nicht behandelt werden geomagnetisch induzierte Ströme (Ströme die durch Änderungen des Erdmagnetfeldes aufgrund der Sonnentätigkeit mit Frequenzen im Minuten- bis Stundenbereich in grossräumigen Verbundnetzen wie Pipelines oder Stromübertragungsnetzen gemessen werden), sowie Gleichströme, die in Medien, welche sich zwischen Metallen mit unterschiedlicher Reduktionsfähigkeit entwickeln, fliessen, sei das in beabsichtigter Art (etwa beim Kathodenschutz von Pipelines) oder als Nebenwirkung von entsprechenden Konstellationen bei Gebäudeinstallationen.

2.2 Konduktive oder systembedingte Kriechströme

2.2.1 Netzanschlussart

Grundsätzlich verursachen TN-C Verteilnetze konduktive Kriechströme, das sind durch elektrische Leiter direkt verursachte Ströme, die ausserhalb der Elektroinstallation auf leitfähigen Medien zirkulieren (v.a. metallene Wasser-, Heizungs- und Gasrohre, sowie das Erdreich). Sie entstehen aufgrund von unterschiedlichen Erdungsspannungen oder durch Rückströme des Netz-PEN-Leiters (PEN-Leiter: kombinierter Neutral- und Schutzleiter). Wenn dieser wie heute üblich bis an den Hausanschlusskasten geführt wird, können Neutralleiterströme auf die Schutzleiter in der Elektroinstallation des Gebäudes übertreten und sich als Kriechströme auf die in die Schutzerdungen einbezogenen Metallstrukturen (Versorgungsrohre, Armierungen) verteilen.

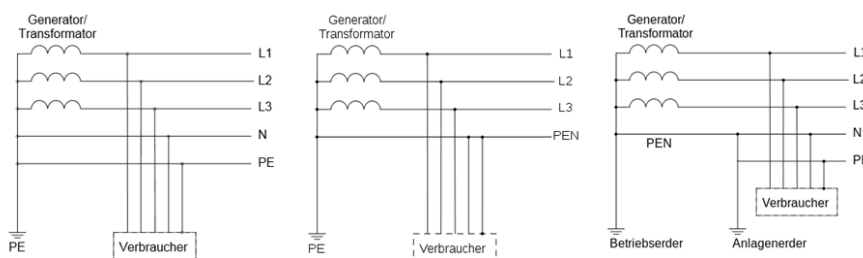
Die heute übliche Netzart ist das TN-System (Figur 1). Beim Netzanschluss ist das TN-C System der Regelfall. Der Verteilnetzbetreiber (VNB) führt ein Vierleiter-Kabel (3 Phasen und den PEN-Leiter) an den Hausanschlusskasten. Dort ist der Netz-PEN-Leiter geerdet und mit dem Neutralleiter sowie dem Schutzleiter der hausinternen Elektroinstallation verbunden. Die Hausinstallation ist als TN-S System ausgelegt: Neutral- und Schutzleiter werden für die Gebäudeversorgung getrennt geführt. Über die Verbindungsstelle am Hausanschlusskasten können dabei Neutralleiter-Ströme in die Schutzleiter fliessen und von dort auf die Hausinstallation übergehen, denn Schutzleiter sind an mehreren Stellen an Heizungsrohren oder anderen metallenen Teilen der Hausinstallationen geerdet. Wie viel von den Neutralleiter-Strömen auf diese Weise abgezweigt werden, hängt vom Parallelwiderstand dieser Wege im Vergleich zum Widerstand des Netz-PEN-Leiters ab. Unabhängig vom Anteil der Kriechströme gilt: je grösser die Ströme auf dem PEN-Leiter, desto grösser sind sie auch in den Schutzleitern und den angeschlossenen Erdungssystemen (Wasser-, Heizungs- und Gasrohre; Gebäudearmierungen).

¹ Für wertvolle inhaltliche Rückmeldungen und Hinweise danke ich Dr. Jürg Fröhlich, Fields at Work GmbH und Dr. Pascal Leuchtman, ETH.

Idealerweise ist in einem Dreiphasen-System der Netz-PEN-Leiter stromfrei. Die Rückströme der drei zeitlich versetzten Phasenströme heben sich, wenn die Phasen gleich stark belastet sind, gegenseitig auf. Bei unterschiedlicher Belastung kompensieren sich die Rückströme jedoch nicht mehr und auf dem Netz-PEN-Leiter ist ein Rückstrom messbar. Rückströme werden heute aber nicht primär durch die Phasenbelegung, sondern durch Art und Anzahl der angeschlossenen nicht-linearen Verbraucher bestimmt (siehe 2.2.3).

Die TN-C Netzanschlussart begünstigt also die „eigenverursachte“ Ausbreitung von Rückleiterströmen (Phasenbelegung, nicht-lineare Verbraucher im internen Stromnetz) auf die Elektro- und Erdungsinstallationen in Gebäuden. Rückströme können aber auch von „ausen“, d.h. von durch andere Verbraucher im Versorgungsnetz verursachten Belastungen des Netz-PEN-Leiters, in die eigene Elektroinstallation eingeschleppt werden.

Sodann ist es möglich, dass metallene Rohrsysteme, die von aussen in Gebäude eingeführt sind (Gas, Wasser, etc.), bereits Kriechströme tragen. Diese können in benachbarten Liegenschaften entstehen oder durch Erdströme des Verteilnetzes, wenn die Rohre im Einzugsbereich solcher Erdkriechströme liegen. Erdkriechströme sind im TN-C System grundsätzlich möglich, denn Netz-PEN-Leiter sind geerdet, bei der Trafostation (Anlagenerder), beim Verteilkasten und beim Hausanschlusskasten. Zwischen diesen Erdungspunkten existieren Spannungsdifferenzen und damit Erdströme. Die Spannungsdifferenzen kommen zustande, weil unterschiedliche Leitungswiderstände Spannungsabfälle bewirken und Material- und Bodeneigenschaften von Installationsteilen und Erden kleine Potenzialunterschiede generieren (i.d.R. bis maximal einige wenige Volt). Damit kann ein kleinerer Teil des Stroms statt über elektrische Leitungen auch über den Boden zurück zum Betriebserder des VNB fließen. Das TN-C System ist so gesehen hinsichtlich Kriechströmen eine schlechte Anschlussart.



Figur 1: Beste Lösung: TN-S (links), schlechte Lösung: TN-C (mitte), heute übliche Lösung: TN-C-S (rechts). Quelle: wikimedia commons. PE: Erdung / Schutzleiter; L: Phasen; PEN: kombinierter Neutral- und Schutzleiter.

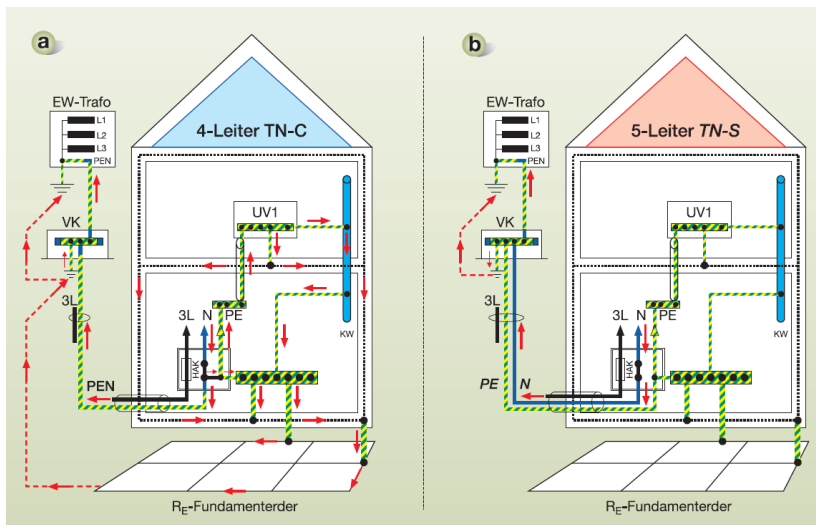
Die beste Lösung ist der TN-S Netzanschluss, bei dem Schutzleiter und Neutraleiter ab Quartierverteiler (Verteilkasten) und/oder ab Trafostation getrennt geführt werden. In diesem System fließen alle Rückströme des Verbrauchers über den Neutraleiter ins Verteilnetz. Kriechströme existieren primär zwischen Trafostation und Verteilkasten. Im heute üblichen TN-C Netzanschluss treten Kriechströme systembedingt auf der ganzen Länge des Verteilnetzes bis an den Hausanschluss auf. Sie können dabei wie erwähnt über Netzinfrastrukturen (Kanalisation, Wasserversorgung) und Gebäudeinstallationen den Weg in Wohnungen oder Ställe finden. Häufig ist die Identifizierung solcher Kriechströme komplex und schwierig.

2.2.2 Elektroinstallation

Die in 2.2.1 beschriebenen durch den Netzanschluss bedingten Ursachen von Kriechströmen kommen durch die Ausführung der Elektroinstallation mehr oder weniger „gut“ zum Tragen. Beim heute üblichen TN-C Netzanschluss sind sie auch bei fachgerechter Installation nicht vollständig zu vermeiden.

Der Netzanschluss kommt üblicherweise mit drei Phasen und dem Netz-PEN-Leiter ins Haus. Der Netz-PEN-Leiter ist am Hausanschlusskasten an der Haupterdungsschiene geerdet. Die Schutzleiter der hausinternen Elektroinstallation werden ebenfalls auf diese Schiene geführt. Sie sind aber auch meist an diversen anderen Punkten (etwa bei Grossverbrauchern oder Unterverteilern) geerdet. Diese gebäudeinternen Erdungen werden über Heizungs- bzw. Wasserrohre, Armierungen und andere metallene Hausinstallationen realisiert. Alle diese Installationen werden für den Potenzialausgleich über Erdungsleiter auf die Haupterdungsschiene geführt. Neutralleiterströme können somit über den Schutzleiter auf alle angeschlossenen Infrastrukturen übertreten und sich als Kriechströme im Gebäude verteilen. Wie viel Strom „diffundiert“, hängt von der konkreten Ausführung der Elektroinstallation und den Spannungsdifferenzen zwischen den verschiedenen Erdungspunkten untereinander und mit dem Netz-PEN-Leiter ab. Die absolute Höhe der Kriechströme ist, wie in 2.2.1 ausgeführt, eine Frage der Belastung des Neutralleiters, und ist heute v.a. eine Frage der Anzahl nicht-linearer Verbraucher. Wie bereits ausgeführt, können Kriechströme aber auch „fremdverursacht“ sein, d.h. von aussen eingetragen werden durch vorbelastete Netz-PEN-Leiter, oder durch vorbelastete – kriechstromtragende – Rohrinfrastrukturen.

In alten Häusern ist die Hausinstallation noch im TN-C System angelegt. Die Anfälligkeit für Kriechströme ist in solchen Liegenschaften besonders gross. Das System ist allerdings nur noch in nicht renovierten Altbauten zu finden. Bei Renovationen und für Neubauten ist das TN-S System vorgeschrieben. Werden in einem Mehrfamilienhaus aber nicht alle Wohneinheiten saniert, belasten die nicht-sanierten Einheiten die Liegenschaft weiterhin. Nicht saniert sind häufig auch Ställe. Vor diesem Hintergrund hat das ESTI (2015) eine Weisung betreffend Kriechströmen (Erdfehlerströmen) in Ställen erlassen (siehe Anhang).



Figur 2: Kriechströme in Häusern mit (a) TN-C Anschluss im Vergleich zu (b) TN-S Anschluss. Quelle: Mathys (2005), p.38.

„Hausgemachte“ Kriechströme können im TN-C-S (TN-C Netzanschluss und TN-S Elektroinstallation) gegenüber einem durchgängigen TN-C System reduziert werden. Je nach Ausführung der Hausinstallation können sie aber, wie oben erwähnt, immer noch erheblich sein.

Zur Vermeidung von Kriechströmen ist eine TN-S Installation (ab Verteilkasten) unabdingbar. Durch die strikte Trennung von Schutzleiter und Neutralleiter werden alle Ströme über die elektrischen Kabel aus dem Haus geführt und auch über den Schutz-Potenzialausgleich werden keine Brücken zum Betriebsstrom hergestellt (Figur 2).

2.2.3 Nicht-lineare Verbraucher

Immer bedeutsamer werden Störströme, die durch nicht-lineare Verbraucher verursacht sind. Letzteres sind Geräte, die mittels elektronischer Bauteile die sinusförmige Netzspannung in andere, anwendungsbedingte Spannungs- (und Strom)verläufe umwandeln. Zu solchen Geräten zählen Netzteile, elektronische Vorschaltgeräte, Frequenzumrichter oder Induktionskochherde. Heute sind beinahe alle am Stromnetz angeschlossenen Geräte nicht-lineare Verbraucher. Sie produzieren Oberwellenströme, welche die Neutralleiter belasten und sich bei ungünstiger Elektroinstallation über die Schutzleiter als Kriechströme in Gebäuden ausbreiten können.

Nicht-lineare Verbraucher erzeugen Spannungsverläufe, die in der Regel nicht kontinuierlich, aber periodisch sind. Solche Signalformen lassen sich aus einzelnen, unterschiedlichen Sinusschwingungen erzeugen. Die Grundschwingung entspricht der Periode des Signals (50 Hz), die „Detailform“ wird aus sog. Oberschwingungen, genauer: aus ganzzahligen Vielfachen der Grundschwingung (100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, etc.) konstruiert (die mathematischen Grundlagen dazu hat Joseph Fourier zu Beginn des 19. Jahrhunderts mit der nach ihm benannten Fourier-Analyse geliefert). Dabei treten drei Probleme auf:

(1) Neutralleiterströme. Neben unsymmetrischen Phasenbelegungen und Phasenverschiebungen können auch Oberschwingungen (Oberwellen, Harmonische) den Neutralleiter belasten. Deshalb wird der maximale Anteil an Oberwellen (sog. THD – Total Harmonic Distortion) limitiert. Er darf im Stromnetz 8 % nicht übersteigen. Insbesondere die 3. Harmonische (150 Hz) ist kritisch, denn sie addiert sich in einem Dreiphasensystem im Rückleiter (Neutralleiter, PEN-Leiter). Üblicherweise führt der Neutralleiter in einem Dreiphasensystem keinen oder nur wenig Strom, denn die zeitlich versetzten Schwingungen der einzelnen Phasen „löschen“ sich bei 50 Hz im Rückstrom gegenseitig aus. Bei 150 Hz (450 Hz, 750 Hz, etc.) jedoch addieren sich die Rückströme der einzelnen Phasen. In der Praxis wird bis etwa die doppelte Stärke des Phasenstroms (manchmal bis zum 2.5-fachen) gemessen (Mathys 2012); siehe auch: Dürrenberger and Klaus (2009). Der Einsatz von Geräten mit aktiver Leistungsfaktorkorrektur kann die Oberwellenanteile und damit die Belastung des Neutralleiters massiv senken.

(2) Gleichstromanteile. Häufig ist der von nicht-linearen Verbrauchern erzeugte Strom nicht exakt symmetrisch zur Nullachse (mathematisch: er enthält eine Harmonische Nullter Ordnung). Das bedeutet nichts anderes als dass ein kleiner Gleichstrom (DC) vorliegt. Weil sich Strom über die Erdung als Kriechstrom auf metallene Installationen des Hauses ausbreiten kann, bewirkt der von nicht-linearen Verbrauchern erzeugte DC-Anteil Korrosion auf den stromdurchflossenen Röhren.

(3) Störungen. Oberwellenströme verursachen elektromagnetische Störungen auf anderen Leitungen. Je grösser der Oberwellenstrom, desto grösser das Störpotenzial. Bereits bei wenigen 10 mA können Datenleitungen gestört sein (Mathys 2012). Die nicht-linearen Ströme führen zu kurzzeitigen Spannungsabfällen, die über die gemeinsame Neutralleiterimpedanz auf andere Phasen übersprechen und wiederum „dortige“ Verbraucher stören. Oberwellenströme können auch Rundsteueranlagen des VNB stören. Sie sind insgesamt gesehen ein ernsthaftes EMV-Problem. Nur in einem konsequent umgesetzten TN-S System treten solche Störprobleme nicht auf. In der neuen Niederspannungs-Verordnung (NIN) von 2015 werden dazu Normen festgelegt, welche den störungsfreien Betrieb von Geräten und Anlagen über einen Funktions-Potenzialausgleich gewährleisten.

2.2.4 Eisenbahnlinien

Die Eisenbahn verwendet als Rückleiter die Schiene. Bis 50 % des Rückstroms kann jedoch über die Erdung durch das Erdreich zum Unterwerk zurückfliessen. Nahe am Eisenbahntrasse verlegte Rohrleitungen können die Spannung dieser Ströme „abgreifen“. Je näher eine Leitung an der Schiene vorbeiführt, einen desto grösseren Anteil der Spannung wird von der Leitung aufgenommen. In 2 m Distanz sind es um 50 % (von der unmittelbar beim Trasse gemessenen Spannung), in 10 m Distanz um 20 %, in 50 m Distanz noch ca. 5 % (SfB 2006).

2.3 Kriechströme aufgrund kapazitiver und induktiver Einkopplung von HSL-Feldern

2.3.1 Kapazitive Einkopplung

Grundsätzlich ist für die Kriechstromproblematik die kapazitive Einkopplung im Vergleich zur induktiven von untergeordneter Bedeutung, weil elektrische Felder in der Praxis meist auf Oberflächen stossen, die geerdet sind.

Ein elektrisches Wechselfeld erzeugt auf einem isolierten Leiter eine elektrische Wechselspannung. Ein Beispiel sind senkrecht stehende Neonröhren, die (ungeerdet, also isoliert) dem elektrischen Wechselfeld unter einer Hochspannungsleitung (HSL) ausgesetzt sind. Zwischen den beiden Enden der Neonröhren baut sich kapazitiv eine Spannung auf, welche die Leuchtstoffröhre zum Glimmen bringen kann. Ein anderes Beispiel sind eingekoppelte Spannungen auf Metalldrähten von Zäunen, die unterhalb oder nahe an und parallel zu einer Freileitung stehen und gegenüber der Erde isoliert sind, z.B. Drähte die an Holzpfeilen montiert sind. Die Länge des Zaunes (Drahtes) spielt für die aufgenommene Spannung keine wesentliche Rolle. Der Draht besitzt auf seiner gesamten Länge gegenüber Erde dasselbe Spannungspotenzial, das bestimmt wird durch die Spannung der HSL und den Abstand zu den Leiterseilen. Hingegen ist die Länge des Zauns (also die „Menge Metall“ bzw. seine elektrische Kapazität) massgebend für den Strom der entsteht, wenn der Draht gegenüber Erde kurzgeschlossen wird. Die kapazitive Einkopplung von Spannung zeigt sich auch, wenn eine Person bei Berührung des Zauns auf einer isolierenden Unterlage steht. Trotz der Isolation kann es zu einem Stromfluss über den Körper kommen, weil bzw. wenn die Isolation kapazitiv überbrückt wird.

Bei Höchstspannungsleitungen können kapazitiv eingekoppelte Spannungen bis in den kV-Bereich gemessen werden. Die damit verbundenen Kurzschlussströme bei Erdung liegen im Falle von Zäunen jedoch sehr tief, in aller Regel deutlich unterhalb des Grenzwertes der NISV (0.5 mA). Grosse metallene Gegenstände, etwa Fahrzeuge, können stärkere Ströme verursachen als Metalldrähte von Zäunen (Reilly 1979). Es gilt deshalb bei grossflächigen Metallteilen den Kontaktstrom, der bei Erdung – also Berührung – entsteht, zu begrenzen, um gesundheitliche Gefährdungen zu verhindern. In einer Entfernung von einigen zehn Metern von einer Hochspannungsleitung ist die kapazitiv übertragene Spannung auf Leitungssysteme praktisch vernachlässigbar (He, Shi et al. 2011).

Eine spezielle Situation stellt die kapazitive Einkopplung zwischen verschiedenen Netzebenen dar, wenn z.B. Transport- und Verteilleitungen denselben Korridor nutzen. Die auf das Niederspannungsnetz übertragene Spannung (Streuspannung) kann beträchtlich sein (Patel and Lambert 2006). Diese Spannungseinkopplung ist jedoch nicht Gegenstand des vorliegenden Themas.

Kapazitive Kopplung gibt es nur oberhalb der Erde bei isolierten (ungeerdeten) Leitern. Für Kabel und Rohre die im Erdreich bzw. innerhalb von Gebäuden verlegt sind, sind nur induktive Einkopplungen relevant. Weil in nahezu allen Situationen rund um Gebäude die über kapazitive Kopplung bewirkten Kriechströme sehr gering sind, wird im Folgenden nicht weiter auf diese Ursache von Kriechströmen eingegangen.

2.3.2 Induktive Einkopplung

Magnetische Wechselfelder induzieren in leitfähigen Körpern elektrische Wechselspannungen, die entsprechende Ströme (man nennt sie Wirbelströme) auslösen. Entscheidend ist dabei der magnetische Fluss, das ist das durch eine bestimmte Fläche „fliessende“ Magnetfeld. Je grösser der Fluss, desto grösser ist die in einem Leiter (der diese Fläche abdeckt oder umschliesst) induzierte Spannung und der damit einhergehende Wirbelstrom. Dabei ist es egal ob es sich um einen idealen Leiter (Metall) oder um einen widerstandsbehafteten „Leiter“ (Erdreich, Tier, Mensch) handelt. Der Schutz vor Strömen, die durch induktive Einkopplung von Magnetfelder entstehen, ist v.a. für Grosssysteme (Rohrleitungen/Pipelines, lange Zäune) die parallel und nahe bei HSL-Trassen verlegt sind, von Bedeutung.

Ein bekanntes Beispiel von induktiver Einkopplung ist der Induktionsherd. Im beinahe idealen Leiter „Pfannenboden“ werden von den Magnetfeldern des Herdes elektrische Wirbelfelder induziert, die Wirbelströme antreiben. Die Widerstände, welche der magnetisierbare Pfannenboden diesen Strömen entgegensetzt, führt dazu, dass 80 % der elektrischen Energie in Wärme umgesetzt wird.

Die induktive Wirkung von HSL-Magnetfeldern entfaltet sich in erster Linie dort, wo leitende Materialien grosse Schlaufen bilden. Werden die durch diese Schlaufen gebildeten Flächen vom HSL-Magnetfeld durchflossen, werden vergleichsweise grosse Spannungen in den Schlaufen induziert. Entscheidend ist dabei die senkrecht zu den magnetischen Feldlinien stehende Fläche (eine sehr grosse Fläche, die gegenüber den Feldlinien stark geneigt ist, wird deshalb eine für die magnetische Flussberechnung eher kleine Fläche abgeben). Weil die magnetischen Feldlinien von Hochspannungsleitungen nahe am Trasse in Bodennähe tendenziell parallel zur Erdoberfläche verlaufen, gilt es in diesen exponierten Situationen v.a. Schlaufen zu beachten, die senkrecht stehen und parallel zur HSL liegen. In grösseren Entfernungen zur HSL verlaufen die Magnetfeldlinien senkrecht zur Erdoberfläche. Die grössten induktiven Wirkungen gehen dort von horizontalen Schlaufen aus (allerdings nimmt die Wirkung mit der Distanz vom Trassee deutlich ab). Die induktive Wirkung auf bzw. in einzelnen (grossflächigen) Metallteilen – etwa im Sinne des Induktionsherdes – ist in den allermeisten Fällen im Vergleich zur Wirkung bei grossen Schlaufen vernachlässigbar.

Schlaufen können durch die geometrische Anordnung von Leitern gegeben sein oder durch Berührung, wenn dadurch über die Erde Installationsteile zu einer Schlaufe geschlossen werden, zu Stande kommen. Ein Beispiel für letzteres ist der bereits erwähnte Zaun. Wenn dieser einseitig geerdet ist, bilden bei Berührung des Drahtes am anderen Ende Erdung, Draht, Körper der Person und Erde eine Schlaufe. Durch diese „Schlaufenfläche“ kann das 50 Hz Magnetfeld der nahen HSL fließen und eine elektrische Spannung induzieren, die einen Strom antreibt. Je grösser die Schlaufenfläche, desto grösser ist die induzierte Spannung / der induzierte Strom. Im Gegensatz zur kapazitiven Situation ist bei Induktion die Spannung also nicht mehr konstant über die Gesamtlänge des Zauns. Die Spannungshöhe ist eine Funktion der vom Magnetfeld durchflossenen Fläche: je länger der Zaundraht, desto grösser die Fläche (Draht, Boden, Erdungsstellen), desto höher die induzierte Spannung. An den Erdungsstellen ist sie Null, zwischen den Erdungen misst man den Maximalwert. Bei einseitiger Erdung liegt das Spannungsmaximum am anderen Ende.

Von besonderer Bedeutung sind Pipelines, wenn die Rohrsysteme parallel zu und auf oder nahe bei HSL-Korridoren verlaufen; siehe etwa: Sfb (2006), DNV (2015). Weil Magnetfelder leicht ins Erdreich eindringen, muss auch bei unterirdisch verlegten Rohrsystemen auf die induktive Einkopplung geachtet werden. Je länger die Parallelführung einer Leitung, desto grösser die induzierte Spannung (der generierte Strom) auf dem Rohrsystem. Die für die induktive Wirkung relevante Fläche ist dabei das (meist inhomogen) leitfähige Erdreich um die Rohrleitung herum. Die Pipeline nimmt, um im Bild des Zauns zu bleiben, die Funktion des Drahts ein.

Eine andere Form induktiver Einkopplung zeigt sich als elektromagnetische Störung. Wenn in einer Leitung Hin- und Rückstrom aufgrund von abfliessenden Kriechströmen, oder von Phasenverschiebungen oder Oberwellen nicht mehr gleich gross sind, dann ist diese Leitung aus EMV-Sicht nicht mehr „neutral“. Das die Leitung umgebende 50 Hz Magnetfeld kann sich in empfindliche Geräte / Schaltkreise einkoppeln und diese mit Störspannungen belegen. Patel and Lambert (2006) haben gemessen und berechnet, dass in der Nähe von Hochspannungsleitungen liegende Neutralleiter ebenso stark durch induktive Störspannungen belastet werden können wie durch asymmetrische Phasenbelastungen. Die induzierten Spannungen liegen im Bereich von 10-15 Volt.

2.4 Häufigkeit und Grössenordnung von Kriechströmen

2.4.1 Systembedingte Spannungen und Kriechströme

In Gebäuden sind primär systembedingte Ursachen für Kriechströme verantwortlich. Mit dem heute üblichen TN-C Netzanschluss können, wenn die Elektroinstallation nicht fachgerecht ausgeführt ist, Rückströme über die Schutzleiter auch auf Teile der Versorgungsinfrastruktur eines Gebäudes (Wasserleitungen, Gasleitungen, Heizungsrohre, etc.) übertreten. Diese Ströme sind in aller Regel „eigenverursacht“, können aber auch von aussen in Gebäude eingetragen sein.

2.4.1.1 Netzanschluss

Idealerweise trägt der Neutralleiter im Dreiphasensystem keinen Rückstrom. Aus drei Gründen ist dies in der Praxis selten der Fall: wenn die Phasen unterschiedlich stark ausgelastet sind, kompensieren sich die Neutralleiterströme (bzw. -spannungen) nicht mehr und der Netz-PEN-Leiter (bzw. der Neutralleiter im Falle eines TN-S Netzanschlusses) steht unter Spannung und trägt Strom. Das gilt auch für vom Verbraucher erzeugte Blindleistung durch Phasenverschiebungen, und last but not least produzieren nicht-lineare Verbraucher Harmonische, die als Oberwellenströme (dirty electricity) das Netz belasten.

Mathys (2012) hat die zwei Netzanschlussarten TN-C und TN-S hinsichtlich Kriechströmen beispielhaft verglichen. Für ein Mehrfamilienhaus in Dietlikon ZH zeigte sich, dass beim TN-C Anschluss die vagabundierenden Ströme auf den Schutzleitern und den Erdungssystemen um 10 % der Neutralleiterströme betragen (der Grossteil dieser vagabundierenden Ströme fliesst dabei auf den Schutzleitern, nur ein kleiner Teil – 20 % – fliesst als Kriechstrom auf den Hausinstallationsrohren: insgesamt manifestieren sich also 1-2 % des Neutralleiterstroms als Kriechstrom). Bei Einsatz vieler nicht-linearer Verbraucher, wie das in einem Geschäftshaus der Fall ist, können die Ströme auf den Schutzleitern und auf den in die Erdung einbezogenen Gebäudeinstallationen bis 50 % des Neutralleiterstroms betragen, wobei sich die Hälfte – insgesamt also bis ein Viertel des Neutralleiterstroms – als Kriechstrom manifestieren kann. Bei einem TN-S Netzanschluss reduzieren sich die Kriechströme markant um den Faktor 4 und mehr. Für kriechstromarme oder nahezu kriechstromfreie Gebäude ist der TN-S Netzanschluss unumgänglich.

Heute ist jedoch der TN-C Netzanschluss üblich, so dass Kriechströme nach wie vor ein Problem sind, auch in Gebäuden mit TN-S Elektroinstallation, da der Zusammenschluss von Neutral- und Schutzleiter am Hausanschlusskasten Rückströme auf den Schutzleiter und über die Verbindung mit dem Potenzialausgleich auch auf die Erdungssysteme zulässt. In elektrotechnisch gut geplanten oder sanierten Gebäuden kann das Problem allerdings minimiert werden. Bezogen auf die Bundesrepublik Deutschland meint Virnich (2012), dass in Neubauten Kriechströme eher selten seien. Hingegen messe man in Altbauten, die nicht gründlich saniert worden sind, sehr häufig vagabundierende Ströme. Das treffe insbesondere auf Mehrfamilienhäuser zu, wenn nicht alle Wohnungen auf TN-S umgestellt sind. Die Situation in der Schweiz ist nicht grundsätzlich anders.

2.4.1.2 Kriechströme in Gebäuden

Mathys (2012), Mathys (2005), Moser (2014) und Bränlich (2014) beziffern die in Wohngebäuden messbaren Kriechströme auf Rohrleitungen auf 0.5-1 A in stark belasteten Liegenschaften. Diese Ströme verursachen in 20 cm Abstand Magnetfeldimmissionen von 0.5-1 μT . Virnich (2012) spricht von gemessenen Spitzenbelastung von mehreren Ampère und Magnetfeldimmissionen bis 4 μT . Als Faustregel kann man sich merken, dass im schlechten Fall in Wohngebäuden Kriechströme die Stromstärke von 1 A erreichen können und die damit verbundene Magnetfeldbelastung in unmittelbarer Nähe im Bereich des Anlagegrenzwertes der NISV von 1 μT zu liegen kommt. Bei sehr starken Belastungen können doppelt so hohe Werte erreicht werden. In Geschäftshäusern oder gros-

sen Mehrfamilienhäusern mit vielen nicht-linearen Verbrauchern können gemäss Mathys (2012) jedoch deutlich höhere Kriechströme auftreten.

Does, Scelo et al. (2011) haben in über 200 Häusern in Kalifornien die Spannungsabfälle an Sanitärinstallationen (Badezimmer) gemessen und einen Mittelwert von knapp 6 mV erhalten (Höchstwerte: 10 mV). Sie stellten dabei eine sehr schwache Korrelation mit der Magnetfeldimmission fest, so dass man schlussfolgern kann, dass im untersuchten Sample Kriechströme vorwiegend systembedingt sind (siehe 2.2).¹

Ob sich das Problem mit Kriechströmen in Zukunft verschärfen oder eher entspannen wird, ist schwierig abzuschätzen. Elektrotechnische Sanierungen tragen mit Sicherheit zu einer Entspannung bei. Andererseits verschärft sich das Problem der Oberwellenbelastung. Dadurch erhöht sich u.a. auch die Impedanz der Netz-PEN-Leiter, was den Parallelwiderstand der Kriechstromwege im Verhältnis zum Widerstand des PEN-Leiter-Weges senkt. Das führt, ceteris paribus, zu einer Erhöhung der Kriechströme. Mathys (2012) hat in Dietlikon innerhalb weniger Jahre eine Erhöhung der mehrheitlich durch Oberwellen verursachten Rückströme auf den Netz-PEN-Leitern von 30 % beobachtet und auch festgestellt, dass bei stark oberwellenbehafteten Rückströmen ein grösserer Teil als Kriechstrom auf den Hausrohren gemessen wird als auf den hausinternen Schutzleitern.

2.4.2 Von HSL induzierte Spannungen und Ströme

In Gebäuden sind primär systembedingte Ursachen (Transportnetz, Verteilnetz, Hausinstallation, Verbraucher) für Kriechströme verantwortlich. Von HSL induzierte Spannungen und Ströme sind nur in Ausnahmefällen, wenn das Gebäude sehr nahe bei einem Starkstromtrasse liegt und gleichzeitig Hausinstallationen grosse Induktionsschleifen bilden, von Belang.

2.4.2.1 Generelle Immissionssituation

Grossinfrastrukturen

Die Exposition von Gebäuden gegenüber Magnetfeldern von Hochspannungsleitungen ist rein quantitativ gesehen unbedeutend. Nur Gebäude im direkten Umfeld von HSL weisen maximale Immissionspegel im Bereich von oder oberhalb der Anlagengrenzwerte auf. Vulevic and Osmokrovic (2011) geben für hochexponierter Wohnungen Höchstwerte von 2-4 μT an; siehe auch: Nicolaou, Papadakis et al. (2011). Gemäss Huss, Spoerri et al. (2009) befinden sich weniger als 0.5 % aller Schweizer Haushalte in einem Korridor von 50 m um 220 und 380 kV Leitungen. Für Frankreich werden Werte von 0.2 % – für Mittelspannung: 0.5 % (Sermage-Faure, Demoury et al. 2013) – für England von 0.1 % (de Vocht and Lee 2014) angegeben. Ausserhalb eines Korridors von 50 m um eine HSL liegen die maximalen Immissionen, insbesondere von kleineren Transport- und von Verteilleitungen, deutlich unter 1 μT (Bessou, Deschamps et al. 2013). Aufgrund des über den Tages- und Jahresverlauf schwankenden Strombedarfs variieren die Immissionen. Die Grössenordnung der Schwankung liegt im Bereich von Faktor 3-5. Weil die oben erwähnten Werte maximale Belastungen angeben, liegen die durchschnittlichen Immissionen um den erwähnten Faktor 3-5 tiefer; nach Nicolaou, Papadakis et al. (2011) sind die Schwankungen noch grösser (bis Faktor 10) wenn man worst-case Phasenbelegungen berücksichtigt.

Eine zweite Quelle erhöhter Immissionen stellen Transformatoren dar, die in Gebäuden untergebracht sind. In Wohnungen direkt oberhalb von Traforäumen werden Werte um 0.3-1 μT gemessen; siehe dazu: Ilonen, Markkanen et al. (2008), Roosli, Jenni et al. (2011), Zaryabova, Shalamanova et al. (2013).

¹ Zu berücksichtigen sind dabei die in den USA verwendeten tieferen Spannungen, bzw. daraus resultierenden grösseren Ströme.

Eisenbahntrassen neben Gebäuden sind eine weitere Quelle niederfrequenter Magnetfelder. Die Belastungen schwanken sehr stark, denn die Fahrdrähte sind nur bestromt, wenn Züge den entsprechenden Abschnitt befahren. Zudem wird je nach Länge des Zuges, Beschleunigung und Geschwindigkeit mehr oder weniger Strom benötigt bzw. rekuperiert. Die Schwankungen belaufen sich schnell auf einen Faktor 10-20. Der 24-Stunden Mittelwert der Flussdichte des 16.7 Hz Magnetfeldes einer Doppelspurstrecke beträgt 10 m vom Trassee entfernt ca. 1 μT .

Hausinstallationen

Die Magnetfeldimmissionen der elektrischen Hausinstallation sind klein, weil Phase und Rückleiter eng beieinander liegen und sich die Magnetfelder dadurch gegenseitig weitgehend kompensieren. Die durchschnittlichen Pegel liegen in der Grössenordnung von 0.1 μT . Grellier, Ravazzani et al. (2014) geben an, dass in 80 % der Haushalte in der EU27 Region weniger als 0.05 μT gemessen wird, in 30 % weniger als 0.01 μT . Diese Daten decken sich mit Angaben von Kheifets, Afifi et al. (2006), Karipidis (2015) oder Tomitsch and Dechant (2015).

2.4.2.2 Exposition

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass Immissionen nicht mit Expositionen von Personen gleichgesetzt werden können. Hohe Immissionspegel an einem Ort führen erst dann zu hohen persönlichen Expositionen, wenn sich Personen (entsprechend lange) an diesen Orten aufhalten.

Nach Bowman (2014) belaufen sich die durchschnittlichen persönlichen Expositionen in europäischen Haushalten auf 0.04 μT . Mitberücksichtigt ist dabei auch die Exposition gegenüber elektrischen Haushaltsgeräten, die etwa einen Drittel der Gesamtexposition ausmachen (Behrens, Terschuren et al. 2004). Roosli, Struchen et al. (2014) schätzen hingegen, dass der Anteil der Geräte deutlich geringer ist. Stratmann, Wernli et al. (1995) massen bei über 500 Personen, die mit Exposimetern ausgerüstet wurden, die typische Belastung der Schweizer Bevölkerung durch 50 Hz Magnetfelder. Die täglichen Mittelwerte lagen für drei Viertel der Teilnehmenden unter 0.2 μT . Die höchsten Werte wurden an Arbeitsplätzen gemessen. Roosli, Struchen et al. (2014) erfassten die persönliche Exposition gegenüber HSL und Transformatoren bei 75 Kindern aus der Schweiz und Italien. Der Mittelwert (geometrisches Mittel) betrug 0.05 μT , 2 % der Messwerte lagen über 0.4 μT . Dabei zeigte sich, dass der geometrische Mittelwert der Schlafzimmerimmissionen gut als Näherung der mittleren persönlichen Exposition genommen werden kann (Struchen, Liorni et al. 2015).

2.4.2.3 Induzierte Spannungen und Kriechströme

Ein Fall bezieht sich auf parallel zu Stromtrassen verlegte Pipelines oder andere metallene Langstrukturen, ein anderer auf sehr nahe an HSL gelegene Gebäude, wenn deren Installationen oder Teile davon gegenüber dem Magnetfeld grosse Induktionsschlaufen bilden. An Orten bzw. in Gebäuden, wo die Anlagegrenzwerte eingehalten sind, spielen von HSL induktiv eingekoppelte Kriechströme keine Rolle. Die induzierten Spannungen sind zu gering um bedeutsame Ströme zu erzeugen. Nur für sehr exponierte Lagen mit hohen magnetischen Flussdichten und sehr ungünstigen Anordnungen der Gebäudeinstallation muss an die Möglichkeit induktiv produzierter Ströme gedacht werden.

Zäune

Bei einem angenommenen Abstand der Leiterseile vom Boden von 20 m muss ein dicker Zaundraht (3 mm), der auf dem Leitungstrassee verläuft, gegen 100 m lang sein, um kapazitive Entladungsströme über 0.5 mA zu verursachen; ausserhalb des Trassees muss die parallel zur HSL geführte Zaunlänge sogar mehrere hundert Meter betragen (Reilly 1979). Um unangenehme elektrische Schläge bei Berührung zu verhindern, sollten lange Metallzäune in der Nähe von HSL deshalb regelmässig (z.B. alle 50 m) geerdet werden. Man beachte: Spannungen können zwar lästig sein

(Elektrisierung), im Gegensatz zu Strömen sind sie aber gesundheitlich unproblematisch. Im geschilderten Fall des Zauns betragen die Spannungen einige wenige Volt (Ortmann 2009).

Fahrzeuge

Messungen an Bussen unterhalb von HSL ergaben für den Berührungsstrom Werte um 0.4 mA pro kV/m elektrischer Feldstärke und für die Berührungsspannung 300-400 V pro kV/m (Reilly 1979). Unter einer 380 kV Höchstspannungsleitung können deshalb grosse Fahrzeuge durchaus unangenehme Berührungsströme verursachen. Bei 5000 V/m (Immissionsgrenzwert gemäss NISV) kann von grossen Fahrzeugen eine Berührungsspannung von 1000-2000 Volt (es können dabei Entladungsfunken mit punktueller Hautverbrennung entstehen) und ein Berührungsstrom von 2-3 mA ausgehen.

Pipelines / Rohrsysteme

Eine unterhalb einer 380 kV Freileitung (Betriebsstrom 1 kA) verlaufende Rohrleitung kann theoretisch eine Spannung von über 100 V pro Laufkilometer aufnehmen (SfB 2006). Gemäss CENELEC (EN 50443) darf die maximale Berührungsspannung 60 V nicht übersteigen. Der Arbeitsschutzgrenzwert beträgt 15 V. Entsprechende Erdungsmassnahmen sind deshalb an solchen Rohrleitungen nötig. Reale Leitungen weisen zudem häufig Leckstellen auf. Die induzierten Spannungen sind in der Praxis deshalb deutlich tiefer. Sie belaufen sich bei nahe am Freileitungstrasseee grosser Hochspannungsleitungen verlegten Pipelines auf einige wenige Volt (Czumbil, Micu et al. 2013). 10 V gelten als hoch. Zudem sind Betreiber bemüht, wegen der elektrochemischen Korrosionsgefahr die Potenziale tief zu halten, möglichst unter 5 V (Fickert, Schmutzner et al. 2010); für noch tiefere Werte: Czumbil, Stet et al. (2012). Bei 5 V (1 V, 10 V) liegt die Berührungsstromstärke beim Menschen (angenommener Widerstand: 2000 Ω) bei 2.5 mA (0.5 mA, 5 mA).

Gebäude / Ställe

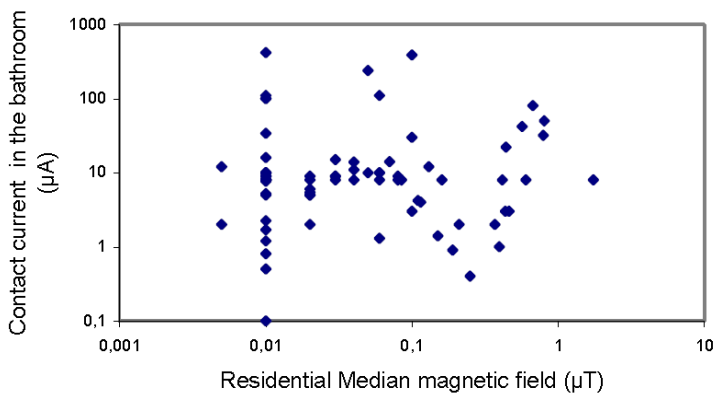
Für eine worst-case Abschätzung gehen wir von einer Grossschlaufe aus, die beispielsweise gebildet wird von einem grossen, geerdeten Tiergatter, das eine anrechenbare Fläche von 60 Quadratmetern umschliesst (eine 40 x 1.5 m senkrecht auf die Magnetfeldrichtung stehende Fläche), und einer Immissionslage mit einer durchschnittlichen magnetischen Flussdichte von 5 Mikrottesla. Daraus errechnet sich eine induzierte Spannung von ca. 0.1 V.¹ Grössere Flächen und stärkere Magnetfelder ergeben höhere, kleinere Flächen und schwächere Magnetfeldstärken ergeben tiefere induzierte Spannungen.

Gehen wir von einem elektrischen Widerstand einer Kuh von 500 Ω aus, so liegen die durch induktive Kopplung in sehr stark exponierten Höfen möglichen Ströme durch die Tiere bei obigen Annahmen im Bereich von 0.2 mA (0.1 V / 500 Ω = 0.2 mA). In 50 m Distanz vom Trasseee liegen die Feldstärken und damit auch die induzierten Spannungen und Ströme einen Faktor 10 tiefer, können also vernachlässigt werden. Für den Menschen ergeben sich aufgrund des höheren elektrischen Widerstands (um 2000 Ω und höher, stark abhängig vom Schuhwerk, also der Isolation zum Untergrund) ca. 4 Mal tiefere Werte für den Berührungsstrom (bei obigen Annahmen also um 0.05 mA). Vergleichsweise hohe induzierte Spannungen haben wie bereits erwähnt Patel and Lambert (2006) auf dem Neutralleiter einer Niederspannungslinie, die während einer Meile einem (unter Vollast stehenden) 500 kV Trasseee folgte, gemessen. Die Werte lagen im Bereich von 10-15 V und machten über die Hälfte des Stromflusses auf dem Neutralleiter aus. Je nach Hausinstallation können unter solch aussergewöhnlichen Bedingungen beträchtliche Kriechströme in Wohnungen eingetragen werden.

Kavet and Zaffanella (2002) und Kavet, Zaffanella et al. (2004) untersuchten den Bezug zwischen Berührungsströmen in Badezimmern und Magnetfeldimmissionen in US-amerikanischen Wohn-

¹ $\frac{\partial}{\partial t} \Phi = \frac{\partial}{\partial t} A * B_0 \sin \omega t; \omega = 2\pi f; f = 50 \text{ Hz}; A = 60 \text{ m}^2; B_0 = 5 \mu\text{T}$

häusern. Sie fanden schwache Zusammenhänge zwischen den zwei Grössen, was auf eine zumindest teilweise induktive Spannungsaufnahme von Wasserleitungen hinweist. Über die Größenordnung dieses Anteils verglichen mit dem Anteil der durch Potenzialdifferenzen in der Elektroinstallation verursachten Spannungen gehen die Autoren nicht näher ein. In ihrer neuesten Publikation (Kavet, Hooper et al. 2011) streichen sie jedoch heraus, dass die grosse Mehrzahl der Kontaktströme in Haushalten konduktiv verursacht ist. Die Berührungsspannungen beliefen sich um 10-100 mV, etwa 4 % der Bewohner waren Berührungsspannungen über 100 mV ausgesetzt. Der aus einer Spannung von 50 mV berechnete Kontaktstrom bemisst sich auf 0.02 mA.



Figur 3: Messresultate zum Zusammenhang zwischen Kontaktströmen und Magnetfeldimmissionen in Wohnhäusern (kein Zusammenhang erkennbar). Quelle: Lilien, Dular et al. (2009), p. 8.

Eine Messung in 90 Häusern in Belgien ergab durchschnittliche Kontaktströme im Bereich von 0.01 mA. 6 Häuser wiesen Werte über 0.1 mA aus. Der Maximalwert betrug 1 mA. Die Studie zeigte keinen Zusammenhang zwischen Kontaktströmen und Magnetfeldbelastung (Lilien, Dular et al. 2009); siehe Figur 3.

3 Kriechströme und Vieh – Stand der Erkenntnisse

3.1 Situation in Ställen

3.1.1 Ein Fallbeispiel

Im Folgenden stellen wir als Beispiel den Fall des Bauern Thomas Jucker, Dettenreid (ZH), dar, wie er von Küenzi (2015) beschrieben worden ist:

Auf dem Bauernhof wurde nach Installation eines Melkroboters festgestellt, dass die Kühe nur widerwillig die Melkanlage betraten. Zudem stellte der Bauer eine Abnahme der Milchqualität und eine Zunahme von Euterentzündungen fest. Messungen ergaben erhöhte Stromwerte auf der Melkanlage. Es wurden bis zu 60 mA gemessen, an der Erdungsstelle des Stalls bis zu 300 mA. Die Suche nach den Ursachen der Kriechströme gestaltete sich schwierig. Erst unter Leitung des ESTI konnte das Problem erkannt und behoben werden. Nachdem die ganze Liegenschaft vom Stromnetz getrennt wurde, und weiterhin Kriechströme vorhanden waren, die erst mit der Kappung der Erdungen verschwanden, war klar, dass es sich um ein von aussen eingeschlepptes Problem handeln musste (siehe 2.2.1). In der Tat wurden die Kriechströme über die Wasserleitung in die Liegenschaft geholt. Verursacher waren die Erdrückströme einer nahe gelegenen Trafostation, die auf der Wasserleitung zirkulierten. Durch galvanische Entkopplung (elektrische Isolation) der Wasserleitung des Stalls von der Hauptwasserleitung konnte gewährleistet werden, dass kein Strom mehr in die Erdungen des Stalls fliesst. Zusätzlich wurde ein zentraler Erdungspunkt installiert, um den Potenzialausgleich fachgerecht zu gewährleisten. Das Resultat liess danach nicht lange auf sich warten: Die Strommessungen ergaben Wert im Bereich von 1-2 mA, und das Verhalten der Kühe verbesserte sich markant. Allerdings dauerte das seine Zeit. Tiere reagieren nicht sofort auf Veränderungen, sondern müssen sich erst an neue Situationen angewöhnen.

3.1.2 Messungen in Ställen

Obiges Fallbeispiel zeigte, dass in ungünstigen Fällen beträchtliche Kriechströme auf Metallinstallationen und Melkständen in Ställen gemessen werden können. Übliche Ströme liegen im Bereich von einigen bis einigen Zehn mA. Die Ausgleichsspannungen betragen typischerweise bis etwa 1 V, höhere Werte sind die Ausnahme, tiefere die Regel.

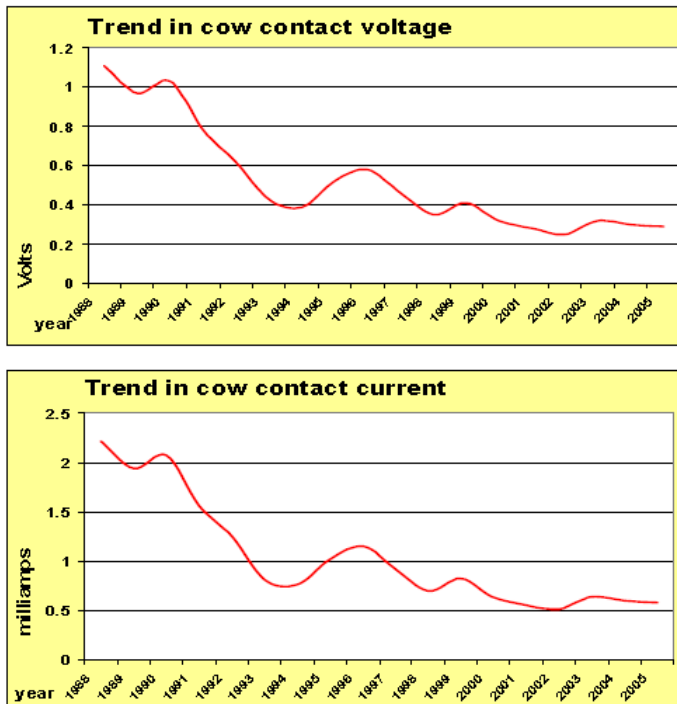
Kriechströme in Ställen sind keine Ausnahme und können häufig auch auf Melkständen gemessen werden; siehe Fallbeispiel oben, sowie: Hömberg (2006), Bräunlich (2014), Savary and Kauke (2008), ESTI (2015), Reinemann (2009). Für Wohlbefinden und Gesundheit der Tiere entscheidend sind die Berührungsspannungen und die damit verknüpften Berührungströme. Um diese abschätzen zu können, muss der elektrische Widerstand einer Kuh berücksichtigt sein.¹ Dieser variiert. Reinemann (2007) gibt als Huf-Huf Widerstand auf feuchter, sauberer Unterlage 500 Ω an (siehe dazu auch: 3.2.1). Das entspricht nahezu einer worst-case Annahme. Im Falle einer trockenen Unterlage oder Stroh rechnet man im Allgemeinen mit 1000 Ω , für den Widerstand Maul-Huf werden 500 Ω angenommen. Bei einer Spannung von 1 V ergibt sich demnach für den schlechten Fall ein Berührungsstrom von 2 mA. In Ausnahmefällen kann er höher sein. Werden die Elektroinstallationen gemäss NIN ausgeführt, sollten die Spannungsabfälle maximal wenige 10 mV betragen, die entsprechenden Körperströme im Bereich von deutlich unter 0.1 mA liegen.

Der Staat Wisconsin hat 1987 ein Kriechstrom-Projekt zur Analyse und Reduktion dieser Ströme auf Farmen ins Leben gerufen. Das Projekt wurde 1995 in ein definitives und langfristiges Monitoring- und Aktionsprogramm umgewandelt, das sowohl strom- wie auch veterinärseitig verankert ist. Aus dem Programm sind eine ganze Reihe von Publikationen entstanden. Erste Messdaten finden

¹ Dies wird im Sinne einer Worst-Case Annahme verstanden: „hinter“ der abgegriffenen Spannung (Im Sinne der Thévenin Ersatz-Schaltung: keine Innenimpedanz) werden keine Impedanzen, welche die Stromstärke begrenzen würden, angenommen.

sich in: Dasho, Cook et al. (1995) oder Reines, Cook et al. (1998). Dasho, Cook et al. (1995) haben die Berührungs- bzw. Körperströme in über 1000 Höfen gemessen (Widerstand: 500 Ω). Bei über 90 % der Tiere lagen die Stromstärken unter 2 mA, bei über 70 % der Tiere unter 1 mA. Die durchschnittliche Stromstärke bei den Betrieben die wenig belastet waren (< 1 mA) betrug 0.3 mA, die Spannungen 0.9 V; für die stärker belasteten Betriebe (> 1 mA): 1.5 mA und 1.8 V.

PSCW (2006) zeigt die Daten in einer längeren Zeitreihe. Die durchschnittlichen Erdungsspannungen der Neutralleiter betragen zwischen 1 und 1.5 V – siehe auch: Polk (2001). Die Berührungsspannungen und -ströme der Tiere liegen heute im Bereich von 0.3 V bzw. 0.5 mA (Figur 4).



Figur 4: Berührungsspannungen (oben) und Körperströme (unten) auf Bauernhöfen in Wisconsin. Quelle: PSCW (2006), p. 14.

In einem Statusbericht zum Wisconsin-Programm von Roberts and Kasper (2014) konnte festgestellt werden, dass im Gegensatz zum Beginn des Programms, als in ca. 40 % der Höfe die um Kriechstrommessungen baten die Werte über 2 mA lagen (als „level of concern“ definiert), gegenwärtig (und seit über einem Jahrzehnt) nur noch in 5 % der Höfe solche Werte erreichen.

Was Schrittspannungen anbetrifft, haben Messungen in Ställen und auf Höfen in den USA ergeben, dass für 1.5 m Schrittdistanz die üblichen Erdspannungen, auch in der Nähe von Hochspannungsleitungen unter 50 mV liegen (Stetson 1999), also kaum Anlass zu Sorgen geben müssen. Höhere Schrittspannungen sind nur in speziellen Situationen, z.B. an Übergängen unterschiedlich leitfähiger Untergründe, zu erwarten (Pellerin, Alumbaugh et al. 2004). Auf Höfen in Minnesota betrug die Schrittspannungen mehrheitlich weniger als 10 mV (Polk 2001).

3.2 Wirkungen

Kriechströme in Ställen haben direkte und indirekte Auswirkungen auf das Vieh. Zu den direkten Auswirkungen zählen je nach Stromstärke (i) milde Verhaltensänderungen, die auf eine Wahrnehmung der Ströme hinweisen (bis ca. 3 mA), (ii) Muskelzuckungen, die auf einer Einwirkung der Ströme auf die natürlichen Nervensignale beruhen (bis ca. 5 mA), (iii) starke Verhaltensänderungen, die als Anpassungsreaktion zur Schmerzvermeidung zu interpretieren sind (ab ca. 5 mA).

Zu den indirekten Auswirkungen zählen bei entsprechend hohen Kontaktsspannungen bzw. Kriechströmen temporär reduzierte Wasser- und Nahrungsaufnahme wenn die Kriechströme Tränken und Futterkrippen belasten, sowie (bei anhaltend starken Strömen) Einbussen in der Milchproduktion und/oder Milchqualität, insbesondere wenn die Kriechströme auf Melkständen gemessen werden.

Im Folgenden werden diese Wirkungen genauer beschrieben. Für Informationen zum biologischen Wirkmechanismus der Nervenstimulation sei auf die einschlägige Literatur verwiesen, etwa: Malmivuo and Plonsey (1995), Reilly (2012), WHO (2007).¹

3.2.1 Direkte Auswirkungen: Wahrnehmung und Verhalten

Wegen des geringeren Körperwiderstandes geht man allgemein davon aus, dass Kühe sensibler auf Kriechströme reagieren als Menschen. Experimente haben gezeigt, dass die Variabilität zwischen den Tieren sehr gross ist (bis Faktor 10). Die untere Wahrnehmungsschwelle von Körperströmen wird bei etwa 1 mA angesetzt. Verhaltensreaktionen zeigen Tiere im Bereich ab ca. 3 mA, aktives Ausweichverhalten beginnt ab ca. 5 mA. Nach einer Anpassungszeit von einigen Tagen gewöhnen sich die meisten Tiere an Ströme in dieser Grössenordnung an und zeigen keine Auffälligkeiten mehr.

In Tabelle 1 sind Schwellenwerte zur Wirkung von Berührungsströmen und Berührungsspannungen auf das Vieh zusammengestellt. Die Angaben stellen die in der wissenschaftlichen Literatur allgemein akzeptierten Werte dar. Folgende Review-Studien können als Quellen und für weitere Details konsultiert werden: Hultgren (1990), Lefcourt (1991), Erdreich, Alexander et al. (2009), Rigalma, Duvaux-Ponter et al. (2009), Reinemann (2005), Reinemann (2008), Reinemann (2012). Figur 5 zeigt die in Lefcourt (1991) angegebenen Werte.

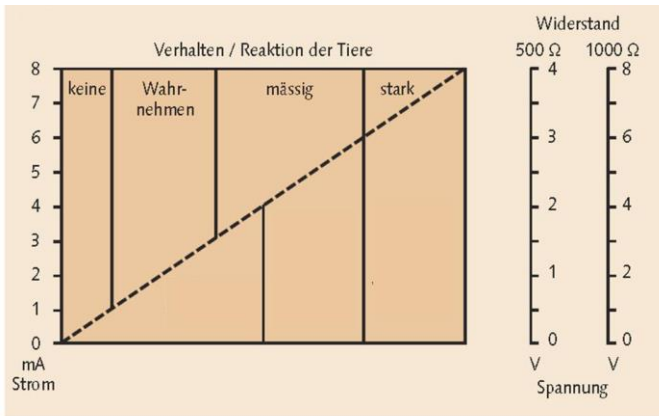
	500 Ω	1000 Ω	2000 Ω	
in mA	in V	in V	in V	
1	0.5	1	2	Wahrnehmungsschwelle
3	1.5	3	6	Reaktionen
5	2.5	5	10	Ausweichverhalten

Tabelle 1: Auswirkungen von Kriechströmen und Berührungsspannungen bei drei verschiedenen Widerständen auf das Vieh (die Werte müssen als Grössenordnungen verstanden werden).

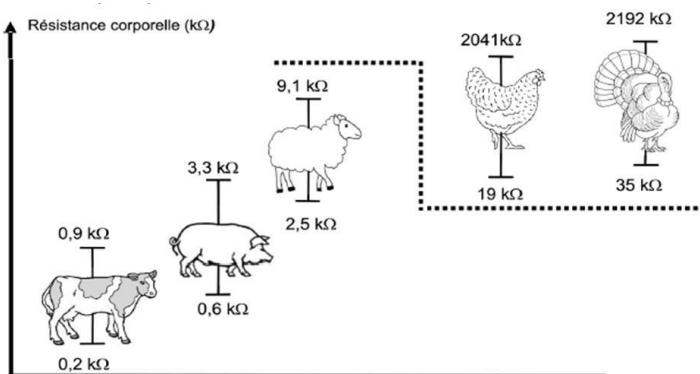
Die Körperwiderstände (inkl. Berührungswiderstände²) hängen von der Tierart ab (Figur 6), sowie von verschiedenen anderen Faktoren wie Umgebungsbedingungen (feucht, trocken; Erdungsverhältnisse; Figur 7 und Figur 8), Art des Kontaktes (Figur 9), Alter des Tieres (Figur 8), oder individuelle Sensitivität gegenüber elektrischen Strömen (Figur 10); siehe dazu auch: Appleman and Gustafson (1985). Gemäss Reinemann (2007) reagieren Kühe etwas sensibler auf Spannungen als Menschen, aber weniger sensibel auf Ströme.

¹ Für Wirkungen elektrischer und magnetischer Felder siehe etwa: Fedrowitz, M. (2014): Cows - a big model for EMF research, somewhere between Vet-Journals and „Nature“. Univ. of Vet. Med, Hannover. Link on website of bioelectromagnetics society: <https://www.bems.org/node/14835>.

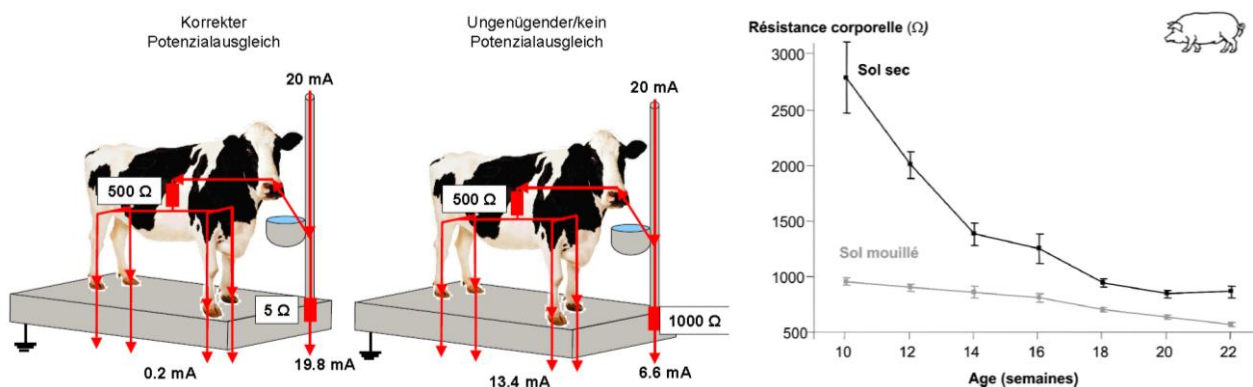
² Die Berührungswiderstände sind schwierig abzuschätzen. Sie hängen ab von der Grösse, der Feuchtigkeit, dem Anpressdruck und der Sauberkeit der berührenden Oberflächen (hier relevant: nasse Stallböden).



Figur 5: Auswirkungen von Spannung und Strom auf das Verhalten von Kühen. Quelle: Savary and Kauke (2008), p. 2 (leicht angepasst), Originalabbildung in Lefcourt (1991), p. 3-22.



Figur 6: Körperstromwiderstände von Nutztieren. Quelle: Rigalma, Duvaux-Ponter et al. (2009), p. 293; leicht angepasst.

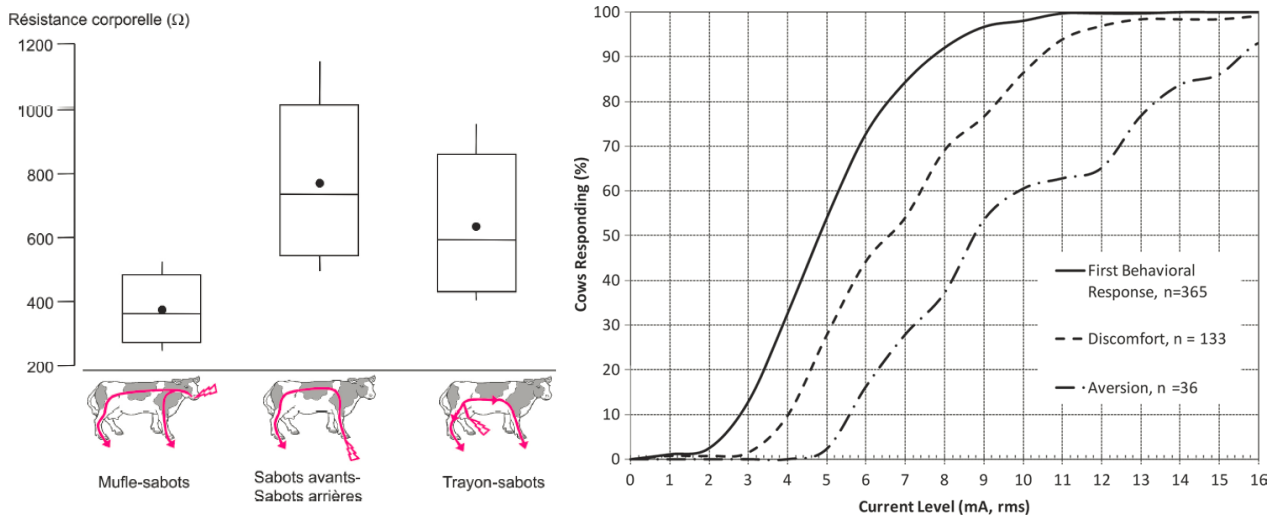


Figur 7 (links): Körperstromstärken durch eine Kuh, abhängig von den Erdungsbedingungen der Tränke. Quelle: Savary (2009), p.11.

Figur 8 (rechts): Abhängigkeit des Körperstromwiderstandes von der Umgebung und vom Alter des Tieres (Beispiel Schwein); Quelle: Rigalma, Duvaux-Ponter et al. (2009), p. 294.

Eine abweichende Beurteilung geben Hillman, Stetzer et al. (2013). Ihre Ansicht stützt sich dabei teilweise auf in der Scientific Community wenig akzeptierte Literatur. Hillmann et al. argumentieren, dass die heute allgemein anerkannten Schwellenwerte auf Beobachtungen mit reinen Sinusschwingungen beruhen und Effekte von Oberschwingungen und insbesondere von Transienten

(Flicker bzw. sehr kurzfristige Spannungsspitzen oder -abfälle, die etwa bei Ein- und Ausschaltvorgängen entstehen) nicht berücksichtigen (Hillman 2014). Auch schwache Oberwellensignale würden biologische Wirkungen auf das Vieh haben (Aneshansley, Pellerin et al. 1995). Allerdings seien dazu auch, gibt Reinemann (2012) zu bedenken, höhere Ströme bzw. Spannungen notwendig. Hillman, Stetzer et al. (2013) präsentieren Daten zu Schrittspannungen auf 12 Höfen mit insgesamt 1700 Tieren; siehe dazu auch (Polk 2001). Ihrer Meinung nach beeinflusst insbesondere die 42. Oberwelle (2520 Hz; 60 Hz Grundfrequenz) die Milchproduktion. Sie plädieren für massiv tiefere maximale Schrittspannungen (<https://www.msu.edu/user/hillman/elecshok.htm>).



Figur 9 (links): Körperstromwiderstand bei unterschiedlichen Stromwegen und Variabilität der Widerstände zwischen den Tieren (die Höhe der Blöcke umfasst jeweils 90 % der Tiere). Quelle: Rigalma, Duvaux-Ponter et al. (2009), p. 298.

Figur 10 (rechts): Sensitivität von Kühen gegenüber Kriechströmen. Schwarze Linie: Anzeichen von Wahrnehmung; gestrichelt: Hinweise auf Unwohlsein; strichpunktirt: aktives Ausweichverhalten. Le-sebeispiel: bei 8 mA nehmen über 90 % der Tiere den Strom wahr, 70 % zeigen Anzeichen von Unwohlsein und bei knapp 40 % der Tiere beobachtet man Ausweichverhalten. Quelle: Erdreich, Alexander et al. (2009), p. 5958; die Daten basieren auf 15 publizierten Studien / Experimenten.

3.2.2 Indirekte Auswirkungen

Berührungsspannungen und damit zusammenhängende Körperströme können, wenn sie ausreichend gross sind, Wohlbefinden und Milchleistung von Kühen negativ beeinflussen. Wenn Tränken und Krippen unter Spannung stehen, reagiert das Vieh sensibel, gewöhnt sich aber bis in den Bereich um 4-5 V bzw. 4-5 mA an die Situation und zeigt dann normales Trink- und Fressverhalten. Die grosse Mehrzahl der vorliegenden Studien konnte bis in diesen Expositionsbereich hinsichtlich Produktivität und Qualität (somatischer Zellgehalt der Milch) keine Auffälligkeiten feststellen, auch kein gehäuftes Auftreten von Mastitis (Euterentzündung). Bei einzelnen Tieren sind jedoch abweichende Befunde möglich. Mengen- und Qualitätseinbussen beruhen nicht auf direkten Wirkungen des Stroms, sondern auf Verhaltensänderungen der Tiere (reduziertes Trinken und Fressen).

3.2.2.1 Nahrungsaufnahme

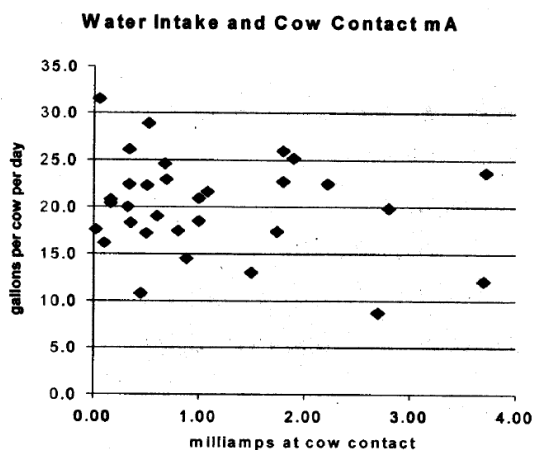
Wenn metallene Futterkrippen und / oder Wassertränken unter erhöhten Erdungsspannungen stehen, können bei Berührung der Metallteile durch die Tiere entsprechende Ströme fliessen. Tiere entwickeln Ausweichverhalten, um unangenehme oder gar schmerzhaft Schläge / Ströme zu vermeiden. Das kann im Extremfall zu einer Unterversorgung führen. Betreffen Kriechströme Zeiten und Orte, an denen sich das Vieh nur gelegentlich aufhält, ist das Ausweichverhalten hinsichtlich Nahrungsaufnahme und Milchproduktion wenig bedeutsam. Umgekehrt können für die Versorgung der Tiere zentrale Tränken und Futterkrippen, die unter Strom stehen, die Versorgung verzö-

gern oder stören, wenn unangenehme oder gar schmerzhaft elektrische Verhältnisse nachhaltig bestehen bleiben.

In Tabelle 2 sind die verfügbaren Daten aus 38 Tests / Experimenten mit total etwas mehr als 800 Kühen hinsichtlich Nahrungsaufnahme und Produktivität zusammengestellt. Die Zahlen sind einer Auflistung von Studien in der Review-Arbeit von Reinemann entnommen worden (Reinemann 2008). Die Angaben dürfen nicht als exakte Zahlen angesehen, sondern müssen als Grössenordnungen verstanden werden. Zudem betreffen die Beobachtungen hinsichtlich Wasser- und Nahrungsaufnahme kurzfristige Verhaltensänderungen. Die meisten Tiere passen sich innerhalb einiger Tage an Spannungen bis 6 V auf Tränken an (Rigalma, Duvaux-Ponter et al. 2010). Nach dieser Adaptionszeit zeigen sie meist keine Auffälligkeiten mehr (Lefcourt (1991), Reinemann (o.J.), Reinemann, Stetson et al. (2005), siehe Figur 11). Ein update von Reinemann liess die Gesamtaussage unverändert (Reinemann 2012).

Spannung	tägliche Wasser- / Nahrungsaufnahme	
	Verzögerung	Reduktion Menge
1 V	10-15	0
2 V	-	10
3 V	30-40	10
4 V	50-60	20
5 V	100	30-50
6 V	100	50-80
7 V	100	100
8 V	100	100

Tabelle 2: Wasser- und Nahrungsaufnahme in Abhängigkeit von Berührungsspannungen. Zahlen zeigen ungefähre Anzahl der Tiere in %. Quelle: (Reinemann 2008), Tabelle 3, p. 39-41.



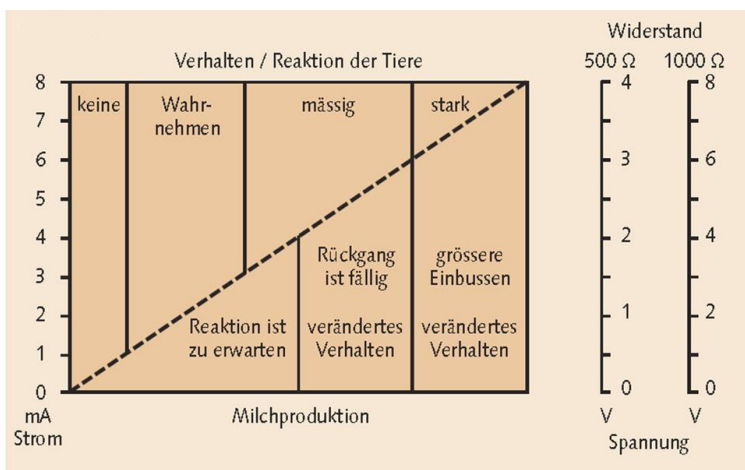
Figur 11: Wasseraufnahme und Körperströme. Quelle: Roberts, Cook et al. (2003), p. 131.

3.2.2.2 Produktivität und Krankheiten

Gemäss Lefcourt (1991) sind erste Auswirkungen auf die Milchproduktion ab 4-5 mA (4-5 V) bei einer kleinen Minderheit von Tieren (7 %) zu erwarten. Vor diesem Hintergrund wird empfohlen, die Berührungsspannungen unter 2 V und den Kontaktstrom unter 4 mA zu halten. Figur 12 gibt diese Einschätzung aus dem Handbuch des US Department für Agriculture (USDA) in deutscher Übersetzung wieder (Quelle: Savary and Kauke (2008), p. 2). Es sei darauf hingewiesen, dass durch die Übersetzung eine inhaltliche Verschiebung der Aussage in Richtung „Produktionsverlust-

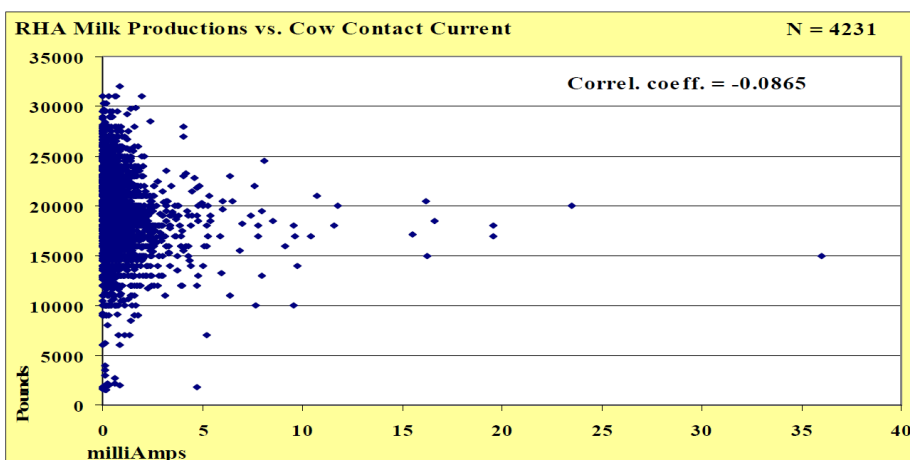
te bei tieferen Spannungen und Strömen“ stattgefunden hat. Die drei Kategorien zur „Milchproduktion“ heissen im Original: no loss in production anticipated, any loss in production is not due to change in animals (Zusammenhang zwischen Produktionsverlusten und Kriechströmen ist wissenschaftlich unsicher), production loss may be due to change in animals (Zusammenhang ist wissenschaftlich möglich – siehe dazu auch: Rigalma, Duvaux-Ponter et al. (2009).

Rigalma, Duvaux-Ponter et al. (2009) kommen in ihrer Literaturanalyse zum Schluss, dass Berührungsspannungen und Körperströme bis in den Bereich von 5-8 V bzw. 8 mA im Allgemeinen keinen negativen Einfluss auf Menge und Qualität der Milch haben. Allerdings kann das für eine kleine Minderheit der Tiere falsch sein, denn die Sensibilität gegenüber elektrischen Strömen variiert zwischen Kühen beträchtlich (siehe Figur 10).

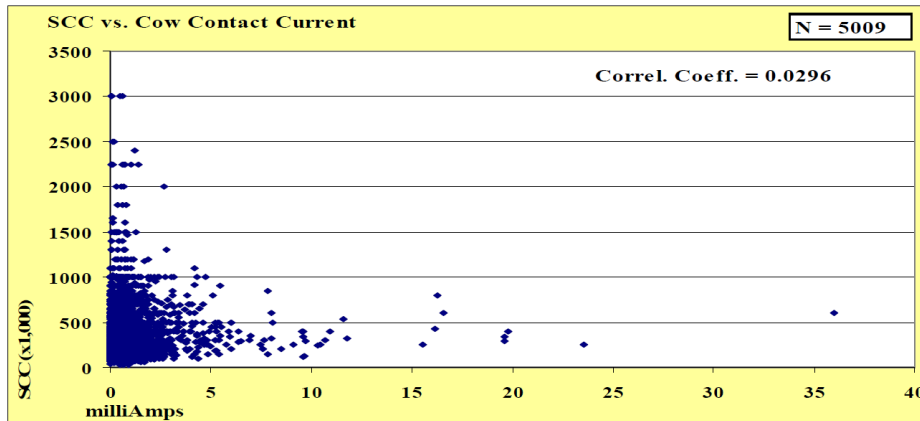


Figur 12: Auswirkungen von Spannung und Strom auf Kühe. Quelle: Savary (2008; p. 2), Originalabbildung in Lefcourt (1991), p. 3-22; siehe auch Kommentar im Text.

Im bereits erwähnten Programm von Wisconsin wurden die Produktionsparameter „Milchmenge“ und „somatischer Zellgehalt“ („SCC“ als Indikator für die Milchqualität) in Beziehung gesetzt zu den gemessenen Körperströmen. Es handelt sich dabei um Herdendurchschnitte pro Kuh. Die Milchmenge wird als Tagesproduktion (in pounds) ausgewiesen. Der somatischer Zellgehalt in 1000 Zellen pro Milliliter angegeben. Der „normale“ Zellgehalt liegt unter 100, der Schweizer Grenzwert liegt bei 400. Milch von Kühen mit Eutererkrankungen (Mastitis) können Werte von einigen 1000 haben.



Figur 13: Zusammenhang Milchproduktion und Körperstrom. Quelle: PSCW (2006), p. 23.



Figur 14: Zusammenhang somatischer Zellgehalt und Körperstrom. Quelle: PSCW (2006), p. 24.

Dasho, Cook et al. (1995) kamen zum Befund, dass kein Zusammenhang zwischen der Exposition der Tiere und den erwähnten Parametern festzustellen ist. Figur 13 und Figur 14 zeigen alle zwischen 1993 und 2005 in Wisconsin erhobenen Daten in einer Gesamtdarstellung (PSCW 2006). Die Einschätzung von Dasho et al. wird in der längeren Datenreihe bestätigt. Nach Reinemann (2012) sind Auffälligkeiten nur dann zu verzeichnen, wenn Tiere ihr Trink- und Fressverhalten aufgrund der Kriechströme anpassen (Reduktion von Trink- oder Nahrungsmenge um elektrische Schläge an Tränken oder Krippen zu vermeiden).

In den zitierten Review-Studien wird bis in den Bereich erhöhter Exposition (ca. 5-6 mA) ein Zusammenhang zwischen Körperströmen (Berührungsspannungen) und Mastitis ausgeschlossen. Leicht erhöhte Kortisolwerte, als Hinweis auf milden Stress, können bei Tieren gemessen werden, die auffälliges Verhalten zeigen. Bei Kühen ohne augenfällige Verhaltensänderungen sind die Hormonwerte gemäss Reinemann (o.J.) und Reinemann (2012) durchschnittlich; siehe auch: Rigalma, Duvaux-Ponter et al. (2010).

Insgesamt stützt die neuere Literatur die Schlussfolgerungen von Lefcourt (1991) hinsichtlich Produktivität. Aus heutiger Sicht scheint es, dass die damals diskutierten Werte eher am unteren Rand der Wirkungsskala liegen; allerdings muss hier nochmals darauf hingewiesen werden, dass die Variabilität zwischen Tieren sehr gross ist und Einzeltiere auch auf kleine Werte sensibel reagieren können. USDA stellte 1991 folgende drei allgemeinen Schlussfolgerungen auf: (i) Körperströme bis 4 mA beeinträchtigen die Milchleistung nicht wesentlich; (ii) dasselbe gilt hinsichtlich Milchqualität (gemessen über den Parameter SCC); (iii) Körperströme bis 4 mA erhöhen auch nicht das Risiko für Mastitis oder andere Erkrankungen.

Im Zusammenhang mit Mastitis und anderen Erkrankungen bezeichnet das Handbuch als hauptsächliche Ursachen Probleme mit Melkmaschinen, Krankheitserreger, Hygiene und Ernährungsprobleme. Mastitis wird als eine Infektionskrankheit des Euters und nicht als Krankheit, die durch Elektrizität verursacht wird, taxiert. Es wird sodann erwähnt, dass Melkmaschinen keine grosse Rolle im Zusammenhang mit der Exposition von Kühen gegenüber Kriechströmen spielen. Die nötigen Spannungen (über die Melkbecher) müssten massiv höher sein als die üblicherweise anzutreffenden Ausgleichsspannungen, die in Melkständen herrschen können.

3.3 Risikowahrnehmung

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass obige Experteneinschätzung(en) und die Laienwahrnehmung(en) zur Wirkung von Ausgleichsspannungen und Kriechströmen auf das Vieh unterschiedlich ausfallen können. Es ist aus der sozialwissenschaftlichen Risikoforschung bekannt, dass insbesondere wenig bekannte und / oder aktuell diskutierte Risiken, sowie solche denen man real

oder in der subjektiven Überzeugung persönlich ausgesetzt ist, von Laien als potenziell gefährlich angesehen werden. Die Exposition ihnen gegenüber wird (teilweise massiv) überschätzt. Es deutet einiges darauf hin, dass das auch im hier vorliegenden Zusammenhang zumindest tendenziell gilt, wie Tabelle 3 beispielhaft zeigt. Das soll als Hinweis auf eine mögliche Wahrnehmungsdiskrepanz zwischen Experten und Laien verstanden werden, nicht als ein belegtes Faktum. Dafür müsste die entsprechende Literatur analysiert worden sein, was nicht Teil dieser Arbeit war.

What Farmers May Perceive as Evidence of Stray Voltage	How Stray Voltage Actually Effects Animals
<p>Performance Issues: Unresolved Low Milk Production Unresolved High Somatic Cell Count</p> <p>Behavioral Issues: Reluctance to Enter Dancing or Foot Paddling Unusual Behavior at Water Cup or Feed Source Reduced Water Consumption Excessive Kicking Nose Pressing Excessive Mooing/Bellowing</p> <p>Symptoms: Foot or Lower Limb Lameness Swollen Joints Poor Response to Veterinary Treatment</p>	<p>Performance Issues: Low production is either an unlikely or transient effect, but possible in extreme cases.</p> <p>Behavioral Issues: Flinch, Twitch, or Eye blink at contact with voltage above that animal's annoyance threshold Avoidance of contact with voltage. Altering time of use, frequency of use, duration of use, or alternative choice is more likely with exposure at water than with exposure during eating. Reluctance to enter is another form of avoidance.</p>

Tabelle 3: Diskrepanz zwischen Einschätzungen von Bauern und wissenschaftlichen Erkenntnisse. Quelle: Roberts and Kasper (2014), p. 14.

4 Kriechströme und menschliche Gesundheit¹

Es gibt wenige Studien und Publikationen zum Thema Kriechströme und Gesundheit. Die grosse Mehrzahl der Arbeiten beschäftigt sich mit dem Zusammenhang zwischen niederfrequenten Magnetfeldern von HSL (teilweise auch Trafostationen und Kleingeräte) und menschlicher Gesundheit. Nur wenige Arbeiten, die fast ausschliesslich von einer Forschungsgruppe stammen, widmen sich explizit Kriech- bzw. Kontaktströmen. Dabei wird als einziger gesundheitlicher Endpunkt Kinderleukämie betrachtet. Die Autoren dieser Arbeiten kommen zum Schluss, dass Kriechströme das Risiko für Kinderleukämie möglicherweise erhöhen. Sie halten Kriech- bzw. Kontaktströme für eine bessere Erklärung als Magnetfeldexpositionen. In vielen Studien wurde ein statistischer Zusammenhang zwischen „Wohnen in der Nähe von HSL“ und erhöhtem kindlichem Leukämierisiko gefunden.

4.1 Physiologie

Kriechströme werden in aller Regel nicht wahrgenommen. Die Berührungsspannungen liegen meist unterhalb der Wahrnehmungsschwelle. Wie viel Strom durch den Körper fliesst, ist eine Frage des Widerstandes (Impedanz), den der Körper dem Wechselstrom bietet. Die Variabilität ist sehr gross, abhängig von den Kontaktbedingungen (Geometrie, Hautzustand), der Erdung (Erdungswiderstand, Kleidung/Schuhe) und der Person (Alter, Gewicht). Die wichtigste Rolle spielt, neben der Kleidung (v.a. Schuhwerk), die Haut, deren Widerstand stark schwanken kann.

In Tabelle 4 sind die durchschnittlichen, für den Menschen biologisch und gesundheitlich relevanten Körperströme und Berührungsspannungen (für 50/60 Hz) zusammengestellt – siehe auch: Dorr (2009), Sutherland (2014). In Wohnungen liegen die Werte fast ausnahmslos unterhalb der Wahrnehmungsschwelle. Messungen zeigten Berührungsspannungen bzw. Körperströme von hundertstel Volt / Milliampère als Regelfall, zehntel Volt / Milliampères oder höher als Ausnahme (4.2.2). Dabei handelt es sich um über den Körper gemittelte Werte. Eine anatomisch aufgelöste Betrachtung zeigt grosse örtliche und damit organspezifische Unterschiede (siehe 4.2.3).

	1000 Ω	2000 Ω	3000 Ω	
in mA	in V	in V	in V	
1	1	2	3	Wahrnehmungsschwelle
2	2	4	6	milder Schlag
3	3	6	9	Schlag
4	4	8	12	starker Schlag
5	5	10	15	Beginn Schmerz
10	10	20	30	Verkrampfung
20	20	40	60	Atemprobleme
30	30	60	90	Herzflattern
50	50	100	150	Erstickungsgefahr
80	80	160	240	Herzkammerflimmern *
2000	2000	4000	6000	Herzstillstand möglich

* wenige Sekunden Kontakt

Tabelle 4: Ungefähre Schwellenwerte der Wirkung von Strom und Spannung (50/60 Hz) auf den menschlichen Körper. Quellen: Hydro (2013), Prasad, Sharma et al. (2010); VDE V 0140-479-1:2007-05.

In Tabelle 5 sind die Gesamtkörperstromwiderstände des Menschen unter verschiedenen Kontaktbedingungen (jeweils über die Haut, also ohne Bekleidungen wie Schuhe) dargestellt. Die Tabelle berücksichtigt die Variabilität zwischen Personen (die Spalten entsprechen dem %-Anteil der Bevölkerung mit der jeweiligen Impedanzgrenze). Die Berührungswiderstände hängen von der Grösse der berührten Fläche, der Feuchtigkeit, dem Kontaktdruck, der Dauer der Berührung, dem Kör-

¹ Für wertvolle Hinweise danke ich Dr. Jürg Fröhlich, Fields at Work GmbH.

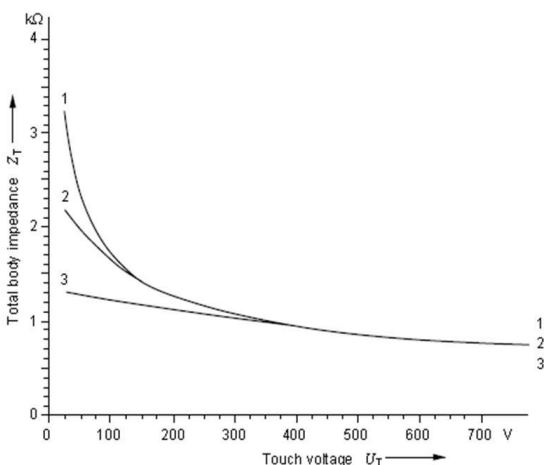
pergewicht und der Spannung ab.¹ In Tabelle 1 sind die Parameter Fläche und Feuchtigkeit bei 25 V Spannung dargestellt. Kriechströme weisen deutlich tiefere Spannungen auf – allerdings erhöhen sich dadurch die angegebenen Werte der Widerstände, insbesondere die niederohmigen, nur unwesentlich. Die Wirkung der Spannung (Tiefere Impedanz der Haut bei höheren Voltzahlen) zeigt sich primär bei trockenen Bedingungen (Figur 15). Die Rolle des Körpergewichts zeigt Figur 16.

Alle Daten zeigen eine grosse Streuung. Die Variabilität wird in erster Linie durch die Kontaktbedingungen bewirkt. Dabei spielt die Haut die zentrale Rolle. Sie stellt im Normalfall den Grossteil des Gesamtkörperwiderstandes dar.² Der Körperinnenwiderstand (ohne Haut) beläuft sich auf ca. 500 Ω (Reilly 2012). Für Kriechströme (tiefe Spannungen) rechnet man häufig mit 2000 Ω Gesamtkörperimpedanz, für spezielle worst-case Betrachtungen (etwa Kriechströme im Badezimmer) setzt man auch 1000 Ω ein (Reilly 2012); siehe auch 4.2.2).

Der Vollständigkeit halber sei noch darauf hingewiesen, dass Kleidung an den Kontaktstellen (also: Handschuhe, Schuhe) die Impedanz beträchtlich erhöht. Feuchte Ledersohlen (worst-case) haben einen Widerstand von ca. 5000 Ω , Gummisohlen (best-case) einen von >10 Millionen Ω . Weitere Impedanzdaten finden sich in: VDE V 0140-479-1, IEC (2005), Sutherland (2014).

Kontaktbedingungen	Sensibilität (Anteil Bevölkerung)		
	5%	50%	95%
grosse Kontaktfläche trocken	1.8	3.3	6.1
dito nass	1.2	2.2	4.1
mittlere Kontaktfläche, trocken	11.1	20.6	38.7
dito nass	5	9.4	17.6
kleine Kontaktfläche, trocken	91	169	318
dito nass	40	74	138

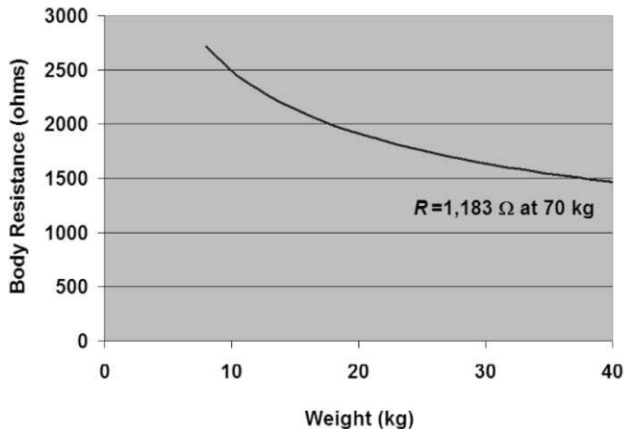
Tabelle 5: Variabilität (% der Bevölkerung) der Gesamtkörperimpedanzen (in k Ω , bei 25 V), abhängig von den Kontaktbedingungen der Haut. Quelle: IEC (2005).



Figur 15: Körperimpedanz (für 50 % der Bevölkerung), Hand zu Hand, grosse Berührungsfläche, bei drei Kontaktbedingungen (1=trocken, 2=nass, Süsswasser, 3=nass, Salzwasser) in Abhängigkeit von der Spannung. Quelle: IEC (2005), p. 63.

¹ Sowie: von der Frequenz (Reduktion Impedanz bei Zunahme Frequenz bis einige wenige kHz; siehe auch: De Santis, V., P. A. Beeckman, D. A. Lampasi and M. Feliziani (2011). "Assessment of Human Body Impedance for Safety Requirements Against Contact Currents for Frequencies up to 110 MHz." Biomedical Engineering, IEEE Transactions on 58(2): 390-396. Im vorliegenden Zusammenhang geht es um 50/60 Hz.

² Die niedrigste Impedanz misst man bei Anwendung eine Kontaktgels wie es bei Defibrillatoren eingesetzt wird. Der Hautwiderstand beträgt dann noch einige wenige 10 Ω .



Figur 16: Abhängigkeit der Körperimpedanz vom Körpergewicht. Ausgangsbasis: 1183 Ω bei 70 kg. Quelle: Kavet, Hooper et al. (2011), p. 813.

4.2 Die Kontaktstromhypothese

Schwache Körperströme, wie sie im Zusammenhang mit der Kriechstromproblematik typisch sind, liegen unterhalb der Wahrnehmungsgrenze. Wenn man mit der Hand eine kleine Berührungsspannungen abgreift, können im Knochenmark der Unterarme Ströme fließen (sie werden in diesem Zusammenhang „Kontaktströme“ genannt), die biologisch relevant sind. Die Hypothese: Kontaktströme, insbesondere in Badezimmern, könnten bei Kindern die Blutbildung im Knochenmark negativ beeinflussen und so zu einer Erhöhung des kindlichen Leukämierisikos beitragen. Weil in der Nähe von HSL meist grössere Berührungsspannungen an Armaturen gemessen werden als andernorts, und epidemiologische Studien höhere Leukämierisiken im Umfeld von HSL ausweisen, könnten Kontaktströme eine biologische Erklärung für die bislang unerklärte Risikoerhöhung sein.

4.2.1 Die Hypothese

Wenn eine Person gleichzeitig zwei leitfähige und unter Spannung stehende Teile berührt, wird ein Ausgleichsstrom durch den Körper fließen, dessen Stärke vom Wechselstromwiderstand (Impedanz) des Körpers abhängt. Bei tiefen Spannungen, wie sie für Kriechstromsituationen in Haushalten üblich sind, bildet die Haut¹ den grössten Widerstand, insbesondere bei trockenen Bedingungen und schwacher Berührung. Bei nasser Haut und grossflächiger Berührung, wie sie etwa Kinder im Badezimmer haben, ist der Widerstand deutlich tiefer. In Häusern mit Kriechstromproblemen können deshalb vergleichsweise grosse Körperströme bei Kindern auftreten, v.a. wenn die Probleme in Badezimmern anzutreffen sind. Der elektrische Strom, der über ein badendes Kind fließen kann ist zwar über alles gesehen klein, kann aber an ausgewählten Orten, insbesondere im Knochenmark der Unterarme bei Berührung einer Wasserarmatur, eine Stärke erreichen, die biologische Prozesse beeinflussen kann. In der Literatur werden diese Ströme „Kontaktströme“ genannt. Sie könnten die bislang ungelöste Beobachtung erklären, warum das Leukämierisiko von Kindern im Umfeld von HSL erhöht ist. Es wurde stets vermutet, dass der Risikofaktor dafür die Magnetfelder der HSL sind. Kontaktströme könnten ev. eine (andere) Erklärung liefern, denn: (i) sie können im Unterschied zu den durch die Magnetfelder induzierten elektrischen Feldstärken im Körper, eine Stärke annehmen, die biologisch relevant ist. (ii) Messungen zeigten, dass die in Haushalten anzutreffenden Berührungsspannungen an Wasserleitungen in der Nähe von HSL grösser sind als andernorts.

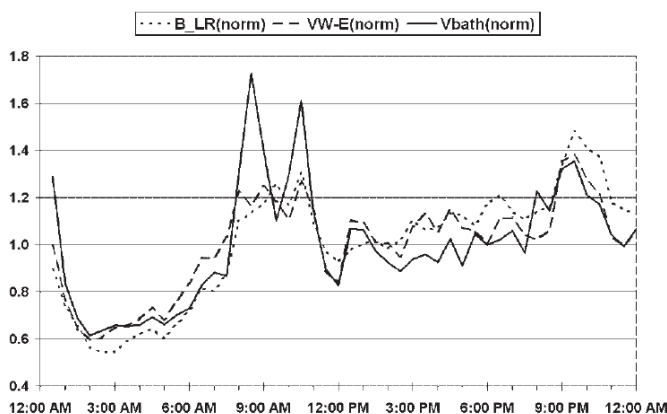
Die Gültigkeit der Hypothese ist wissenschaftlich nicht bewiesen. Epidemiologische Daten zum postulierten Zusammenhang sind kaum vorhanden. Zusätzliche Studien könnten lohnend sein.

¹ Es wird von Schuhwerk und Handschuhen (Annahme: Berühren im Stand) abgesehen.

4.2.2 Die Expositionsfrage

Kavet und Kollegen haben in mehreren Publikationen die Kontaktstrom-Hypothese entwickelt, thematisiert und Daten und Argumente dazu vorgelegt: Kavet, Zaffanella et al. (2000), Kavet and Zaffanella (2002), Kavet, Zaffanella et al. (2004), Kavet (2005), Kavet, Hooper et al. (2011), Does, Scelo et al. (2011).

Messungen und Berechnungen der Autoren (ein Beispiel zeigt Figur 17) zeigen einen statistischen Zusammenhang zwischen Magnetfeldstärke und Kontaktströmen im Umfeld von HSL. Dieser Zusammenhang ist allerdings wenig robust. Bei Does et al. 2011 ist er schwach ausgeprägt, Lilien, Dular et al. (2009) fanden gar keinen Bezug (siehe Figur 3), und Kavet, Hooper et al. (2011) betonen in ihrer neuesten Publikation, dass die grosse Mehrzahl der Kontaktströme in Haushalten konduktiv verursacht ist (siehe 2.2).



Figur 17: Zeitlichen Entwicklung von magnetischer Flussdichte (B-LR), Differenzspannung (V W-E) und Berührungsspannung (Vbath) in einem Haushalt. Alle Daten normalisiert auf den Wochendurchschnitt (= 1.0). Quelle: Kavet (2005), p. S78.

Berührungsspannungen in Badezimmern, insbesondere in Badewannen, sofern Armaturen und Abflussrohre aus Metall sind, betragen wie in 2.4.1.2 und in 2.4.2.3 erwähnt einige 10 mV. Nur bei wenigen % der Haushalte übersteigen sie 100 mV – siehe: Kavet and Zaffanella (2002), Kavet, Zaffanella et al. (2004), Does, Scelo et al. (2011). Die daraus berechneten Körperströme – Kavet verwendete bei seinen Messungen einen Widerstand von 1000 Ω – liegen im Bereich von 0.01-0.05 mA (also weit unterhalb der Wahrnehmungsschwelle). Die Grössenordnung deckt sich mit den belgischen Zahlen: Lilien, Dular et al. (2009) geben als Durchschnitt 0.01 mA an, bei einigen wenigen Prozent lagen die Körperstromwerte über 0.1 mA.

4.2.3 Die Dosisfrage

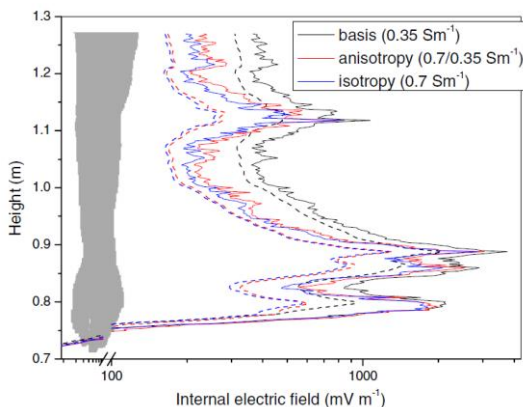
Der biologische Teil der Kontaktstromhypothese geht davon aus, dass die durch die Ströme bewirkten Spannungen im Körper so gross sind, dass sie biologisch bedeutsam werden, im Unterschied zu den von Magnetfeldern induzierten geringen Spannungen.

Dawson, Caputa et al. (2001) berechneten, dass ein Körperstrom von 0.1 mA im Knochenmark der Extremitäten elektrische Feldstärken in der Grössenordnung 0.1-1 V/m erzeugen kann. Je nach Alter / Gewicht betragen die Werte 2 V/m (10 kg), 1 V/m (20 kg), 0.5 V/m (70 kg).¹ Wenige 10 mV Berührungsspannung, insbesondere wenn die Kontakte feucht sind, reichen demnach aus, um bei Kindern im Knochenmark der Unterarme biologisch wirksame Feldstärken im Bereich von mehreren Zehntel bis 1 oder 2 V/m zu erzeugen. Dagegen bewirkt eine starke Magnetfeldexposition (10 μ T)

¹ Erdung über beide Füsse

im Knochenmark elektrische Feldstärken von unter 0.001 V/m (1 mV/m), also rund 1000 Mal weniger als via Kontakt- bzw. Körperstrom.

Chan, Hattori et al. (2013) und Chan, Ohta et al. (2015) erhalten bei ihren Simulationen mit hochauflösenden und nach Gewebearten differenzierten Körpermodellen bei einem Kontaktstrom von 0.5 mA interne elektrische Feldstärken von mehreren V/m für Muskelgewebe, 0.5-1 V/m für Nervengewebe. Die angenommenen Erdungsverhältnisse sind dabei mit Kavet vergleichbar. Eine Simulation von Tarao, Korpinen et al. (2013) zeigt geringere Werte. Ein Kontaktstrom von 0.5 mA bewirkt danach körperinterne elektrische Feldstärken, je nach Gewebeart und Lokalisierung, im Bereich von einigen Zehntel Volt wobei Spitzenwerte um 1 V/m auftreten können. In Figur 18 sind für den Unterarm die elektrischen Feldstärken (über alle Gewebe gemittelt) bei einem Stromfluss von der rechten Hand zum rechten Fuss dargestellt.



Figur 18: Über alle Gewebe gemittelte elektrische Feldstärke bei 0.5 mA Kontaktstrom. Die Kurven geben unterschiedliche Modellannahmen wieder. Quelle: Tarao et al. (2013; p. 2989).

Kontaktströme im Bereich von Zehntel mA können körperinterne Feldstärken im Bereich von Zehntel V/m bewirken, deutlich mehr als Magnetfeldexpositionen, selbst wenn diese massiv über dem Anlagegrenzwert von 1 μ T liegen. Gewebeinterne Feldstärken im Bereich von Zehntel V/m bis einige V/m können biologische Effekte zeitigen (siehe unten). Einschränkend gilt es festzuhalten, dass die Variabilität unter den dosimetrischen Simulationen noch recht gross ist und die Daten deshalb mit der gebührenden Vorsicht zu betrachten sind.

4.2.4 Die Wirkungsfrage

Kommen wir zur biologischen Relevanz der Feldstärken. Gemäss WHO (2007) muss ein elektrisches Feld im Knochenmark mindestens 10 mV/m betragen, um biologisch bedeutsam zu sein, gemäss NIEHS (1999) genügt 1 mV/m. Die durch Körperströme erzeugten Feldstärken liegen damit im Bereich der biologischen Wirksamkeit, die durch Magnetfelder induzierten Feldstärken hingegen nicht.

Leukämie entsteht im blutbildenden System (Knochenmark), indem die normale Entwicklung von Blutzellen (u.a. weisse und rote Blutkörperchen; siehe Figur 19) im noch nicht ausgereiften Stadium (Stufe Vorläuferzellen) entartet und es so zu einer unkontrollierten Vermehrung der Zellen kommt. Neben den Stammzellen besteht das blutbildende System noch aus Binde- und Stützgewebe (sog. Stroma). Wenn elektromagnetische Felder eine Rolle in der Entwicklung von Leukämie spielen, dann müssen sie auf eine oder mehrere dieser Zellarten einwirken können, um so den Prozess der Zellreifung zu beeinflussen.

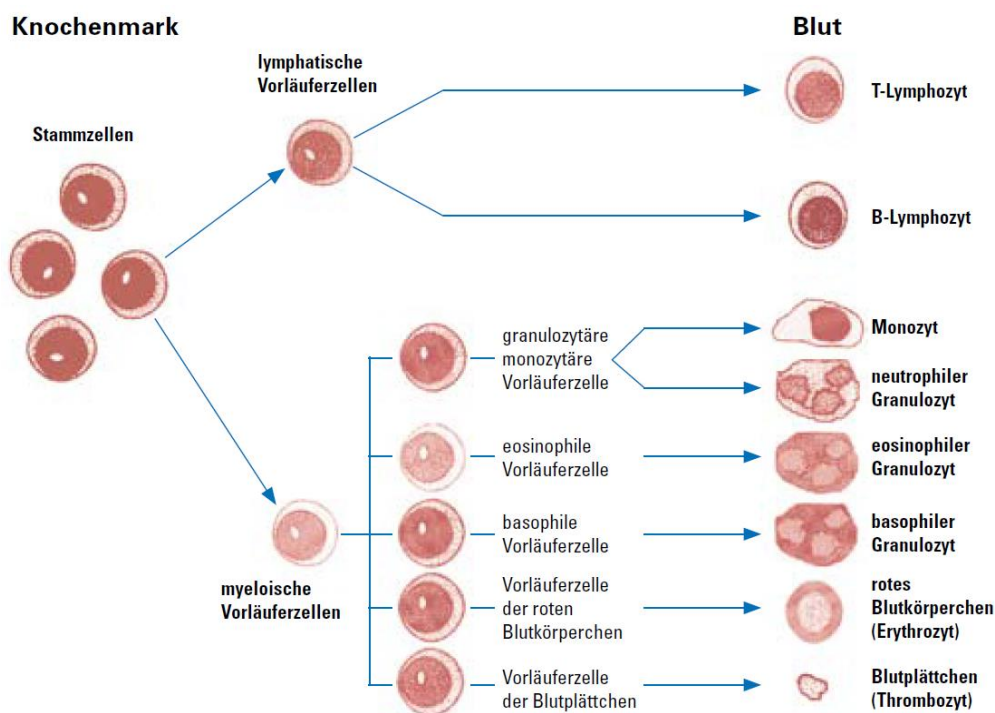
Stamm- und Vorläuferzellen sind sehr klein. Selbst Feldstärken von 1 V/m können die Membranspannung nicht wesentlich beeinflussen. Das durch das Feld zusätzlich aufgebaute Potenzial ist na-

hezu vernachlässigbar (McLeod 1992). Anders sieht es bei den bis hundert Mal grösseren Zellen des Stroma aus. Ein Feld von 0.1 V/m kann hier Membranspannungen von 0.1-1 mV aufbauen; siehe: Kavet, Bailey et al. (2008), Dawson, Caputa et al. (2001) McLeod (1992). Chiu and Stuchly (2005) berechneten eine ähnliche Grössenordnung: eine interne Feldstärke im Bereich von 1 V/m kann Transmembranpotenziale bis einige mV erzeugen. Eine grobe Übersicht über die Expositions- und Dosis-Verhältnisse gibt Tabelle 6.

	Elektrisches Feld	Magnetfeld	Kontaktstrom
Exposition	Hunderte kV/m	10 mT	Zehntel mA
E-Feld Knochenmark	wenige V/m	wenige V/m	wenige V/m
Membranspannung	1 mV	1 mV	1 mV
Grenzwerte	5 kV/m (IGW)	1 μ T (AGW)	0.5 mA

Tabelle 6: Expositionsbedingungen (im Vergleich: Grenzwerte in unterster Zeile), um eine biologisch wirksame Membranspannung im Knochenmark (1 mV) zu erzeugen. IGW=Immissionsgrenzwert, AGW=Anlagegrenzwert. Quellen: siehe Text.

Wie bereits gesagt reicht nach NIEHS (1999) 1 mV für eine biologische Wirkung. Im Vergleich zum Ruhepotenzial von über 50 mV ist das vergleichsweise wenig, soll aber ausreichend gross sein um auf zelluläre biochemische Prozesse einwirken zu können (etwa Beeinflussung der Signalübermittlung). Gemäss WHO (2007) sind 10 mV/m für biologische Effekte erforderlich. Aufgrund dieser Unterschiede – die u.a. auf leicht voneinander abweichende Modellannahmen und Bezugsgewebe zurückzuführen sind – sollten die aufgelisteten Expositions- und Dosisabschätzungen mit Vorsicht interpretiert werden.



Figur 19: Entwicklungsschritte der Blutzellen. Quelle: KLS (2007), p. 7.

4.2.5 Daten zu Kinderleukämie

Kavet und Kollegen haben die Kontaktstromhypothese mit epidemiologischen Daten in zwei Studien zu untermauern versucht. Andere Arbeiten existieren nicht. Auch experimentelle Untersuchungen zum postulierten Wirkungszusammenhang liegen unseres Wissens keine vor.

Die erste Abschätzung hinsichtlich Leukämierisiko findet sich im Anhang von Kavet, Hooper et al. (2011). Dort werden Risikofaktoren hochgerechnet, indem Kontaktströme als Störgrösse (sog. Confounder) von epidemiologischen Studien mit Magnetfeldexposition behandelt werden. Die Abschätzung kommt zum Schluss, dass der Risikofaktor „Kontaktstrom hoch“ (> 60 mV Berührungsspannung) bei einer Verbreitung (Prävalenz) von 10-15 % der Haushalte zwischen 3 und 5 betragen könnte (für Magnetfeldexposition > 0.3 μ T beträgt der Risikofaktor 1.5).

Die neueste Studie (Does, Scelo et al. 2011) kommt insgesamt zu einem negativen Befund und findet keine Assoziationen zwischen externen Magnetfeldstärken, Kontaktströmen und Leukämierisiko. Die Risikoschätzer für hausinterne bzw. hausederne Berührungsspannungen betragen 0.8 bzw. 0.9 (beide statistisch nicht signifikant). Auch für Magnetfelder kann die Studie keinen Zusammenhang zwischen Exposition und Erkrankungsrisiko feststellen. Die Datenbasis ist aber sehr schmal. Weitere Studien zu diesem Thema wären nötig, um die Frage abschliessend oder zumindest besser beurteilen zu können.

5 Kriechströme – offene Fragen

Aufgrund der vorliegenden Literaturstudie können folgende offenen Fragen und damit verknüpfter Forschungsbedarf sowie Begleitaktivitäten identifiziert werden (keine Priorisierung):

(i) Monitoring 1: Gibt es einen Bedarf zur Dokumentation von Art, Ausmass und Entwicklungsdynamik des „Kriechstromproblems“ in der Schweiz? Hier könnte eine Umfrage bei wichtigen Akteuren, Verbänden und/oder Stichproben von Bevölkerungsteilen die notwendigen Daten für eine Beurteilung liefern. Resultat wäre eine Auflistung von Monitoringansätzen und -schwerpunkten aus wissenschaftlicher und aus Akteurssicht.

(ii) Monitoring 2: Ist es sinnvoll, allfällige Monitoringaktivitäten in ein zukünftiges NIS-Monitoringprogramm des Bundes (es wird gegenwärtig politisch diskutiert) zu integrieren?

(iii) Monitoring 3: Gezielte Untersuchung von Höfen, die mit Kriechstromproblemen kämpfen. Dabei sollte es sich um kombinierte, sowohl ingenieurseitig (Kriechstrommessungen) als auch veterinärseitig (Viehbestand) abgestützte Erhebungen handeln. Die Dokumentation der Ergebnisse liesse erkennen, welche Bedeutung Kriechströme auf den untersuchten Höfen (und exemplarisch für die Schweiz als ganzes) hätten und welche Massnahmen zu Verbesserungen der Situation beitragen können.

(iv) Kontaktstromhypothese 1: Abschätzung der Exposition (und Dosis) von Kindern gegenüber Kriechströmen in der Schweiz. Dabei muss der Fokus auf der Gesamtbevölkerung liegen, nicht primär auf Anwohnern von HSL. Die Ergebnisse gäben Hinweise auf die gesundheitspolitische Bedeutung des Themas.

(v) Kontaktstromhypothese 2: Biologische Studien zu möglichen Wirkmechanismen von Körperströmen auf das blutbildende System und die Leukämieentwicklung. Hierbei handelt es sich um Grundlagenforschung.

(vi) Risikowahrnehmung: Studie zur Problem- und Risikowahrnehmung bei Betroffenen (v.a. Landwirte, landwirtschaftliche Verbände, Behörden etc.) und bei Experten, um allfällige verzerrte Wahrnehmungen und / oder Wissensdefizite gezielt und sachdienlich angehen zu können.

(vii) Abklärung des Bedarfs an Weiterbildungskampagnen bei Fach- und Berufsverbänden; Erstellen von entsprechendem Material.

6 Anhang – Weisung ESTI betreffend Erdfehlerströmen in Melkständen



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Starkstrominspektorat ESTI

Streuströme, vagabundierende Ströme in Ställen

Erdfehlerströme in Melkständen

Auch bei modernen und normgerecht installierten Kuhställen können Probleme beim Melkablauf auftreten. So betreten die Kühe den Melkstand nicht freiwillig, sie sind unruhig, koten und harnen vermehrt. Dabei verändert sich das Melkverhalten auffällig und die Eutergesundheit verschlechtert sich. Eine Ursache für diese Probleme in den Melkständen können Erdfehlerströme (Streustrom) sein.

Die Problematik des Erdfehlerstroms kann man anhand des Prinzips einer Batterie erklären. Diese erzeugt elektrischen Strom, wenn zwei Pole mit unterschiedlichen elektrischen Potenzialen über einen Leiter verbunden sind. Die Kuh wirkt im Melkstand als Leiter und wird vom elektrischen Strom durchflossen, wenn sie zwei Punkte mit unterschiedlichen elektrischen Potenzialen im Melkstand berührt. Die Stärke dieses Erdfehlerstroms (I) hängt von der Potenzialdifferenz (U) und dem Widerstand des elektrischen Leiters (R) ab. Stellt man eine elektrische Potenzialdifferenz oder Spannung von ca. 2,0 Volt zwischen dem Brustrohr und dem Wellenrohr des Melkstandgerüsts fest und hat der elektrische Leiter dabei einen Widerstand von 500 Ohm (z.B. wie eine Kuh), fliesst ein Erdfehlerstrom von 4 mA ($I = U/R$). Menschen spüren bei einem Strom dieser Stärke ein leichtes Kribbeln, eine Kuh hingegen reagiert wesentlich empfindlicher. Erdfehlerströme von 0,5 mA bis 1,0 mA können bereits Auswirkungen auf den Melkvorgang haben. Mit zunehmender Stromstärke werden das Wohlbefinden und die Leistung der Kühe negativ beeinflusst.

Ursache

Wie entstehen Potenzialdifferenzen? Die Konstellation ist oft so, dass der Hof abgelegen vom bebauten Gebiet liegt und eine grosse Fundamentfläche aufweist. Deswegen fliessen bei dieser Konstellation «grosse» Ströme in die Erdungsleitung. Die Impedanz, Verhältnisse zwischen Fundamentleiter (Erdungsleitung) und PEN-Leiter der Anschlussleitung

begünstigen Erdfehlerströme. Hinzu kommt, dass die Erdungsleitungen oft durch die sensitiven Bereiche (Stallkonstruktionen) führen. Sind solche Erdfehlerströme in Ställen vorhanden, leiden vor allem Kühe unter dieser Belastung. Die Kühe können krank werden und weniger oder gar keine Milch mehr geben. Ist die Ursache behoben, kann es oft sehr lange dauern, bis die Kühe wieder gesund werden. Den Landwirten entstehen dadurch sehr grosse Ausfälle und damit auch sehr hohe Kosten.

Problemlösung

Treten im Melkstand die genannten Probleme auf, sollte eine umfassende Fehleranalyse durchgeführt werden, die neben einer Überprüfung der Funktionalität der Melkanlage auch das Vorhandensein von Erdfehlerströmen beinhalten muss. Sind Letztere vorhanden, gilt es einerseits, die Quelle des Fehlerstroms zu identifizieren und gleichzeitig eventu-

elle Fehler bei der Erdung ausfindig zu machen.

Es lassen sich vor allem 3 Gruppen von Ursachen herauskristallisieren:

- Geräte, die Fehlerströme gegen den Schutzleiter erzeugen, z.B. Frequenzumformer, Wechselrichter, EN 60204/ 8.2.8. Wo elektrische Ausrüstung an irgendeinem Netzanschluss einen Erdableitstrom (z.B. elektrische Antriebssysteme für regelbare Drehzahl oder Ausrüstung für Informationstechnik) von mehr als 10 mA AC oder DC hat, muss eine oder mehrere der folgenden Bedingungen für das Schutzleitersystem erfüllt sein:

- Der Schutzleiter muss einen Mindestquerschnitt von 10 mm² Cu über seine gesamte Länge haben und separat ausserhalb der sensitiven Bereiche installiert werden.

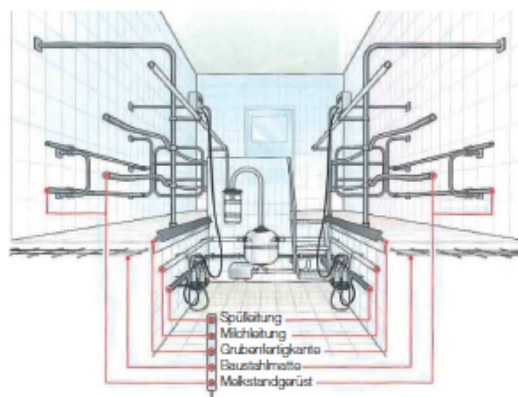
- Die elektrische Ausrüstung muss eventuell einen getrennten Anschluss für einen zweiten Schutzleiter aufweisen.

- Automatische Abschaltung der Versorgung bei Verlust der Durchgängigkeit des Schutzleiters.

- Erdungen, die nicht sternförmig verlegt wurden (parallele Schlaufenbildungen).

- Asymmetrische Ausgleichsströme, die den Rückweg über das Erdsystem durch die Stallkonstruktionen parallel zum PEN-Leiter suchen (Erdfehlerströme).

Es ist ratsam, alle diese Prüfungen durch einen Elektrofachmann ausführen zu lassen.

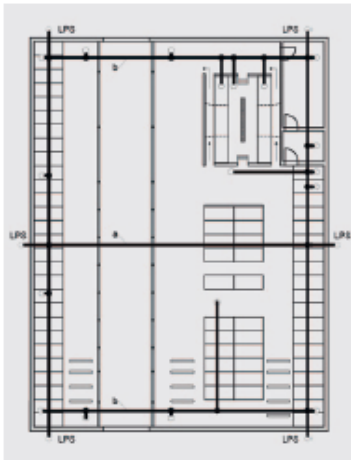


Zentraler Erdungspunkt ZEP bei Milch-anlage.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Starkstrominspektorat ESTI



Beispiel der Errichtung eines Fundamenterders in einem Kuhstall.

Fragen?

Unter welchen Voraussetzungen ist der Einsatz von Trennfunktenstrecken in Ställen im Schutzleiter zur Unterbrechung der Erdfehlerströme möglich? Welches sind die technischen Prüfanforderungen an die Trennfunktenstrecken? In Ställen soll eine maximale Berührungsspannung von 25 V, in gewöhnlichen Liegenschaften eine solche von 50 V nicht überschritten werden. Handelsübliche Trennfunktenstrecken sind mit Ansprechspannungen ab 50 V erhältlich.

Es stellt sich daher auch die Frage, wie die Installation erstellt werden muss, damit die Erdfehlerströme auf ein Minimum reduziert werden können.

Entscheid des ESTI

Gemäss NIN 7.05.4.1.5 gilt: An Orten, die für Nutztiere vorgesehen sind, muss ein zusätzlicher Schutz-Potenzialausgleich alle Körper und fremden leitfähigen Teile, die von den Nutztieren berührt werden können, miteinander verbinden. Wo ein Metallgitter im Stallboden verlegt ist, muss dieses in den zusätzlichen Schutz-Potenzialausgleich des Raumes einbezogen werden (2 Fig. 7.05.A.1 bis 7.05.A.4).

Anmerkung: Orte, an denen ein zusätzlicher Schutz-Potenzialausgleich gefordert ist, z.B. Stand-, Liege- und Melkbereiche sowie dazugehörige Gänge, in denen Körper elektrischer Betriebsmittel oder fremde leitfähige Teile von Nutztieren berührt werden können sowie fremde leitfähige Teile in oder auf dem Stallboden, z.B. Bewehrungsnetze im Allgemeinen oder die

Bewehrung von Jauchegruben unterhalb von Spaltenböden, müssen in den zusätzlichen Schutz-Potenzialausgleich einbezogen werden.

Umsetzung in der Praxis

In der Praxis wird zwischen neuen und bestehenden Ställen unterschieden.

Neue Ställe

In neuen Ställen muss der Erdfehlerstrom-Problematik bei der Planung besondere Beachtung geschenkt werden. Folgende Punkte sind zu berücksichtigen:

- Die Installationen müssen im TN-S-System erstellt werden.
- Sämtliche Installationen müssen mit RCD 30 mA geschützt werden.
- Es muss ein einziger zentraler Erdungspunkt (ZEP) erstellt werden.
- Der ZEP muss ausserhalb des sensiblen Bereichs, in welchem sich die Kühe aufhalten, angeordnet werden.
- Der ZEP ist die einzige Verbindungsstelle zwischen den sternförmigen Schutz- und Potenzialausgleichsleitern, den Blitzschutzsystemen und dem PEN-Leiter der Anschlussleitung.
- Bei der Melkanlage sind alle leitfähigen Teile sternförmig an den zentralen Erdungspunkt anzuschliessen.
- Die Installation muss korrosionsbeständig ausgeführt werden.

Bestehende Ställe

In bestehenden Ställen muss vor einer Installationsänderung eine ausführliche Bestandsaufnahme mit den erforderli-

chen Messungen durchgeführt werden. Eine der beiden nachfolgenden Varianten ist auszuführen und mit Sicherheitsnachweis SiNa zu bestätigen.

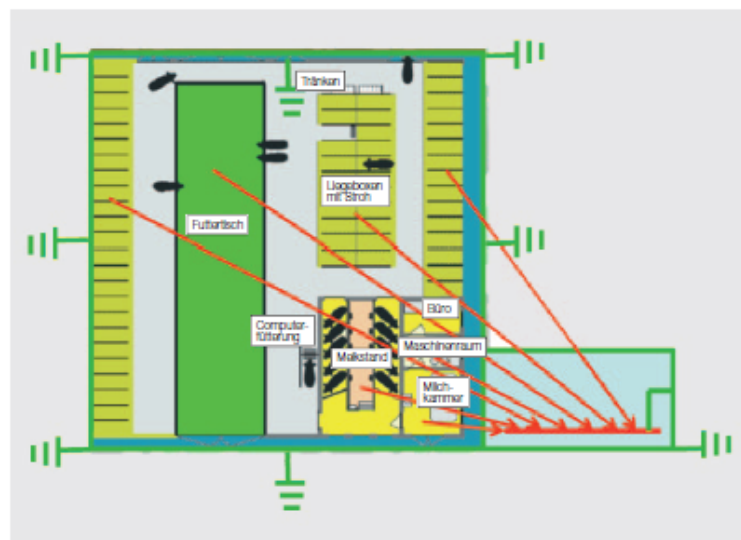
Folgende Punkte müssen dabei beachtet werden:

- Bestehende Installationen nach TN-C müssen ersetzt werden.
- Sämtliche Installationen müssen mit RCD IDn \leq 30 mA geschützt werden.
- Wenn möglich, soll ein ZEP erstellt werden.
- Der ZEP muss ausserhalb des sensiblen Bereichs angeordnet werden.
- Trennfunktenstrecken dürfen nur im Schutzleiter eingebaut werden (siehe Variante 2).
- Fail-Safe-Trennfunktenstrecken unterbrechen die Erdfehlerströme zuverlässig oder schliessen diese kurz.

Variante 1

Schutzsystem TT (Art der Erdverbindung im System TT):

- Sämtliche Installationen müssen mit RCD IDn \leq 30 mA geschützt sein.
- Neutral- und Schutzleiter müssen immer getrennt geführt werden, also 3- oder 5-adrige Leitungen.
- Bei alten Schema-III- oder TN-C-Installationen ist eine neue Installation nur nach TN-S und ZEP möglich.
- Der ZEP muss ausserhalb des sensiblen Bereichs angeordnet werden.
- Der ZEP ist die einzige Verbindungsstelle zwischen den sternförmigen Schutz- und Potenzialausgleichsleitern, den Blitzschutzsystemen und dem PEN-Leiter der Anschlussleitung.

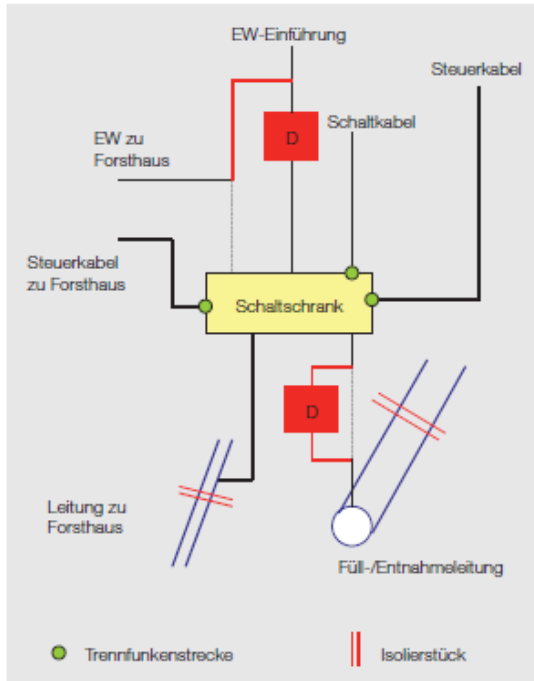


Zentraler Erdungspunkt ZEP in Stallung > Ausgleich im Nebengebäude.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Starkstrominspektorat ESTI



Galvanische Insel, D
= Antiparallele Dioden oder Trennfunktenstrecken gemäss Anforderungen: 50 V Klasse N 50 kA.

Variante 2

Als Schutzmassnahme wird eine galvanische Insel erstellt:

- Ausführung der galvanischen Insel nach der ESTI-Weisung Nr. 511 (WeARA).
- Einsatz von geprüften Trennfunktenstrecken gemäss Anforderungen.
- Sämtliche Installationen müssen mit RCD $I_{Dn} \leq 30$ mA geschützt sein.
- Neutral- und Schutzleiter müssen immer getrennt geführt werden.
- Bei alten Schema-III- oder TN-C-Installationen ist nur noch eine neue Installation nach TN-S und ZEP möglich.

- Der ZEP muss ausserhalb des sensiblen Bereichs angeordnet werden.
- Der ZEP ist die einzige Verbindungsstelle zwischen den sternförmigen Schutz- und Potenzialausgleichsleitern, den Blitzschutzsystemen und dem PEN-Leiter der Anschlussleitung.

Bewilligungspflicht

Der Einbau von Trennfunktenstrecken sowie Anpassungen am Schutzsystem dürfen nur durch die Inhaber einer allgemeinen Installationsbewilligung nach Art. 7 oder 9 der Verordnung über elekt-

rische Niederspannungsinstallationen (NIV) erfolgen. Für die Schluss- und Abnahmekontrolle der Installation ist gemäss NIV ein entsprechender Sicherheitsnachweis SiNa auszustellen.

Anforderung Trennfunktenstrecken

Folgende Anforderungen gelten an eine Trennfunktenstrecke für den Einsatzbereich in Ställen mit Kühen betreffend Erdfehlerströme:

- Ansprechspannung: 50 V AC (50 Hz)
- Blitzstossstrom (T1 10/350 μ s) (Iimp): 50 kA
- Nennableitstossstrom (T2 8/20 μ s) (In): 50 kA
- Schutzart IP 67
- Betriebstemperaturbereich (Tu): -20 bis +80 °C
- Blitzstromtragfähigkeitsklasse: N
- Fail-Safe (d.h. Kurzschluss der Trennfunktenstrecke nach Schädigung durch Blitzstrom)
- Korrosionsfeste Ausführung für den Einsatz in einem Kuhstall

Dario Marty, Geschäftsführer

Kontakt

Hauptsitz

Eidgenössisches Starkstrominspektorat ESTI
Luppenenstrasse 1, 8320 Fehraltorf
Tel. 044 956 12 12, Fax 044 956 12 22
info@esti.admin.ch, www.esti.admin.ch

Niederlassung

Eidgenössisches Starkstrominspektorat ESTI
Route de Montena 75, 1728 Rossens
Tel. 021 311 52 17, Fax 021 323 54 59
info@esti.admin.ch, www.esti.admin.ch

Literaturverzeichnis

- Aneshansley, D., R. A. Pellerin, J. A. Throok and D. C. Ludington (1995). "Holstein cow impedance from muzzle to front, rear, and all hooves." Presentation Paper(95-3621).
- Appleman, R. D. and R. J. Gustafson (1985). "Source of stray voltage and effect on cow health and performance." J Dairy Sci **68**(6): 1554-1567.
- Behrens, T., C. Terschuren, W. T. Kaune and W. Hoffmann (2004). "Quantification of lifetime accumulated ELF-EMF exposure from household appliances in the context of a retrospective epidemiological case-control study." J Expo Anal Environ Epidemiol **14**(2): 144-153.
- Bessou, J., F. Deschamps, L. Figueroa and D. Cougnaud (2013). "Methods used to estimate residential exposure to 50 Hz magnetic fields from overhead power lines in an epidemiological study in France." J Radiol Prot **33**(2): 349-365.
- Bowman, J. (2014). Exposures to ELF-EMF. Epidemiology of Electromagnetic Fields. M. Roosli. Boca Raton, CRC Press: 93-124.
- Bräunlich, R. (2014). "Streuströme in landwirtschaftlichen Teirhaltungsbetrieben." VSE Bulletin(3): 3.
- Chan, K. H., J. Hattori, I. Laakso, A. Hirata and M. Taki (2013). "Computational dosimetry for grounded and ungrounded human models due to contact current." Phys Med Biol **58**(15): 5153-5172.
- Chan, K. H., S. Ohta, I. Laakso, A. Hirata, Y. Suzuki and R. Kavet (2015). "Computational dosimetry for child and adult human models due to contact current from 10 Hz to 110 MHz." Radiat Prot Dosimetry **167**(4): 642-652.
- Chiu, R. S. and M. A. Stuchly (2005). "Electric fields in bone marrow substructures at power-line frequencies." IEEE Trans Biomed Eng **52**(6): 1103-1109.
- Czumbil, L., D. D. Micu, D. Stet, G. C. Christoforidis and L. Ancas (2013). HVPL conductor sag influence on induced voltage evaluation in nearby metallic structures. Power Engineering Conference (UPEC), 2013 48th International Universities'.
- Czumbil, L., D. Stet, D. D. Micu, V. Topa and L. Ancas (2012). Induced voltage and current computation for different HVPL operating conditions. Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), 2012 International Symposium on.
- Dasho, D., M. Cook, R. Reines and D. Reinemann (1995). Stray Voltage: the Wisconsin Experience, Paper.
- Dawson, T. W., K. Caputa, M. A. Stuchly and R. Kavet (2001). "Electric fields in the human body resulting from 60-Hz contact currents." IEEE Trans Biomed Eng **48**(9): 1020-1026.
- De Santis, V., P. A. Beeckman, D. A. Lampasi and M. Feliziani (2011). "Assessment of Human Body Impedance for Safety Requirements Against Contact Currents for Frequencies up to 110 MHz." Biomedical Engineering, IEEE Transactions on **58**(2): 390-396.
- de Vocht, F. and B. Lee (2014). "Residential proximity to electromagnetic field sources and birth weight: Minimizing residual confounding using multiple imputation and propensity score matching." Environ Int **69**: 51-57.
- DNV (2015). Criteria for Pipelines Co-Existing with Electric Power Lines. Dublin, OH, INGAA.
- Does, M., G. Scelo, C. Metayer, S. Selvin, R. Kavet and P. Buffler (2011). "Exposure to electrical contact currents and the risk of childhood leukemia." Radiat Res **175**(3): 390-396.
- Dorr, D. (2009). Determining voltage levels of concern for human and animal response to AC current. Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE.
- Dürrenberger, G. and G. Klaus (2009). Netzurückwirkungen von Energiesparlampen. Bern, BFE.
- Erdreich, L. S., D. D. Alexander, M. E. Wagner and D. Reinemann (2009). "Meta-analysis of stray voltage on dairy cattle." J Dairy Sci **92**(12): 5951-5963.
- ESTI (2015). "Streuströme, vagabundierende Ströme in Ställen." VSE Bulletin(4): 3.
- Fickert, L., E. Schmutz, R. Braunstein and M. Lindinger (2010). "Reduction of the electrical potential of interfered pipelines due to currents of high voltage power lines and electric railways." e & i Elektrotechnik und Informationstechnik **127**(12): 362-366.
- Grellier, J., P. Ravazzani and E. Cardis (2014). "Potential health impacts of residential exposures to extremely low frequency magnetic fields in Europe." Environ Int **62**: 55-63.
- He, L. H., H. M. Shi, T. T. Liu, Y. C. Xu, K. P. Ye and S. Wang (2011). "Effects of extremely low frequency magnetic field on anxiety level and spatial memory of adult rats." Chin Med J (Engl) **124**(20): 3362-3366.
- Hillman, D. (2014). "Effects of Extraneous Electricity on Dairy Cattle, Other Animals, and Humans-A Guide for Dairymen, Veterinarians, and Investigators of Stray Voltage." J Vet Sci Med Diagn **3** **4**: 2.
- Hillman, D., D. Stetzer, M. Graham, C. L. Goeke, K. E. Mathson, H. H. VanHorn and C. J. Wilcox (2013). Relationship of electric power quality to milk production of dairy herds. 2003 ASAE Annual Meeting, American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Hömberg, D. (2006). "Kriechstrom: wenn nicht mal mehr die Erdung hilft." top agrar(6): 3.

- Hultgren, J. (1990). "Small electric currents affecting farm animals and man: A review with special reference to stray voltage." Veterinary research communications **14**(4): 287-298.
- Huss, A., A. Spoerri, M. Egger and M. Roosli (2009). "Residence near power lines and mortality from neurodegenerative diseases: longitudinal study of the Swiss population." Am J Epidemiol **169**(2): 167-175.
- Hydro (2013). Electric Safety Handbook for Emergency Responders. Toronto, Hydro One Networks Inc.
- IEC (2005). Effects of current on human beings and livestock. Geneva, IEC. **TS 60479-1**.
- Ilonen, K., A. Markkanen, G. Mezei and J. Juutilainen (2008). "Indoor transformer stations as predictors of residential ELF magnetic field exposure." Bioelectromagnetics **29**(3): 213-218.
- Karipidis, K. K. (2015). "Survey of residential power-frequency magnetic fields in Melbourne, Australia." Radiat Prot Dosimetry **163**(1): 81-91.
- Kavet, R. (2005). "Contact current hypothesis: summary of results to date." Bioelectromagnetics Suppl 7: S75-85.
- Kavet, R., W. H. Bailey, T. D. Bracken and R. M. Patterson (2008). "Recent advances in research relevant to electric and magnetic field exposure guidelines." Bioelectromagnetics **29**(7): 499-526.
- Kavet, R., C. Hooper, P. Buffler and M. Does (2011). "The relationship between residential magnetic fields and contact voltage: a pooled analysis." Radiat Res **176**(6): 807-815.
- Kavet, R. and L. E. Zaffanella (2002). "Contact voltage measured in residences: implications to the association between magnetic fields and childhood leukemia." Bioelectromagnetics **23**(6): 464-474.
- Kavet, R., L. E. Zaffanella, J. P. Daigle and K. L. Ebi (2000). "The possible role of contact current in cancer risk associated with residential magnetic fields." Bioelectromagnetics **21**(7): 538-553.
- Kavet, R., L. E. Zaffanella, R. L. Pearson and J. Dallapiazza (2004). "Association of residential magnetic fields with contact voltage." Bioelectromagnetics **25**(7): 530-536.
- Kheifets, L., A. A. Afifi and R. Shimkhada (2006). "Public health impact of extremely low-frequency electromagnetic fields." Environ Health Perspect **114**(10): 1532-1537.
- KLS (2007). Leukämie bei Erwachsenen. Bern, Krebsliga Schweiz.
- Küenzi, A. (2015). "Wenn der Stall unter Strom steht." die grüne **13**(1): 4.
- Lefcourt, A. M. (1991). "Effects of electrical voltage/current on farm animals. How to detect and remedy problems." Agriculture Handbook (Washington)(696): 1.1-9.4.
- Lilien, J. L., P. Dular, R. V. Sabariego, I. Beauvois, P. P. Barbier and R. Lorphèvre (2009). Effects of Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields on Human Beings. International Colloquium Power Frequency Electromagnetic Fields. Sarajevo.
- Malmivuo, J. and R. Plonsey (1995). Bioelectromagnetism: principles and applications of bioelectric and biomagnetic fields, Oxford university press.
- Mathys, P. (2005). "Hausanschluss: Wechsel von TN-C auf TN-S." VSE Bulletin(17): 4.
- Mathys, R. (2012). "Am TN-S-Netzanschluss führt keine Weg vorbei." VSE Bulletin(12): 7.
- McLeod, K. J. (1992). "Microelectrode measurements of low frequency electric field effects in cells and tissues." Bioelectromagnetics Suppl 1: 161-178.
- Moser, A. (2014). Probleme mit Ausgleichsströmen - ZEP. Weiterbildungskurs für Baufachleute.
- Nicolaou, C. P., A. Papadakis, P. A. Razis, G. A. Kyriacou and J. N. Sahalos (2011). "Measurements and Predictions of electric and magnetic fields from power lines." Electric Power Systems Research **81**: 1107-1116.
- NIEHS (1999). Report on Health Effects from Exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields. H. a. H. Sercices. Research Triangle Park, NC, NIEHS.
- Ortmann, P. E. (2009). Induced Voltage on Electric Fences. I. P. Company.
- Patel, S. and F. C. Lambert (2006). Induced stray voltages from transmission lines. Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES, IEEE.
- Pellerin, L., D. Alumbaugh, D. Reinemann and P. Thompson (2004). "Power line induced current in the earth determined by magnetotelluric techniques." Applied engineering in agriculture **20**(5): 703-706.
- Polk, C. (2001). "Cows, ground surface potentials and earth resistivity." Bioelectromagnetics **22**(1): 7-18.
- Prasad, D., A. K. Sharma and H. Sharma (2010). "Electric shock and human body." International Journal of Electrical and Power Engineering **4**(3): 177-181.
- PSCW (2006). Stray Voltage Phase I and Phase II - Combined Database Summary, Public Service Commission of Wisconsin: 37.
- Reilly, J. P. (1979). "Electric Field Induction of Long Objects-a Methodology for Transmission Line Impact Studies." Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on(6): 1841-1852.
- Reilly, J. P. (2012). Applied bioelectricity: from electrical stimulation to electropathology, Springer Science & Business Media.
- Reinemann, D. (2005). "Review of Literature on the Effect of the Electrical Environment on Farm Animals." Updated December.

- Reinemann, D., L. Stetson, N. Laughlin and S. LeMire (2005). "Water, feed, and milk production response of dairy cattle exposed to transient currents." TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS **48**(1): 385.
- Reinemann, D. J. (2007). Stray Voltage Field Guide. Madison, University of Wisconsin: 8.
- Reinemann, D. J. (2008). Literature review and synthesis of research findings on the impact of stray voltage on farm operations, Ontario Energy Board.
- Reinemann, D. J. (2009). What do we know about stray voltage? Madison, University of Wisconsin: 12.
- Reinemann, D. J. (2012). "Stray voltage and milk quality: a review." Vet Clin North Am Food Anim Pract **28**(2): 321-345.
- Reinemann, D. J. (o.J.). Stray Voltage and Mastitis. Madison, university of Wisconsin: 15.
- Reines, R., M. Cook, D. Dasho and D. Reinemann (1998). Putting stray voltage in perspective: the Wisconsin experience revisited. ASAE Annual International Meeting Technical Paper.
- Rigalma, K., C. Duvaux-Ponter, A. Barrier, C. Charles, A. A. Ponter, F. Deschamps and S. Roussel (2010). "Medium-term effects of repeated exposure to stray voltage on activity, stress physiology, and milk production and composition in dairy cows." J Dairy Sci **93**(8): 3542-3552.
- Rigalma, K., C. Duvaux-Ponter, F. Gallouin and S. Roussel (2009). "Les courants électriques parasites en élevage." Productions animales **22**(4): 291.
- Roberts, J. R., M. A. Cook and R. Kasper (2003). Stray Voltage and Water for Dairy Cattle. Veterinary Medical Assn.: 123-126.
- Roberts, J. R. and R. Kasper (2014). The Veterinarian Position. Wisconsin's Stray Voltage Program. Madison, Wisconsin Department of Agriculture.
- Roosli, M., D. Jenni, L. Kheifets and G. Mezei (2011). "Extremely low frequency magnetic field measurements in buildings with transformer stations in Switzerland." Sci Total Environ **409**(18): 3364-3369.
- Roosli, M., B. Struchen and D. Urbinello (2014). "Unsichtbare Wellen: wie die Emissionen der mobilen Kommunikation und des Stroms unsere Gesundheit beeinflussen." Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft beider Basel **15**: 11-22.
- Savary, P. (2009). Kriechstrom im Stallbau. Weiterbildungskurs für Baufachleute. Tänikon.
- Savary, P. and M. Kauke (2008). "Kriechstrom in Melkständen." UFA-Revue(3): 2.
- Sermage-Faure, C., C. Demoury, J. Rudant, S. Goujon-Bellec, A. Guyot-Goubin, F. Deschamps, D. Hemon and J. Clavel (2013). "Childhood leukaemia close to high-voltage power lines--the Geocap study, 2002-2007." Br J Cancer **108**(9): 1899-1906.
- SfB (2006). Massnahmen beim Bau und Betrieb von Rohrleitungen im Einflussbereich von Hochspannungs-Drehstromanlagen und Wechselstrom-Bahnanlagen. Köln, Schiedsstelle für Beeinflussungsfragen.
- Stetson, L. E. (1999). Findings of Minnesota Science Advisors on the Effects of Ground Current on the Health and Productivity of Dairy Cows, ASEA: 14.
- Stratmann, M., C. Wernli, U. Kreuter and S. Joss (1995). Messung der Belastung der Schweizer Bevölkerung durch 50 Hz Magnetfelder. Villigen, PSI.
- Struchen, B., I. Liorni, M. Parazzini, S. Gängler, P. Ravazzani and M. Röösli (2015). "Analysis of personal and bedroom exposure to ELF-MFs in children in Italy and Switzerland." Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology.
- Sutherland, P. E. (2014). Principles of Electrical Safety, John Wiley & Sons.
- Tarao, H., L. H. Korpinen, H. A. Kuisti, N. Hayashi, J. A. Elovaara and K. Isaka (2013). "Numerical evaluation of currents induced in a worker by ELF non-uniform electric fields in high voltage substations and comparison with experimental results." Bioelectromagnetics **34**(1): 61-73.
- Tomitsch, J. and E. Dechant (2015). "Exposure to electromagnetic fields in households--trends from 2006 to 2012." Bioelectromagnetics **36**(1): 77-85.
- Virnich, M. (2012). "Strom auf'm Rohr kommt häufig vor." IKZ-Haustechnik(7): 7.
- Vulevic, B. and P. Osmokrovic (2011). "Survey of ELF magnetic field levels in households near overhead power lines in Serbia." Radiat Prot Dosimetry **145**(4): 385-388.
- WHO (2007). Extremely low frequency fields. Geneva, WHO
- Zaryabova, V., T. Shalamanova and M. Israel (2013). "Pilot study of extremely low frequency magnetic fields emitted by transformers in dwellings. Social aspects." Electromagn Biol Med **32**(2): 209-217.

Figurenverzeichnis

Figur 1: Beste Lösung ist TN-S, schlechte Lösung ist TN-C, heute übliche Lösung ist TN-C-S.	13
Figur 2: Kriechströme in Häusern mit TN-C Anschluss im Vergleich zu TN-S Anschluss..	14
Figur 3: Messresultate zum Zusammenhang zwischen Kontaktströmen und Magnetfeldimmissionen in Wohnhäusern.	22
Figur 4: Berührungsspannungen (oben) und Körperströme (unten) auf Bauernhöfen in Wisconsin.	24
Figur 5: Auswirkungen von Spannung und Strom auf das Verhalten von Kühen..	26
Figur 6: Körperstromwiderstände von Nutztieren.	26
Figur 7: Körperstromstärken durch eine Kuh, abhängig von den Erdungsbedingungen der Tränke..	26
Figur 8: Abhängigkeit des Körperstromwiderstandes von der Umgebung und vom Alter des Tieres	26
Figur 9: Körperstromwiderstand bei unterschiedlichen Stromwegen und Variabilität der Widerstände zwischen den Tieren.	27
Figur 10: Sensitivität von Kühen gegenüber Kriechströmen.....	27
Figur 11: Wasseraufnahme und Körperströme.	28
Figur 12: Auswirkungen von Spannung und Strom auf Kühe.....	29
Figur 13: Zusammenhang Milchproduktion und Körperstrom.....	29
Figur 14: Zusammenhang somatischer Zellgehalt und Körperstrom.	30
Figur 15: Körperimpedanz (für 50 % der Bevölkerung), Hand zu Hand, grosse Berührungsfläche, bei drei Kontaktbedingungen in Abhängigkeit von der Spannung.	33
Figur 16: Abhängigkeit der Körperimpedanz vom Körpergewicht.	34
Figur 17: Zeitlichen Entwicklung von magnetischer Flussdichte, Differenzspannung und Berührungsspannung in einem Haushalt..	35
Figur 18: Über alle Gewebe gemittelte elektrische Feldstärke bei 0.5 mA Kontaktstrom.	36
Figur 19: Entwicklungsschritte der Blutzellen.	37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auswirkungen von Kriechströmen und Berührungsspannungen bei drei verschiedenen angenommenen Widerständen auf das Vieh.....	25
Tabelle 2: Wasser- und Nahrungsaufnahme in Abhängigkeit von Berührungsspannungen.....	28
Tabelle 3: Diskrepanz zwischen Einschätzungen von Bauern und wissenschaftlichen Erkenntnisse.	31
Tabelle 4: Ungefähre Schwellenwerte der Wirkung von Strom und Spannung (50/60 Hz) auf den menschlichen Körper.	32
Tabelle 5: Variabilität (% der Bevölkerung) der Gesamtkörperimpedanzen, abhängig von den Kontaktbedingungen der Haut.....	33
Tabelle 6: Expositionsbedingungen, um eine biologisch wirksame Membranspannung im Knochenmark zu erzeugen.....	37