

Differenzspannungen / Streuströme in landwirtschaftlichen Tierhaltungsbetrieben

Bedeutung, Erläuterungen und Beurteilung

Technisches Komitee Erdungen des CES

Wenn bei Nutztieren gesundheitliche Störungen, Verhaltensauffälligkeiten und bei Kühen verminderte Milcherträge mit unbekannter Ursache festgestellt werden, wird von Landwirten, Tierärzten und Beratern oft der Verdacht geäussert, diese Störungen können mit Streuströmen im Aufenthaltsbereich der Nutztiere zusammenhängen.

Da die Frage der möglichen Beeinträchtigung von Nutztieren in den betroffenen Kreisen seit Jahren grosse Verunsicherung hervorruft, hat die Technische Kommission Erdungen des CES bereits 2014 einen Artikel zu dieser Frage publiziert. [2]

Der vorliegende Bericht erläutert, weshalb in den allermeisten Fällen die Annahme unerwünschter Auswirkungen auf Mensch und Tier unbegründet ist. Ausserdem wird erklärt, weshalb von Mensch und Tier nicht die Streuströme, sondern Differenzspannungen als störend wahrgenommen werden können und dass leicht überprüft werden kann, ob die Berührungsspannungen die Grenze einer möglichen Wahrnehmung von 1 V erreichen. Eine Mitteilung des ESTI und des TK Erdungen informiert über die Massnahmen zur Vermeidung solcher Berührungsspannungen (S. 82).

Unter dem Begriff «Streustrom» werden Ströme im Boden und in leitfähigen Gebäudeteilen verstanden. Solche schwachen Ausgleichsströme können in allen Gebäuden mit Elektroinstallationen festgestellt werden. Sie koppeln sich über die Erdung der elektrischen Installation ein (PEN-Leitererdung). Der PEN-Leiter (Abkürzung für protective earth neutral) ist ein Leiter, der zugleich die Funktionen des Schutzleiters (PE) und des Neutralleiters (N) erfüllt. Er ist über die Erdungsleitung mit dem Erder (Fundamenterder) verbunden.

Streuströme werden auch durch das Magnetfeld von in Betrieb stehenden Kabelleitungen sowie elektrischen Geräten in die Gebäudeerdungssysteme und auch in andere leitfähige Gebäudeteile eingekoppelt.

Die Gründe für die Entstehung von Streuströmen werden im Anhang A näher beschrieben. Oft wird ins Feld geführt, dass sich die Magnetfelder, welche die Streuströme hervorrufen, nachteilig auswirken könnten. Die nähere Betrachtung zeigt aber, dass auch die Magnetfelder aufgrund ihrer geringen Grösse für eine Störung ausser Betracht fallen.

Streuspannungen als relevante Störgrösse

Bei ungenügendem Potenzialausgleich (metallische Verbindungen aller leitfähigen Strukturen) können Differenzspannungen zwischen Boden und Metallteilen auftreten. Wie nachstehend gezeigt wird, ist das Auftreten von höheren Spannungsdifferenzen die einzige Möglichkeit, dass Nutztiere beeinträchtigt werden können. Die Schwelle der Wahrnehmung ist individuell und situationsabhängig und beginnt oberhalb von 1 V. (Es handelt sich dabei um den Effektivwert, der auch Oberwellen (d.h. höhere Frequenzanteile) beinhalten kann und mitberücksichtigt. Auf digitalen Voltmetern wird er als quadratischer Mittelwert der Spannung über die Zeit mit einer Anpassungszeitkonstante von etwa 0.1 ... 1 s angezeigt.)

In der englischsprachigen Fachliteratur, welche die elektrische Beeinträchtigung von Nutztieren

behandelt, wird deshalb treffender nur von Streuspannungen und nicht von Streuströmen gesprochen. In Nordamerika, wo durch andere Konzepte der Elektrizitätsversorgung von Farmen wesentlich grössere Spannungsabfälle im Erdungssystem auftreten, werden entsprechende Abklärungen häufiger durchgeführt, und es existieren umfangreiche Studien über die Wirkung von Streuspannungen und Reaktionen der Nutztiere auf diese Spannungen. [3, 5, 6]

Bei Auslegung des Potenzialausgleichs gemäss NIN [9] erreichen Streuspannungen Werte von einigen mV bis zu einigen 10 mV. Die Streuströme fliessen im Erdungssystem vornehmlich durch metallische Leiter, z.B. durch verbundene Bewehrungsstäbe (Armierungseisen) (Bild 1), weshalb nur sehr kleine Spannungsabfälle auftreten. Nur bei fehlendem, unterbrochenem oder ungenügendem Potenzialausgleich oder im Erdschlussfall können Differenzspannungen im Volt-Bereich auftreten. Wegen des relativ grossen elektrischen Körperwiderstands von Menschen und Tieren entstehen bei Berührung von metallischen Teilen sogar bei Spannungen im Bereich einiger Volt so kleine Körperströme, dass sie von Menschen nicht bemerkt werden.

Tatsächlich können jedoch Nutztiere im Stallbereich geringere Differenzspannungen wahrnehmen und darauf reagieren, als dies für Menschen unter Alltagsbedingungen der Fall ist. Der Grund dafür ist, dass die Tiere Spannungen zwischen metallischen Einrichtungen wie Futterkrippen, Tränken, Melkmaschinen und nassen Betonböden mit blossen Körperteilen abgreifen. Rinder beispielsweise berühren die metallischen Einrichtungen mit dem Maul und stehen gleichzeitig mit den Klauen auf dem nassen Stallboden. Beide Kontaktstellen weisen einen geringen Übergangswiderstand zwischen leitfähigen Oberflächen und Körper auf, so dass das Verhältnis aus Differenzspannung zu Berührungsstrom in erster Linie durch den Körperwiderstand der Tiere gegeben ist (Bild 1).

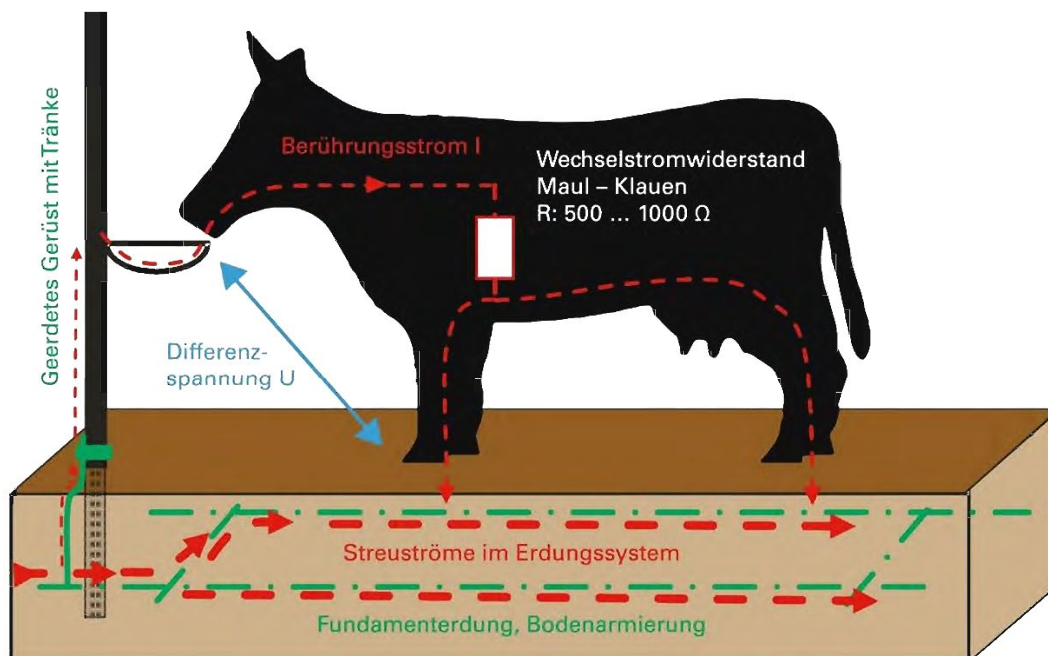


Bild 1 Prinzipbild für das Abgreifen einer Berührungsspannung zwischen Maul und Klauen bei einem Rind

Ausschlaggebend für die Beurteilung einer möglichen Beeinträchtigung sind die oben genannten im Betrieb auftretenden Spannungsdifferenzen zwischen leitfähigen berührbaren Objekten.

Der Strom I , der dabei durch den Tierkörper mit elektrischem Widerstand R fliesst, ergibt sich bei einer abgegriffenen Spannung U nach dem Ohmschen Gesetz ($I = U/R$).

Quantitative Studien zur Beurteilung der Beeinträchtigung von Nutztieren durch Spannungsdifferenzen

In einem aus vielen Forschungsarbeiten zusammengefassten Bericht [5] wird ein Körperstrom für eine Verhaltensbeeinträchtigung bei besonders empfindlichen Rindern bei Wechselstrom von 2 mA und bei Gleichstrom von 2.8 mA angegeben (siehe [3, 6]). Ferner wird für den Körperwiderstand eines Rinds, gemessen zwischen den vier Klauen und dem Maul von einem Wert zwischen 500 Ω bis 1000 Ω [7] ausgegangen, woraus sich ein unterer Wert der Berührungsspannung für eine mögliche Beeinträchtigung für Wechselspannung von höchstens 1 V und für Gleichspannungen von 1,4 V ergibt.

Umfangreiche Expositionsstudien an Rindern in den USA und in Frankreich haben Differenzspannungen im Bereich 1 V ... ca. 5 V ermittelt, ab welchen mit einer Beeinträchtigung der Tiere zu rechnen ist [3, 4, 5]. Bei diesen Studien werden Versuchstiere in ihrer üblichen Stallumgebung über längere Zeit definierten Berührungsspannungen ausgesetzt, wobei nachteilige Auswirkungen im Verhalten, in der Nahrungsaufnahme, in der Milchleistung und aus medizinischer Sicht überprüft werden. Nebst individuellen Unterschieden spielen bei solchen Versuchen über längere Versuchsdauern auch Gewöhnungseffekte eine entscheidende Rolle.

Hinweise auf Beeinträchtigungen von Tieren mit Wechselspannungen unter 1 V konnten aus Tierexpositionsstudien bisher keine gefunden werden. Es ist wichtig festzuhalten, dass bei den Studien in den USA [5] reproduzierbare, medizinische (klinische) Auswirkungen nur dann festgestellt wurden, wenn die Spannungen die Schwelle der Wahrnehmung (d.h. > 1 V Berührungsspannung) überstiegen und dabei auch Verhaltensstörungen auftraten.

Die Schwelle für erste Reaktionen bei besonders empfindlichen Milchkühen wird auch in IEEE Std 1695 [12] mit 1 bis 2 V angegeben.

Ohne Fehler in der elektrischen Installation oder im Erdungssystem liegen die Berührungsspannungen im Stallbereich deutlich unter 1 V. Deshalb ist mit einer Beeinträchtigung von Nutztieren durch Ausgleichsströme (Berührungsströme > 2 mA) im Körper nur in Ausnahmefällen zu rechnen.

Auftreten und Auswirkung von Gleichspannungsdifferenzen

Kleine Gleichspannungsdifferenzen treten auch ohne Vorhandensein einer elektrischen Einrichtung auf. Sie entstehen beim Übergang zwischen Metallen und dem Erdboden oder einer feuchten Betonkonstruktion als elektrochemische Spannung. In besonders ungünstigen Fällen können Spannungsdifferenzen zwischen unterschiedlichen Metallteilen von über einem Volt auftreten. Aufgrund der bei Gleichstrom höheren Wahrnehmbarkeitsschwelle von mindestens 1,4 V ist eine Beeinträchtigung durch elektrochemische Spannungen (Makroelementspannungen) aber ebenfalls unwahrscheinlich.

Eine relevante Beeinflussung durch Gleichstromanlagen, z. B. durch Gleichstrombahnen, ist in der Schweiz nur in seltenen Fällen zu erwarten, da Spannungsabfälle im Voltbereich nur bei hohen Rückströmen bzw. hohen Erdübergangswiderständen auftreten können.

Überprüfung des Vorliegens von Berührungsspannung über 1 V

Für Fälle, in denen angenommen wird, dass ausserordentlich hohe Berührungsspannungen über 1 V an den berührbaren metallischen Einrichtungen im Stallbereich vorliegen, wird im

Folgenden beschrieben, wie eine messtechnische Überprüfung vorgenommen werden kann.

Für die Sicherheit von Mensch und Tier im Betrieb ist es zunächst unerlässlich, dass die Installationskontrollen nach NIN [9] systematisch nach Erneuerungen und Änderungen an den Niederspannungs-Installationen von landwirtschaftlichen Tierhaltungsbetrieben durchgeführt werden, wobei auch die Wirksamkeit des Potenzialausgleichs geprüft wird. Der Nachweis dieser Sicherheit (Installationskontrolle) wird in der NIV [8] Art. 35 + 36 gefordert.

Ausschlaggebend hierfür sind die Ziffern: 4.1.5.2 «Zusätzlicher Schutz-Potenzialausgleich» (Beispiel Stall) und 7.05 «Landwirtschaftliche Betriebsstätten» (§ 7.05.4.1.5.23).

Bei Verdacht auf Mängel in der elektrischen Installation ist deshalb stets eine Installationskontrolle durchführen zu lassen. Ausserdem werden eine Erdungsmessung und eine Überprüfung der Verbindungen für den Erdungspotenzialausgleich im Areal, wo sich die Tiere aufhalten, empfohlen.

Inhaber einer Kontrollbewilligung sind unter folgendem Link abrufbar:

<https://verzeichnisse.est.ch/de/aikb>

Messung allfälliger störender Streuspannungen

Zur Überprüfung, ob Differenzspannungen oberhalb von 1 V auftreten, können Wechsellspannungsmessungen mit einem handelsüblichen Multimeter vorgenommen werden.

Bei der Messung von Streuspannungen sind folgende Punkte zu beachten:

- Zur Kontrolle des Einflusses der elektrischen Verbraucheranlagen im landwirtschaftlichen Betrieb auf die Berührungsspannungen (Heugebläse, Fütterungsanlagen, Melkanlagen etc.) sollen diese bei den Messungen in den jeweiligen Räumen, wo sie installiert sind, mindestens bei einigen Stichprobenmessungen eingeschaltet werden. Werden externe Quellen (elektrische Energieversorgungsanlagen, Starkstromleitungen, Bahnen etc.) als Verursacher der Streuspannungen vermutet, so sollen die Messungen durchgeführt werden, wenn diese Anlagen in Betrieb stehen. Die Betriebsdaten (insbesondere Betriebsströme) sollen wenn immer möglich während der Messungen registriert werden.
- Die Messungen werden mit einem Voltmeter (Wechsellspannungsbereich eines Multimeters) vorgenommen, wobei die beiden Messleitungen zwischen zwei berührbaren Metallteilen oder zwischen einem leitfähigen Erdboden und einem Metallteil kontaktiert werden. Bei den Messungen sollen die Distanzen, über die eine Spannung abgegriffen werden kann, entsprechend der Körperlänge der Rinder (max. 3 m) berücksichtigt werden.
- Naturböden können mit einer Stahlplatte von ca. 20 cm x 20 cm kontaktiert werden. Leitfähige harte Böden (Beton) werden über einen nassen Lappen oder Schwamm mit der Platte kontaktiert (Bild 2).
- Isolierende Böden, zum Beispiel Stand- und Liegeflächen für die Nutztiere aus Kunststoff oder Kautschuk, können stichprobenmässig geprüft werden, wo die Wirksamkeit der Isolation, etwa durch Feuchtigkeit, fraglich ist.
- Die Spannungsanzeige soll über ca. 5 s beobachtet werden. Der Wert nach Stabilisierung der Anzeige ist festzuhalten. Bei schwankender Anzeige ist die Messzeit unter Umständen zu verlängern, so dass mehrere Maxima beobachtet werden können. Der höchste wiederholt auftretende Wert ist festzuhalten.
- In gewissen Fällen können kapazitive Einstreuungen auftreten, die eine fälschlicherweise

galvanisch gekoppelte Berührungsspannung im Voltbereich vortäuschen. Um dies auszuschliessen, wird im IEEE Standard 1695 – 2016 die Verwendung eines zum Voltmeter parallelgeschalteten Belastungswiderstands vorgeschlagen, der den Körperwiderstand der Rinder nachbildet. Hierfür vorgesehene Messwiderstände von $3000\ \Omega$ sind als Zubehör für Multimeter am Markt erhältlich.[12, 13] Der empfohlene Widerstandswert liegt oberhalb des Körperwiderstands und ist geeignet zur Messung der Berührungsspannungen entsprechend dem ungünstigsten Fall eines sehr hohen Körperwiderstands.

Werden für Tiere abgreifbare Berührungs- oder Differenzspannungen über 1 V festgestellt, so ist die Ursache durch eine Fachstelle oder einen Elektrokontrolleur oder Sicherheitsberater mit weiteren Messungen abzuklären und zu beseitigen.

Durch das Befolgen der einschlägigen Installationsnormen werden Differenzspannungen wirkungsvoll vermieden (siehe [1]).

Änderungen an Niederspannungsinstallationen sind Installationsarbeiten. Um diese ausführen zu dürfen, ist eine entsprechende Bewilligung des eidgenössischen Starkstrominspektorates erforderlich. SR 734.27 Art. 6 bis 16.

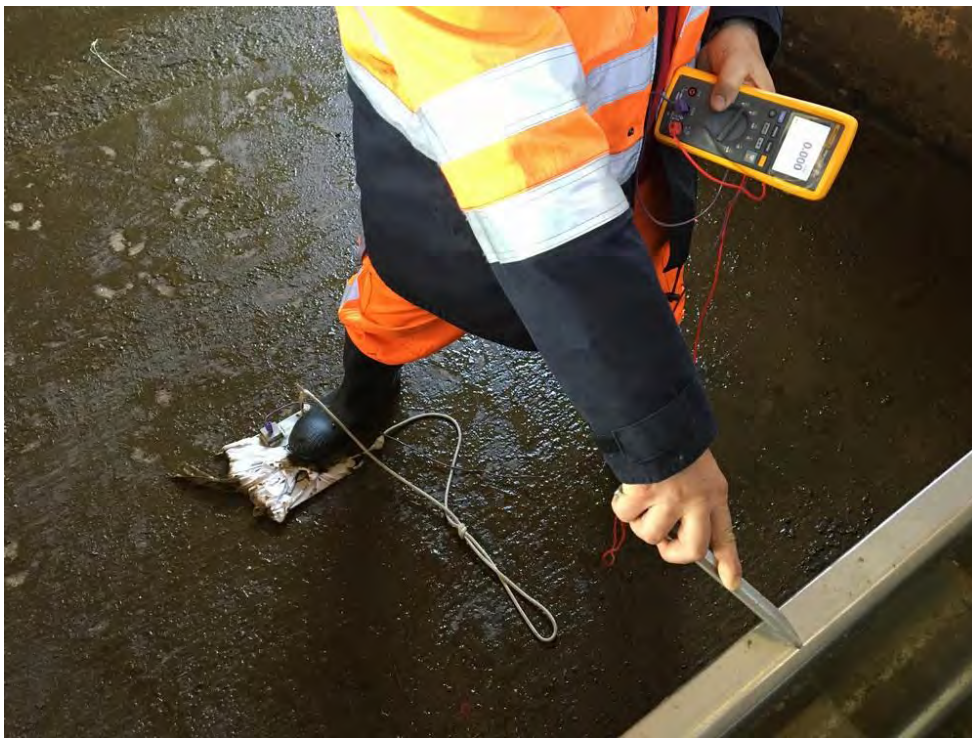


Bild 2 Messung der Wechselfspannungsdifferenz zwischen der Standfläche eines Rinds und einer metallischen Tränke. Einfache Möglichkeit zur Kontaktierung des Betonbodens mittels einer Metallplatte, die in einen nassen Lappen eingehüllt wurde. Der Abstand bei dieser Messung entspricht etwa jenen zu den Vorderbeinen.

Bemerkung: Gleichspannungsmessungen mit metallischen Messanschlüssen sind nur zwischen Metallteilen aussagekräftig. Auf feuchtem Erdboden, Beton etc. entstehen beim Kontaktieren mit metallischen Elektroden elektrochemische Spannungen (in aller Regel unter 1 V), die von der Messanordnung abhängen und keinen direkten Bezug zur Berührungsspannung haben, welche die Rinder abgreifen (siehe auch Abschnitt 4). Für Gleichspannungsmessungen auf Beton- und Naturböden müssen zur korrekten Berücksichtigung der elektrochemischen Spannungen normierte Bezugs Elektroden (elektrochemische Halbzellen) eingesetzt werden.

Referenzen

- [1] «Differenzspannungen/Streuströme in landwirtschaftlichen Tierhaltungsbetrieben, Massnahmen zur Vermeidung störender Differenzspannungen in bestehenden und neuen Nutztierställen», Mitteilung des Eidgenössischen Starkstrominspektorats und des Technischen Komitees Erdungen des CES, Bulletin SEV/VSE 12/2018, S. yy – zz).
- [2] Streuströme in landwirtschaftlichen Tierhaltungsbetrieben Mechanismen und Auswirkungen, Bulletin 03/2014, S. 54ff.
- [3] Deschamps F., Devaux L. Rigalma K., Roussel S., Duvaux-Ponter C., «Innovative approach of the potential impact of HV lines on their environment: the experimental farm», Cigré Session Paris 2010, Paper C3_113_2010.
- [4] «Mieux connaître les risques des courants électriques parasites dans les exploitations d'élevage», Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, EDF, Promelec, Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture, Groupama; RTE, 92068 Paris, www.rte-france.com
- [5] Douglas J. Reinemann, «Literature review and synthesis of research findings on the impact of stray voltage on farm operations», Prepared for the Ontario Energy Board, 31 March 2008.
- [6] Dürrenberger G., «Kriechströme, Stand des Wissens», Forschungstiftung Strom und Mobilkommunikation, c/o ETH Zürich, 8092 Zürich.
- [7] Biegelmeier G., Kieback D., Kiefer G., Krefter K.-H., «Schutz in elektrischen Anlagen, Band 1, Gefahren durch den elektrischen Strom», VDE-Verlag, 2. Auflage, 2003.
- [8] Verordnung über elektrische Niederspannungsinstallationen (NIV SR 734.27).
- [9] Niederspannungs-Installationsnorm NIN, SN 411000:2015.
- [10] SR 814.710, «Verordnung vom 23. Dezember 1999 über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV)».
- [11] SNG 483755 (SN Guideline); «Erden als Schutzmassnahme in elektrischen Starkstromanlagen, Erläuterungen zu den Artikeln 53 – 61 der Starkstromverordnung SR 734.2», CES TK Erdungen, Arbeitsgruppe 3755, Juni 2015.
- [12] IEEE Std 1695 – 2016 «IEEE Guide to understanding, diagnosing, and mitigating stray and contact voltages».
- [13] Streuspannungsadapter, TL225-1, Fluke Switzerland GmbH, 8303 Bassersdorf.
- [14] SNR 464113, «Regeln des CES Fundamentender», 2015.

Anhang A: Entstehung von Streuströmen

Im Erdboden und im Gebäudeerdungssystem bilden sich Streuströme systembedingt als kleiner Anteil eines Teilrückstroms, der von der Gebäudeerdung ins Stromnetz zurückfliesst. Auch geringe Anteile der Rückströme von Bahnanlagen oder Anteile von Erdströmen benachbarter Freileitungen können vom Erdreich über die Erdungssysteme und über Erdleiter von Kabelverbindungen fließen. Ausserdem entstehen Streuströme durch Induktion aufgrund der Magnetfelder der elektrischen Hausinstallationen.

Beide Fälle werden in den zwei nachfolgenden Figuren detaillierter beschrieben:

Bild 3 zeigt das Schema einer üblichen Stromversorgungssituation für einen Bauernhof, welcher von einer Trafostation angespeist wird [11]. Da die drei Phasen der Niederspannungsleitung in der Regel nicht alle gleich belastet sind, fliesst ein Asymmetrie-Rückstrom (Nettostrom) über den geerdeten Neutralleiter (PEN-Leiter) zur Trafostation zurück. Der Neutralleiter wird aus Sicherheitsgründen sowohl bei der Trafostation als auch beim Stromkunden (hier beim Nutztierstall) geerdet. Durch den beidseitigen Erdkontakt kann ein kleiner Anteil des Rückstroms als Streustrom über die Leiter des Erdungssystems und das Erdreich zurückfließen.

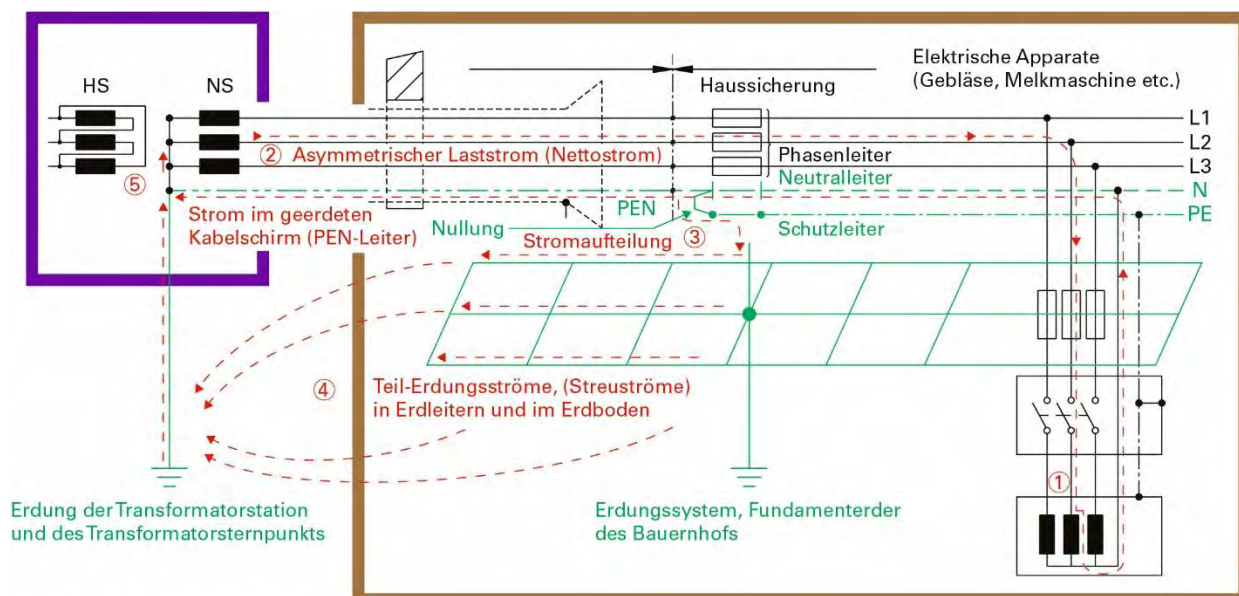


Bild 3 Skizze für die Erklärung der Entstehung von Streuströmen als Teilausgleichsströme ausserhalb des Erdungsleiters (PEN-Leiter), nach [11]:

- Eine asymmetrische Belastung der drei Aussenleiter (Polleiter) führt zu einem Nettostrom.
- ⚡ Dieser Nettostrom fliesst über die drei Aussenleiter zur Last und zurück über den Neutralleiter zum Hausanschlusspunkt und weiter über den PEN-Leiter zur Trafostation zurück.
- ⬅ Bei der Erdung des Neutralleiters (Nullung am Hausanschlusspunkt) kann ein kleiner Anteil des Rückstroms auf das Erdungssystem des Gebäudes übertreten.
- ⤵ Dieser fliesst als Streustrom über vorhandene Leiter und durch das Erdreich schliesslich ebenfalls zum Erdungssystem der Trafostation zurück.
- ⌞ In der Trafostation fließen die Rückstromanteile vom dortigen Erdungssystem zum Trafostationsternpunkt zurück.

Bild 4 zeigt den zweiten Mechanismus, durch welchen ebenfalls kleine Streuströme erzeugt werden können. Stromdurchflossene Kabel in der Elektroinstallation des Gebäudes, Freileitungen und vorbeiführende Kabel erzeugen ein Magnetfeld. Führen die Feldlinien des Magnetfelds durch eine Schleife im Erdungssystem, dann entsteht ein schwacher Kreisstrom in dieser Schleife. Dieser ruft ebenfalls ein Magnetfeld hervor, welches dem erzeugenden

Magnetfeld entgegengerichtet ist und dieses abschwächt.

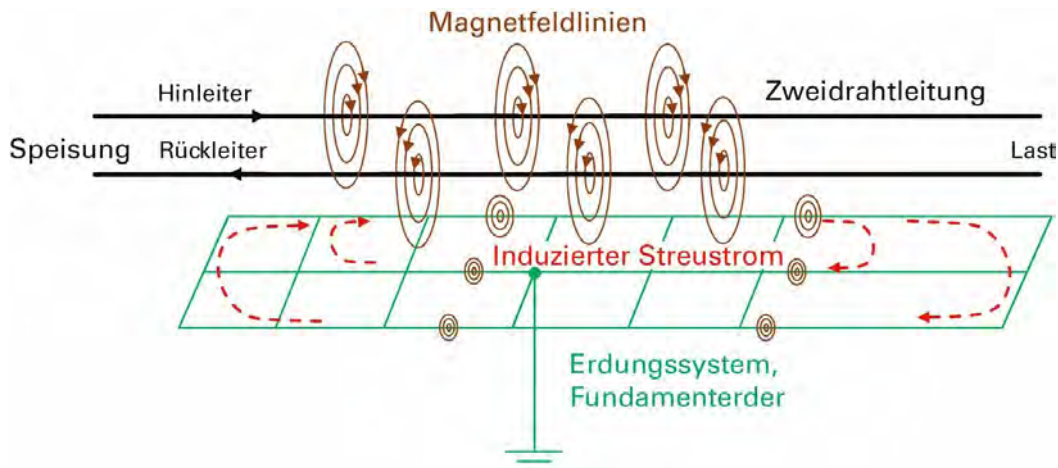


Bild 4 Einkopplung von Streuströmen durch Induktion über das Magnetfeld. Hier mit dem Beispiel einer Zweidrahtleitung.

Die Magnetfelder von Streuströmen sind, abgesehen von Fehlerfällen wie im Folgenden gezeigt wird, gering und unbedenklich.

Als besonders ungünstiges Beispiel wird von einem Strom von 1 A in einem einzelnen, gerade verlaufenden Erdleiter ausgegangen. Die magnetische Flussdichte, welche durch den Strom von 1 A in diesem Leiter erzeugt wird, klingt linear mit dem Abstand ab und nimmt bereits in einem Abstand von 20 cm auf einen Wert von $1 \mu\text{T}$ ab. (Für einen Strom I in einem einzelnen gestreckten Leiter gilt bei für die magnetische Flussdichte B im Abstand d folgende einfache Beziehung: $B = 0,2 \times I/d$). Dieser Wert entspricht dem Vorsorgewert gemäss NISV [10] für Orte empfindlicher Nutzung für Personen. Die NISV soll Menschen vor schädlicher und lästiger nichtionisierender Strahlung schützen. Der Vorsorgewert von $1 \mu\text{T}$ ist als Mittelwert über den ganzen Körper zu verstehen. Er gilt an Orten, wo sich Personen regelmässig während längerer Zeit aufhalten. Er ist für Nutztierställe nicht verbindlich, da diese nicht zu den Orten mit empfindlicher Nutzung zählen, bzw. der Anlagengrenzwert nicht für Tiere gilt.

An allen öffentlich zugänglichen Orten, wie auch in Ställen, müssen nach der NISV [10] die frequenzabhängigen Immissionsgrenzwerte verbindlich eingehalten werden (bei 50 Hz: $100 \mu\text{T}$). Dieser Wert gilt für das magnetische Feld von Einrichtungen der Elektrizitätsversorgungsunternehmen (z.B. Trafostationen und vorbeiführende Freileitungen und Kabel). Im Aufenthaltsbereich von Nutztieren in Ställen werden allerdings üblicherweise nur Werte im Bereich von $0,1 \mu\text{T}$ bis zu einigen wenigen μT gemessen.

Messungen mit einem Magnetfeldmessgerät können rasch Aufschluss über die vorliegenden Felder im Stallbereich geben.

Eine störende Beeinträchtigung von Nutztieren durch Magnetfelder von Streuströmen in Erdleitern und anderen metallischen Strukturen ist deshalb nicht zu erwarten.

Die im Erdungssystem fliessenden Ströme können nur über das Magnetfeld mit dem biologischen Gewebe von Menschen und Tieren wechselwirken. Aufgrund der schwachen Leitfähigkeit des Körpers erzeugen sie dort geringe Wirbelströme. Wie oben erklärt, sind die Magnetfelder jedoch unbedenklich. Eine direkte Auswirkung von Streuströmen auf Nutztiere und auch Menschen kann deshalb nicht begründet werden.