

# Verbesserte Prüfung des Isolationsvermögens elektrotechnischer Anlagen in der Landwirtschaft

Dr.-Ing. W. Naumann, KDT, Zentralinstitut für Arbeitsschutz Dresden  
Ing. E. Damme, KDT, Spezialschule für Landtechnik Großenhain

## 1. Elektrosicherheit

Auch in der Landwirtschaft ist die Erfüllung der Forderung nach einem hohen Automatisierungsgrad mit der umfassenden Gewährleistung der Gebrauchsfähigkeit und der Elektrosicherheit der Anlagen, Betriebsmittel und Geräte verbunden. Die 11 Schutzziele zur Elektrosicherheit sind grundsätzlich im Standard TGL 30 060 [1] aufgeführt und in vielen weiteren Standards untersetzt (Tafel 1).

Ohne ausreichendes Isolationsvermögen ist der Schutz gegen direktes Berühren, eingeschlossen die Schutzisolierung, nicht gewährleistet. Außerdem würden die Schutzmaßnahmen gegen zu hohe Berührungsspannungen laufend den Betrieb der Anlagen unterbrechen, um Gefährdungen abzuwenden. Kurzschlüsse mit hoher Beanspruchung der Strombahnen sowie mit Lichtbogenauswirkungen würden auftreten, und Überspannungen mit Funkenbildung könnten Brände und Explosionen verursachen.

## 2. Methoden zum Nachweis des Isolationsvermögens

### 2.1. Isolationswiderstandsmessung

Die Isolation einer Anlage, eines Bauteils oder eines Geräts ist in Ordnung, wenn bei anliegender Spannung  $U_p$  kein bzw. nur der zulässige Ableitstrom  $I_A$  (auch Verlust- oder Leckstrom genannt) zwischen den isolierten Teilen fließt. Zum Nachweis diente bisher die Isolationswiderstandsmessung, z. B. mit dem Isolationswiderstandsmeßgerät vom Typ ISO61.

Einzuhaltende Grenzwerte des spezifischen Isolationswiderstands  $R_i$  sind Tafel 2 zu entnehmen. Es gilt:

$$R_i = \frac{R_{i\text{zul}}}{U_n} = \frac{1}{I_{A\text{zul}}} \quad (1)$$

$R_i$  unterer Grenzwert des spezifischen Isolationswiderstands

$R_{i\text{zul}}$  kleinster zulässiger Wert des Isolationswiderstands

$U_n$  Nennspannung des Prüflings

$I_{A\text{zul}}$  größter zulässiger Ableitstrom.

Diese Nachweismethode hat drei entscheidende Nachteile:

- Die am Prüfling anliegende Spannung  $U_p$  ist nicht definiert und vom Aufbau des Prüfgeräts (Meßspannung des Prüfgeräts  $U_M$  und Innenwiderstand  $R_i$ ) abhängig:

$$U_p = U_M \frac{R_i}{R_i + R_i} \quad (2)$$

Das bedeutet, daß schlechte Isolierungen ( $R_i < R_i$ ) „rücksichtsvoll“ mit kleineren Spannungen geprüft werden.

- Der am Prüfling gemessene Ableitstrom zur Anzeige des Isolationswiderstands ergibt sich aus einer Vielzahl von Teilströmen unbekannter Ursache, deren Auswirkungen nicht eindeutig der Qualität der Isolierung zuzuschreiben sind.

Ein winziger sauberer Wassertropfen, der schon in wenigen Stunden abgetrocknet sein kann und keine Gefahr darstellt, erscheint somit ebenso als Isolationsfehler wie ein permanenter Kriechstrom an der Oberfläche einer verschmutzten Isolierung.

In langen Leitungen wiederum können naturgemäß größere Ableitströme fließen als in kürzeren, ohne daß dadurch ein Qualitätsunterschied bezüglich der Isolierung besteht.

- Der Ableitstrom kann nicht zur Fehlerortbestimmung genutzt werden, da er weder hör- noch sichtbar ist.

### 2.2. Blitzspannungsprüfung

Eine Alternative zur Isolationswiderstandsmessung stellen die Hochspannungsprüfverfahren dar. Hierbei hat sich in den letzten Jahren das Prüfen der Anlagen und Betriebsmittel mit Blitzspannung als besonders günstig erwiesen.

Tafel 1. Zuordnung der Schutzziele zu den Rechtsvorschriften

Abschnitt nach Standard TGL 30 060	Schutzziel	nachgeordneter Standard	Titel (verkürzt)
2.	Isolationsvermögen	TGL 20 445 TGL 16 559	Isolationskoordination Kriech- und Luftstrecken
3.	Schutz gegen direktes Berühren	TGL 200-0602/02  TGL 200-0601	Schutzmaßnahmen, Schutz gegen Berühren betriebsmäßig unter Spannung stehender Teile Errichtungsvorschriften
4.	Schutz bei indirektem Berühren	TGL 200-0602/03  TGL 200-0603 TGL 21 366 TGL 7783	Schutzmaßnahmen, Schutz beim Berühren nicht unter Spannung stehender Teile Erdung in elektrotechnischen Anlagen Schutzklassen Schutzleiteranschlußstelle
5.	Kurzschluß-	TGL 200-0606/02 TGL 200-0606/03 TGL 200-0606/04	Bemessung auf mechanische Kurzschlußstromfestigkeit Bemessung auf thermische Kurzschlußstromfestigkeit
6.	Lichtbogenschutz	TGL 200-0606/05	Bemessung auf Kurzschlußfestigkeit, Lichtbogenschutz
7.	Schutz gegen elektromagnetische Felder	TGL 32 602/01 TGL 37 816	Arbeitshygiene, elektromagnetische Felder, Umweltschutz, Schutz vor elektromagnetischen Feldern
8.	Schutz gegen elektrostatische Aufladungen	TGL 22 061	Elektrostatische Aufladungen
9.	Schutz gegen Beeinflussung durch induktive, kapazitive und ohmsche Kopplung	TGL 36 172  TGL 200-0605	Interface zwischen numerischen Steuerungen und Be- und Verarbeitungsmaschinen Kreuzungen und Näherungen – Beeinflussung
10.	Blitzschutz	TGL 30 044 TGL 200-0616 TGL 33 373	GAB, Blitzschutz Blitzschutzmaßnahmen Bautechnische Maßnahmen, Erdung, Potentialausgleich, Blitzschutz
11.	Verriegelungen	TGL 12 468	Anfahr- und Signalordnung für technologische Prozesse
12.	Verhütung von Bränden und Explosionen	TGL 200-0621  TGL 200-0622  TGL 200-0625	Elektrotechnische Anlagen in explosionsgefährdeten Arbeitsstätten Elektrotechnische Anlagen in explosivstoffgefährdeten Arbeitsstätten Elektrotechnische Anlagen – Brandgefährdung

Nennspannung des Stromkreises	Meßgleichspannung	Isolationswiderstand $R'_i$				
		nach TGL 200-0618 für Neuanlagen	nach TGL 200-0619/08			
			Anlagen ohne Verbraucher bzw. Geräte	Anlagen mit Verbraucher	Anlagen in Feuchträumen	IT-Netze
$\leq 440$ V	500 V	$R'_i = 10$ k $\Omega$ /V bzw. für Meßabschnitte der Länge $l > 100$ m $R'_i = \frac{100}{l} 10$ k $\Omega$ /V (l in m)	1 k $\Omega$ /V entspricht $I_A = 1$ mA	0,3 k $\Omega$ /V entspricht $I_A = 3,3$ mA	0,05 k $\Omega$ /V entspricht $I_A = 20$ mA	0,025 k $\Omega$ /V entspricht $I_A = 40$ mA
$> 440$ V	1 000 V					

Tafel 2  
Untere Grenzwerte für Isolationswiderstände nach den Standards TGL 200-0618 und TGL 200-0619/08

Der Prüfling wird an einen Blitzgenerator (z. B. TIP006) angeschlossen, der einen in Wellenform (1,2  $\mu$ s Stirnanstiegszeit, 50  $\mu$ s Rückenhalbwertszeit) und Scheitelwert definierten Hochspannungsimpuls liefert. Sein Innenwiderstand ist gegenüber den Isolationswiderständen vernachlässigbar klein, so daß Gl. (2) jetzt lautet:

$$U_p = U_M \quad (3)$$

Somit wird der Prüfling stets mit der voreingestellten Prüfspannung  $U_p$  beaufschlagt. Die Prüfspannung muß dem Standard TGL 20 445/03 [2] entsprechen (Tafel 3). Einzelheiten des Prüfvorgangs sind der ZIAS-Richtlinie [3] zu entnehmen.

Bei der Blitzspannungsprüfung wird der bei anliegender Prüfspannung fließende Ableitstrom überwacht, aber nicht wertmäßig ausgewiesen.

Die Isolation des Prüflings ist gut, wenn

$$I_A (U_{p1}) < I_F \quad (4)$$

und sie ist fehlerhaft, wenn

$$I_A (U_{p2}) = I_F \quad (5)$$

$I_A (U_{p1})$  Ableitstrom bei  $U_{p1}$

$I_A (U_{p2})$  Ableitstrom bei  $U_{p2}$

$I_F$  Fehlerstrom infolge Funkenüberschlag bzw. -durchschlag.

Dadurch erscheint der winzige Wassertropfen nicht als „Isolationsfehler“, wohl aber der Kriechwegüberschlag als Fehler- oder Schwachstelle in der Isolierung.

Mit der Blitzspannungsprüfung wird durch eine nachgebildete elektrische Beanspruchung, wie sie oft auch während des Betriebs auftritt (innere und äußere Überspannungen), der Sicherheitsgrad gegenüber der Betriebsspannung ermittelt. Durch die kurze Beanspruchungsdauer und die damit verbundenen geringen Energieinhalte (weniger als 1,4 Ws) beeinträchtigt die Prüfung die Isolierungen nicht (zerstörungsfreie Werkstoffprüfung). Bei der Blitzspannungsprüfung wird die Isolierung punktförmig abgetastet, und genau an der Fehlerstelle entsteht ein Funkenknall. Diese Methode eignet sich somit ausgezeichnet zur Fehlerlokalisierung. Es ist gelungen, das typische Funkenknallgeräusch von Umgebungsgeräuschen zu isolieren und in einem Entfernungsmeßgerät zu verarbeiten [4]. Das Zusatzgerät befindet sich z. Z. in der Erprobung und wird zur Verbreitung der Blitzspannungsprüfung beitragen, denn welcher Elektriker ist nicht froh darüber, wenn ihm schnell und zuverlässig der Ort des Fehlers angegeben wird.

Der Umgang mit Blitzspannung, auch wenn es sich hierbei um eine Hochspannung handelt, ist bei einem Scheitelwert von maximal 10 kV und einer Rückenhalbwertszeit  $< 7$  ms ungefährlich, wenn die Entladungsenergie 50 Ws nicht übersteigt [5]. Die Schmerzgrenze liegt bei 0,1 Ws.

Im Gutachten zum Blitzgenerator TIP006 wird festgestellt, daß eine Gefährdung des Bedieners bei sachgemäßer Handhabung mit großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen ist. Tiere reagieren auf diese Impulse wie

beim Berühren eines elektrischen Weidezauens und brauchen vor der Prüfung nicht aus dem Stall gebracht zu werden. Absperrrungen der zu prüfenden Anlage entfallen. Menschen müssen vor einer Berührung jedoch gewarnt werden, um Verletzungen durch Schreckreaktionen zu vermeiden.

### 3. Ergebnisse der Prüfungen mit Blitzspannung

Aus dem Bereich der Land-, Forst- und Nahrungsgüterwirtschaft kamen erste Anregungen zur Entwicklung einer Nachweismethode der Funkenfreiheit elektrotechnischer Anlagen bei Gewitter, weil viele Brände durch derartige Entladungen eingeleitet wurden und mit Totalschaden der Bergeräume und Ställe endeten. Dabei genügt schon ein Blitzschlag außerhalb des Objekts, der die Elektroanlagen lediglich über seine Feldwirkung beeinflusst.

Ursprünglich mit selbstgebauten Blitzgeneratoren, jetzt mit dem Gerät TIP006 (Bild 1) ausgeführt, ergaben die Messungen

- Fehlerstellen in Form beschädigter Isolierungsumhüllungen der Leitungen durch Schädner (Bild 2)
- Fehlerstellen durch korrodierte Klemmen in Abzweigboxen, Steckboxen, Schaltern und Klemmleisten aufgrund mangelnden Schutzgrades
- Fehlerstellen unmittelbar an lockeren Klemmstellen, wo die Isolierung durch thermische Überlastung spröde, brüchig und bereits verkohlt war (sehr oft in den Fassungen der Leuchten)
- Fehlerstellen an Kabeln und Leitungen,

Bild 1. Für den Einsatz vorbereiteter Blitzgenerator TIP 006 mit  
a Prüfpistolen (müssen nicht angewendet werden)  
b Adapter (dient anstelle der Schraubkappe zum Anschluß des Blitzgenerators am Sicherungsverteiler)  
c Spannungsprüfer (zum Feststellen der Spannungsfreiheit des zu prüfenden Stromkreises)

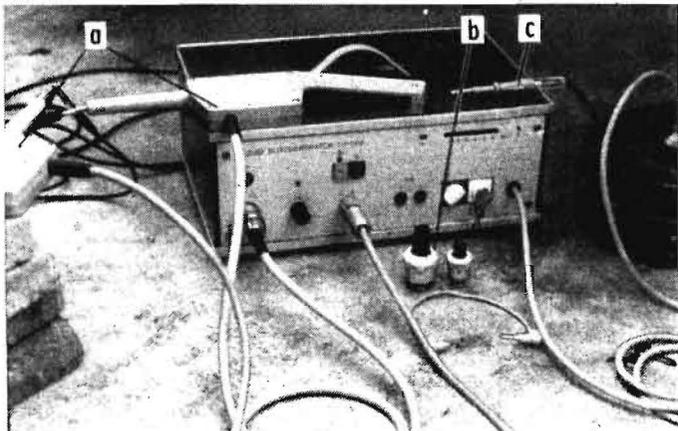


Bild 2. Durch die Anwendung der Blitzspannungsprüfung aufgefundene, von Schädner abgefressene Isolierung einer Leitung im Kabelkanal eines Trockenwerks



Nennspannung des Netzes bzw. des Stromkreises in V		Soll-Wert der Prüfblitzspannung $U_p$ (Nennstehblitzspannung nach Standard TGL 20 445/03) Scheitelwerte in kV			
Leiter – Leiter Drehstromsystem	Leiter – Erde; Außenleiter – Außenleiter bei Drehstrom- Wechselstrom- Gleichstromsystem	Anlagenklasse <sup>1)</sup>			
bis:	bis:	1	2	3	4
60	50	0,33	0,5	0,8	1,5
150	100	0,5	0,8	1,5	2,5
240	150	0,8	1,5	2,5	4,0
500	300	1,5	2,5	4,0	6,0
1 000	600	2,5	4,0	6,0	8,0
–	1 000	4,0	6,0	8,0	12,0

- 1) Anlagenklasse 1: für BMSR-Anlagen  
 Anlagenklasse 2: für Installationsanlagen bis 63 A  
 Anlagenklasse 3: für Elektroanlagen größerer Leistung als bei Anlagenklasse 2, z. B. Verteilungsanlage, Hausanschlußanlage  
 Anlagenklasse 4: für Elektroanlagen großer Leistung, großer Zuverlässigkeit und zentraler Bedeutung, z. B. Schwerpunktlaststationen und Anlagen in schutzisolierter Ausführung

die über scharfe Kanten, z. B. bei Kabelpfitschen, gezogen wurden und bei denen die Isolierung gequetscht war Eben solche Quetschungen der Isolierung waren an Motoranschlußleitungen am Anschlußkasten zu beobachten, weil bei der Montage die Leitung unzulässig straff gezogen und durch Rüttelbewegungen die Isolierung stark beansprucht wurde.

- Schwachstellen in Abzweigdosen, Steckdosen und Schaltern durch Einschnitte in die Aderisolierung beim Abisolieren der Anschlußenden
- Schwachstellen durch leichte Verschmutzung der Isolierstoffoberflächen
- Fehlerstellen in Form von Kriechwegen infolge Verschmutzung, Hitze und Feuchte auf Isolierstoffoberflächen, die auch schon zum Auslösen von Sicherungen geführt haben, aber nicht erkannt wurden
- Schwachstellen an neuwertigen Betriebsmitteln, die vom Hersteller noch nicht für das Isolationsvermögen gemäß Standard TGL 20 445/03 ausgelegt waren.

Der Unterschied zwischen Schwach- oder Fehlerstellen wird darin gesehen, daß

- eine Schwachstelle zwar die Prüfspannung der Anlagenklasse hält, bei der Diagnose mit höherer Prüfspannung (vgl. Tafel 3) aber versagt
- die Fehlerstelle schon bei der Prüfspannung der Anlagenklasse anspricht oder bei höherer Prüfspannung wegen der von ihr ausgehenden Gefährdung die Gebrauchsfähigkeit der Anlage oder des Betriebsmittels nicht mehr gewährleistet.

Bei einem während der Prüfung aufgetretenen Funkenüberschlag muß der Fachmann durch Sichtprüfung entscheiden, was mit der Anlage zu geschehen hat.

Die Auswertung der an der TH Leipzig vorliegenden Untersuchungsergebnisse ergab, daß etwa 35 % der aufgeführten Schwach- oder Fehlerstellen durch die Isolationswiderstandsmessung, 50 % durch eine Vorab-Sichtprüfung und 90 % durch die Blitzspannungsprüfung gefunden werden können. Durch die Blitzspannungsprüfung ortsfester Elektroanlagen können die Gebrauchsfähigkeit und die Elektrosicherheit der Anlagen

erhöht werden, weil bislang unentdeckte Fehler- und Schwachstellen, vor allem solche durch Schädlinge verursachte, ermittelt und nach der Revision zielgerichtet beseitigt werden können. Anlagen, für die bisher kein Fachmann aufgrund der fehlenden Aussagekraft der Isolationswiderstandsmessung und der nicht zugänglichen Teile bei der Sichtprüfung nach Ablauf der normativen Nutzungsdauer einen GAB-Nachweis für die Weiternutzung erstellen konnte, bleiben der Volkswirtschaft erhalten. Das betrifft sowohl Zwischendeckeninstallationen in Ställen als auch überwachungspflichtige Elektroanlagen in der Getreidewirtschaft. Damit wird ein wesentlicher Beitrag zu den Maßnahmen des Ministeriums für Land-, Forst- und Nahrungsgüterwirtschaft vom 10. Februar 1986 zur Erhöhung der technischen Sicherheit der Elektroanlagen geleistet. Bei regelmäßiger Revision kann die geforderte Verlegung der Zwischendeckenleitungen auf sichtbare Kabelbahnen langfristig geplant werden. Im Fall einer überwachungspflichtigen Elektroanlage eines Getreidesilos wurde durch die Weiternutzung dringend benötigte Lagerkapazität gewonnen.

Eine oft gestellte Frage betrifft die Brand- und Explosionsgefahr bei der Blitzspannungsprüfung. Die vom Blitzgenerator TIP 006 erzeugte maximale Energie beträgt je Impuls 1,35 Ws. Feste brennbare Stoffe (Papier, Textilien, Stroh) können nicht entzündet werden. Mit Stäuben aus der Landwirtschaft wurden Versuche durchgeführt, die zu keiner Zündung geführt haben. Trotzdem ist mit der notwendigen Vorsicht zu prüfen. Staubproben sollten auf ihre Zündfähigkeit direkt im Funken zwischen den Prüfspitzen des Blitzgenerators getestet werden. Die minimale Zündenergie von Getreidestaub wird mit 1,6 Ws angegeben. Bei Gasexplosionsgefahr, z. B. im Bereich von Tankstellen oder Gülleanlagen, muß vor der Prüfung wie bei der Isolationswiderstandsmessung Gasfreiheit herrschen.

Durch die Blitzspannungsprüfung ergeben sich auch für den Elektriker Vorteile. Er kann vorausschauend die geprüfte Anlage beurteilen, die Rangfolge der Instandhaltungsmaß-

Tafel 3  
 Prüfblitzspannungen zur Prüfung elektrotechnischer Anlagen

nahmen planen sowie schnell und zuverlässig Isolationsfehler bestimmen.

Auf der Grundlage der bestehenden Prüftechnologie [3] für ortsfeste Anlagen wurden auch Fahrzeuginstallationsanlagen mit Nennspannungen bis 12 V mit Blitzspannung geprüft. Beispielsweise wurden an einem instand gesetzten Häcksler, dessen Elektroanlage nur einer Sichtprüfung unterzogen worden war, weitere Fehler gefunden:

- Fehlerstelle in Form einer Scheuerstelle an der Blinkgeberleitung unter der Befestigungsschelle
- Fehlerstelle in der Bremslichtleitung durch Verrutschen eines Isolierschlauches über einer Lötstelle
- Schwachstellen in fast allen Steckdosen in Form korrodierter und verschmutzter Kontakteile aufgrund ungünstig gewählter Einbaulage am Fahrzeug, die das Eindringen von Schmutzwasser begünstigte
- Schwachstelle im Schalter für Zusatzscheinwerfer und Lüfter durch geringen Kontaktabstand.

Von 16 geprüften Stromkreisen waren zwei fehlerhaft und zehn zeigten die o. g. Schwachstellen, obwohl alle Isolationswiderstände ausreichend hoch waren (0,3 bis 500 MΩ). Auch dieses Beispiel zeigt, daß es notwendig ist, prophylaktische Prüfungen mit Blitzspannung durchzuführen, um die Betriebs- und Verkehrssicherheit der Fahrzeuge in der Landwirtschaft von seiten der Elektroanlage zu gewährleisten.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Gebrauchsfähigkeit und Elektrosicherheit von Starkstrom-, Automatisierungs- und Fahrzeuginstallationsanlagen wird durch das Isolationsvermögen wesentlich beeinflusst. Zum Nachweis eines ausreichenden Isolationsvermögens hat sich auch in der Landwirtschaft die Methode der Blitzspannungsprüfung bewährt und konnte bereits mit großem Nutzen angewendet werden. Die beschriebenen Beispiele für das Ermitteln von Fehler- bzw. Schwachstellen sollen den Praktikern helfen, sich für die Anwendung der Blitzspannungsprüfmethode zu entscheiden (TGL 200-0619/08 und TGL 200-0629/01 gestatten sowohl die Isolationswiderstandsmessung als auch die Blitzspannungsprüfung). In der Perspektive ist vorgesehen, noch kleinere netzunabhängige Blitzgeneratoren zu entwickeln und ein passendes, einfaches Zusatzgerät zur Fehlerortbestimmung zu produzieren.

#### Literatur

- [1] TGL 30 060 GAB; Schutz gegen Elektrizität, Allgemeine sicherheitstechnische Forderungen. Ausg. Juni 1986.
- [2] TGL 20 445/03 Isolationskoordination; Betriebsmittel und Anlagen mit Nennspannung bis 1000 V. Ausg. Febr. 1986.
- [3] ZIAS-Richtlinie „Anwendung der Blitzspannungsprüfung zum Nachweis des Isoliervermögens in elektrotechnischen Anlagen bis 1000 V“. Zentralinstitut für Arbeitsschutz Dresden, Beiträge für die Praxis (1987), H. 45.
- [4] Naumann, W.: Einrichtung zur Feststellung des Isolationszustandes und des Fehlerortes an elektrotechnischen Anlagen und Betriebsmitteln. WP G01R/3112990. Anmeldetag: 24. Dezember 1987.
- [5] IEC 479-2 Effects of current passing through the human body. IEC-Report 1987 der Internationalen Elektrotechnischen Kommission. A5399