

1.1 Was ist Hochspannung?

In VDE 0101-1 [4] werden Wechselspannungen über 1 000 V als Hochspannung bezeichnet.

Nicht genormt, aber in der Praxis seit jeher üblich, ist die Unterteilung in Mittel-, Hoch- und Höchstspannung. In VDE 0101 waren über viele Jahre drei Spannungsbereiche A, B und C definiert. Legt man diese Bereiche zugrunde, so kann man folgende Einteilung vornehmen:

Mittelspannung: $U_n = 3 \dots 36 \text{ kV}$ Bereich A: $U_m = 1 \dots < 52 \text{ kV}$

Hochspannung: $U_n = 45 \dots 220 \text{ kV}$ Bereich B: $U_m = 52 \dots < 300 \text{ kV}$

Höchstspannung: $U_n = 275 \dots 700 \text{ kV}$ Bereich C: $U_m \geq 300 \text{ kV}$

In VDE 0101-1 [4] sind die **Spannungsbereiche** neu definiert:

Bereich I: $1 \text{ kV} < U_m \leq 245 \text{ kV}$

Bereich II: $U_m > 245 \text{ kV}$.

In anderen VDE-Normen werden diese Bezeichnungen bereits verwendet (z. B. VDE 0111-1 [31]). Die VDE 0101-1 [4] gilt allerdings nur für Wechselspannung. In der TAR Mittelspannung [114] wird für Mittelspannung ein Bereich von $>1 \text{ kV}$ bis $<60 \text{ kV}$ verwendet.

Für Gleichspannungsanlagen gilt VDE 0101-20, derzeit als Entwurf [144] verfügbar. Hiernach wird Gleichspannung bis zu einer Höhe von nicht größer als 1 500 VDC als Niederspannung bezeichnet, darüber liegende Spannungen als Hochspannung.

1.2 Welcher generelle Unterschied besteht zur Niederspannung?

Die notwendigen Abstände zwischen spannungsführenden Teilen und zu geerdeten Teilen werden degressiv mit der Spannung erhöht. Dies soll durch einen Vergleich der vorgeschriebenen *Luftstrecken* nachgewiesen werden.

Die Luftstrecken für NS-Anlagen sind in VDE 0110-1 [81] festgelegt.

1	2	3	4
Höchste Spannung der Anlage U_m kV	Mindestabstand N cm	N in % von l	l linear hochgerechnet cm
1			1,9
7,2	9	70,2	13,7
12	16	65,7	22,8
24	27	59,2	45,6
36	32	46,8	68,4
145	130	47,2	275,5
245	210	45,1	465,5
420	360	45,1	798

Tafel 1.1 Vergleich der Luftstrecken bei NS und HS

Für $U_n = 1\,000\text{V}$ wird die Luftstrecke bei folgenden Bedingungen ermittelt:

- höchste Überspannungskategorie (Tabelle F1),
- höchste Verschmutzung und zeitweilige Überspannungen (Tabelle F2),
- inhomogene Felder und periodische Spitzenspannungen (Tabelle F8).

Ergebnis: Bei $U_n = 1\,000\text{V}$ Luftstrecke $l = 19\text{mm}$

Für die in Deutschland gebräuchlichsten Nennspannungen sind in Spalte 2 der **Tafel 1.1** die größten Mindestabstände N gemäß VDE 0101-1 – Tabellen 1 und 2 [4] – den von $1\,000\text{V}$ linear hochgerechneten Werten von $l = 19\text{mm}$ in Spalte 4 gegenübergestellt. In Spalte 3 ist der prozentuale Wert von N zum linear hochgerechneten Wert aus Spalte 4 angegeben. In **Bild 1.1** sind die Verhältnisse für den Bereich der Mittelspannung grafisch dargestellt.

Man erkennt, dass mit steigender Spannung die prozentualen Werte von N von 70,2 % bei 7,2 kV auf 45,1 % bei 420 kV abnehmen. Das bedeutet, dass die *elektrische Feldstärke* E (in kV/cm) mit wachsender Nennspannung immer größer wird.

Nimmt man ein homogenes Feld an, so erkennt man, dass die Feldstärke bei $1\,000\text{V}$ nur $0,5\text{ kV/cm}$ beträgt, aber ab 24 kV bis 420 kV den doppelten Wert von $0,9 \dots 1,2\text{ kV/cm}$ annimmt. Berücksichtigt man außerdem, dass der Scheitelwert der Wechselspannung das $\sqrt{2}$ -Fache ihres Effektivwertes ist (der Scheitelwert tritt immerhin alle 10 ms, also 100-mal in der Sekunde auf) und dass die höchste Betriebsspannung U_m um 20 % über der Nennspannung liegen kann, so ergibt sich beispielsweise für eine Nennspannung von $U_n = 20\text{ kV}$:

$$\hat{u} = \sqrt{2} \cdot 1,2 \cdot 20\text{ kV} = 34\text{ kV} \text{ und damit } \hat{E} = 1,54\text{ kV/cm.}$$

In den realen Anlagen sind keine homogenen Felder vorhanden. Für Feststoffisolierungen und Kriechstrecken gelten die Feldbedingungen analog. Bei Kriechstrecken

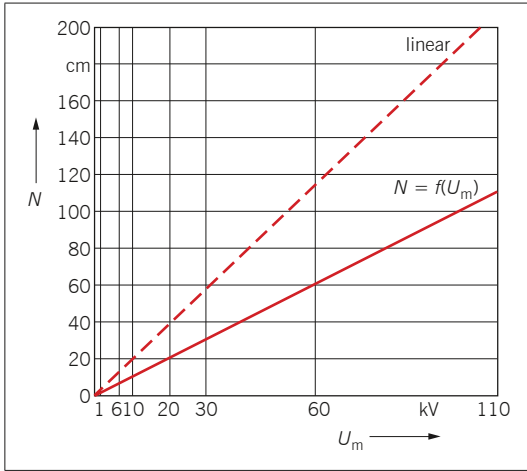


Bild 1.1
 Mindestabstand N
 in Abhängigkeit von U_m

besteht im Gegensatz zu Luftstrecken allerdings die Möglichkeit der Verlängerung durch Rippen oder Barrieren. An der Prinzipdarstellung des elektrischen Feldes in einem Einleiterkabel in **Bild 1.2** [82] soll das verdeutlicht werden.

Die elektrische Feldstärke ist umso höher, je geringer der Abstand der Feldlinien ist. In Bild 1.2 a ist erkennbar, dass an der Leiteroberfläche die Feldstärke etwa 3-mal so hoch ist wie am Kabelschirm. In Bild 1.2 b erkennt man, dass im Bereich des eingedrückten Steines und am Ende des Kabelschirms (obere Bildhälfte) höhere Feldstärken auftreten.

Eine grobe Abschätzung der Feldstärke ist möglich, indem die Potentialdifferenz zwischen zwei Äquipotentiallinien (in Bild 1.2 b $\Delta\phi = U/4$) durch deren Abstand dividiert wird.

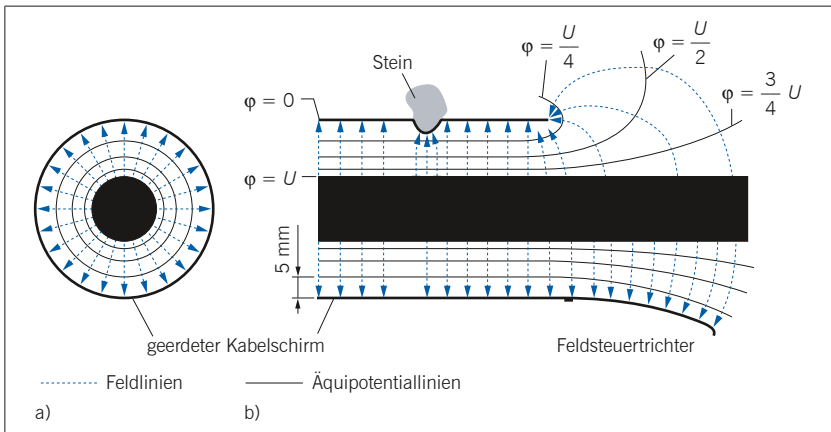


Bild 1.2 Prinzipdarstellung des elektrischen Feldes in einem Einleiterkabel
 a) Querschnitt; b) Längsschnitt

Rechenbeispiel für $U_n = 20 \text{ kV}$

$$\hat{U}_m = \frac{\sqrt{2} \cdot 1,2 \cdot 20 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \approx 20 \text{ kV, also } \Delta\varphi = 5 \text{ kV}$$

Die Abstände wurden dem Bild 1.2 b entnommen. Der Scheitelwert der Feldstärke ist

am Leiter: $\hat{E} \approx \frac{5 \text{ kV}}{1,5 \text{ mm}} = 33 \text{ kV/cm}$

am Kabelschirm: $\hat{E} \approx \frac{5 \text{ kV}}{5 \text{ mm}} = 10 \text{ kV/cm}$

am Stein: $\hat{E} \approx \frac{5 \text{ kV}}{2 \text{ mm}} = 25 \text{ kV/cm}$

am Schirmende: $\hat{E} \approx \frac{5 \text{ kV}}{3 \text{ mm}} = 17 \text{ kV/cm}$

Diese Rechenergebnisse sind keine genauen Werte, da Bild 1.2 nicht exakt konstruiert wurde, sondern nur den prinzipiellen Feldverlauf darstellt. Es sollten auch nur die unterschiedlichen Feldstärkewerte und ihre Größenordnung verdeutlicht werden.

Aus den bisherigen Feststellungen können folgende **Schlussfolgerungen** abgeleitet werden:

- Die Oberfläche der Leiter muss extrem glatt sein. Mehrdrähtige Leiter werden zur Glättung mit Cu- oder Alu-Folie umwickelt, oder die Isolierung auf der Leiterseite wird mit einer leitfähigen Grafitsschicht überzogen.
- In der Isolierung dürfen keine Luft- oder Gasblasen und keine Verunreinigungen enthalten sein.
- Da der Schirm meist aus einzelnen Flachdrähten besteht, wird zur Glättung die Isolierung auf der Schirmseite mit einer leitfähigen Schicht, z. B. aus Grafit, überzogen.
- Am Kabelende im Endverschluss ist am Schirm eine Feldsteuerung erforderlich, z. B. durch einen Metalltrichter, wie in Bild 1.2 b in der unteren Hälfte dargestellt.
- Bei Erdverlegung dürfen keine Steine unter, neben oder auf dem Kabel liegen. Nach TGL 200-0612/02:1979-01 [40] waren Kabel in einer Bettungsschicht mit einer Korngröße $< 2 \text{ mm}$ zu verlegen. Diese Bettungsschicht sollte oberhalb und unterhalb des Kabels eine Schichtdicke von 10 cm aufweisen. Leider kann man auf Baustellen sehr oft feststellen, dass Steine im Kabelgraben liegen. Durch das Gewicht der verdichteten Erde drücken sie sich im Laufe der Zeit in das Kabel ein und bewirken dort eine Feldstörung. Bei hoher Belastung und damit hoher Erwärmung des Kabels – bei Nennbelastung erreicht die Leitertemperatur $60 \dots 70^\circ \text{C}$ – wird der Vorgang noch beschleunigt. Ein Stein ist also fast eine Garantie für eine

spätere Kabelstörung. Die früher fast ausschließlich verwendeten Papier-Masse-Kabel waren wegen ihres Aufbaus (Papierbandage, Bleimantel, Teerpapierbandage, Stahlbandbewehrung, Juteumspinnung) wesentlich unempfindlicher gegen äußere Einwirkungen als die heute verwendeten Kunststoffkabel mit einem äußeren Mantel von 2...3 mm Dicke.

Bei den im normalen Netzbetrieb auftretenden Überspannungen (Schalt- bzw. Blitzüberspannungen) treten noch höhere Feldstärken – wenn auch nur kurzzeitig – auf. Gemäß Tafel 5.1 ist bei 20 kV die Kurzzeitwechselspannung immerhin mit 50 kV und die Blitzstoßspannung mit 95 kV bis 145 kV festgelegt.

Durch Verschmutzung und Betauung werden die Isolationsstrecken noch zusätzlich geschwächt.

In Hochspannungsanlagen spielt die elektrische Feldstärke also eine entscheidende Rolle. Schon geringe Unebenheiten in der Leiteroberfläche sowie die Form der Leiter, der geerdeten Teile und der Isolierteile können zu enormen Erhöhungen der Feldstärke führen. An besonders kritischen Stellen sind Maßnahmen zur Feldsteuerung notwendig (z. B. an Kabelendverschlüssen). Die Beseitigung und Vermeidung von scharfen Ecken und Kanten sowie von Spitzen ist daher eine wichtige Aufgabe für Konstrukteure und Errichter. [83]

Besonders gefährdet sind Stellen, an denen die Feststoffisolierung an Luftisolierung angrenzt (z. B. Befestigung von Stromschiene oder Kabelendverschlüsse). In sauberer und trockener Luft setzt bei 21,4 kV/cm Glimmentladung ein. [84] Wenn Überspannungen auftreten, kann bereits eine Vorschädigung der Feststoffisolierung erfolgen. Beim Zersetzen von Isolierstoffen wird in der Regel Kohlenstoff frei, also ein elektrisch leitfähiger Stoff. Damit werden die Feldstärken an der betroffenen Stelle weiter erhöht, da der Isolationsschaden eine Spitze darstellt und das Potential des Leiters annimmt. Dadurch erfolgt eine weitere Zersetzung der Isolierung durch Glimm-, Büschel- und Teilentladungen, die letztlich zum Durchbruch der Isolierung bei normaler Betriebsspannung und zum Kurzschluss oder Erdschluss führen. An zwei Beispielen soll das verdeutlicht werden.

Beispiel 1.1

In einer metallgekapselten fabrikfertigen 30-kV-Schaltanlage waren die Einfahrkontakte für den Leistungsschalter auf einer Isolierstoffplatte im Abstand von etwa 35 cm montiert. Zur mechanischen Versteifung waren unter den Kontakten quadratische Isolierstoffplatten mit etwa 15 cm Kantenlänge aus dem gleichen Material zusätzlich zwischen Kontakt und Isolierstoffplatte angeordnet. Von den Ecken der zusätzlichen Isolierstoffplatten ausgehend, erfolgte die Schädigung der Isolierung und erst nach mehreren Jahren der Durchschlag und die Zerstörung der Schaltanlage. Bei Verwendung von kreisrunden Verstärkungsplatten hätte das verhindert werden können. Man sieht – auch Profis machen Fehler.

Beispiel 1.2

An einem 30-kV-Freilufttransformator war zum Anschluss der vier Kabel je Leiter ein Hilfsschienensystem mit Cu-Schienen und Isolierstoffplatten aus Schichtpressstoff in einem abgedichteten Gehäuse montiert worden. Be- und Entlüftungsöffnungen waren nicht vorhanden. Der Transformator war – außer bei der Inbetriebnahme – noch nicht in Betrieb gewesen, auch über den Winter hinweg nicht. Die zwangsläufig auftretende Befeuchtung durch Kondenswasser bei Taupunktunterschreitungen führte zur Schwächung der Isolationsfähigkeit der Isolierstoffplatten. Schon nach kurzer Betriebszeit von wenigen Stunden erfolgte – ausgehend von den Ecken der Cu-Schienen – die Zerstörung der Isolierung durch Teilentladungen mit anschließendem Durchschlag und Kurzschluss. Bei Verwendung von Freiluftstützern für das Hilfsschienensystem hätte das verhindert werden können. Der Teilentladungskanal ist in **Bild 1.3** gut zu erkennen.



Bild 1.3 Teilentladungskanal in einer Isolierstoffplatte mit anschließendem Kurzschluss

1.3 Welche Spannungsebenen gab es, und welche sind heute üblich?

In **Tafel 1.2** sind die wichtigsten in Deutschland üblichen Nennspannungen und ihre Verwendung aufgelistet.

Spannung kV	Verwendung	Bemerkungen
3	Versorgung von NS-Stadtnetzen	Reste bis 1990
6 ¹⁾	Industriernetze für Großantriebe, Versorgung von NS-Stadtnetzen	bis etwa 1980
10 ¹⁾	Versorgung von NS-Stadtnetzen	
15 ²⁾	Versorgung von ausgedehnten Landnetzen	Teilweise noch vorhanden
20 ¹⁾	Versorgung von ausgedehnten Stadt- und Landnetzen	
30 ¹⁾	Versorgung der 10-kV-Netze in Großstädten	auch Landnetze
50 60	Versorgung ganzer Regionen mit 10-kV- bzw. 15-kV-Netzen	bis etwa 1970
110 ¹⁾	Verteilungsspannung für ganze Bundesländer bzw. Energieversorgungsunternehmen	
220 ¹⁾	überregionale Verbundnetze, Einspeisungen aus Großkraftwerken	
380 ¹⁾	Verbundnetze für ganze Staaten, Verbundnetz in Europa, Einspeisung aus Großkraftwerken	
<p>1) heute noch gebräuchlich und weit verbreitet</p> <p>2) Die Umstellung vorhandener 15-kV-Netze (Reihe 20) auf 20kV führte bei hohem Freileitungsanteil oftmals zu erheblichen Störungen durch Erdschlüsse und Folgefehler.</p>		

Tafel 1.2 Anwendung der Spannungsebenen

1.4 Wie verlief die historische Entwicklung, und was bringt die Zukunft?

Die historische Entwicklung der Elektroenergieversorgung war am Anfang vom Konkurrenzkampf geprägt. Herausragendes Beispiel ist der sog. Stromkrieg zwischen Edison (Gleichstrom) und Westinghouse/Tesla (Wechselstrom). Wegen der Erfindung des Wechselstrommotors und des Mehrphasenwechselstromsystems durch Tesla hat sich die Wechselstromtechnik letzten Endes durchgesetzt – obwohl Gleichstromnetze noch bis etwa 1965 betrieben wurden. Von den kleinen Energieunternehmen wurden bewusst andere Spannung, Frequenz oder Stromart als beim Nachbarunternehmen gewählt. Diese Entwicklung verlief in Deutschland, Europa und der übrigen Welt ähnlich. Die vielen verschiedenen Nennspannungen in der Europäischen Norm VDE 0101-1, Tabellen 1 und 2, [4] sind noch ein Überbleibsel davon. Schon nach wenigen Jahren wurde jedoch klar, dass damit keine stabile Energieversorgung möglich war. Bereits 1898 wurden deshalb die ersten Hochspannungsvorschriften erarbeitet, die erste VDE 0101 erschien 1930. Sicher auch unter dem Druck der Schaltgerätehersteller begann eine Vereinheitlichung der Spannungsebenen, die dann zur Einführung der Reihenspannungen führte (Reihe 10, Reihe 20, Reihe 30, Reihe 110 usw.). Die Herstellung von Schaltgeräten, Isolatoren, Kabeln usw. konnte nun in größeren Stückzahlen erfolgen, wodurch die Geräte billiger wurden.

Im Folgenden sind einige wesentliche Ereignisse der Elektroenergieversorgung aufgeführt [85]:

- 1891: Erste Wechselstromübertragung über 175 km mit 15 bis 25 kV von Lauffen am Neckar nach Frankfurt am Main.
- 1912: Erste 100-kV-Drehstromübertragung Europas von Riesa nach Lauchhammer. Daraus entstand in den folgenden Jahren die sächsische Landessammelschiene mit 110 kV.
- 1927: Ausbau des 220-kV-Netzes in Deutschland. Bis 1936 war die sog. Reichsammelschiene – eine 220-kV-Verbindung vom Ruhrgebiet über Niedersachsen, Sachsen-Anhalt (Leuna), Sachsen bis nach Bayern – fertiggestellt. Teile davon sind noch heute in Betrieb.
- 1958: Erste 380-kV-Leitung in der Bundesrepublik Deutschland von Rommerskirchen nach Hoheneck. In der DDR wurde die erste 380-kV-Leitung von Ragow nach Lauchstädt im Jahr 1962 in Betrieb genommen.
- 1958: Erste 500-kV-Übertragung von Kuibyschew nach Moskau.
- 1966: Erste 735-kV-Leitung in Kanada.

Die Erhöhung der Betriebsspannung über 380 kV führte zu einer erheblichen Steigerung der Verluste (Koronaverluste, Isolationsverluste). Bereits bei 380 kV betragen diese Verluste etwa 1 W pro Isolator. Außerdem führen die großen Induktivitäten und Kapazitäten der langen Leitungen zu Stabilitätsproblemen beim Betrieb und bei der Synchronisation. Es mussten riesige Reihen-Kondensatoranlagen bzw. Phasenschieberanlagen errichtet werden. Diese Entwicklung zu immer gigantischeren Spannungen wurde deshalb nicht weiter betrieben.

Eine bessere Lösung für die Energieübertragung über große Entfernungen ist die *Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung* (HGÜ) – eine späte Anerkennung Edisons. Als Verluste treten nur die ohmschen Verluste $I^2 \cdot R$ auf. Die Isolations- und Koronaverluste sind wesentlich geringer, da im Gleichstromfeld das Pulsieren der Ladungsträger wegfällt. Die Induktivitäten und Kapazitäten haben (außer beim Ein- und Ausschalten) keinen Einfluss auf die Übertragung, d. h. $\cos\phi = 1$. Außerdem werden Kurzschlüsse durch die HGÜ nicht übertragen, und es können Netze mit unterschiedlichen Frequenzen und Spannungen verbunden werden. Die ersten HGÜ wurden bereits 1954 (Schweden–Gotland) und 1961 (England–Frankreich) errichtet. Weltweit sind heute zahlreiche HGÜs als Kurzverbindungen (meistens Seekabel) oder als Fernleitungen in Betrieb. [85]

Zukünftig werden *dezentrale Energieerzeugungsanlagen*, z. B. Blockheizkraftwerke oder alternative Energiequellen, wie Windkraftanlagen oder Photovoltaikanlagen, eine immer größere Rolle spielen. Sie haben allerdings den Nachteil, dass ihre Energie nicht zuverlässig zur Verfügung steht, z. B. in der Nacht, bei Windstille oder Sturm bzw. im Sommer, wenn keine Wärme gebraucht wird. Schon heute treten Stabilitätsprobleme bei der Anhäufung derartiger Anlagen in regionalen Netzen auf. Intelligente Lösungen sind hier gefragt.