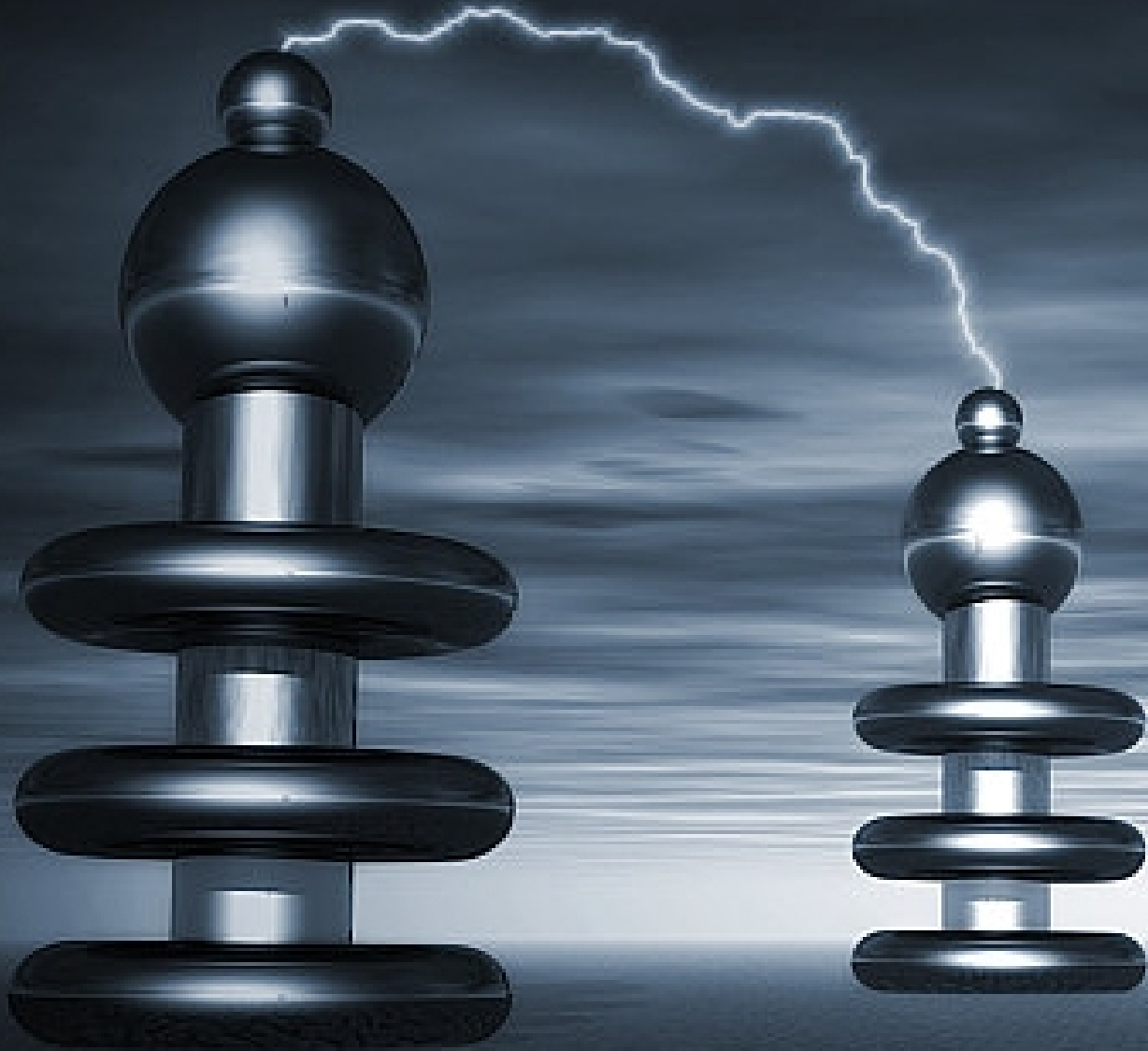


# Grundlagen der Hochspannungs- und Prüftechnik (Hochspannungstechnik 1)



Sommersemester 2020  
Prof. Dr.-Ing. Marc Klemm

# Inhaltsverzeichnis Intro-Teil

<b>1 Allgemeines.....</b>	<b>2</b>
1.1 Definition der Hochspannungstechnik.....	2
1.2 Geschichte der Hochspannungstechnik.....	4
1.3 Aufgaben der Hochspannungstechnik.....	5
<b>2 Das Elektrische Feld.....</b>	<b>6</b>
2.1 Übersicht, Arten elektrischer Felder.....	6

# 1 Allgemeines

## **1.1 Definition der Hochspannungstechnik**

Die Hochspannungstechnik befaßt sich mit denjenigen Gebieten der Elektrotechnik, bei denen

Hohe Spannungen **und / oder**  
hohe elektrische Feldstärken auftreten.

Dies ist unabhängig von der Größe der Energie- und Leistungswerte. (Oft wird dieser Bereich auch Isolationstechnik genannt.)

### Definition über die Spannung:

Eine recht genaue Grenzziehung findet sich in einschlägigen Normen. So beispielsweise in DIN VDE 0100 / 5.73 § 17:

Nennspannungen über 1 kV werden im folgenden Hochspannung kurz HS, unter 1 kV mit Niederspannung NS bezeichnet.

Für Nennspannungen über 1 kV gelten meist zusätzliche VDE-Vorschriften.

In der Energieverteilung unterscheidet man hingegen 3 Bereiche:

Mittelspannung:	bis 100 kV
Hochspannung:	bis 245 kV
Höchstspannung:	bis 380 kV (in anderen Ländern auch >380kV)

**ACHTUNG:** Bei Niederspannungsnetzen wird im allgemeinen der Effektivwert zwischen Phase und Neutralleiter (Ph-N) d.h. Phase und Erdpotential angegeben. Bsp.: 230V-Netz.

Bei der Energieübertragung/-verteilung wird hingegen der Effektivwert der verketteten Spannung (Außenleiterspannung) angegeben. Der Spitzenwert der verketteten Spannung ist dann um  $\sqrt{2}$  größer (da sin-förmige Spannung). Der Spitzenwert zwischen Außenleiter und Erde berechnet sich z.B. bei einer 380 kV-Freileitung :

$$\hat{U}_{AL\ Erde} = \frac{380\text{ kV}}{\sqrt{3}} \sqrt{2} = \frac{\hat{U}_{AL\ AL}}{\sqrt{3}} = 310\text{ kV}$$

Einige übliche Wechselspannungen in der Energietechnik:

Erzeugung:	6 kV, 10,5 kV, 15,75 kV, 18 kV, 21 kV; 27 kV
Übertragung/Verteilung:	6 kV; 10 kV; 20 kV; 110 kV 220 kV; 380 kV

## Definition über die Feldstärke

Man definiert die HS-Technik dann über die Feldstärke, wenn die **Dimensionierung** eines Bauteils **wesentlich** durch die **elektrische Festigkeit** des Isolierstoffs bestimmt wird.

Bsp. dafür: Kondensator; SF6-Isoliertechnik; Großgeneratoren

Bsp. dagegen: Schuko-Stecker

Einige Anhaltspunkte für  $E_{\max \text{ zul}}$ :

Luft: ca.  $30 \text{ kV/cm} = 3 \text{ kV/mm}$  (Durchschlagfeldstärke in Luft)

(Freilufttechnik:  $100 \text{ kV/m} = 1 \text{ kV/cm} = 0,1 \text{ kV/mm} \Rightarrow$  Sicherheitsfaktor: 30)

Isolieröl:  $200 \text{ kV/cm}$

Kunststoffe:  $100 \dots 1000 \text{ kV/cm}$

Beispiele:

Bei einer Gewitterwolke:  $U_{\text{Wolke-Erde}}: 10 \dots 100 \text{ MV}$

mit einer durchschnittl. Wolkenhöhe von  $h = 1000 \text{ m} \Rightarrow E = 100 \text{ kV/m} = 1 \text{ kV/cm}$

Natürliche elektrische Feldstärke (Erde Heaviside-Schicht): einige  $100 \text{ V/m}$

Technische Anlagen (Geräte) lassen sich nun in folgendes Schema einordnen:

	<b>Hohe Spannung</b>	<b>Hohe Feldstärke E</b>
<b>Hohe Energie / Leistung</b>	Blitz (P groß), Sendeanlagen, (Freileitungen)	Kondensatoren, zunehmend Mikroelektronik
		Energieübertragung
<b>niedrige Energie / Leistung</b>	Elektrostatik, Medizintechnik, Van de Graaf Generatoren etc.	Kondensatoren
		Autozündung

## 1.2 Geschichte der Hochspannungstechnik

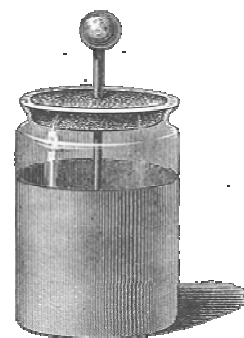
Genau betrachtet existiert die Hochspannungstechnik in Form von Blitzen schon seit Millionen von Jahren. Man geht heute davon aus, daß Blitze zusammen mit der Uratmosphäre der Erde zur Entstehung des Lebens wesentlich beigetragen haben.

Elektrostatische Aufladung entdeckte man schon im Altertum (griech. *elektron* =Bernstein) beim Reiben eines Bernsteins mit einem Seidentuch (Thales von Milet). Danach gerieten diese Erkenntnisse lange Zeit in Vergessenheit.

um 1600: Reibungselektrizität

1672: Otto von Guericke: Drehen und reiben einer Schwefelkugel (Elektrifiziermaschine)

1744/45: Ewald J.G. von Kleist / Pieter van Musschenbroek entwickeln unabhängig voneinander den Kondensator (Kleistsche bzw. Leydener Flasche). Damals üblich erreichbare Kapazitäten: ca. 1-20nF



1752: B. Franklin: Mittels Papierdrachen und Gewitterwolke lud er eine Leydener Flasche auf und zog mit einem Schlüssel Funken

1831: M. Faraday: Entdeckte die Induktion

1882: Übertragung Miesbach nach München (Oskar von Miller): Generator (2 kW) via **2 kV**-Trasse trieb einen Wasserfall ( $\eta = 22\%$ )



**1891:** O. von Miller: Drehstromübertragung Lauffen (Neckar) -> Frankfurt (Main): 240 kW mit **15 kV** 175km übertragen ( $\eta = 75\%$ ); AEG&MFO

1910/12: 100 kV

1929: 220 kV

1936: 287 kV (Boulder Damm, USA)

1952: 380 kV Schweden (1958 BRD)

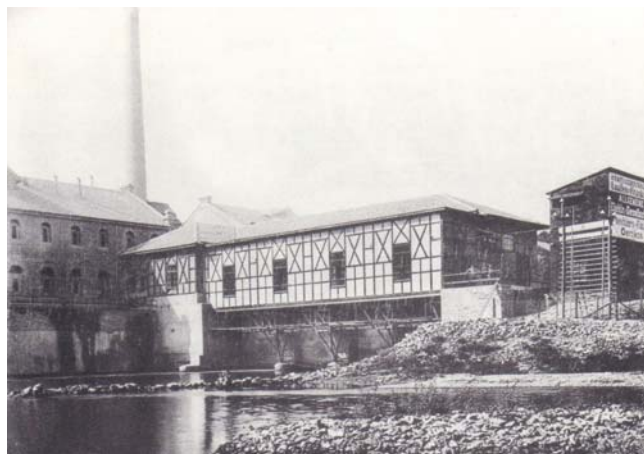
1959: 500 kV UdSSR (heute Kasachstan-Rußland)

1965: 735 kV Kanada

1966: 765 kV USA

1988/90: 1150 kV GUS,

2005: Beginn 1250 kV-Technik (ABB) für China (Dreischluchtendamm)

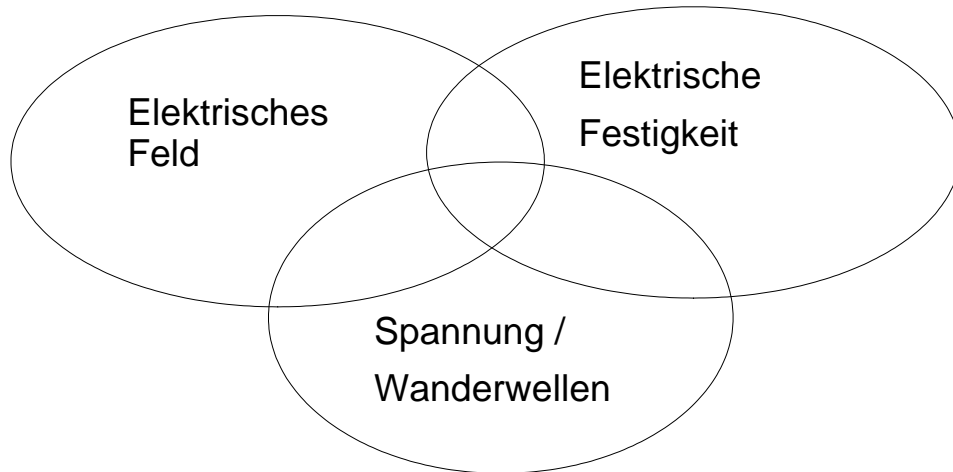


### 1.3 Aufgaben der Hochspannungstechnik

Die Aufgabe der Hochspannungstechnik lässt sich allgemein formulieren als:

Herstellung einer **ausreichenden, wirtschaftlichen Isolation** unter **Berücksichtigung von Sicherheit und Umweltverträglichkeit**.

Bei der Dimensionierung einer elektrischen Isolation (Konstruktionslehre) müssen folgende Aspekte d.h. Gebiete der Hochspannungstechnik berücksichtigt werden:



Weitere Gebiete der Hochspannungstechnik stellen die Prüftechnik und die Hochspannungsmeßtechnik dar.

## 2 Das Elektrische Feld

### **2.1 Übersicht, Arten elektrischer Felder**

Elektrische Felder lassen sich nach ihrer Zeitabhängigkeit unterscheiden.

#### **a) Zeitlich invariante Felder**

##### **elektrostatische Felder**

Mit oder ohne Raumladung; das Feld entsteht durch ungleichmäßige Ladungsverteilung.

Zur Beschreibung des Feldes dient die Laplace- bzw. Poisson-Differentialgleichung für Feldbereiche ohne bzw. mit Raumladung (dies gilt bei konstanter

Permittivität, d.h.  $\epsilon \neq f(\text{Ort})$  ).

Es gilt:

$$\text{div} \left( \text{grad} \right) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \quad = \quad - \quad \text{Raumladungsdichte}$$

|----- Laplace -----| |----- Poisson -----|

##### **stationäre elektrische Strömungsfelder**

(Feld entsteht aus Ladungsträgerbewegung)

Es existieren auch Mischfelder aus den beiden oben genannten Feldern, wobei

das Verhältnis aus  $\frac{1}{\sigma} = \frac{1}{\epsilon \cdot \omega}$  und Permittivität  $\epsilon$  maßgeblich ist.

#### **b) langsam veränderliche Felder (quasistationär)**

Hierbei handelt es sich um Felder, deren Veränderungsgeschwindigkeit klein gegenüber den Geschwindigkeiten der durch sie ausgelösten Effekte ist. Dies trifft z.B. für nahezu alle Betrachtungen im Bereich bis einige hundert Herz auf.

#### **c) schnellveränderliche Felder**

Hierbei handelt es sich um Felder, die sich so schnell ändern, daß der bzw. die durch sie verursachten Effekte (z.B. Polarisation) sich nicht oder wenigstens nicht vollständig ausbilden können. Dies trifft z.B. für elektromagnetische Wellen ( $f > \text{einige kHz}$ ) und für Stoßspannungen zu.

Bei Frequenzen von 50 Hz bzw. 60 Hz und den am häufigsten vorkommenden Werten von  $\kappa$  bzw.  $\epsilon$  wird im allgemeinen eine **elektrostatische Feldbetrachtung** durchgeführt.

Es bietet sich an, die Korrespondenz zwischen elektrostatischem Feld und stationärem elektrischen Strömungsfeld zu untersuchen:

<b>Elektrostatistisches Feld</b>	<b>Elektrisches Strömungsfeld (volumenleitfähig)</b>
Ladung Q elektr. Fluß $\Psi$	Stromstärke I
elektr. Flußdichte D	Stromdichte S (oder auch J genannt)
elektr. Feldstärke E	elektr. Feldstärke E
Permittivität $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$	elektrische Leitfähigkeit $\kappa$ (Konduktivität)
Grundgleichung: $D = \epsilon E$	Grundgleichung: $S = \kappa E$
Brechungsindex $= \frac{r^2}{r_1}$	Brechungsindex: $= \frac{2}{1}$

Bedeutung dieser Korrespondenz in der praktischen Anwendung:

Ermittlung elektrostatischer Felder aus stationären Strömungsfeldern:

- sog. halbleitendes Papier (2D-Felder oder Schnittbilder)
- elektrolytischer Trog (3D-Felder)

Ermittlung stationärer Strömungsfelder aus elektrostatischen Feldern

Für diese Korrespondenz und das Folgende werden lineare Materialeigenschaften angenommen.

**Achtung:**

Problematisch sind für diese Überlegungen daher Oberflächenleitfähigkeiten (z.B. nasser Isolator) und Durchschläge (nach Vorentladung) als auch Koronaentladungen (Glimmen).