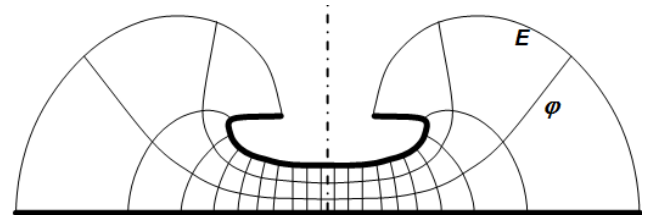
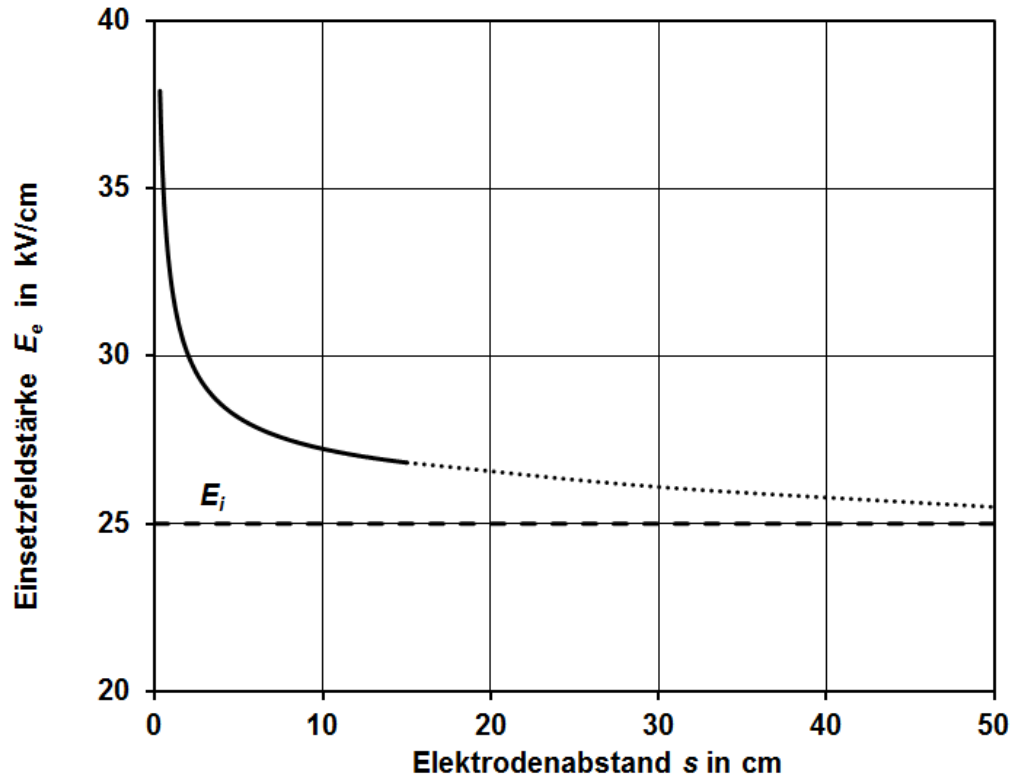


**ROGOWSKI-Profil**

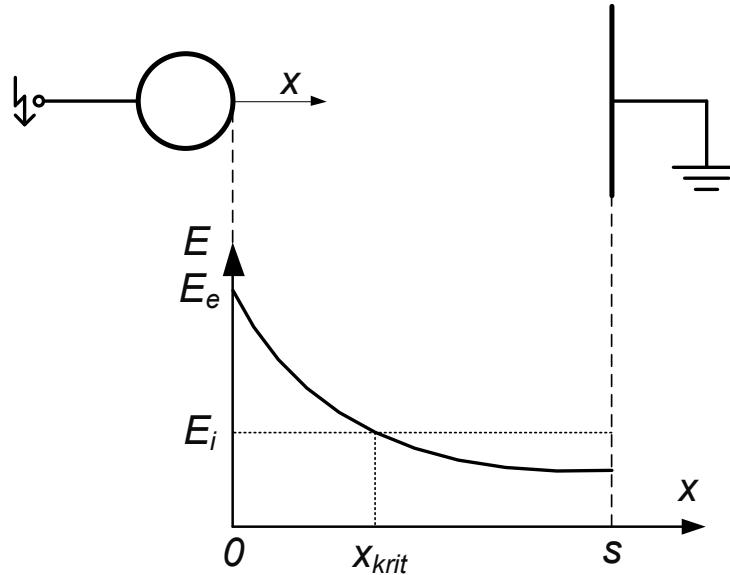


**BORDA-Profil**

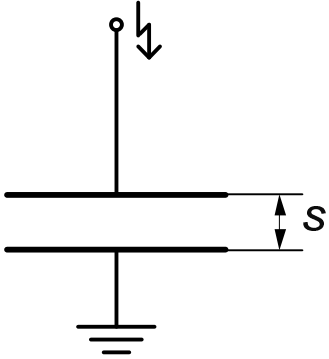
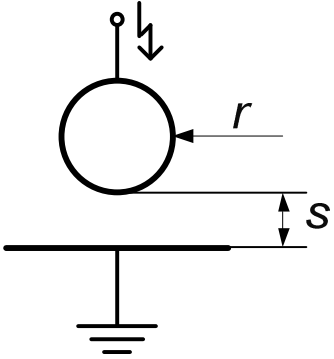
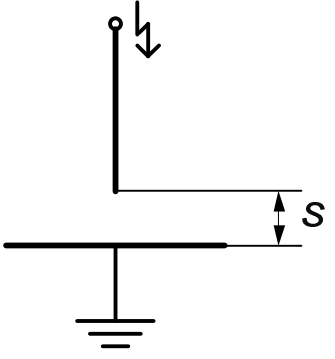
**Praktische Nachbildung des homogenen Feldes**



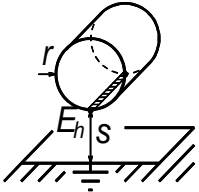
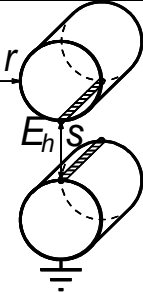
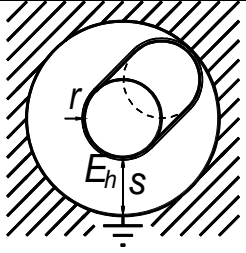
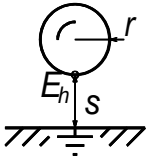
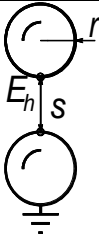
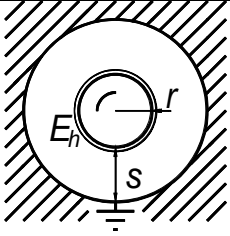
Einsetzfildstärke  $E_e$  für das homogene Feld und innere elektrische Festigkeit  $E_i$  für atmosphärische Luft



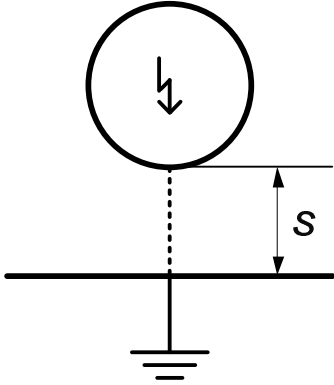
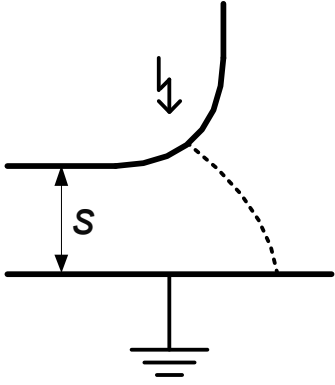
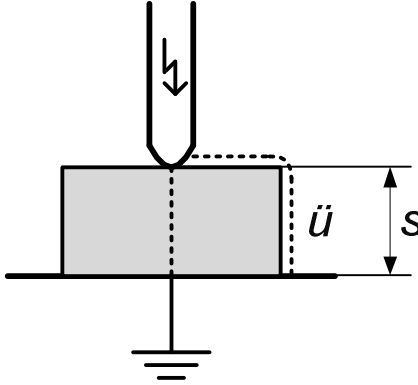
**Einsetzungsfeldstärke  $E_e$ , innere elektrische Festigkeit  $E_i$  und kritische Wegstrecke  $x_{krit}$  am Beispiel einer Kugel-Platte-Anordnung**

Homogenes Feld	Inhomogenes Feld	
	schwach inhomogen	stark inhomogenes
		
Platte-Platte	Kugel-Platte	Spitze-Platte
Parameter: $s$	Parameter: $s; r$	Parameter: $s$
Entladungszündung führt unmittelbar zum Durchschlag		Entladungszündung führt nicht zum Durchschlag
$U_e = U_d$		$U_e < U_d$

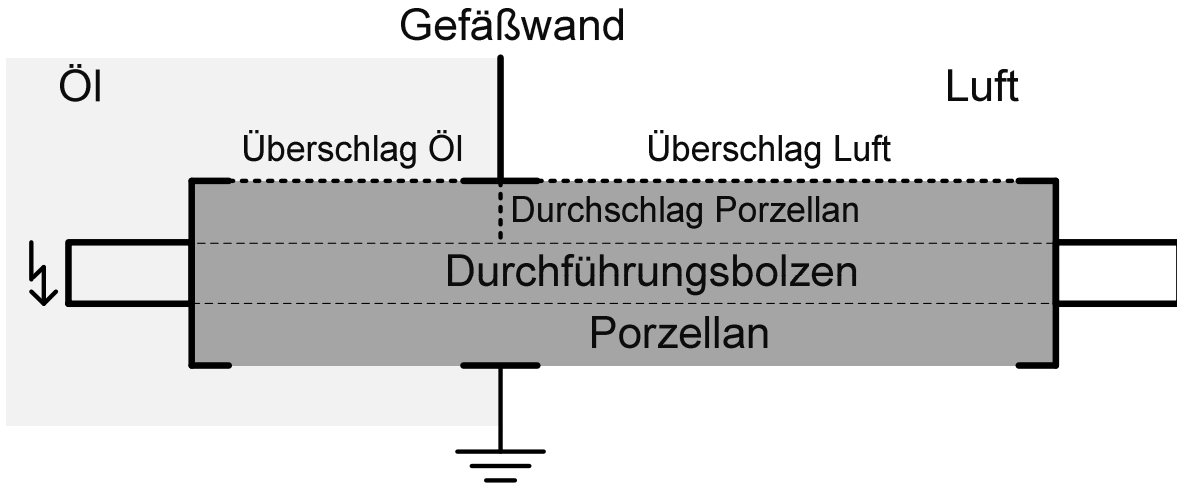
**Homogene und inhomogene Felder**

		
Zylinder-Platte	Zylinder-Zylinder	Zylinder in Zylinder
Parallelebene Elektrodenanordnungen		
		
Kugel-Platte	Kugel-Kugel	Kugel in Kugel
Rotationssymmetrische Elektrodenanordnungen		

### Elektrodenanordnungen

 <p>A diagram showing a lightning bolt striking a horizontal ground plane. A vertical dashed line connects the point of impact on the ground to a circle above it, representing the lightning channel. A double-headed vertical arrow labeled 's' indicates the height of the lightning channel above the ground. The ground is represented by a horizontal line with a standard ground symbol below it.</p>	 <p>A diagram showing a lightning bolt striking a horizontal ground plane. A curved dashed line represents the lightning path starting from a point above the ground and curving towards the strike point. A double-headed vertical arrow labeled 's' indicates the height of the starting point above the ground. The ground is represented by a horizontal line with a standard ground symbol below it.</p>	 <p>A diagram showing a lightning bolt striking a shaded rectangular object on a horizontal ground plane. A dashed line shows the lightning path starting from a point above the object, striking the object, and then continuing horizontally to the ground. A double-headed vertical arrow labeled 's' indicates the height of the starting point above the ground. A double-headed vertical arrow labeled 'ü' indicates the width of the shaded object. The ground is represented by a horizontal line with a standard ground symbol below it.</p>
<p>Durchschlag entlang des kürzesten Abstandes</p>	<p>Durchschlag entlang einer Feldlinie</p>	<p>Überschlag entlang des Überschlagweges</p>

## Durchschlag und Überschlag

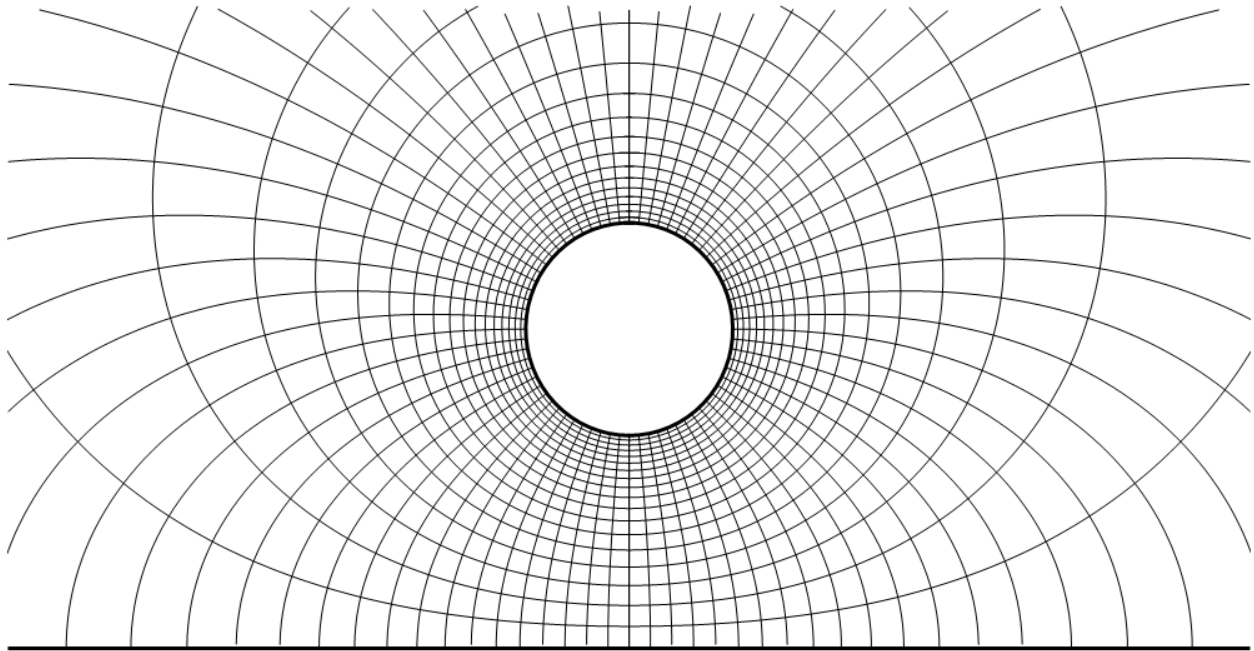


$$U_{d; \text{ü Gas}} < U_{d; \text{ü Flüssigkeit}} < U_{d \text{ Feststoff}}$$

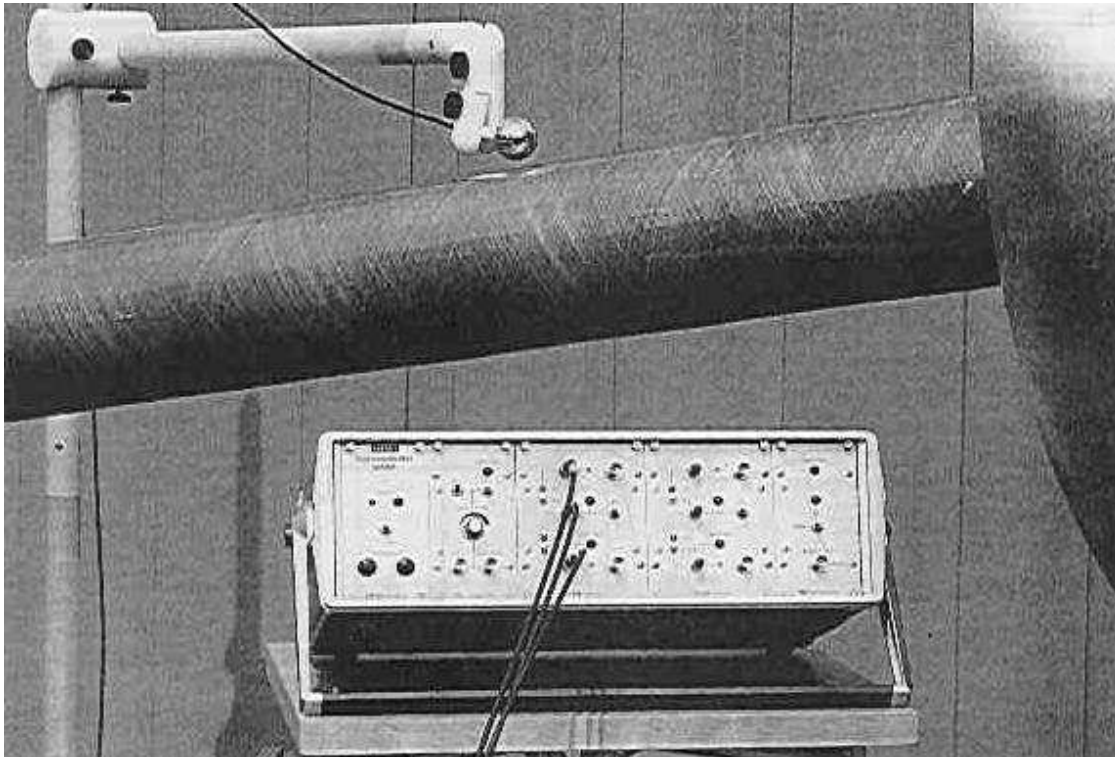
### Porzellandurchführung eines ölgefüllten Transformators

Differentialform	Integralform
<b>Hauptgleichungen (Feldgleichungen)</b>	
$\vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt} = \text{rot } \vec{H}$ entfällt	$\int_{\text{Hülle}} \left( \vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt} \right) dA = \oint \vec{H} ds$ entfällt
Durchflutungsgesetz	
$-\frac{d\vec{B}}{dt} = \text{rot } \vec{E} = 0$	$-\frac{d}{dt} \int_{\text{Hülle}} \vec{B} dA = \oint \vec{E} ds = 0; \int_{s1}^{s2} \vec{E} ds = U$
Induktionsgesetz	
<b>Nebengleichungen (Kontinuitätsgleichungen)</b>	
$\text{div } \vec{D} = \rho$	$\int_{\text{Hülle}} \vec{D} dA = \int_{\text{Volumen}} \rho dV = Q (=0)$
$\text{div } \vec{B} = 0$ entfällt	$\int_{\text{Hülle}} \vec{B} dA = 0$ entfällt
<b>Stoffgleichungen</b>	
$\vec{J} = \kappa \cdot \vec{E}$ entfällt	
$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E}$	
$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$ entfällt	

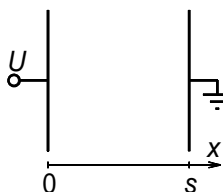
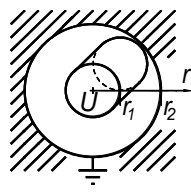
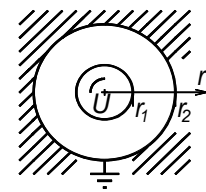
### MAXWELL-Gleichungen



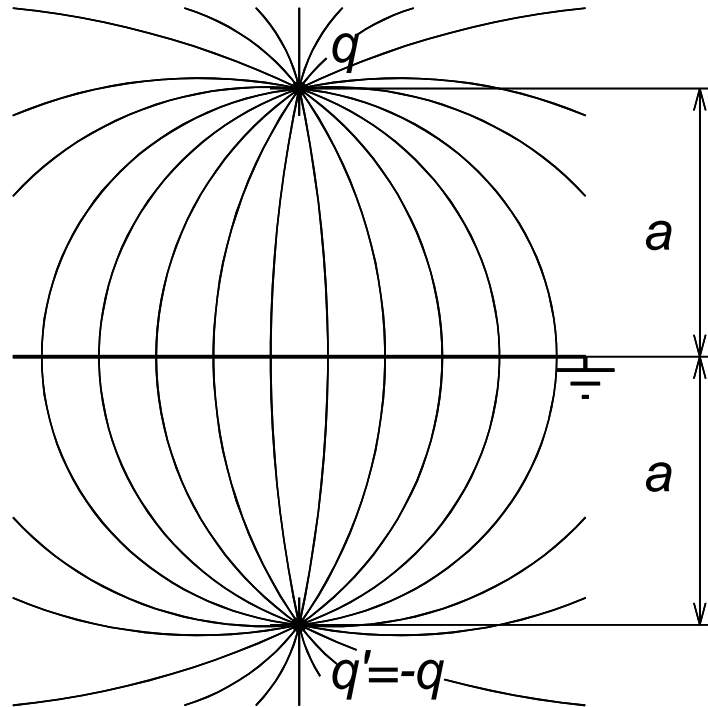
**Feldlinien und Äquipotentiallinien einer Kugel-Platte-Anordnung**



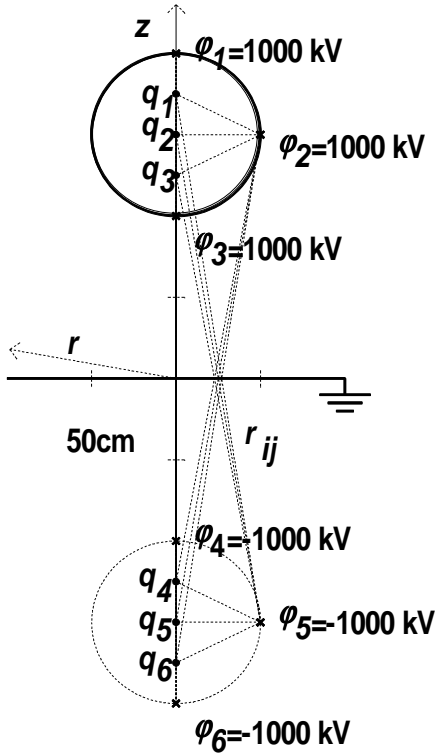
**Feldmessungen an Objekten - E-Feldsonde**

parallele Platten	koaxiale Zylinder	konzentrische Kugeln
		
$\varphi(x) = U \left( 1 - \frac{x}{s} \right)$	$\varphi(r) = \frac{U}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot \ln \frac{r}{r_1}$	$\varphi(r) = \frac{U r_1}{r} \cdot \left( \frac{r_2 - r}{r_2 - r_1} \right)$
$E(x) = \frac{U}{s}$	$E(r) = \frac{U}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot \frac{1}{r}$	$E(r) = \frac{U r_1 r_2}{(r_2 - r_1)} \cdot \frac{1}{r^2}$
$C = \frac{\epsilon A}{s}$ A - Plattenfläche	$C = \frac{2\pi\epsilon \ell}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$ ℓ - Zylinderlänge	$C = \frac{4\pi\epsilon r_1 r_2}{(r_2 - r_1)}$

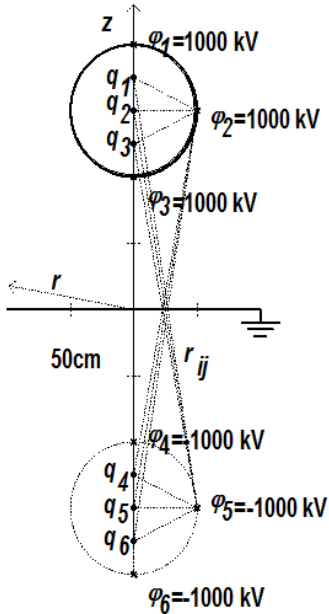
**Potentialfunktionen  $\varphi(r)$  und Feldstärkefunktionen  $E(r)$   
und Kapazität  $C$  für Grundanordnungen**



**Spiegelungsprinzip**

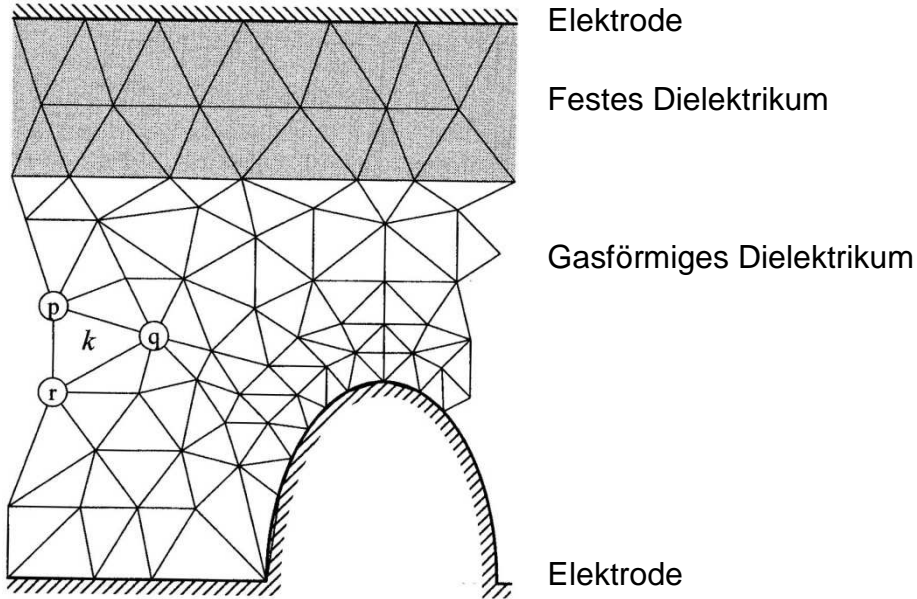


Überlagerung von 3 Punktladungen und ihren Spiegelladungen

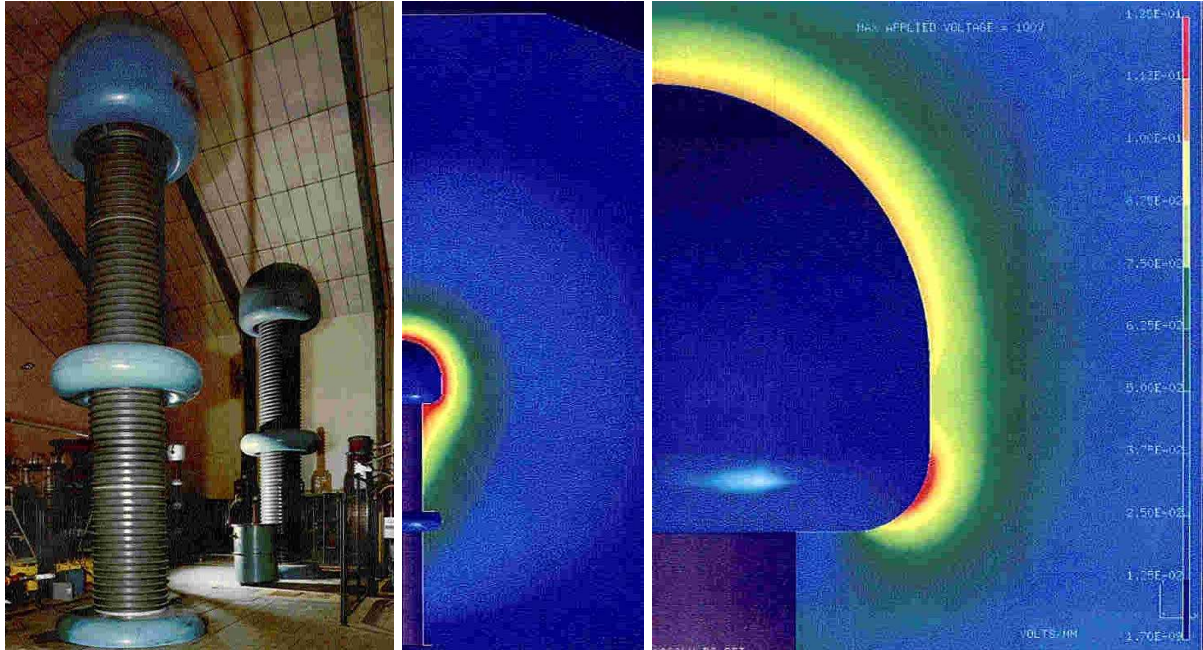


$$\begin{aligned}
 \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{11}} q_1 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{12}} q_2 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{13}} q_3 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{14}} q_4 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{15}} q_5 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{16}} q_6 &= 1000\text{kV} \\
 \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{21}} q_1 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{22}} q_2 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{23}} q_3 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{24}} q_4 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{25}} q_5 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{26}} q_6 &= 1000\text{kV} \\
 \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{31}} q_1 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{32}} q_2 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{33}} q_3 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{34}} q_4 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{35}} q_5 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{36}} q_6 &= 1000\text{kV} \\
 \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{41}} q_1 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{42}} q_2 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{43}} q_3 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{44}} q_4 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{45}} q_5 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{46}} q_6 &= -1000\text{kV} \\
 \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{51}} q_1 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{52}} q_2 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{53}} q_3 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{54}} q_4 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{55}} q_5 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{56}} q_6 &= -1000\text{kV} \\
 \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{61}} q_1 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{62}} q_2 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{63}} q_3 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{64}} q_4 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{65}} q_5 + \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_{66}} q_6 &= -1000\text{kV}
 \end{aligned}$$

### Gleichungssystem des Ersatzladungsverfahrens



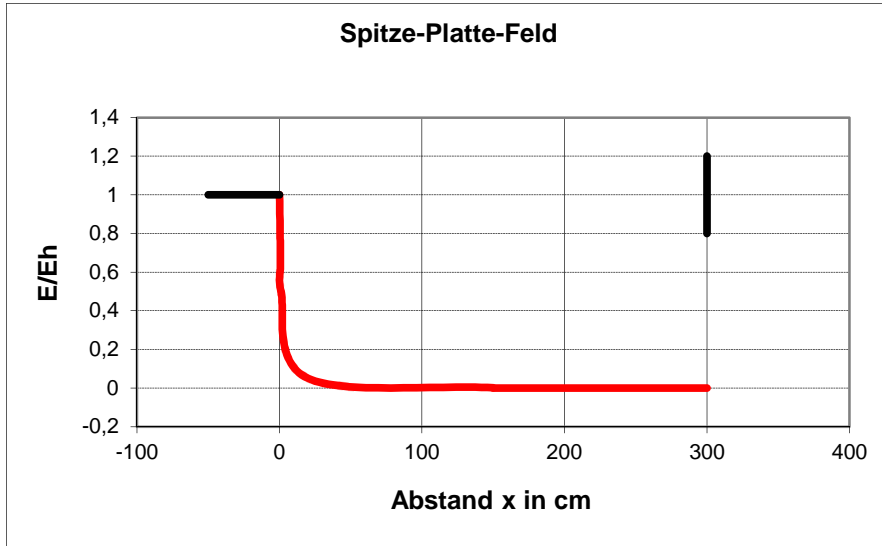
**Finite Elemente Methode - Nachbildung einer Elektrodenanordnung mit zwei Isolierstoffen**



**Finite Elemente Methode - Nachbildung einer Gleichspannungskaskade 1 000 kV**

	homogenes Feld	schwach inhom. Feld	stark inhomog. Feld
Anordnung			
Potentialverteilung			
Feldstärke-verteilung			
Homogenitätsgrad $\eta = \frac{E_m}{E_h} = \frac{U}{s \cdot E_h}$	<b>1</b>	<b><math>\geq 0,2</math></b>	<b><math>&lt; 0,2</math></b>

### Potential- und Feldstärkeverteilung im Einstoffsystem

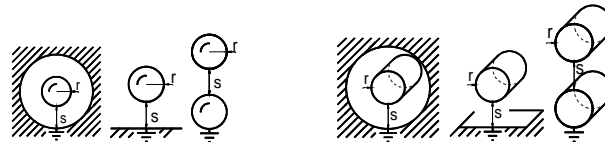
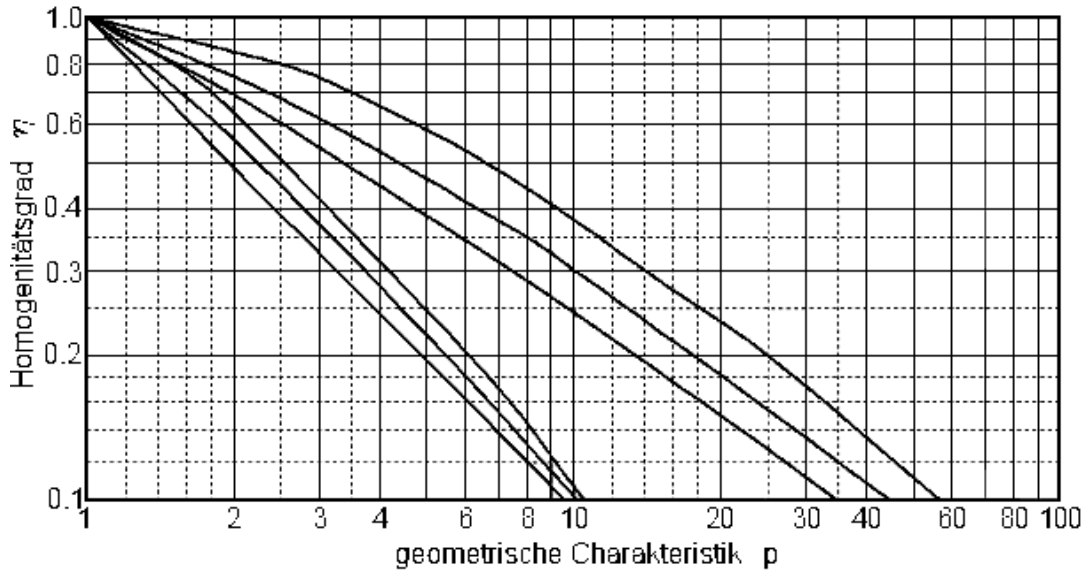


$$E(x = 0) = E_h$$

$$E(x = 1 \text{ cm}) = 0,5 E_h$$

$$E(x = 150 \text{ cm}) = 0,001 E_h$$

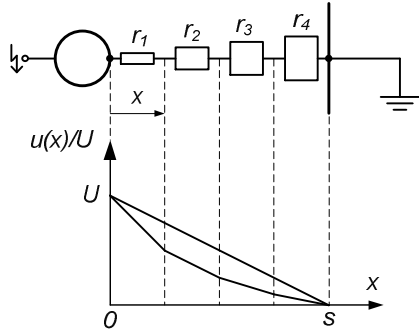
**Spitze-Platte-Feld**



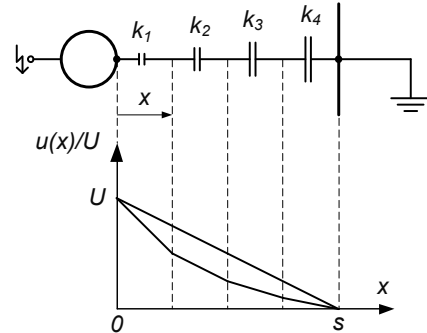
**Schwaiger-Kurven - Homogenitätsgrad  $\eta$  abhängig von der geometrischen Charakteristik  $p$  für Elektrodengrundanordnungen**

### Reihe - Schaltelemente verschieden groß

Widerstände ( $r_1 > r_2 > r_3 > r_4$ )

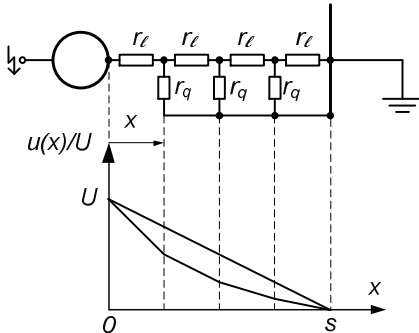


Kondensatoren ( $k_1 < k_2 < k_3 < k_4$ )

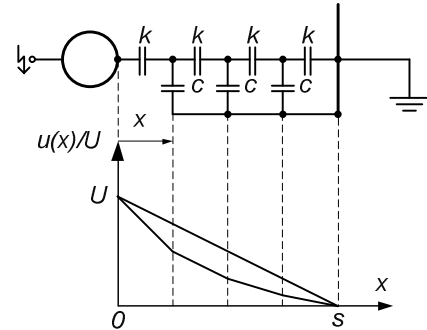


### Kette - Schaltelemente gleich groß

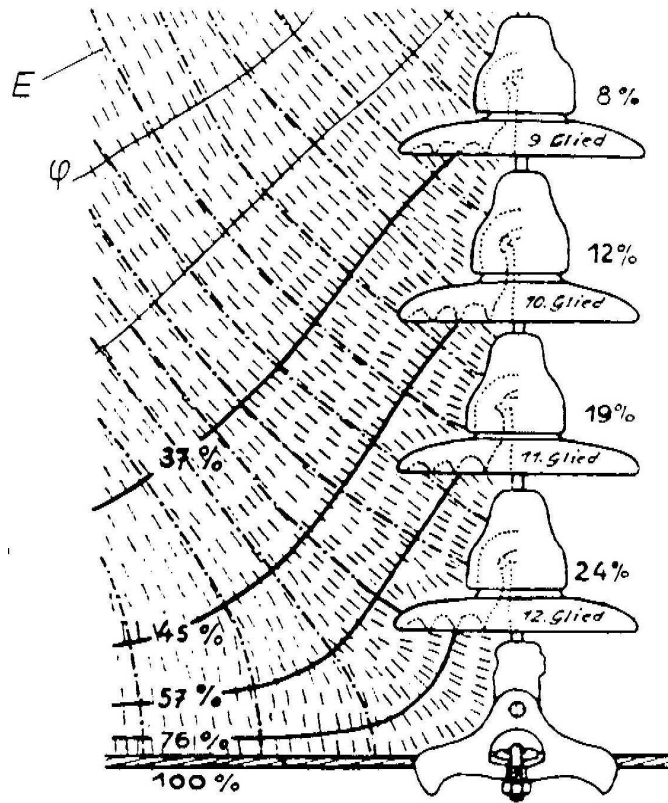
Widerstände



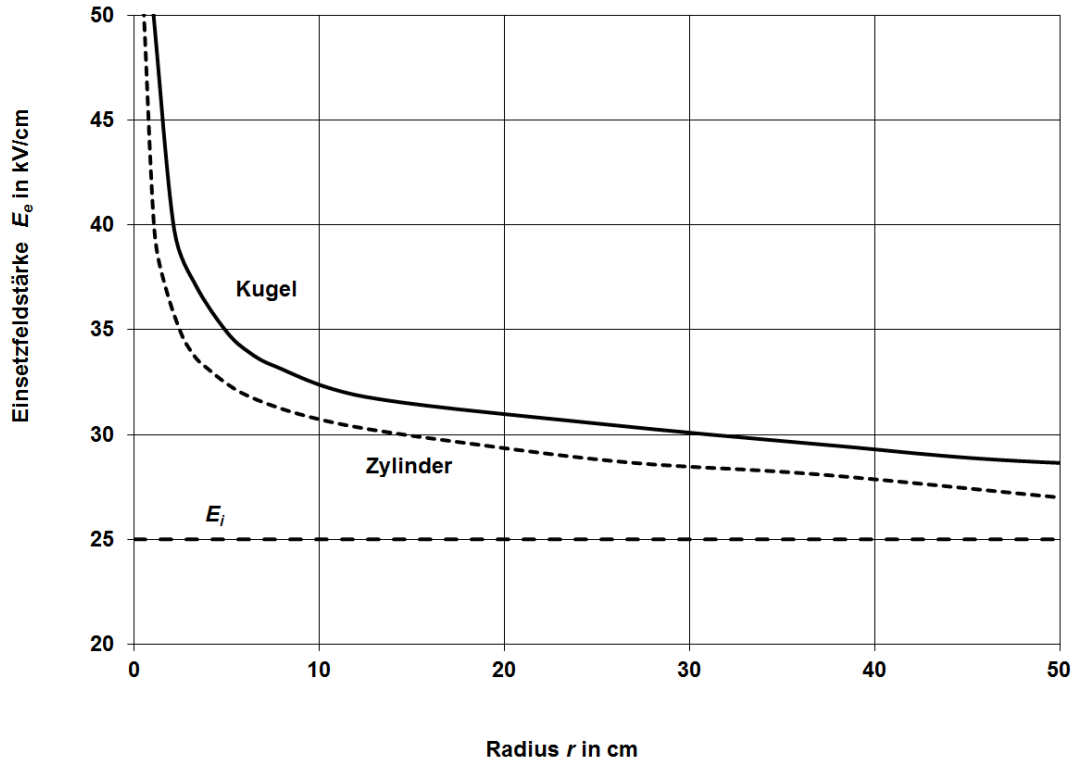
Kondensatoren



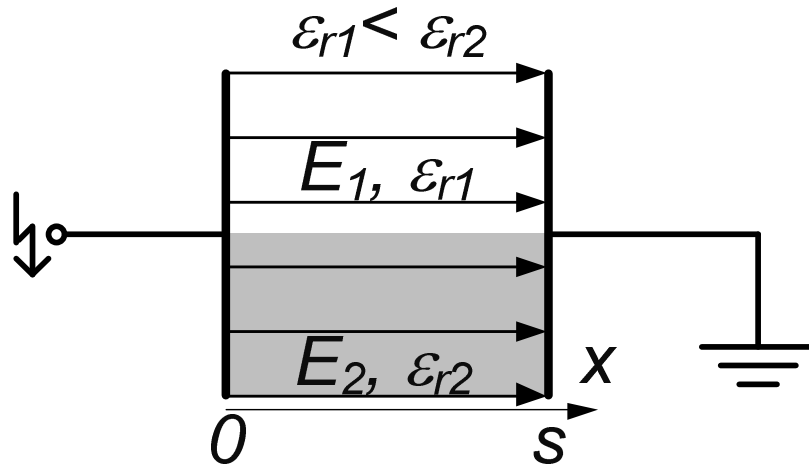
### Ersatzschaltbilder



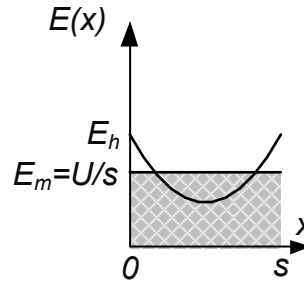
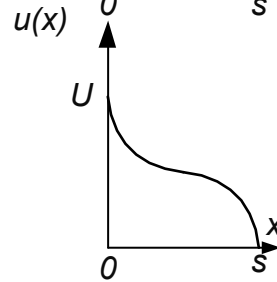
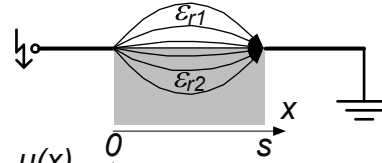
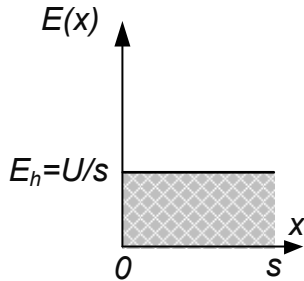
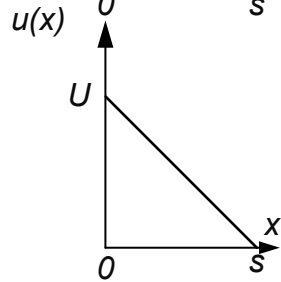
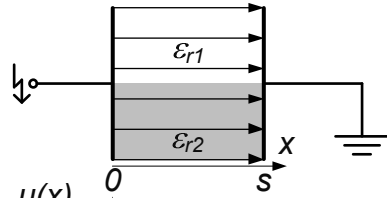
**Isolatorenkette aus Kappenisolatoren**



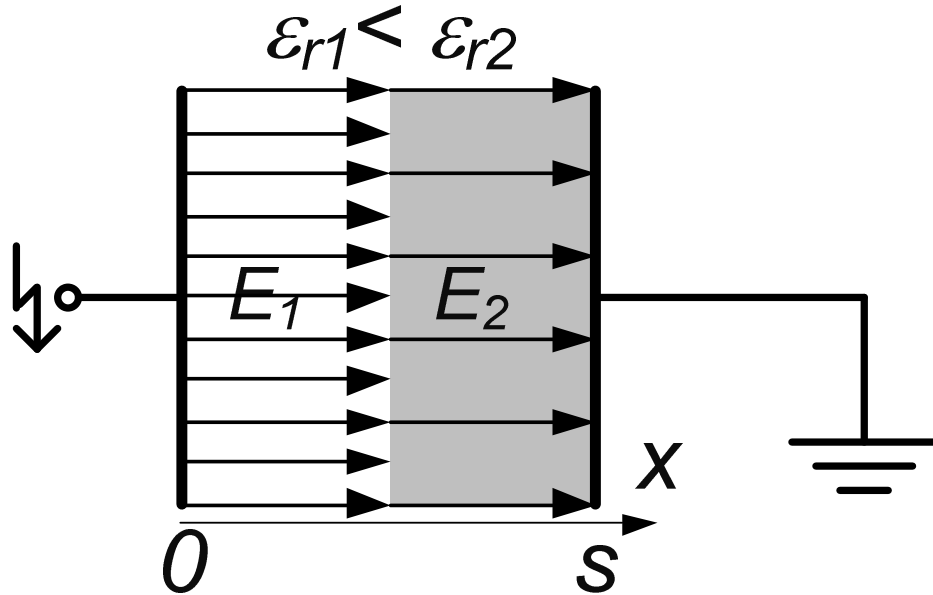
**Schumann-Kurven für Kugel- und Zylinderelektroden**



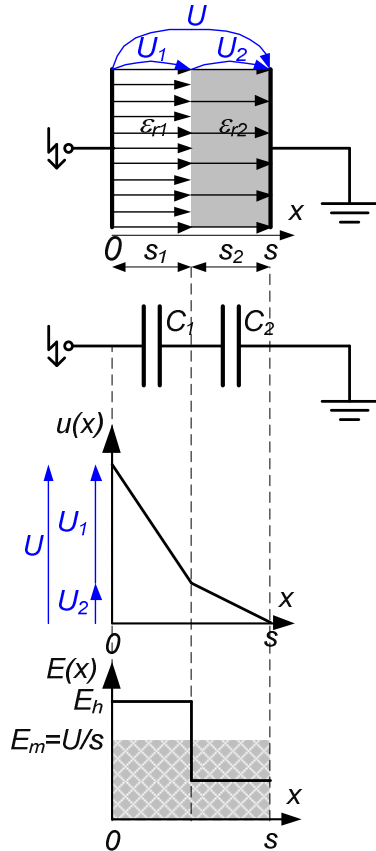
**Homogenes Grundfeld mit Längsgrenzfläche**



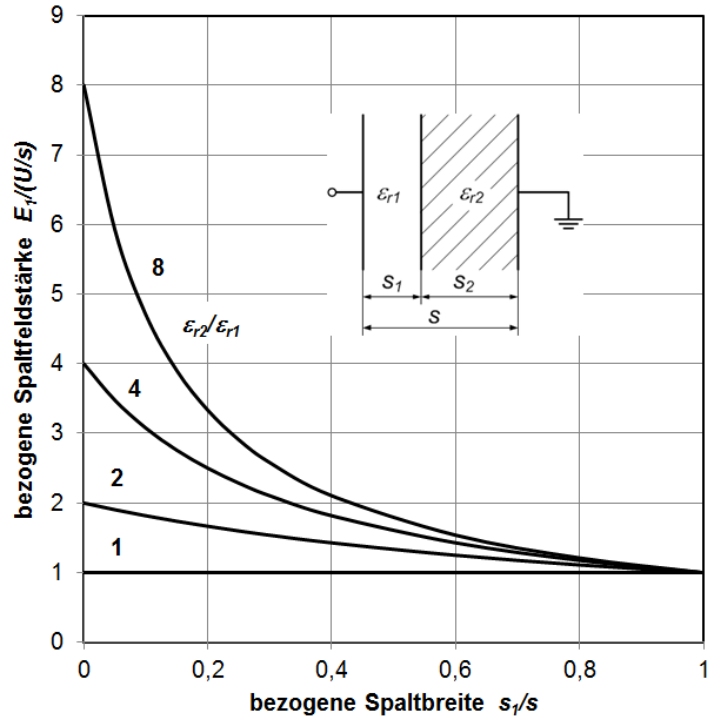
**Potential- und Feldstärkeverteilung an der Längsgrenzfläche im homogenen und im inhomogenen Feld**



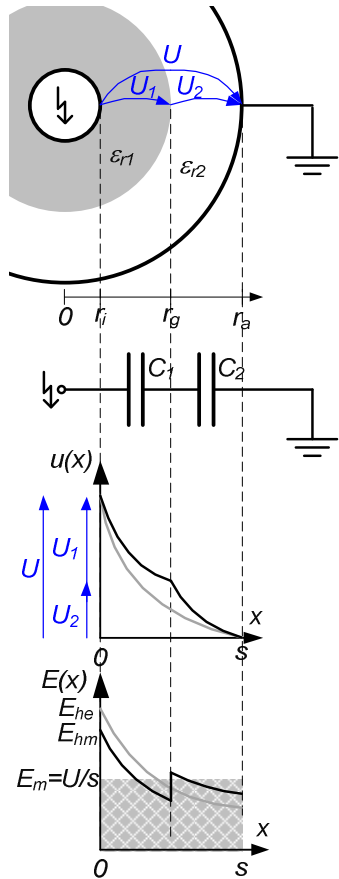
Homogenes Grundfeld mit Quergrenzfläche



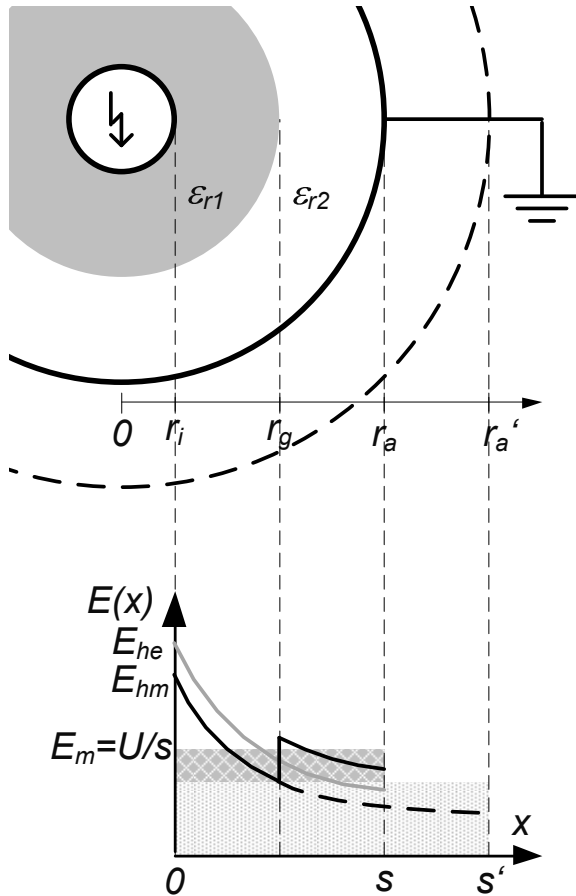
**Potential- und Feldstärkeverteilung im Zweistoffdielektrikum mit Quergrenzfläche**



### Feldstärke im geschichteten Dielektrikum



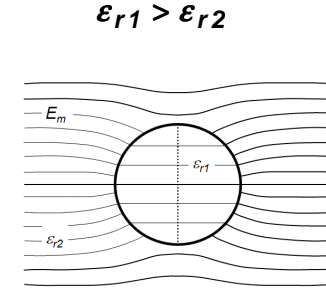
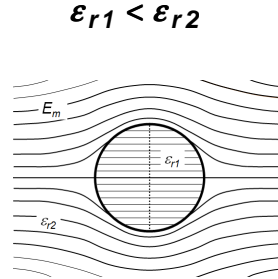
**Quergrenzfläche im schwach inhomogenen Feld einer coaxialen Zylinderanordnung**



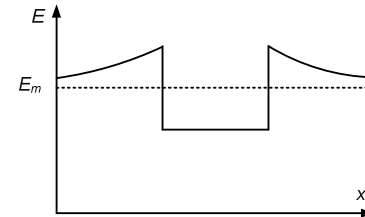
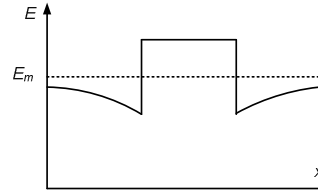
**Feldstärkeverteilung in einem coaxialen System, Reduzierung der Höchstfeldstärke  $E_h$  durch Vergrößerung des Außenradius oder Umhüllung der Innenelektrode mit einem Isolierstoff mit höherem Dielektrikum**

# Verhältnis der Dielektrizitätszahlen

Feldbild



Feldverlauf



Ort der Höchsfeldstärke  
(außerhalb des Einschlusses)

Gürtel (Äquator)

Pole

Betrag der Höchsfeldstärke

$$E_G = \frac{3}{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} + 2} \cdot E_m$$

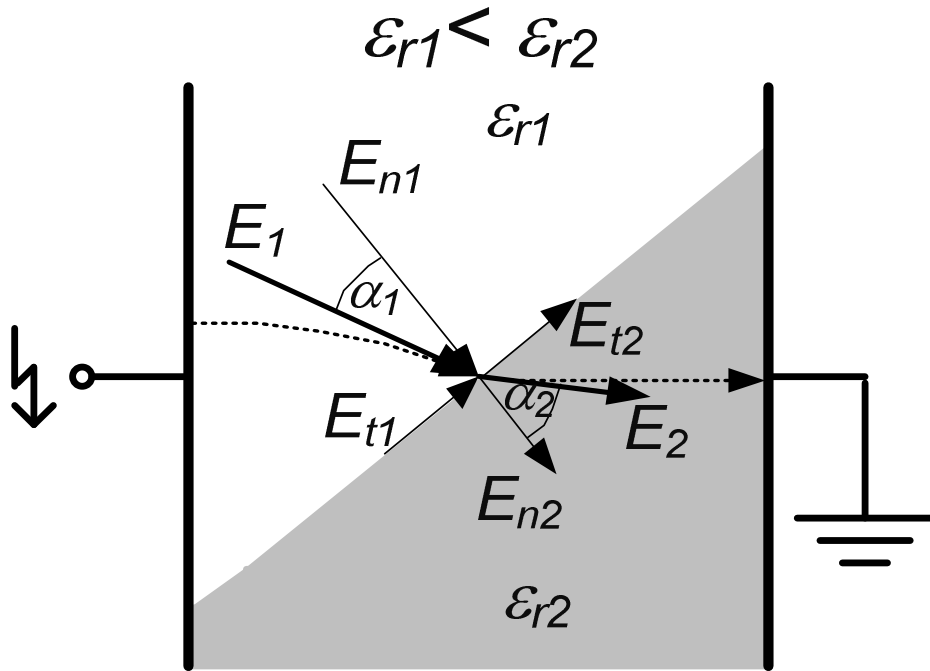
$$E_P = \frac{3}{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} + 2} \cdot \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} \cdot E_m$$

Beispiel

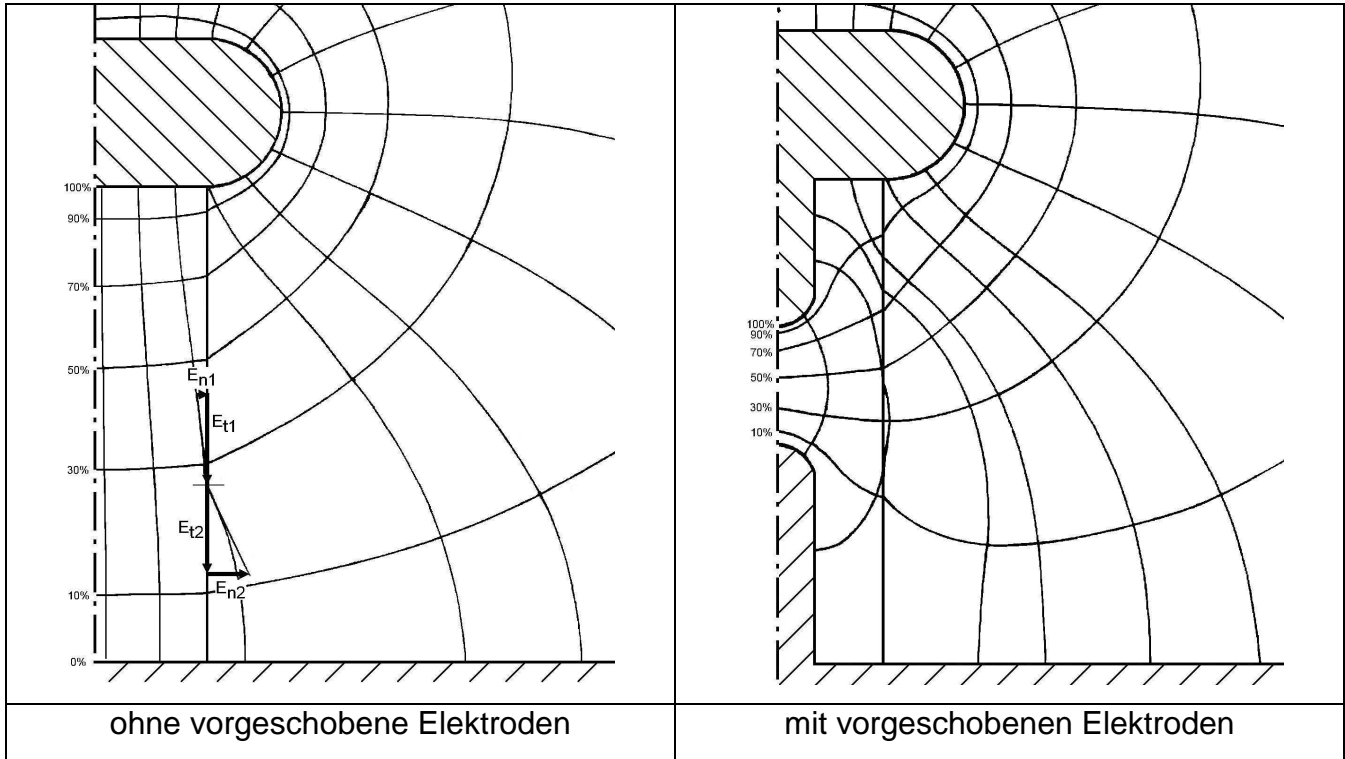
Luft in Epoxidharz

Wasser in Öl

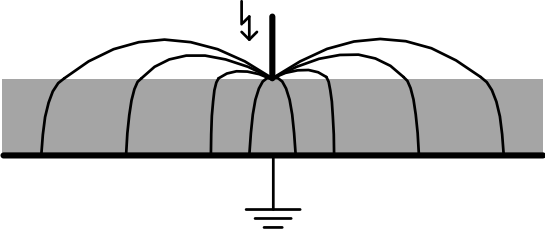
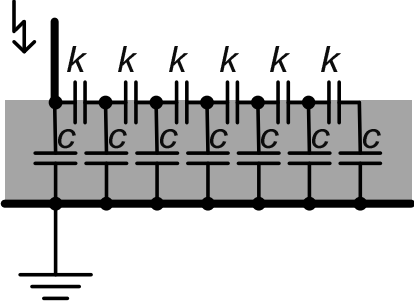
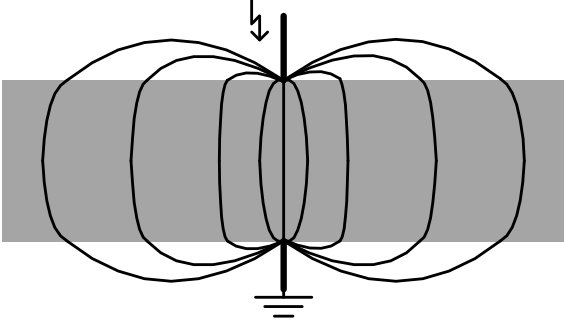
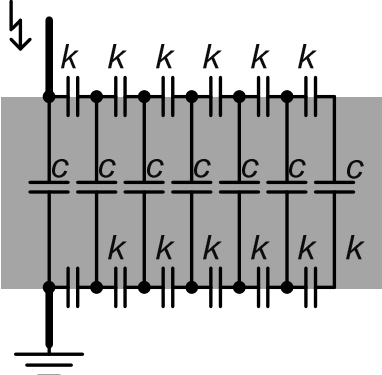
## Kugelförmige Einschlüsse im Dielektrikum



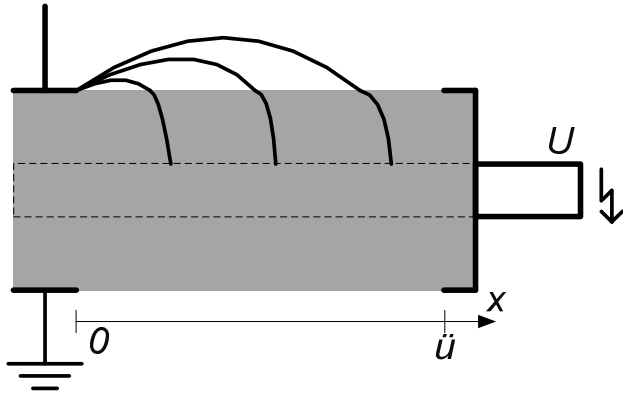
**Schräggrenzfläche**



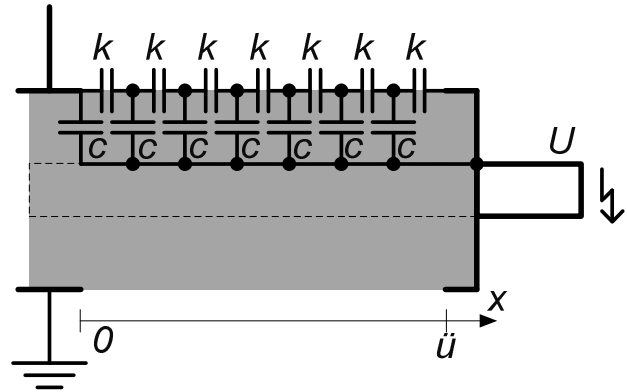
**Schräggrenzflächen an einem Stützer (Feldberechnung mit CSM)**

Anordnung	Ersatzschaltbild
 <p data-bbox="375 423 577 456">Spitze - Platte</p>	
 <p data-bbox="371 862 580 896">Spitze - Spitze</p>	

**Anordnungen mit Schräggrenzflächen**

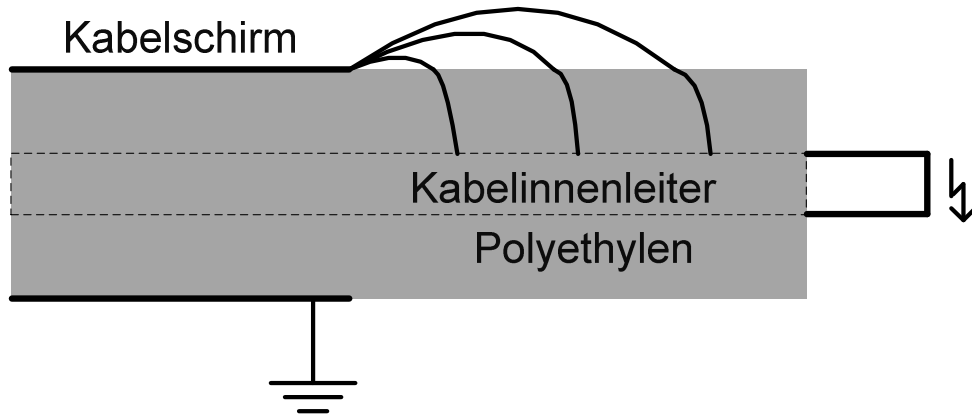


**Feldbild**

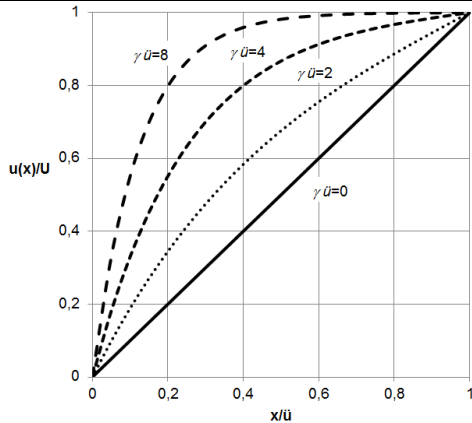


**Ersatzschaltbild**

**Schräggrenzfläche an einer Durchführung - Feld- und Ersatzschaltbild**

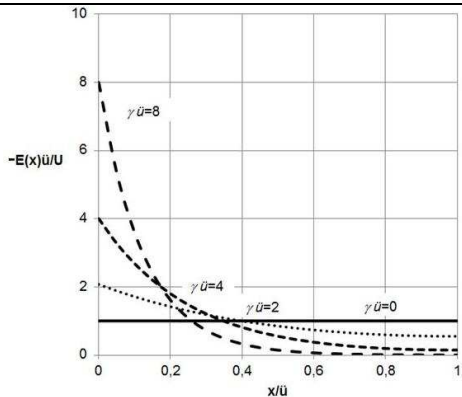


**Schräggrenzfläche an einem Kabel**



$$\frac{u(x)}{U} = 1 - \frac{\sinh[\gamma \cdot \ddot{u}(1 - x/\ddot{u})]}{\sinh(\gamma \cdot \ddot{u})}$$

**Potentialverteilung**



$$\frac{E(x)}{U/\ddot{u}} = \gamma \cdot \ddot{u} \frac{\cosh[\gamma \cdot \ddot{u}(1 - x/\ddot{u})]}{\sinh(\gamma \cdot \ddot{u})}$$

$$\frac{E_h}{U/\ddot{u}} = \frac{E(x/\ddot{u}=0)}{U/\ddot{u}} = \gamma \cdot \ddot{u} \coth(\gamma \cdot \ddot{u})$$

$$E_m = \frac{U}{\ddot{u}}$$

**Feldstärkeverteilung**

**Schräggrenzfläche an einer Durchführung - Potential- und Feldstärkeverteilung**