

Felder zum Anfassen

# Energieströme im elektromagnetischen Feld

Peter Schmälzle



**STAATLICHES SEMINAR für Didaktik und  
Lehrerbildung (Gymnasien) KARLSRUHE**

04.07.2016

# Energieströme im elektromagnetischen Feld

Anliegen dieser Veranstaltung:

**Felder als physikalische Systeme ernst nehmen**

Beschreibung von Systemen:  
mit Hilfe **physikalischer Größen**

„übergreifende“ Größe: **Energie**

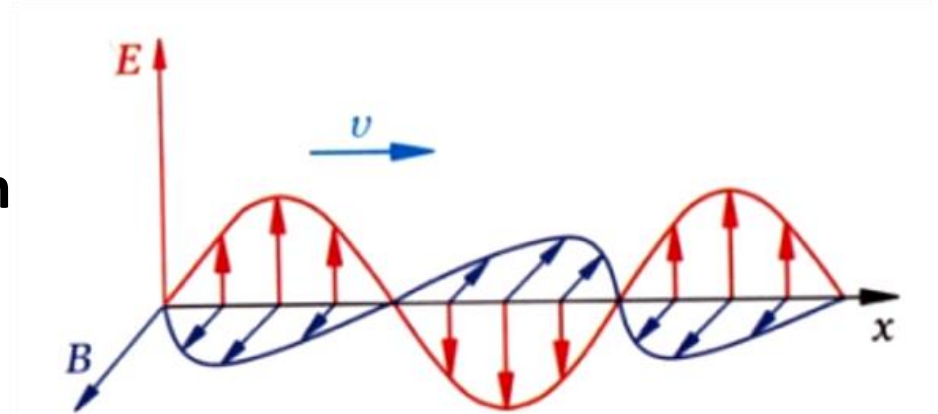
Energiedichte  $\rho_E$

Energiestromdichte  $\vec{j}_E$

**Werden Felder ernst genommen,  
wenn es um Energiebetrachtungen geht?**

# Werden Felder ernst genommen, wenn es um Energiebetrachtungen geht?

Stichwort:  
**Elektromagnetische Wellen**



**Poynting-Vektor**

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

„S gibt die mittlere Strahlungsleistung pro Fläche einer elektromagnetische Welle an“ (Metzler)

# Kondensator und Spule als Energiespeicher

Energie im Kondensator:  $E = \frac{1}{2} C U^2$

$$\rho_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 |\vec{E}|^2$$

Energie in der Spule:

$$\rho_E = \frac{1}{2\mu_0} |\vec{B}|^2$$

$$\rho_E = \frac{1}{2} \mu_0 |\vec{H}|^2$$

$$E = \frac{1}{2} L I^2$$

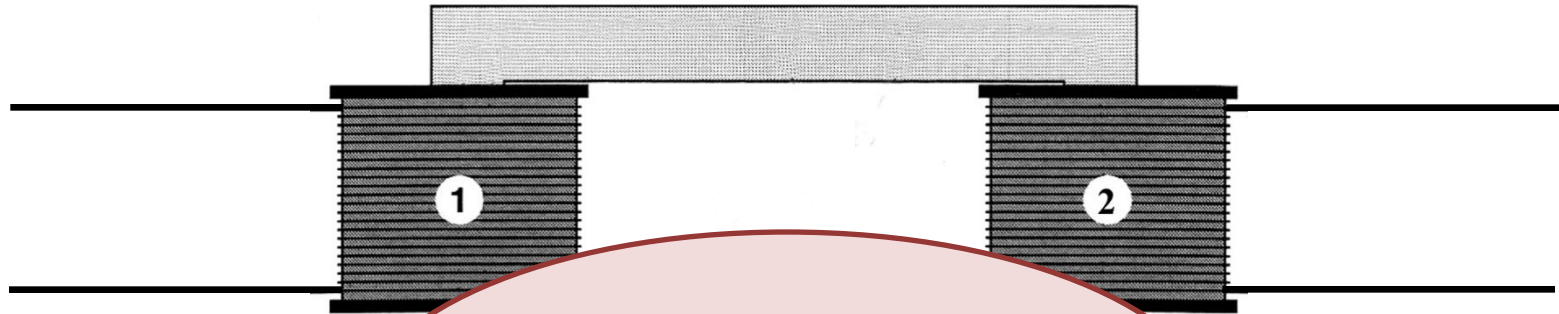
Wie kommt die Energie in den Kondensator und die Spule?

Mit dem Energieträger Elektrizität (beim Auflade- bzw. Einschaltvorgang)!

Die bildhafte Vorstellung des „Energieträgers“ ist nicht wörtlich zu nehmen

Grenzen beachten!!

# Energieübertragung im Transformator



Wie kommt die Energie hierbei vom Primärkreis in den Sekundärkreis?

An dieser Stelle könnte man auf die wichtige Funktion der Felder für den Energietransport eingehen

# Energieströme im elektromagnetischen Feld

1172

G. Mie,

Damit ist, allerdings nur unter der Voraussetzung, dass die Materie im elektromagnetischen Felde sich nicht bewegt,<sup>1</sup> der Satz bewiesen:

Die elektromagnetische Energieübertragung lässt sich localisiren. Der Vector, durch den sich alle realisirbaren Energieübergänge berechnen lassen, ist der Poynting'sche Energiestrom.

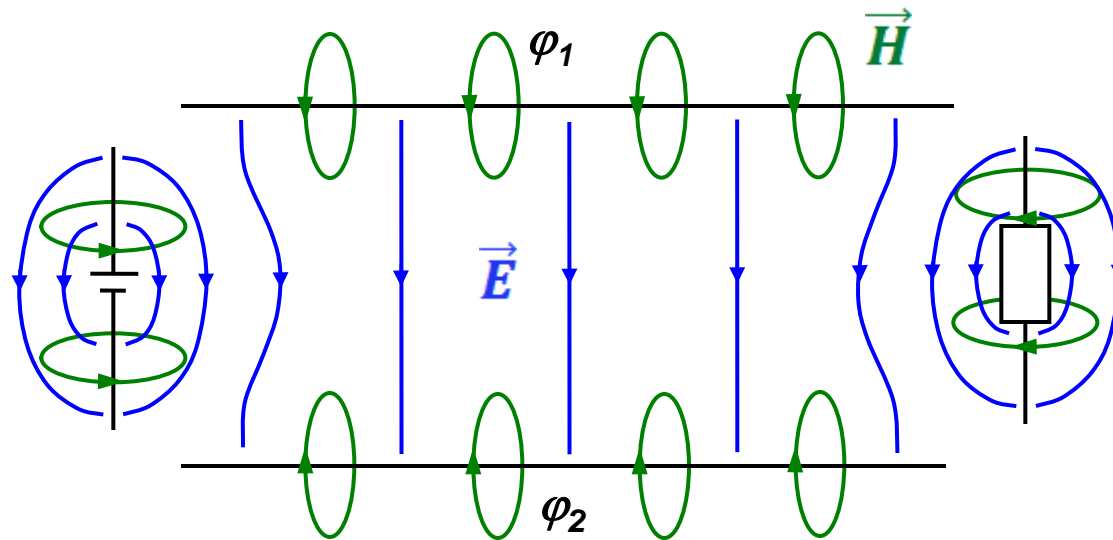
**G. Mie: Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung,**  
Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften.  
CVII. Band VIII. Heft (1898), S. 1113 ff

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

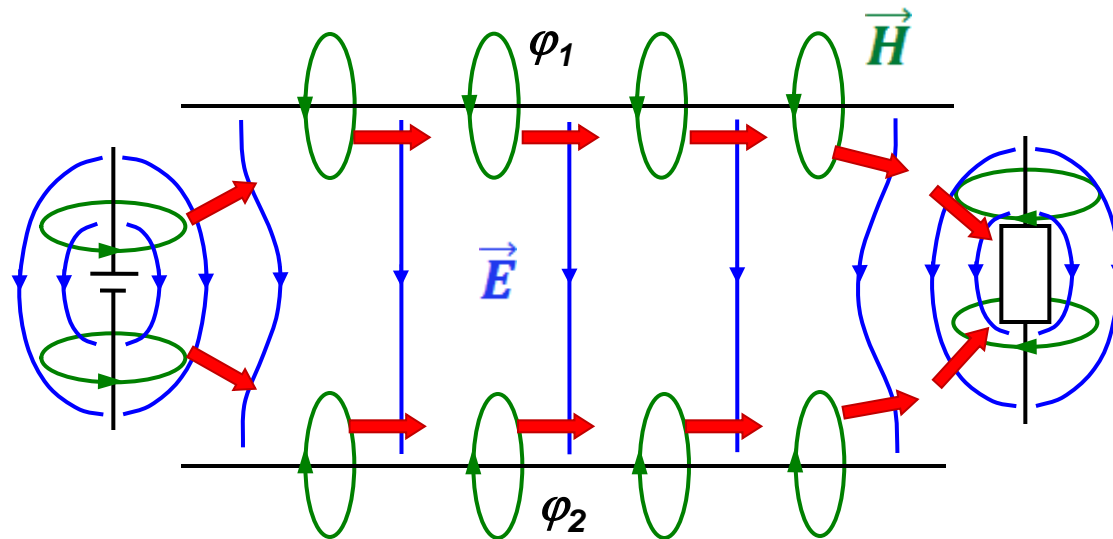
**Poynting-Vektor**

$$\vec{j}_E = \vec{E} \times \vec{H}$$

# Anwendung: Der einfache elektrische Stromkreis

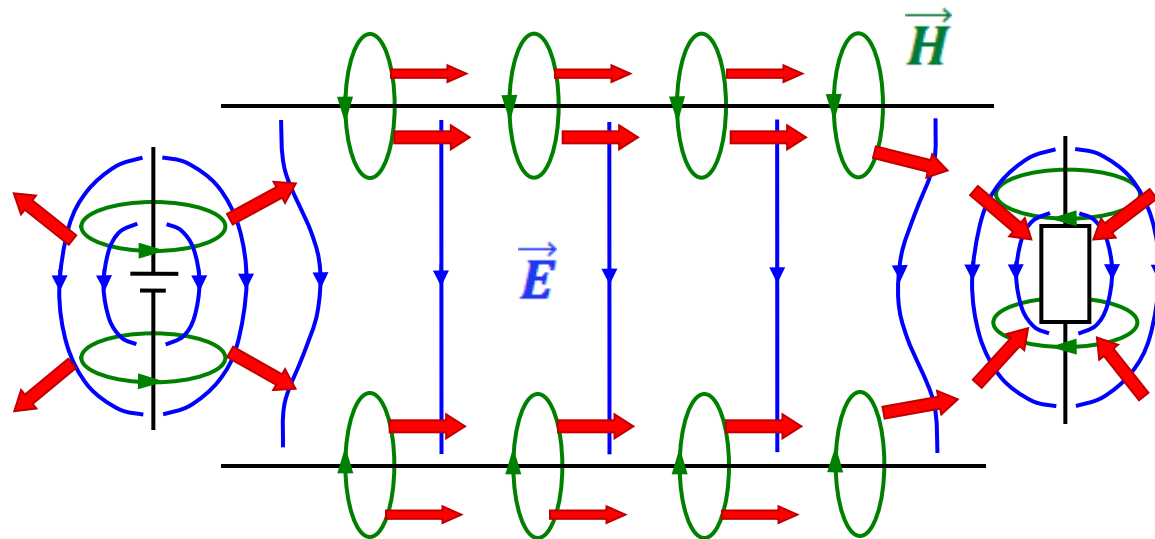


# Anwendung: Der einfache elektrische Stromkreis



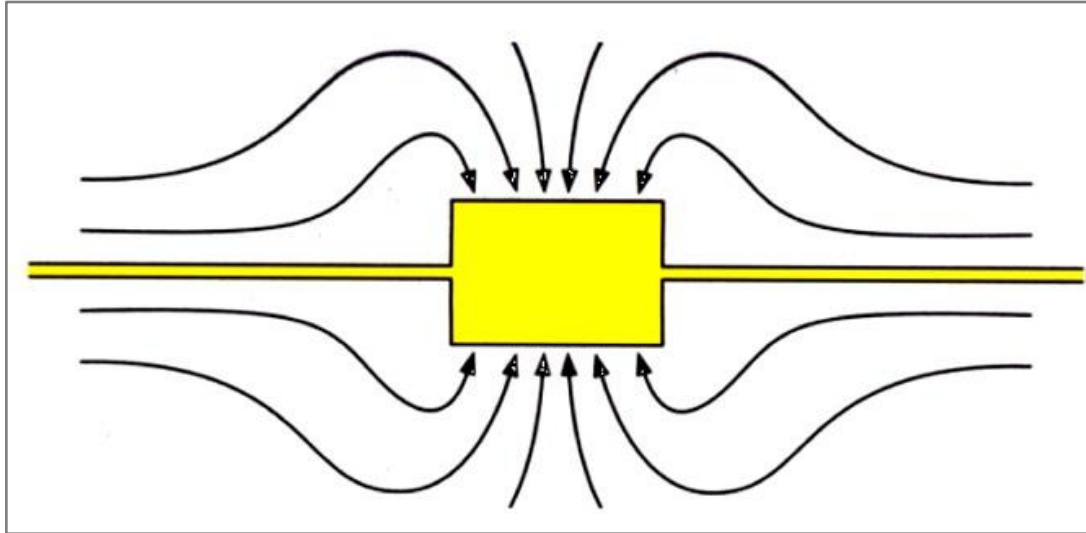


# Anwendung: Der einfache elektrische Stromkreis



$$\operatorname{div} (\vec{E} \times \vec{H}) = -\vec{E} \cdot \vec{j}_Q$$

# Energieströme im elektromagnetischen Feld



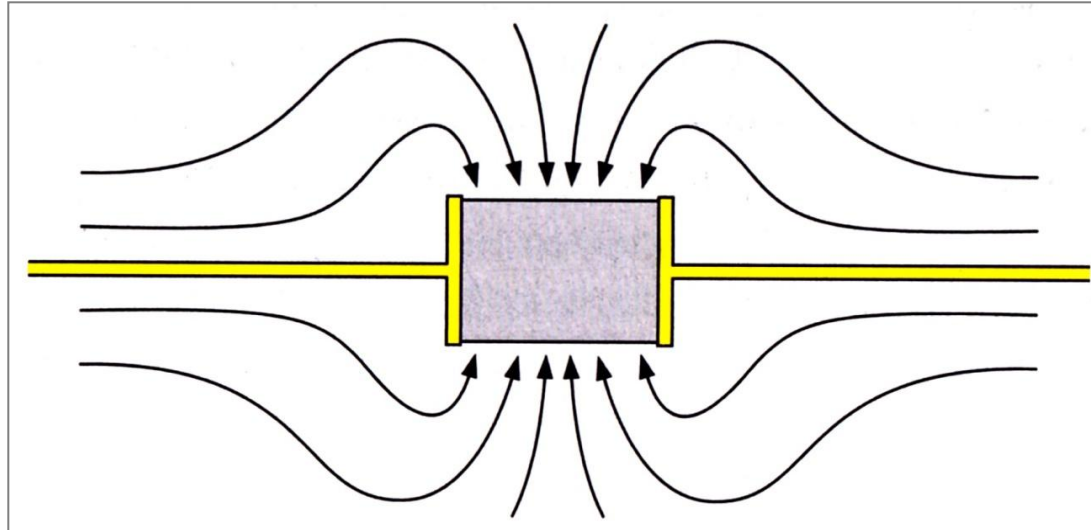
Ohmscher Widerstand

Quelle:

D. Plappert, „Zur Lokalisation von Energieströmen“ ;

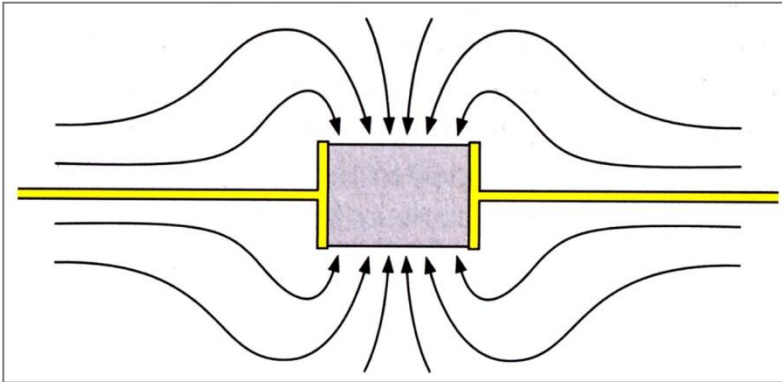
Praxis der Naturwissenschaften Physik, Heft 2/57 (2008), Aulis-Verlag

# Energieströme im elektromagnetischen Feld



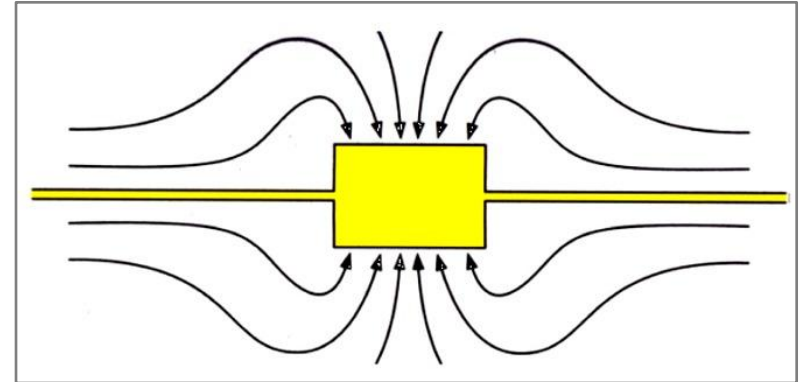
Kondensator

# Energieströme im elektromagnetischen Feld



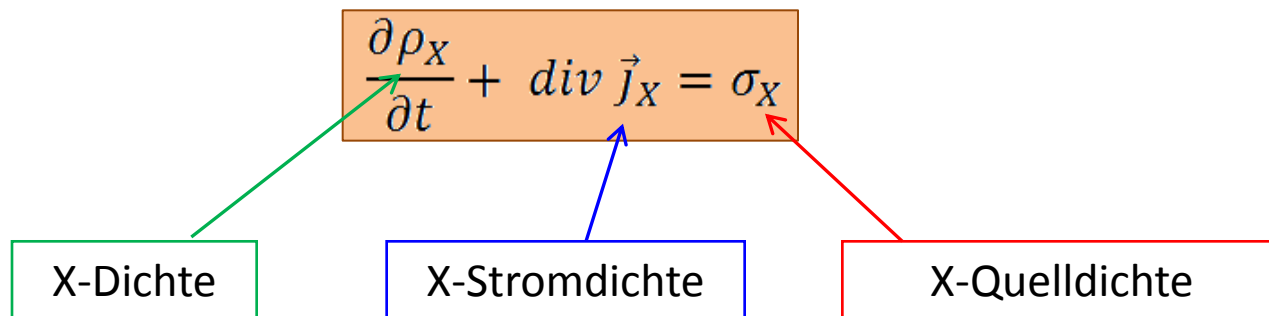
Kondensator

Energiespeicherung im elektrischen Feld

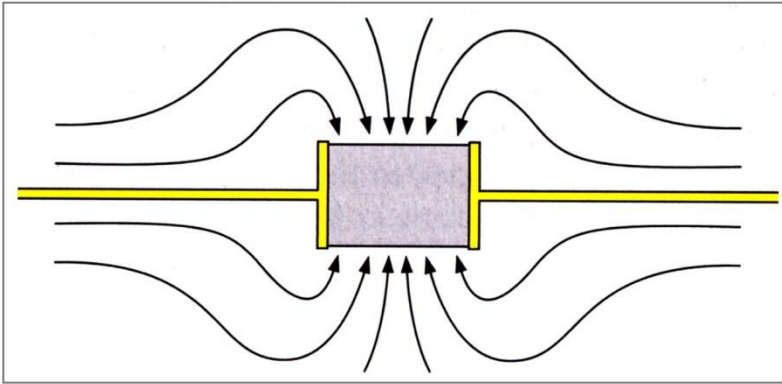


Ohmscher Widerstand

Energiedissipation im Widerstand

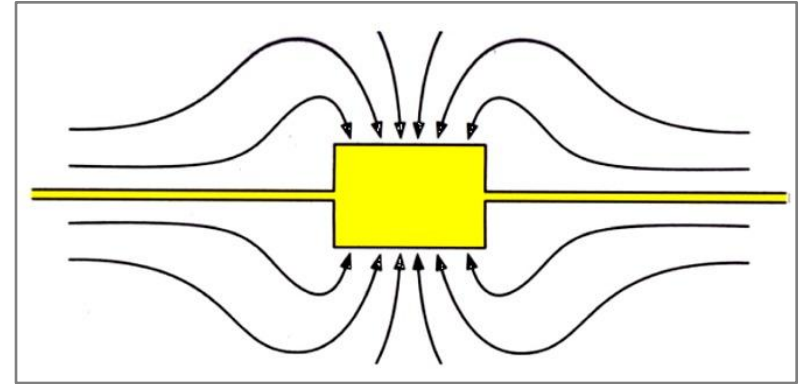


# Energieströme im elektromagnetischen Feld



Kondensator

Energiespeicherung im elektrischen Feld



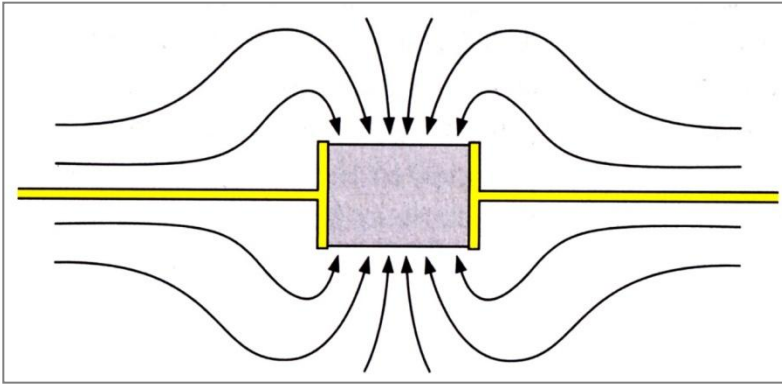
Ohmscher Widerstand

Energiedissipation im Widerstand

$$\frac{\partial \rho_X}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j}_X = \sigma_X$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\epsilon_0}{2} \vec{E}^2 + \frac{\mu_0}{2} \vec{H}^2 \right) + \operatorname{div}(\vec{E} \times \vec{H}) = -\vec{E} \cdot \vec{j}_Q$$

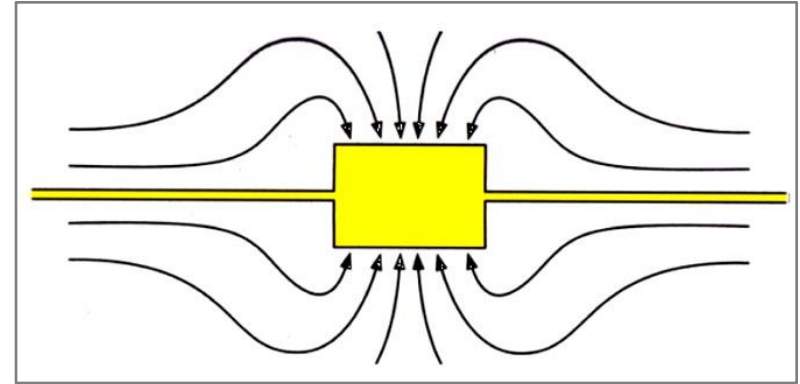
# Energieströme im elektromagnetischen Feld



Kondensator

Energiespeicherung im elektrischen Feld

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\epsilon_0}{2} \vec{E}^2 \right) + \operatorname{div}(\vec{E} \times \vec{H}) = 0$$



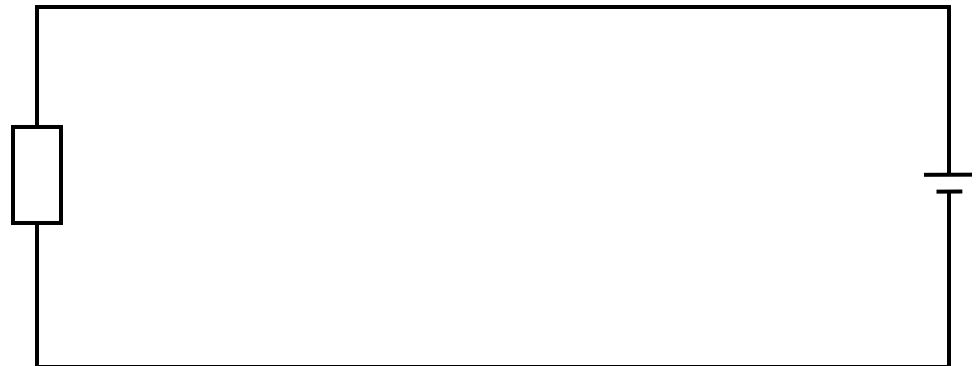
Ohmscher Widerstand

Energiedissipation im Widerstand

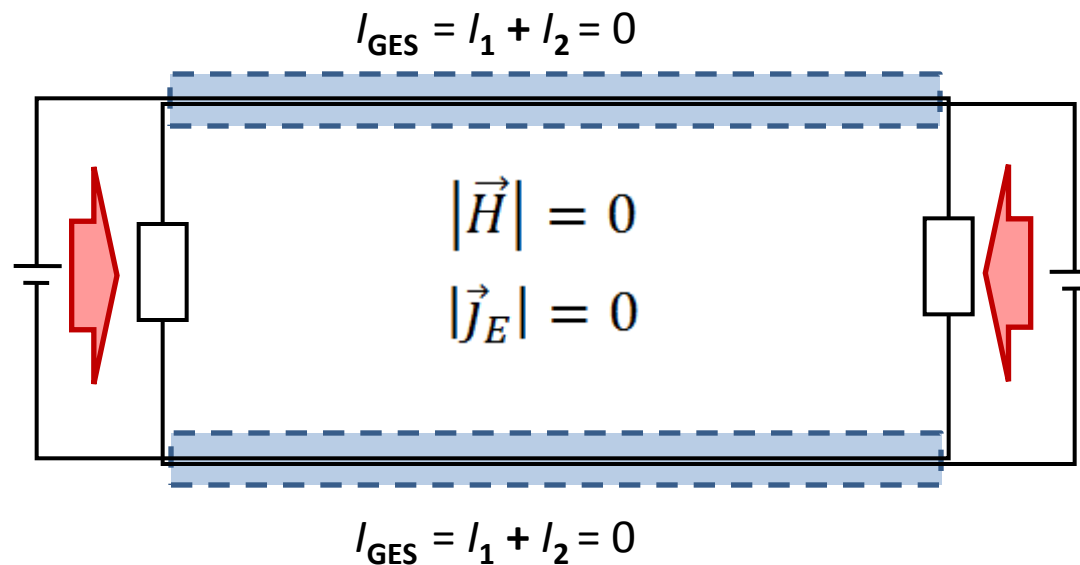
$$\operatorname{div}(\vec{E} \times \vec{H}) = -\vec{E} \cdot \vec{j}_Q$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\epsilon_0}{2} \vec{E}^2 + \frac{\mu_0}{2} \vec{H}^2 \right) + \operatorname{div}(\vec{E} \times \vec{H}) = -\vec{E} \cdot \vec{j}_Q$$

# Weitere Beispiele für Energieströme im elektromagnetischen Feld



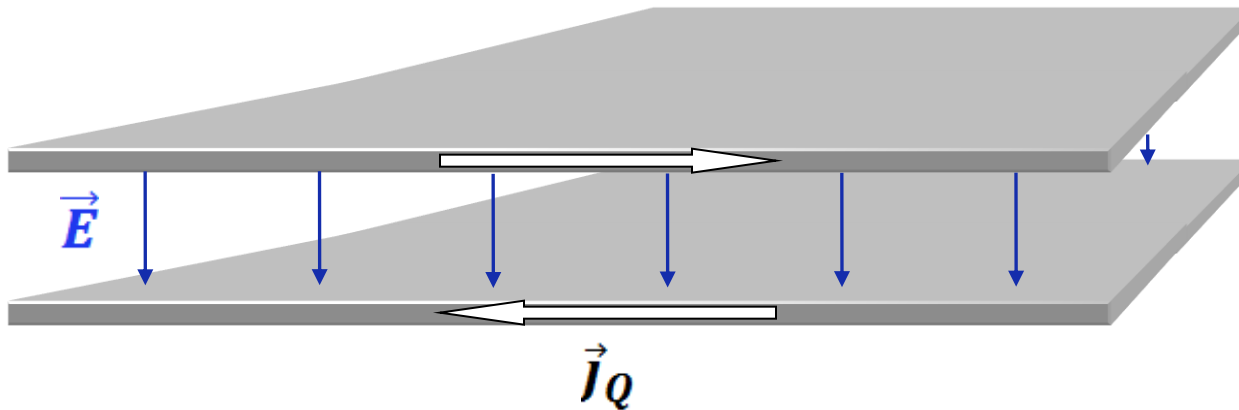
# Weitere Beispiele für Energieströme im elektromagnetischen Feld





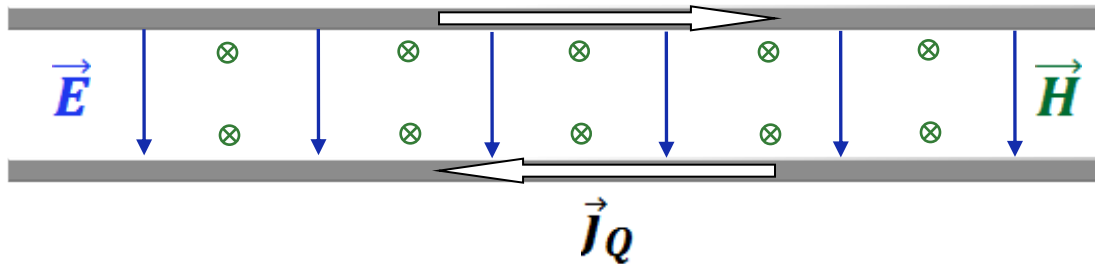
# Weitere Beispiele für Energieströme im elektromagnetischen Feld

## Flächenhafte Leitungen



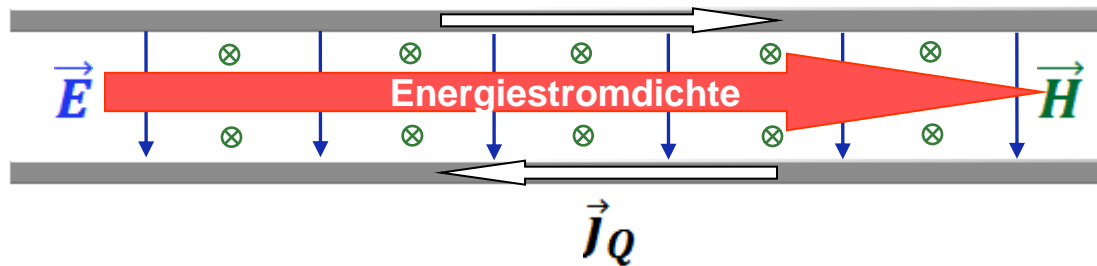
# Weitere Beispiele für Energieströme im elektromagnetischen Feld

## Flächenhafte Leitungen



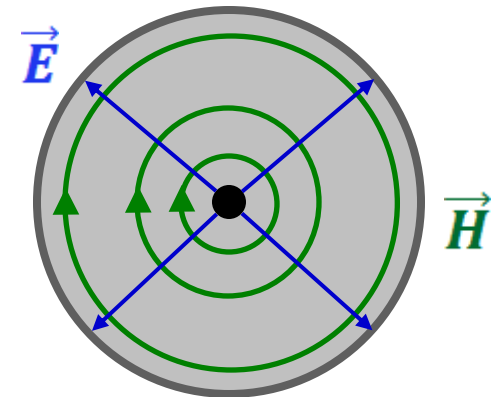
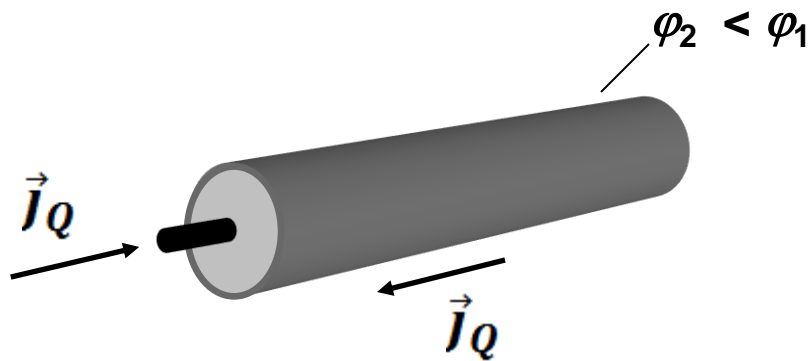
# Weitere Beispiele für Energieströme im elektromagnetischen Feld

## Flächenhafte Leitungen



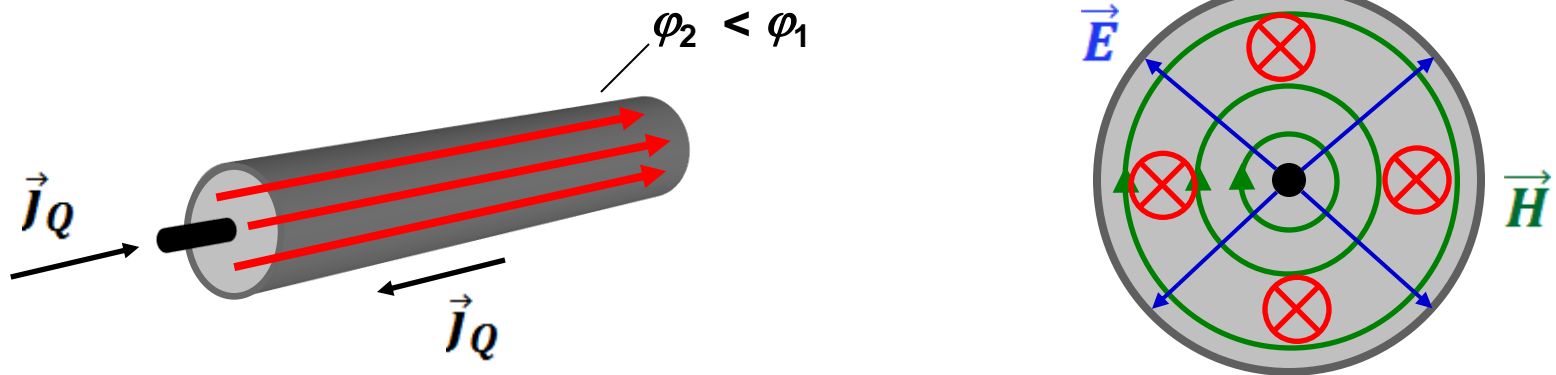
# Weitere Beispiele für Energieströme im elektromagnetischen Feld

## Koaxialkabel



# Weitere Beispiele für Energieströme im elektromagnetischen Feld

## Koaxialkabel

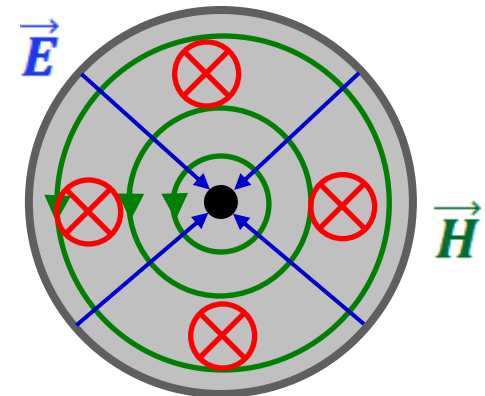
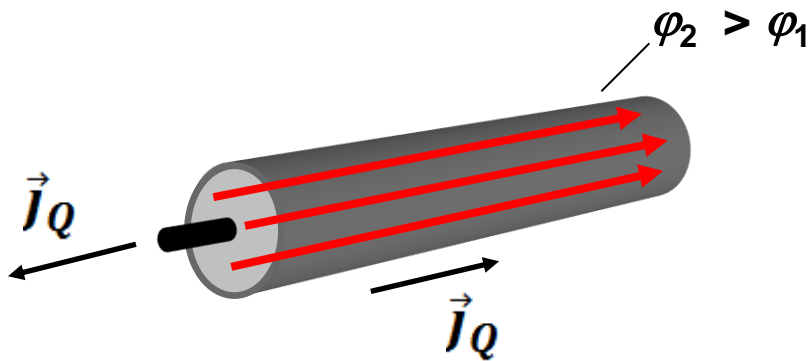
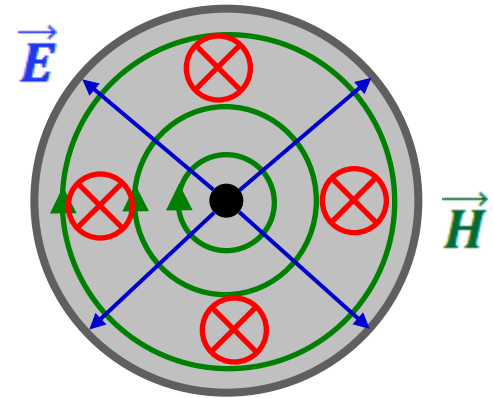
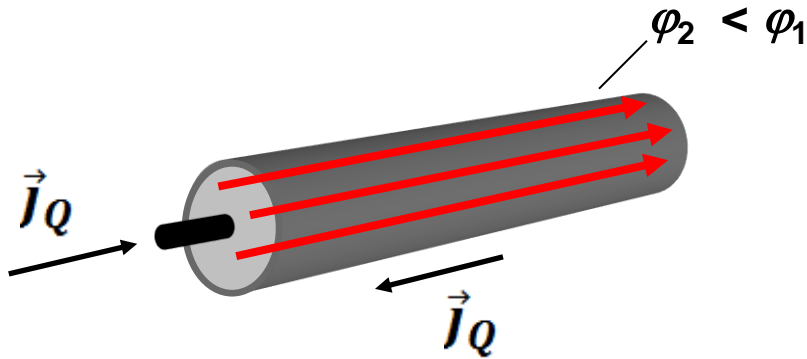


Folge: Die Energieübertragung erfolgt nur im Bereich zwischen Innen- und Außenleiter

# Weitere Beispiele für Energieströme im elektromagnetischen Feld

Koaxialkabel bei Wechselspannung

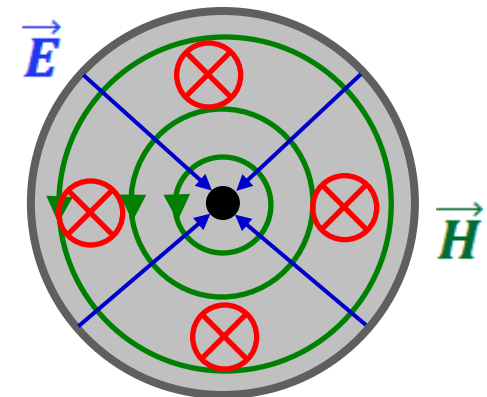
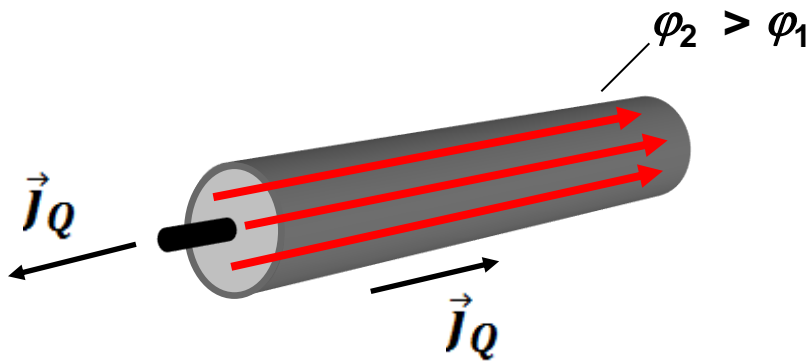
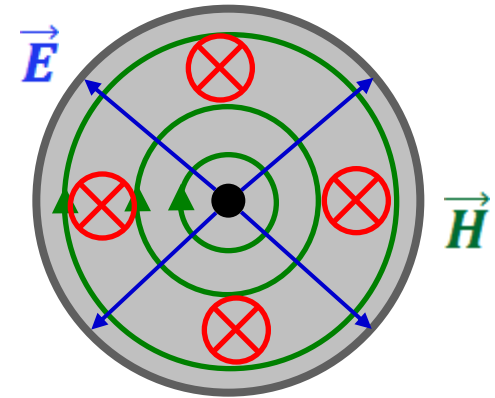
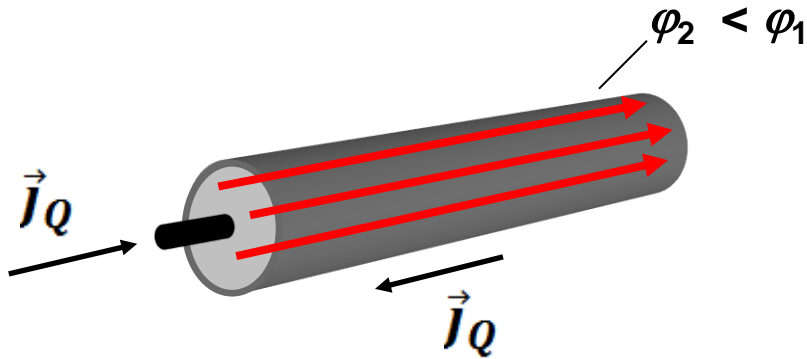
Folge: ständige Änderung der Polarität



# Weitere Beispiele für Energieströme im elektromagnetischen Feld

Koaxialkabel bei Wechselspannung

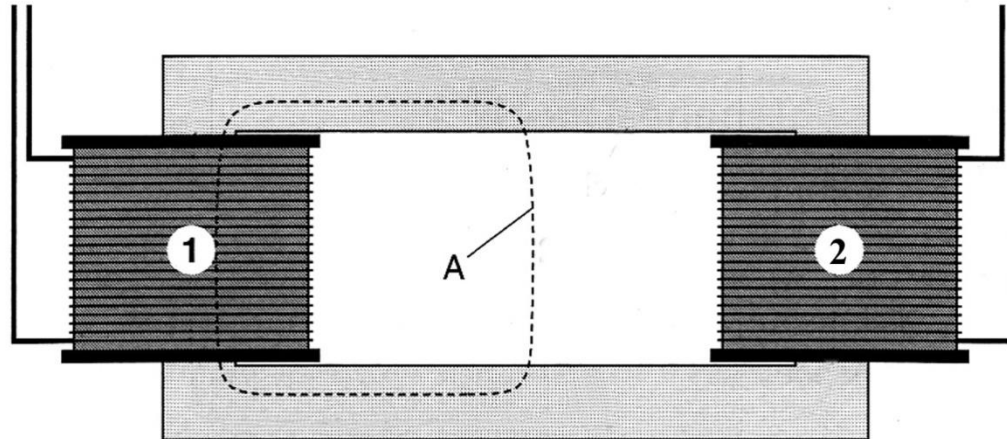
Die Energiestromdichte behält ihre Richtung bei



# Weitere Beispiele für Energieströme im elektromagnetischen Feld

## Transformator

$$\oint_A \vec{H} \, d\vec{r} = n_1 I_1$$



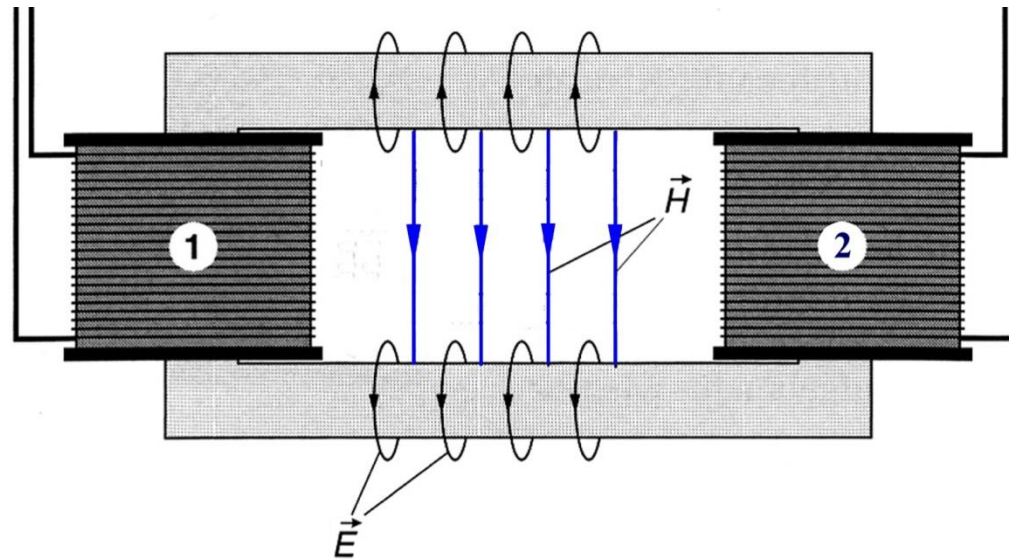
im Inneren des Kerns:  $H_i \approx 0$

zum Integral trägt im Wesentlichen nur ein Magnetfeld im Außenbereich zwischen den Schenkeln des Kerns bei



# Weitere Beispiele für Energieströme im elektromagnetischen Feld

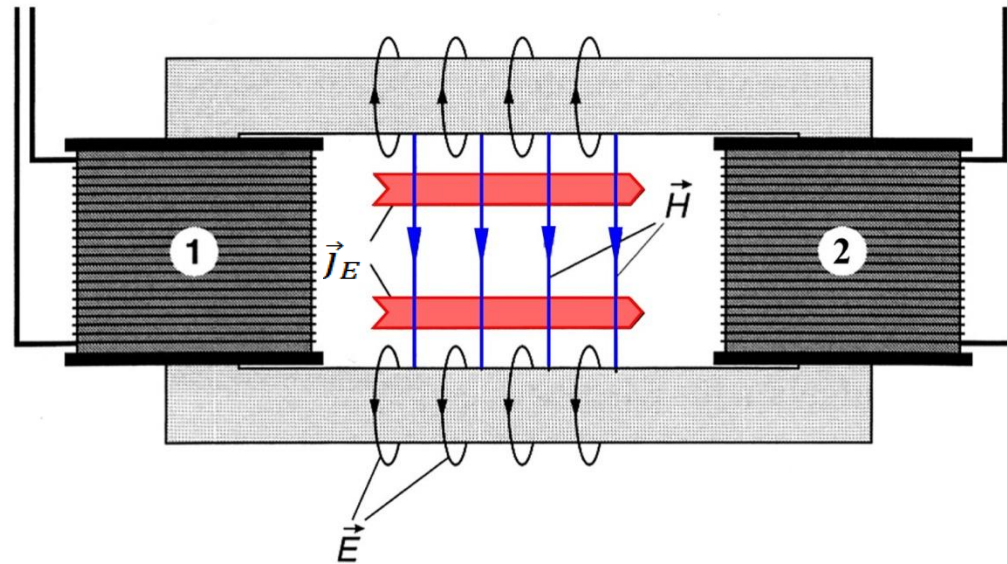
## Transformator



$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

# Weitere Beispiele für Energieströme im elektromagnetischen Feld

## Transformator



# Energieströme im elektromagnetischen Feld

## Zusammenfassung

- Die Frage nach dem „Weg der Energie“ ist im Physikunterricht erwünscht und angebracht.
- Das „naive Bild des Energieträgers“ sollte dabei nicht zu sehr strapaziert werden.
- Am Beispiel des Transformators lässt sich (qualitativ) zeigen, wie wichtig elektrisches und magnetisches Feld für die Energieübertragung sind.
- Der Poynting-Vektor liefert nicht nur bei elektromagnetischen Wellen die korrekte Energieströmung!