

# Habt ihr schon gewusst 199 ... E-M-Welle

In den Bildungsstandards steht in der Kursstufe:

## 9. Strukturen und Analogien

Die Schülerinnen und Schüler können ... das magnetische und elektrische Feld als physikalisches System beschreiben und die Grundlagen der Maxwelltheorie verstehen, in der die Elektrodynamik auf vier Aussagen zurückgeführt wird.

Grundkenntnisse werden bei folgenden Themen erwartet:

### Inhalte

*harmonische ... elektromagnetische Schwingung, Differenzialgleichung*

*... elektromagnetische Welle (unter Einbezug von Licht) ... harmonische Welle, einfache mathematische Beschreibung ...*

### Ein typisches Kerncurriculum schreibt bei den Fachinhalten:

Behandlung der Grundlagen der Maxwelltheorie, in der die Elektrodynamik auf 4 Aussagen zurückgeführt wird:

1. Positive Ladung als Quelle und negative Ladung als Senke des E-Feldes
2. Quellenfreiheit des magnetischen B-Feldes
3. Ein sich veränderndes B-Feld erzeugt ein E-Feld (Induktion)
4. Elektrischer Strom bzw. ein sich veränderndes E-Feld erzeugen B-Feld

Selbstverständlich gibt es ganz unterschiedliche sprachliche und mathematische Formulierungen dieser vier Grundhaussagen. Wesentlich ist hierbei das damit verbundene Physikverständnis. Und dieses Physikverständnis beginnt in der Klasse 5 in den Naturphänomenen, in denen die Schülerinnen und Schüler das obige **Gesetz Nr. 2** in der Form lernen, dass es zwei unterschiedliche Magnetpole gibt und diese nicht als Einzelpole vorkommen.

Das **Gesetz Nr. 1** spielt schon bei der Einführung des E-Feldes eine zentrale Rolle ... Feldlinien beginnen an positiven Ladungen (Quelle des E-Feldes) und enden an negativen Ladungen (Senken des E-Feldes).

Selbstverständlich wurde das **Gesetz Nr. 3** „schon immer“ unterrichtet – die Physiklehrkräfte haben dabei vielleicht nicht hinreichend betont, dass das „Induktionsgesetz“ auf einer der grundlegenden Maxwellgleichung basiert. UND mit Sicherheit kann man die Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle nur erklären, wenn man dieses Gesetz Nr. 3 wenigstens in qualitativer Form behandelt.

Das **Gesetz Nr. 4** hat zwei Teile. Der erste Teil (ein elektrischer Strom erzeugt ein B-Feld) wurde auch „schon immer“ unterrichtet – und zwar schon in der Mittelstufe. Ohne diese Aussage ist die Behandlung einer Spule, eines Elektromagneten oder der Lorentzkraft nicht möglich. Der zweite Teil (ein sich veränderndes E-Feld erzeugt ein B-Feld) muss spätestens bei der Behandlung der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in der SII behandelt.

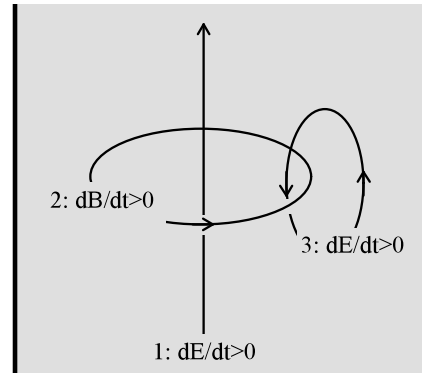
**Fazit:** Diese vier Grundaussagen der Maxwellgleichungen wurden in der einen oder anderen Form immer schon behandelt. Der wesentliche Unterschied in den Bildungsstandards: Die Behandlung dieser Thematik muss dazu führen, dass die Schülerinnen und Schüler die einzelne Aspekte nicht als zerrissene „Einzelaspekte“, sondern als Grundlage der gesamten Elektrodynamik verstehen.

Die **Unterrichtsschritte** in dieser Thematik könnten folgendermaßen aussehen:

- ❖ Ganz wichtig: Wiederholung des Energietransportes von einer elektrischen Energiequelle (Batterie) über eine parallele Zweidrahtleitung zu einer elektrischen Energiesenke (ohmscher Widerstand) über die „Rechte-Hand-Regel“ des Energietransports. Ganz wesentlich: Die Energie wird über das E-M-Feld transportiert und läuft NICHT im Kabel selbst! Siehe Sendung **195 Energiestrom.ppt**
- ❖ Parallelschaltung einer Kapazität (Kondensator) und einer Induktivität (Spule) zu einem Parallelschwingkreis.
- ❖ Behandlung der Elektromagnetischen Schwingung ... verschiedene experimentelle Varianten – Meißnerschaltung ...
- ❖ Differenzialgleichung der harmonischen elektromagnetischen Schwingung
- ❖ Thomsonsche Schwingungsgleichung ... Periodendauer als Funktion der Kapazität und Induktivität
- ❖ Reduktion der Kapazität und Induktivität ... HF-Frequenzen ... evtl. Hertzscher Dipol ... evtl. Lecherleitung ... evtl. Koaxialkabel ... experimentelle Varianten aus der Physiksammlung
- ❖ HF-Frequenzschaltung mit MOSFET – siehe Schaltbild ... oder Schulalternativen
- ❖ Nachweis der Ablösung elektromagnetischer Wellen von der HF-Schaltung ... zum Beispiel durch ein Koffer-radio ...
- ❖ Erklärung der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Raum ... siehe 199 E-M-Welle.ppt ... in dieser PowerPoint kann man die Phasenverschiebung zwischen dem E- und B-Feld zeigen und warum man im Fernfeld diese Phasenverschiebung nicht feststellen kann.
- ❖ Tesla-Transformator ... Skineffekt
- ❖ Ausbreitungscharakteristik ... warum das E-M-Feld nicht mit  $1/r^2$  abfällt.

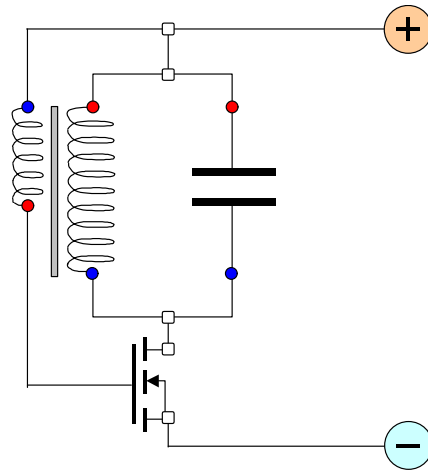
## Skin-Effekt

Eine besondere Motivation geht von einem Teslatransformator aus, bei dem man mit einem Metallstift (nicht mit der bloßen Haut! Die Stelle, an der der Funken landet, erhitzt sich und führt zu einem stechenden Schmerz!) einen Funken von mehr als 10cm bei einer Stromstärke von 100mA ziehen kann. Diese sonst tödliche Stromstärke ist bei der Frequenz von mehr als 500kHz ungefährlich, weil der Skineffekt – siehe rechtes Bild – dazu führt, dass der Strom an die Oberfläche gedrängt und dort „harmlos“ abfließt.



## Meißner-Schaltung

Die Betriebsspannung wird von 0V an hochgefahren, bis die Schwingung einsetzt. Die Arbeitspunkteinstellung erfolgt also über die Betriebsspannung. Wesentlich ist die richtige Ankopplung der Induktionsspule.

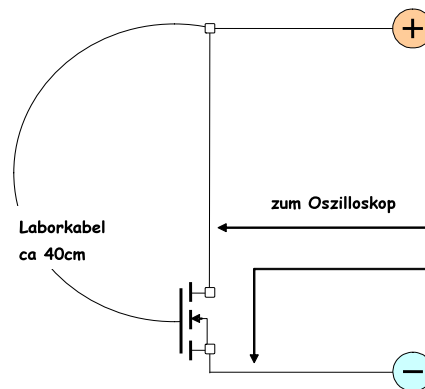


## MOSFET-Hochfrequenzschaltung

Die Spannung wird von 0V an hochgeregelt, bis die Schwingung einsetzt. Achtung: Der Einsatzpunkt ist sensibel ... um eine Zerstörung der Schaltung bei zu schnellem Hochfahren der Spannung zu vermeiden, empfiehlt sich der Einsatz einer elektrischen Energiequelle, die eine exakte Gleichspannung abgibt und die Stromgeregelt ist (max. Stromstärke 1A).

Achtung, das Laborkabel zur Rückkopplung darf nicht wesentlich länger oder kürzer als 40cm sein.

Zusammen mit der Schaltungskapazität und der Schaltungsinduktivität ergibt sich eine Frequenz im Bereich von 5MHz.



## Maxwell-Gleichungen

**vektorielle Form**  $\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}$

**Integralform:**  $\iint_A \vec{E} \circ d\vec{A} = \frac{1}{\varepsilon} \iiint_V \rho dV$

**Schule:** „Ladungen sind Quellen und Senken des elektrischen Feldes“  
 $D = \varepsilon \cdot \vec{E}$  oder das Coulomb'sche Gesetz!

**vektorielle Form**  $\operatorname{div} \vec{B} = 0$

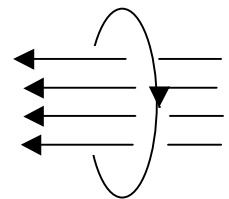
**Integralform:**  $\iint_A \vec{B} \circ d\vec{A} = 0$

**Schule:** „...die magn. Flussdichtelinien sind geschlossen...“  
 oder: „...es gibt keine Monopole...“

**vektorielle Form**  $\operatorname{rot} \vec{E} = -\dot{\vec{B}}$

**Integralform:**  $\oint_C \vec{E} \circ d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \iint_A \vec{B} \circ d\vec{A}$

**Schule:** „...ein sich änderndes magn. Feld wird von einem elektrischen Wirbel-Feld umschlossen...“  
 z.B.  $U_i = -\dot{\Phi}$  „Induktionsspannung“  
 oder „elektromotorische Kraft“



Faustregel: ..wenn das magnetische Feld anwächst, gilt die linke Handregel – siehe negatives Vorzeichen

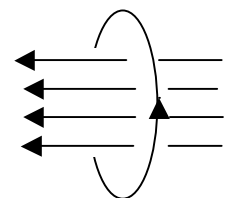
**vektorielle Form**  $\operatorname{rot} \vec{B} = \varepsilon \cdot \mu \cdot \dot{\vec{E}} + \mu \cdot \vec{j}$

**Integralform:**  $\oint_C \vec{B} \circ d\vec{s} = \mu \cdot \iint_A \vec{j} \circ d\vec{A} + \varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{d}{dt} \iint_A \vec{E} \circ d\vec{A}$

**Schule:** „... ein elektrischer Strom erzeugt ein Magnetfeld ...“

z.B.  $B = \mu \cdot \frac{n}{l} \cdot I$  ...schlanke Spule!

„...ein sich änderndes elektrisches Feld wird von einem magn. Wirbel-Feld umschlossen...“



Faustregel: .. wenn das elektrische Feld anwächst, gilt die rechte Handregel – siehe positives Vorzeichen ...