## Skript zum PVK zur Vorlesung

# **Netzwerke und Schaltungen 1**

für D-ITET

verfasst von

René Zurbrügg

D-ITET ETH Zürich

### Vorwort

Dieses Skript entstand als Beiblatt zum Prüfungsvorbereitungskurs "Netzwerk und Schaltungen 1" im Januar 2019. Es ist primär als Hilfe für die Studenten gedacht, mit dem Ziel, den Fokus auf die prüfungsrelevanten Themen zu legen. Fragen, Anregungen und vor allem Korrekturen sind willkommen und sollten an zrene@student.ethz.ch adressiert werden.

Die neuste Version des Skriptes befindet sich immer auf: n.ethz.ch/ zrene/nusl-pvk.html

Version 1.0.0

Version X.Y.Z

Neue Themen hinzugefügt Tippfehler / Grammati

Wichtige Änderungen (Formeln etc.)

## Inhaltsverzeichnis

1	Mathematische Grundlagen 4		
	1.1	Koordinatensysteme	4
		1.1.1 Karthesische Koordinaten	7
		1.1.2 Zylinderkoordinaten	8
			0
	1.2	Vektorfelder	2
	1.3	Weg und Oberflächenintegrale	
2	Elektrostatik 20		
	2.1	(Ladungs)-Dichte	
	2.2	Elektrische Flussdichte	
	2.3	Vorgehen zur Feldberechnung	
	2.4	Kondensator	
	2.5	Strom	
	2.6	Verhalten des J- und E-Feldes an Materialübergängen	
	2.0	2.6.1 Konsequenzen aus den Randbedingungen	
			_
3	Netz	zwerke 3	0
	3.1	Grundlegende Netzwerkumformungen	3
	3.2	Stern Dreieck Umformung	4
		3.2.1 Grundregeln bei Netzwerkumformungen	5
	3.3	Vereinfachungen mithilfe Symmetrieüberlegungen	6
	3.4	Vorgehen um Schaltbilder mit einer Quelle zu vereinfachen	6
	3.5	Quellen	7
	3.6	Ersatzquelllen	8
	3.7	Leistungsanpassung	0
	3.8	Superpositionsprinzip	.3
	3.9	Analyse umfangreicher Netzwerke	6
4	Mag	netostatik 4	7
	4.1	Das Magnetische Feld und die Lorentzkraft	.7
		4.1.1 Verhalten von B und H Feld an Randflächen	1
		4.1.2 Das Reluktanzmodell	1
	4.2	Spule und Induktivität	6
5	Zeitl	lich veränderliches Magnetfeld 6	0
	5.1	Induktion	0
	5.2	Charakteristische Gleichungen von Kapazität und Induktivität 6	0
6	Anh	ang 6	1
	6.1	Katalog S.9	1
	6.2	Katalog S.15	6
	63	Katalog S. 222	Q

### 1 Mathematische Grundlagen

#### 1.1 Koordinatensysteme

Häufig sind wir daran interessiert, geometrische Dinge in der Mathematik darzustellen um mit ihnen zu rechnen.

Um mit mathematischen Mitteln geometrische Probleme beschreiben zu können, müssen wir ein System einführen, wie wir Positionen im Raum und Richtungen charakterisieren können.

Zu diesem Zweck werden Koordinatensysteme eingeführt.

#### **Definition Koordinatensystem**

Ein Koordinatensystem dient zur eindeutigen Bezeichnung der Position von Punkten in einem geometrischen Raum.

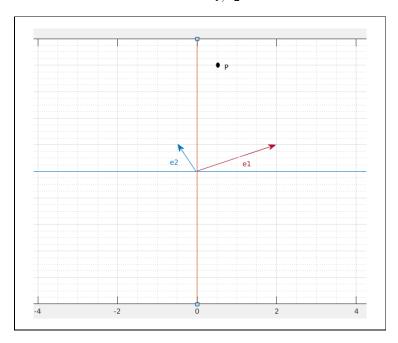
Befinden wir uns in einem 3-Dimensionalem Raum so werden 3 **Basisvektoren** benötigt, um jeden Punkt im Raum eindeutig zu definieren.

Möchten wir nun einen Punkt im Raum beschreiben, so müssen wir zuerst einen Punkt im Raum als Bezugspunkt (Ursprung) definieren.

Danach beschreiben wir den gesuchten Punkt als **linearkombination** der Basisvektoren. Die Koeffizienten der linearkombination bezeichnen wir dabei als Koordinaten.

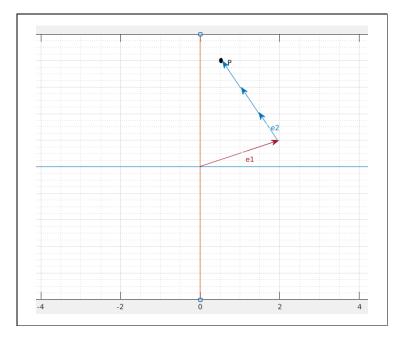
### Beispiel 1 Punkt im Koordinatensystem

Geben sie die Koordinaten des folgenden Punktes P im 2 Dimensionalen an. Als Basisvektoren verwenden wir die Vektoren:  $\vec{e}_1, \vec{e}_2$ 



#### Lösung

Um vom Ursprung den Punkt P mit den Basisvektoren  $\vec{e}_1$  und  $\vec{e}_2$  zu erreichen, müssen die Vektoren wie folgt kombiniert werden:



Somit gilt für den Punkt P:

$$\vec{P} = 1 \cdot \vec{e}_1 + 3 \cdot \vec{e}_2$$

$$\rightarrow P = \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix}$$

#### **Definition** Winkelabhängige Basisvektoren

In gewissen Koordinatensysteme werden Basisvektoren verwendet, dessen Richtung sich Abhängig des Winkels ändern.

Sie werden dazu verwendet, Punkte im Raum abhängig eines Winkels zu beschreiben.

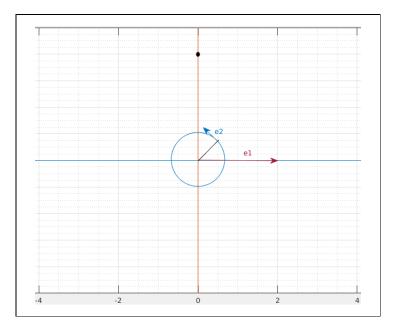
Der Basisvektor zeigt dabei immer in die Richtung des Winkels



#### Beispiel 2 Punkt im Koordinatensystem - Polarkoordinaten

Geben sie die Koordinaten des folgenden Punktes P im 2 Dimensionalen an.

Als Basisvektoren verwenden wir die Vektoren:  $\vec{e}_1, \vec{e}_2$ , wobei  $\vec{e}_2$  ein Winkelabhängiger Basisvektor ist.



#### Lösung

Da der Punkt P einen Winkel von  $90^{\circ} = \frac{\pi}{2}$  einschliesst, müssen wir ein Winkelabhängigen Basisvektor  $\vec{e}_2$  mit  $\frac{\pi}{2}$  multiplizieren.

Der Abstand des Punktes zum Ursprung beträgt 8 Einheiten, wobei der Vektor  $\vec{e}_1$  die Länge von 2 Einheiten besitzt.

Somit gilt für die Koordinaten des Punktes P in Abhängigkeit von  $\vec{e}_1, \vec{e}_2$ :

$$\vec{P} = \frac{\pi}{2} \cdot \vec{e}_2 + 4 \cdot \vec{e}_1$$

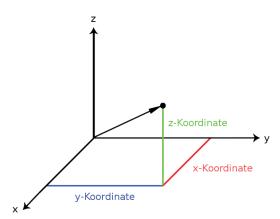
$$P = \begin{pmatrix} 4 \\ \frac{\pi}{2} \end{pmatrix}$$

#### 1.1.1 Karthesische Koordinaten

#### **Karthesische Koordinaten**

Karthesische Koordinaten werden als bekannt vorousgesetzt.

Karthesische Koord. werden vor allem dann verwendet, wenn die geometrische Anordnung **Symmetrien bezüglich einer Ebene** besitzt.



#### 1.1.2 Zylinderkoordinaten

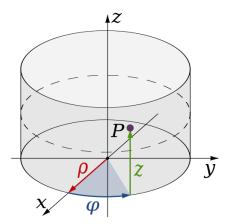
#### Zylinderkoordinaten

Zylinderkoordinaten werden meist dann Verwendet, wenn die geometrischen Anordnung Symmetrien bezüglich einer Gerade aufweist.

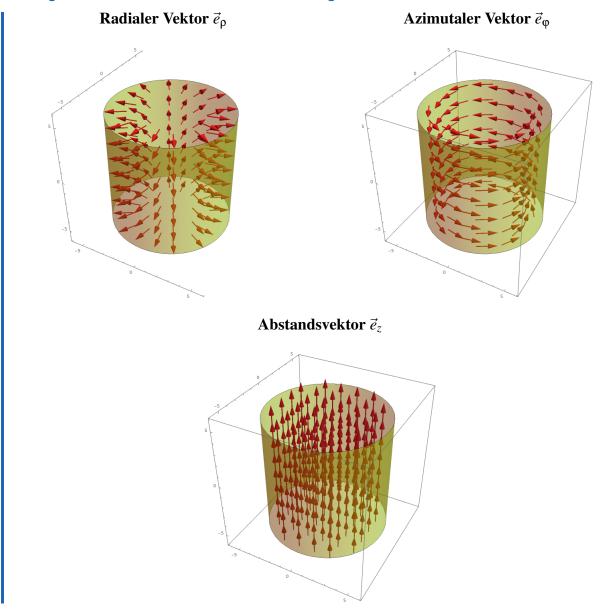
Zylinderkoordinaten besitzen 3 Basisvektoren wovon 1 Winkelförmig ist.

#### Basisvektoren

- 1.  $\vec{e}_{\rho}$  Beschreibt den Abstand zur Symmetrieachse 2.  $\vec{e}_{\phi}$  Beschreibt den Winkel des Punktes in der XY-Ebene 3.  $\vec{e}_z$  Beschreibt den Abstand auf der Symmetrieachse



### Richtung der einzelnen Besisvektoren für beliebige Punkte im Raum:



#### 1.1.3 Kugelkoordinaten

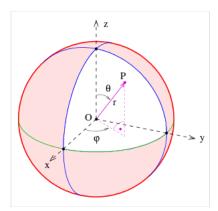
#### **Kugel Koordinaten**

Kugelkoordinaten werden meist dann verwendet, wenn die geometrischen Anordnung **Punkt-symmetrien** aufweist.

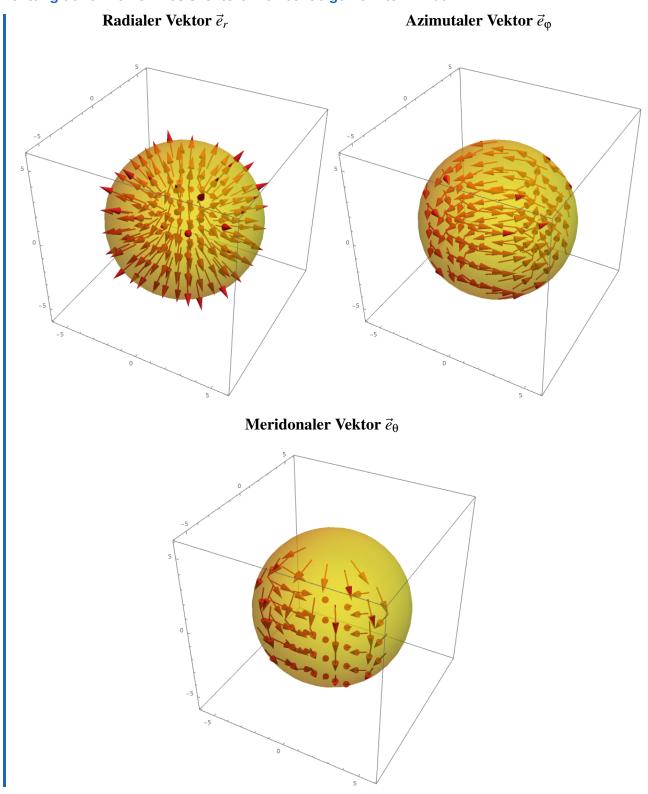
Kugelkoordinaten besitzen 3 Basisvektoren wovon 2 Winkelabhängig sind.

#### Basisvektoren

- 1.  $\vec{e}_r$  Beschreibt den Abstand zum Ursprung
- 2.  $\vec{e}_{\theta}$  Beschreibt den Winkel des Punktes in der ZY-Ebene
- 3.  $\vec{e}_{\phi}$  Beschreibt den Winkel des Punktes in der XY-Ebene



### Richtung der einzelnen Besisvektoren für beliebige Punkte im Raum:



#### 1.2 Vektorfelder

Möchten wir eine physikalische Grösse im Raum beschreiben, so sind wir häufig nicht nur an den ortsabhängigen Punkten interessiert.

Meistens möchten wir jedem Punkt im Raum eine Richtung zuordnen.

Möchten wir beispielsweise die Erdanziehungskraft modellieren, so wollen wir jedem Punkt im Raum einen **Vektor** zuweisen, der in Richtung der Kraftwirkung zeigt.

Seine Länge soll zudem die Information beinhalten, wie stark die Kraft an diesem Punkt wirkt.

#### **Defintion** Vektorfeld

Ein Vektorfeld, bezeichnet eine mathematische Funktion, welche anstatt einer skalaren Grösse Vektoren zurück gibt.

Häufig ist ein Vektorfeld nicht nur von einer Variable (x) abhängig, sondern besitzt 3 Parameter (x,y,z) die wir manchmal als Ortsvektor  $\vec{r}$  zusammenfassen.

#### **Beispiel Vektorfeld - Gravitation**

Möchten wir Beispielsweise das Gravitationsfeld der Erde mathematisch beschreiben, würden wir dies in Form eines Vektorfeldes tun.

Dieses Vektorfeld soll jedem Punkt einen Kraftvektor zuweisen, welche in richtung Erdmittelpunkt zeigt.

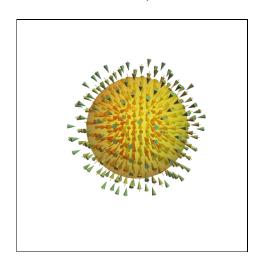
Da die Erde Punktsymmetrisch ist, ist es sinnvoll Kugelkoordinaten zu verwenden.

Die Stärke der Gravitationskraft auf ein Massepunkt der Masse m ist definiert als:

$$F_M = \frac{M \cdot G}{r^2}$$

Somit folgt für das Vektorfeld, das die Gravitationskraft beschreibt:

$$\vec{F}_M(r, \theta, \varphi) = \frac{M \cdot G}{r^2} \cdot (-\vec{e}_r)$$



#### 1.3 Weg und Oberflächenintegrale

#### Gleichung Wegintegral über ein Vektorfeld

Wegintegrale beschreiben die Auswirkungen eines Vektorfeld auf ein Teilchen, welches sich entlang eines Weges bewegt.

Sie können in unserem Fall, häufig als ein Mass der Arbeit welche aufgewendet werden muss, um ein Teilchen von A nach B zu bewegen, aufgefasst werden.

Wir notieren das Wegintegral über einen Weg γ folgendermassen:

$$\int_{\gamma} \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Können wir den Weg  $\gamma$  als mathematische Funktion von t ausdrücken, so lässt sich das Integral folgdendermassen darstellen:

$$\int_{t_0}^{t_e} \vec{E}(\gamma(t)) \cdot \dot{\vec{\gamma}}(t) \cdot dt$$

#### Variablen

 $\gamma(t_0)=$  Startpunkt ,  $\dot{\gamma}(t_e)=$  Endpunkt ,  $\dot{\dot{\gamma}}(t)=$  Zeitliche Ableitung der Kurve

Das Integral selbst ist relativ schwer zu rechnen. Häufig lässt es sich jedoch vereinfachen: Ist der Weg **parallel zur Richtung des Feldes**, so vereinfacht sich das Integral über eine vektorielle Grösse zu einem Integral über eine skalare Grösse

$$\int_{\gamma} \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_{A}^{B} E(r) \cdot dr$$

#### Variablen

A =Startpunkt des Weges

B =Endpunkt des Weges

Für den Fall, dass das Feld auf dem **gesamten Weg konstant** ist, lässt es sich noch weiter vereinfachen:

$$\int_{\gamma} \vec{E} \cdot d\vec{s} = l_{AB} \cdot |\vec{E}|$$

#### Variablen

 $l_{AB}$  = Länge des Weges im Feld

Ist das Feld konstant, schliesst aber mit dem Weg **immer einen Winkel**  $\phi$  ein, so gilt für das Integral:

$$\int_{\gamma} \vec{E} \cdot d\vec{s} = l_{AB} \cdot |\vec{E}| \cdot cos(\varphi)$$

#### Variablen

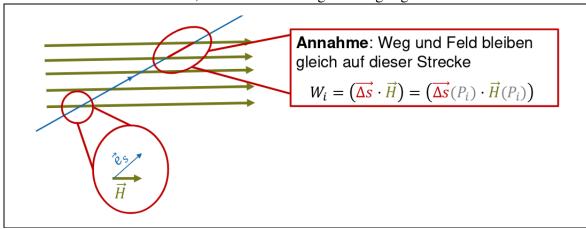
φ = Winkel zwischen Wegrichtung und Richtung des Feldes

#### Begründung Wegintegral

Wir betrachten ein Vektorfeld  $\vec{H} = H \cdot \vec{e}_H$  (Grün) und ein Weg  $\vec{s} = s \cdot \vec{e}_s$  (Blau).

Wir interessieren uns dafür, wie viel Arbeit wir aufwenden müssen, um uns von Punkt A (unten Links) nach Punkt B (oben Rechts) zu bewegen.

Wir gehen nun davon aus, dass auf einem sehr kleinem Wegstück  $\Delta s$  sich die Richtung und Stärke des Feldes nicht ändert, sowie die Richtung des Weges gleich bleibt.



Die Arbeit  $W_i$  bezeichnen wir, als die Arbeit, welche wir aufwenden müssen, um uns auf dem Weg  $\gamma$  um ein stück  $\Delta s$  nach vorne zu bewegen.

Diese Arbeit ist Abhängig davon, wie Weg und Feld geometrisch stehen. Möchten wir uns senkrecht zum Feld bewegen, so hindert das Feld uns nicht daran, uns in diese Richtung zu Bewegen, und die Arbeit ist gerade 0.

Möchten wir uns hingegen parallel zum E-Feld bewegen, so müssen wir maximale Arbeit verrichten, da das E-Feld uns maximal beeinflusst.

Den Winkel, welcher das Feld mit dem Weg einschliesst ist gegeben als  $cos(\varphi) = \vec{e}_s \cdot \vec{e}_H$ . Somit gilt für die Arbeit, welche auf dem Weg  $\Delta s$  aufgewendet wird:  $W_i = |H(P_i)| \cdot \Delta s \cdot \vec{e}_s \cdot \vec{e}_H = \vec{H}(P_i) \cdot \Delta \vec{s} \cdot \vec{e}_i$ 

Für den gesamten Weg gilt somit:  $W_{ges} = \sum_{i} W_{i} = \sum_{i} \vec{e}_{H} = \vec{H}(P_{i}) \cdot \Delta \vec{s}(P_{i}) \Rightarrow i \rightarrow \infty$ 

$$W_{ges} = \int_A^B \vec{H}(\vec{P}) \cdot d\vec{s}$$

Ist der Weg s als Funktion gegeben, mit  $s(t_0) = A$  und  $s(t_e) = B$ , so gilt für den Punkt P:  $\vec{P} = \vec{s}(t)$  und den kleinen Richtungsvektor  $d\vec{s}$  des Weges:

$$\vec{s}(t) = \begin{pmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{pmatrix} \qquad | \quad \frac{d}{dt}(.)$$

$$\frac{d}{dt}(\vec{s}(t)) = \dot{\vec{s}}(t) \qquad | \quad \cdot dt$$

$$d\vec{s}(t) = \dot{\vec{s}}(t) \cdot dt = \begin{pmatrix} \dot{f}_1(t) \\ \dot{f}_2(t) \end{pmatrix} \cdot dt$$

Und somit für das Gesamte Integral:

$$\int_{A}^{B} \vec{H}(\vec{P}) \cdot d\vec{s} = \int_{t_0}^{t_e} \vec{H}(\vec{s(t)}) \cdot \dot{\vec{s}}(t) \cdot dt$$

#### Beispiel 3 Wegintegral über ein Vektorfeld

Gegeben sei das Vektorfeld in den Karthesischen Koordinaten 
$$\vec{E}(x,y,z) = \begin{pmatrix} x+2y \\ 5z \\ x \end{pmatrix}$$
Berechnen sie das Wegintegral, über eine Gerade vom Punkt  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  zu  $\begin{pmatrix} 5 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$ 

#### Lösung

Zuerst müssen wir die Gerade vom Punkt (0,0,0) zu (5,2,1) als Funktion Parameterisieren. Aus der Vektorrechnung folgt für die Geradengleichung:

$$\gamma(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 5 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot t = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Somit gelten für Anfang und Endpunkte unserer Kurve:

$$A = (0,0,0)^T = \gamma(0) \rightarrow t_0 = 0$$
  
 $B = (5,2,1)^T = \gamma(1) \rightarrow t_e = 1$ 

Für  $d\vec{\gamma}$  folgt:

$$d\vec{\gamma} = \dot{\gamma} \cdot dt = \begin{pmatrix} \frac{d}{dt}(5 \cdot t) \\ \frac{d}{dt}(2 \cdot t) \\ \frac{d}{dt}(1 \cdot t) \end{pmatrix} \cdot dt = \begin{pmatrix} 5 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot dt$$

Und für  $\vec{E}(\vec{\gamma}(t))$ :

$$\vec{P} = \gamma \vec{(t)} = \begin{pmatrix} 5t \\ 2t \\ 1t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow \vec{E}(\vec{P}) = \begin{pmatrix} 5t + 2 \cdot 2t \\ 5 \cdot 1t \\ 5t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 9t \\ 5t \\ 5t \end{pmatrix}$$

Somit folgt für das Integral:

$$\underbrace{\int_{\gamma} \vec{E} \cdot d\vec{\gamma}}_{\gamma} = \int_{0}^{1} \begin{pmatrix} 9t \\ 5t \\ 5t \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 5 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot dt = \int_{0}^{1} 45t + 10t + 5t \cdot dt = \int_{0}^{1} 60t \cdot dt = \underline{\underline{30}}$$

#### Beispiel 4 Wegintegral in Kugelkoordinaten

Gegeben sei das Vektorfeld in Kugelkoordinaten 
$$\vec{E}(r, \theta, \phi) = \begin{pmatrix} 5 \cdot r^2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = 5 \cdot r^2 \cdot \vec{e}_r$$

Berechnen sie das Wegintegral, über eine Gerade (in Kugelkoordinaten) vom Punkt  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  zu

$$\left(\begin{array}{c}5\\0\\0\end{array}\right)$$

#### Lösung

#### **Inuitive Lösung:**

Da der Weg parallel zum Feld ist  $(\vec{e}_{\gamma} = \vec{e}_{E})$  vereinfacht sich das Wegintegral zu einem Skalaren Integral:

$$\int_{\gamma} \vec{E} \cdot d\vec{\gamma} = \int_{0}^{5} 5 \cdot r^{2} dr = \frac{1}{3} \cdot 5 \cdot 125 = \frac{625}{3}$$

#### Mathematische Lösung

Wir beschreiben die Kurve  $\gamma$  in Kugelkoordinaten:

$$\gamma(t) = 5 \cdot t \cdot \vec{e}_r$$

Somit folgt für  $d\vec{\gamma}$ 

$$d\vec{\gamma} = 5 \cdot \vec{e}_r \cdot dt$$

Und für das Integral:

$$\int_{\gamma} \vec{E} \cdot d\vec{\gamma} = \int_{0}^{1} \vec{E} \cdot 5 \cdot \vec{e}_{r} = \int_{0}^{1} 5 \cdot (5t)^{2} \cdot \vec{e}_{r} \cdot 5 \cdot \vec{e}_{r} dt = \int_{0}^{1} 5^{4} \cdot t^{2} dt = \frac{1}{3} \cdot 5 \cdot 125 = \frac{625}{3}$$

#### **Gleichung** Fluss eines Vektorfeldes

Die Folgende Gleichung bezeichnen wir als Oberflächenintegral des Vektorfeldes  $\vec{E}$ . Der Wert des Integrales gibt uns eine Information darüber, wieviel Feld durch eine gegebene Hüllfäche "fliesst"

$$\Phi = \iint\limits_{A} ec{E} \cdot dec{A}$$

#### Variablen

 $\vec{E} = \text{ein Vektorfeld}$ 

A = Fläche, welche geschlossen ist

 $\vec{A}$  = Normalenvektor der Fläche

Das Integral selbst ist relativ schwer zu rechnen. Häufig lässt es sich jedoch vereinfachen: Steht das Vektorfeld **senkrecht** zur Hüllfläche und ist es auf der gesamten Fläche **Konstant**, so gilt für das Integral:

$$\iint\limits_{A} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \pm A_{eff} \cdot |\vec{E}|$$

#### Variablen

 $A_{eff} = \text{Die Fläche}$  auf der das Feld ungleich 0 ist

Ist das Feld zwar Konstant auf der gesamten Fläche, fliesst jedoch **nicht senkrecht** hindurch, so lässt sich das Integral auch zu einer Multiplikation vereinfachen:



$$\iint\limits_{A} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \pm A_{eff} \cdot |\vec{E}| \cdot cos(\varphi)$$

#### Variablen

φ = Winkel zwischen Vektorfeld und Flächennormale

### Beispiel 5

Wir betrachten ein Rohr der Länge L und mit Radius R.

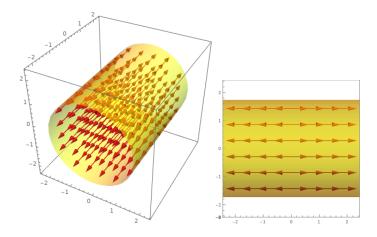
In der Mitte des Rohres im Ursprung des Koordinatensystems befindet sich eine Wasserquelle, welche eine gewisse Menge Wasser generiert.

Die Flussdichte des Wassers, ist durch folgendes Vektorfeld gegeben:

$$\vec{J}_{wasser}(x,y,z) = \begin{cases} 1 \cdot \vec{e}_y \cdot \left[\frac{L}{s \cdot m^2}\right] &: (x^2 + z^2) \le R, y > 0 \\ -1 \cdot \vec{e}_y \cdot \left[\frac{L}{s \cdot m^2}\right] &: (x^2 + z^2) \le R, y \le 0 \\ 0 \cdot \vec{e}_y \cdot \left[\frac{L}{s \cdot m^2}\right] &: sonst \end{cases}$$

- 1. Zeichne das Vektorfeld in einem 3-Dimensionalen Koordinatensystem.
- 2. Berechne sie das Oberflächenintegral  $\iint_A \vec{J} \cdot d\vec{A}$  nach Aussen, wobei A die Oberfläche des Rohres mit den beiden Kreisen am Ende bezeichne.

1.



#### 2. Intuitiver Weg

Da das Vektorfeld nur auf den Kreisflächen ungleich Null ist, müssen wir nur das Oberflächenintegral über diese Kreisflächen berechnen.

Da das Vektorfeld auf den Kreisflächen senkrecht steht und Konstant ist, vereinfacht sich dieses Integral zu einer Multiplikation mit der Fläche:

#### **Mathematischer Weg**

$$\iint_A \vec{J} \cdot d\vec{A} = \iint_{Mantel} 0 \cdot d\vec{A} + \iint_{Kreise} \vec{J} d\vec{A}$$

Wir bezeichnen nun mit  $K_1$  die erste Kreisfläche des Zylinders bei  $y = -\frac{L}{2}$  und mit  $K_2$  die zweite Kreisfläche bei  $y = \frac{L}{2}$ . Somit folgt für das Integral:

$$\iint_A \vec{J} \cdot d\vec{A} = \iint_{K_1} -1\vec{e_y} \cdot d\vec{A} + \iint_{K_2} 1\vec{e_y} \cdot d\vec{A}$$

Die Flächennormalen auf der ersten Kreisfläche zeigt nach  $(-e_y)$ , die der 2. Kreisfläche nach  $(e_y)$ :

$$K_{1}: d\vec{A} = (-\vec{e}_{y}) \cdot dA, K_{2}: d\vec{A} = \vec{e}_{y} \cdot dA$$

$$\to \iint_{K_{1}} \vec{J} \cdot d\vec{A} = \iint_{K_{1}} -1\vec{e}_{y} \cdot (-\vec{e}_{y}) dA + \iint_{K_{2}} 1\vec{e}_{y} \cdot \vec{e}_{y} dA$$

$$= 1 \cdot \iint_{K_{1}} dA + 1 \cdot \iint_{K_{2}} dA = \pi \cdot R^{2} + \pi \cdot R^{2} = 2 \cdot \pi \cdot R^{2}$$

#### 2 Elektrostatik

Elektrisch geladene Teilchen, welche sich in der Nähe eines anderen, geladenen Teilchen befinden, verspüren eine Kraftwirkung, die Abhängig der eigenen Ladung ist.

Um diese Kraftwirkung zu beschreiben, wurde der Begriff des Elektrischen Feldes eingeführt.

#### **Definition** Elektrisches Feld

Das Elektrische Feld, beschreibt die Kraftwirkung auf geladene Teilchen im Raum. Es ordnet jedem Punkt im Raum einen Vektor  $\vec{E}$  zu, der in die Richtung der Kraftwirkung zeigt. Für die Kraftwirkung auf ein Teilchen mit der Ladung Q und dem Ortsvektor  $\vec{r}$  gilt:

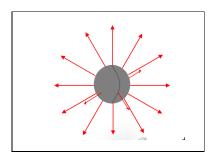
$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}(\vec{r})$$

#### Einige wichtige Felder

#### Beispiel E-Feld einer Punktladung

Das Elektrische Feld einer Punk tladung Q ist gegeben als:

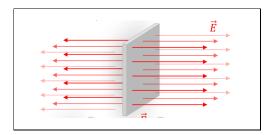
$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \vec{e}_r$$



#### Beispiel E-Feld einer Platte

Das Elektrische Feld einer Platte mit Ladung Q ist gegeben als:

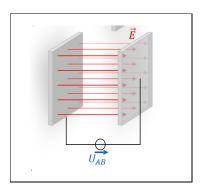
$$\vec{E} = \begin{cases} \frac{Q}{2 \cdot A \varepsilon} \cdot \vec{e}_n & , y > y_0 \\ \frac{-Q}{2 \cdot A \varepsilon} \cdot \vec{e}_n & , y <= y_0 \end{cases}$$



#### **Beispiel E-Feld eines Kondensators**

Das Elektrische Feld in einem Kondensator mit Der Ladung Q oder Spannung U ist gegeben als:

$$\vec{E} = \frac{Q}{A\varepsilon} \cdot \vec{e}_d = \frac{U}{d} \vec{e}_d$$



#### 2.1 (Ladungs)-Dichte

In der Physik

#### 2.2 Elektrische Flussdichte

Quelle des Elektrischen Feldes sind geladene Teilchen. Jedoch hängt das Elektrische Feld davon ab, in was für einem Material wir uns befinden.

Das Elektrische Feld in einem Metall ist zum Beispiel kleiener, als das Elektrische Feld im Vakuum. Grund dafür ist die **elektrische Influenz**, welche das Ursprüngliche Feld abschwächt) Um gewisse Rechnungen zu vereinfachen, definieren wir ein neues Feld.

#### **Definition** Die Elektrische Flussdichte

Die elektrische Flussdichte  $\vec{D}$  beschreibt das Feld, welches existieren würde, falls kein Material vorhanden wäre.

Da die elektrische Flussdichte  $\vec{D}$  unabhängig vom Material ist und aussschliesslich von den Ladungsträger abhängig ist, gibt es eine Formel, die die beiden Grössen in Verbindung bringt:

#### **Gleichung** Quellgleichung des elektrischen Flusses

$$\Psi := \oiint ec{D} \cdot dec{A} = Q_{eff}$$

Falls Feld senkrecht auf Fläche und Konstant

$$D=|rac{Q_{eff}}{A_{eff}}|$$

#### Variabeln:

 $\Psi = \text{Elektrischer Fluss } [\Psi] = A \cdot s$ 

D = Elektrische Flussdichte  $[D] = \frac{As}{m^2}$   $Q_{eff} =$  Von der Fläche eingeschlossene Ladung  $[Q] = A \cdot s$   $A_{eff} =$  Fläche, durch die das D-Feld durchfliesst $[A] = m^2$ 

### Beispiel 6 Berechnung des D-Feldes einer Kugel

Eine Kugel sei mit der Ladung 20C gefüllt. Die Kugel habe den Radius R = 2cm und alle Ladungsträger verteilen sich auf der Kugeloberfläche.

Berechne das  $\vec{D}$ -Feld der Kugel.

#### Lösung

Um das D-Feld der Kugel anzugeben, müssen wir zuerst ein passendes Koordinatesystem wählen.

Da wir mit einer Kugel rechnen, muss das Feld Punktsymmetrisch sein und einzig der Abstand zum Kugelmittelpunkt bestimmt wie gross das D-Feld ist.

Aufgrund dieser Überlegung, werden wir **Kugelkoordinaten** verwenden. (Hätten wir etwas, das Symmetrisch zur Z-Achse ist, so würden wir Zylinderkoord. verwenden etc.).

Um die Gleichung für den Elektrischen Fluss anwenden zu können, müssen wir eine Hüllfläche finden, auf der das D-Feld Konstant ist.

Da die Anordnung eine Kugel ist, verwenden wir als Hüllfläche eine Kugel mit radius r. Nun können wir die Quellgleichung verwenden:

$$\iint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q_{eff} \rightarrow D \cdot 4\pi r^2 = Q_{eff}$$

Der Betrag des D-Feldes entspricht also gerade der von der Hullfläche eingeschlossenen Ladung geteilt durch die Fläche.

Für den Fall, dass wir die Hüllfläche grösser als die Kugel wählen, schliessen wir alle Ladungen ein:

r > R

$$Q_e f f = 20C$$

$$D = \frac{20C}{4\pi r^2}$$

$$\vec{D} = D \cdot \vec{e}_r$$

Falls unsere Hüllfläche im inneren der Kugel ist, so schliessen wir keine Ladung ein:  ${\bf r}<{\bf R}$ 

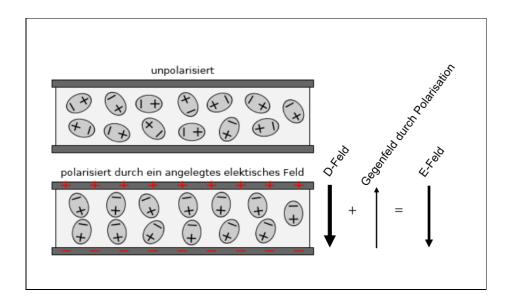
$$Q_e f f = 0C$$
$$\vec{D} = 0$$

Somit gilt für das D-Feld einer Kugel mit Ladungen auf der Oberfläche:

$$\vec{D}(r) = egin{cases} 0 & r < R \ rac{20C}{4\pi r^2} \cdot \vec{e}_r & r > R \end{cases}$$

Da die elektrische Flussdichte nur von den Ladungsträgern abhängig ist, lässt sie sich realtiv einfach berechnen und bildet meist den Grundstein für das Berechnen von E-Feldern usw.

"Fliesst"eine elektrische Flussdichte durch ein Material mit Ladungsträgern, so wird diese abgeschwächt, da sich im inneren des Materiales ein elektrisches Feld entgegen dem von Aussen angelegtem Feld ausbildet.



#### Gleichung **Zusammenhang E-Feld und D-Feld**

$$\vec{E} = \frac{1}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \cdot \vec{D}$$

#### Variabeln:

 $D = \text{Elektrische Flussdichte} [D] = \frac{As}{m^2}$ 

 $E = \text{Elektrisches Felder}[E] = \frac{V}{m}$ 

 $\epsilon_0 = \text{Dielektrizitätskonstante } [\epsilon_0] = \frac{C}{V \cdot m}$   $\epsilon_r = \text{rel. Permitivität. Unterschiedlich im Material } [\epsilon_r] = []$ 

#### Verhalten von Feldgrössen bei Materialübergängen

Trifft eine Elektrische Flussdichte durch eine geladene Fläche, so verändert sich die Normalkomponente des D-Feldes.

Die Tangentialkomponente des Feldes bleibt jedoch konstant.

$$\vec{D}_1 = \vec{D}_{1t} + \vec{D}_{1n} \Rightarrow \vec{D}_2 = \vec{D}_{1t} + (1 + \sigma) \cdot \vec{D}_{1n}$$

#### Definition **Spannung**

Wir definieren die Spannung zwischen zwei Punkten als das Wegintegral über das elektrische Feld:

$$U_{AB} := \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

[U] = Volt[V]

#### **Bemerkung zur Spannung**

- Da die Beziehung  $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$  gilt und die Arbeit als  $W_{AB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s}$  definiert ist, können wir die Spannung zwischen zwei Punkten als **Maß der benötigten Arbeit** um ein Ladungsträger von A nach B zu bringen betrachten.
- Die Spannung ist unabhängig des Weges.  $U_{AC} = U_{AB} + U_{BC}$  $\Rightarrow$  Start- und Endwert sind ausreichend.
- ullet Die Spannung über einen Weg zurück zum Anfangsort entspricht 0V:  $U_{AB}+U_{BA}=0$
- Ist die Spannung auf dem gesamten Weg konstant und parallel zum Weg, vereinfacht sich das Integral zu einer Multiplikation:

$$U_{AB} = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s} = l_{AB} \cdot E$$

### 2.3 Vorgehen zur Feldberechnung

### ✓ Vorgehen Feldberechnungen für eine gegebene Anordnung

- 1. Überlege, ob Superpositionsprinzip
- 2. Versuche die Symmetrie der Anordnung herauszufinden und entscheide dich für ein Koordinatensystem:

 $Punktsymmetrisch \rightarrow Kugelkoordinaten$ 

Achsensymmetrisch → Zylinderkoordinaten

Symmetrisch zu einer Ebene → Karthesischekoordinaten

- 3. Falls Ladungsdichte oder Ladung gegeben, suche Hüllfläche, auf der das Feld Konstant ist.
- 4. Verwende  $\iint_{A} \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q \Rightarrow D = \frac{Q_{eff}}{A_{eff}}$

5.

#### 2.4 Kondensator

Bringen wir 2 Platten mit verschiedenen Ladungsträger nah zu einander, so bildet sich ein elektrisches Feld zwischen den Platten.

Die Stärke des elektrischen Feldes ist abhängig der Plattenladung und der Flächen der Platten.

#### **Definition Kondensator**

Ein Kondensator ist ein Bauelement, das in der Lage ist elektrische Ladung und somit Energie in Form von Feldlinien zu speichern.

Die charakteristische Kenngrösse des Kondensators ist die Kapazität C.

Die im Feld eines Kondensators gespeicherte Energie entspricht  $W = \frac{1}{2}C \cdot U^2$ 

#### **Definition** Kapazität

Die elektrische Kapazität C beschreibt die Fähigkeit eines Bauelementes, Ladung Q bei einer gewissen Spannung U zu speichern.

$$C = \frac{Q}{U}$$

In Abhängigkeit der Felder, lässt sich die Kaazität folgendermassen beschreiben:

$$C = \frac{\iint_A \vec{D} \cdot d\vec{A}}{\int_S \vec{E} \cdot d\vec{s}}$$

Falls das Feld senkrecht auf der Hüllfläche steht und der Integrationsweg parallel zum E-Feld verläuft gilt:

$$C = \frac{D \cdot A_{eff}}{\int_A^B E \cdot ds}$$

#### **Gleichung** Kapazität eines Plattenkondensators

Bei einem Plattenkondensator mit Flächen A und Abstand d, der mit einem Dielektrikum mit Konstante  $\varepsilon$  gefüllt ist, gilt:

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d}$$

#### Variabeln:

 $A = \text{Fläche einer Platte } [A] = m^2$ 

d = Abstand der Platten [d] = m

 $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$  Dielektrikum zw. den Platten  $[\varepsilon] = \frac{C}{V \cdot m}$ 

Begründung Da das E-Feld eines Plattenkondensators Konstant ist, gilt für die Kapazität:

$$C = \frac{D \cdot A_{eff}}{E \cdot d}$$

Mit dem Zusammenhang  $D = \varepsilon \cdot E$  und der Erkenntniss, dass das Feld nur auf der einen Seite der Platte existiert folgt:

$$C = \frac{E \cdot \varepsilon \cdot A_{eff}}{E \cdot d} = \underbrace{\frac{A}{d}}_{E}$$

#### **Definition** Serienschaltung von Kapazitäten

Werden mehrere Kapazitäten seriell miteinander verbunden, so addieren sich die Kehrwerte der Kapazität

$$\frac{1}{C_{ges}} = \sum_{i=0}^{n} \frac{1}{C_i} \left| C_{ges} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = (C_1 || C_2) \right|$$

#### Begründung

Die Definition der Kapazität ist genau gegensätzlich zu der des Widerstandes  $(R \propto \frac{l}{A}, C \propto \cdot \frac{A}{d})$  Werden Kondensatoren in Serie geschaltet, so vergrößert sich der effektive Abstand der Platten, weshalb wir die Kehrwerte addieren müssen.

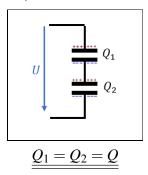
#### **Definition** Parallelschaltung von Kapazitäten

Werden mehrere Kapazitäten parallel miteinander verbunden, so addieren sich die Kapazitäten

$$C_{ges} = \sum_{i=0}^{n} C_i$$

#### **Definition** Ladungserhaltung in der Serienschaltung

Werden Kapazitäten in Serie geschaltet, besitzen alle dieselbe Ladung Q.

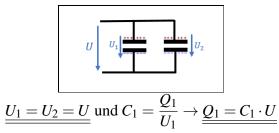


#### Begründung

Damit sich auf dem ersten Kondensator die Ladung  $Q_1$  ansammeln kann, muss diese Ladung unterhalb des Kondensators angesammelt werden. Angenommen, beide Kondensatoren waren zu Beginn ungeladen, so muss die Ladung, welche sich auf der unteren Platte des ersten Kondensators befindet, dieselbe Ladungsmenge auf der oberen Platte des unteren Kondensators hervorrufen.

#### **Definition** Maschenregel bei Parallelschaltung

Die Maschenregel für Spannung gilt auch bei Kondensatoren



#### 2.5 Strom

Legen wir ein elektrisches Feld an einem Material mit beweglichen Ladungsträgern an, so beginnen sich die Ladungsträger entlang dem angelegten Feld zu bewegen.

Je mehr freie Ladungsträger pro Volumen vorhanden sind  $(:= \rho)$ , desto mehr Ladungsträger werden sich zu bewegen beginnen.

Die Geschwindigkeit (:= v, Driftgeschwindigkeit), mit der sich die Ladungsträger bewegen, ist abhängig von der Stärke des Elektrischen Feldes und dem Material selbst. Wie gut sich ein Ladungsträger in einem Material bewegen kann, beschreiben wir mit der Beweglichkeit (:=  $\mu$ )

#### **Definition** Strom und Stromdichte

Der Strom I bezeichnet, wie viele Teilchen sich pro Zeit durch eine Fläche bewegen. Die Stromdichte J sagt etwas darüber aus, wie viel Strom pro Fläche fliesst (= Dichte)

$$I := \frac{dQ}{dt} = \iint_A \vec{J} \cdot d\vec{A}$$

#### Variabeln:

 $I = \text{Strom} [I] = A = \frac{C}{s}$ 

$$\vec{J} = \underbrace{n \cdot q}_{\rho} \vec{v} = \kappa \cdot \vec{E}$$

#### Variabeln:

 $\vec{J}$  = Stromdichte  $[J] = \frac{A}{m^2}$  n = Teilchendichte  $[n] = \frac{1}{m^3}$ 

q = Ladungen der Teilchen[q] = C = As

 $\vec{v}$  = Driftgeschwindigkeit  $[v] = \frac{m}{s}$   $\rho$  = Raumladungsdichte  $[\rho] = \frac{As}{m^3}$ 

 $\kappa = \text{Elektrische Leitfähigkeit } [\kappa] = \frac{A}{V_{\text{vm}}}$ 

Grundlage für den Strom sind bewegte Ladungsträger.

Im Falle eines Kupferkabel sind dies zum Beispiel Elektronen, die sich gegen das Elektrische Feld bewegen. Da Elektronen jedoch eine negative Ladung besitzen und der Strom als Ladung pro Zeit die durch eine Fläche hindurchfliesst definiert ist, zählen negative Ladungen, die entgegen dem Strom fliessen, zum Strom hinzu.

$$J := n \cdot q \cdot \vec{v}_I = n \cdot (-e) \cdot (-\vec{v}_I)$$

In anderen Baustoffen (wie zum Beispiel Halbleitern), bewegen sich **positive Ladungsträger** (=Löcher) mit dem Elektrischen Feld.

Diese führen zu einem positiven Strom in dessen Bewegungsrichtung.

Je nach Material, ist es auch möglich, dass beide Ladungsträger zum Stromfluss beitragen, sich jedoch nicht gleich gut im Material bewegen können.

Aus diesem Grund, gibt es für Positive wie negative Ladungen verschiedene Beweglichkeiten.

#### **Definition** Elektrische Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit (k) beschreibt, wie Gross die Stromdichte in einem Material, bei einem gegebenen E-Feld wird.

$$\vec{J} = \kappa \cdot \vec{E} = \vec{J_-} + \vec{J_+} = \underbrace{\left(n_- \cdot q_- \cdot \mu_- + n_+ \cdot q_+ \cdot \mu_+\right)}_{\kappa} \cdot \vec{E}$$

Dabei bezeichnen die Variabeln  $\mu_x$  die **Beweglichkeit** der einzelnen Ladungsträger und sind ein Mass dafür, wie schnell sich die Teilchen bei einem gegebenem E-Feld bewegen werden.

### 2.6 Verhalten des J- und E-Feldes an Materialübergängen

Triftt eine Stromdichte auf einen Materialübergang, so ändert sich der Betrag der Tangentialkomponente. Die Normalkomponente bleibt gleich.

Es gilt bei Materialübergängen:

Für das J-Feld:

$$\frac{tan(\alpha_1)}{tan(\alpha_2)} = \frac{J_{t1}}{J_{t2}}$$
$$J_{n1} = J_{n2}$$

Für das E-Feld:

$$\frac{tan(\alpha_1)}{tan(\alpha_2)} = \frac{E_{n2}}{E_{n1}}$$
$$E_{t1} = E_{t2}$$

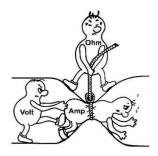
#### 2.6.1 Konsequenzen aus den Randbedingungen

todo

#### 3 Netzwerke

#### **Definition** Widerstand und Leitwert

Der Widerstand bestimmt, wieviel Strom fließen kann, wenn eine bestimmte Spannung angelegt wird.



$$R := \frac{U}{I} = \rho \frac{l}{A}, [R] = \Omega, Ohm$$

Als **Leitwert** bezeichnen wir die Inverse des Widerstandes. Er gibt an, wie groß die Spannung ist, wenn ein gewisser Strom fließt.

$$Y = \frac{1}{R} = \frac{A}{\rho \cdot l}$$

Da das elektrische Feld wirbelfrei ist, erhalten wir unabhängig vom Weg den gleichen Wert für die Spannung  $U_{AB}$ 

30

Dies bedeutet jedoch auch, dass wir für einen geschlossenen Weg die Spannung 0V erhalten müssen, da für jede geschlossene Kurve  $\gamma$  gilt:

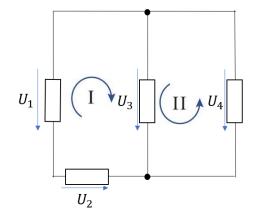
$$\oint_{\gamma} \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_{\gamma_0}^{\gamma_1} \vec{E} \cdot d\vec{s} + \int_{\gamma_1}^{\gamma_0} \vec{E} \cdot d\vec{s} = U_{01} + U_{10} = 0$$

Mit dieser Erkenntnis können wir die Maschenregel definieren:

#### **Definition** Maschenregel

Die Summe aller Spannungen in einer Masche ergibt 0

$$\sum_{k=1}^{n} U_k = 0$$



#### Maschenregel

I: 
$$(-U_1) + U_3 + (-U_2) = 0$$
  
II:  $U_2 + (-U_4) = 0$ 

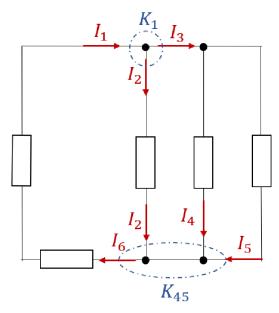
Analog können wir mithilfe der Ladungserhaltung argumentieren, dass sämtliche Ladungen, welche in ein Gebiet hineinfließen, auch wieder aus diesem hinausließen müssen.

#### **Definition Knotenregel**

Die Summe aller Ströme die in einen Knoten hinein/hinausfließen muss 0 ergeben.

$$\sum_{i=0}^{n} I_n = 0$$

Wichtig Die Knotenregel kann auch auf ein Gebiet von Knoten angewandt werden.



## Knotengleichungen

$$K_1: I_1 - I_2 - I_3 = 0$$
  
 $K_{45}: I_2 + I_4 + I_5 - I_6 = 0$ 

#### 3.1 Grundlegende Netzwerkumformungen

Wir interessieren uns nun dafür, wie sich Widerstände verhalten, wenn wir sie seriell/parallel verknüpfen.

#### **Definition** Serienschaltung

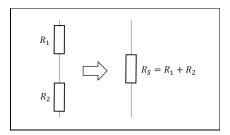
Werden mehrere Widerstände seriell miteinander verbunden, so addieren sich die Widerstandswerte

$$R_{serie} = \sum_{i=0}^{n} R_i$$

#### Begründung

Mehrere Widerstände in Serie können als ein langer Widerstand mit konstanter Fläche angesehen werden. Da die Längenabhängigkeit des Widerstandes im Zähler steht, addieren sich die Werte.

$$R_s = \rho \cdot \frac{l_1 + l_2}{A} = \rho \cdot \frac{l_1}{A} + \rho \cdot \frac{l_2}{A} = R_1 + R_2$$



#### **Definition** Parallelschaltung

Werden mehrere Widerstände parallel miteinander verbunden, so addieren sich die Leitwerte

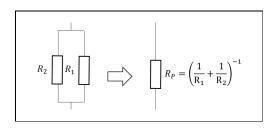
$$Y_{parallel} = \sum_{i=0}^{n} Y_i \left| R_{parallel} = \left( \sum_{i=0}^{n} \frac{1}{R_i} \right)^{-1}$$

#### Begründung

Mehrere Widerstände parallel können als ein Widerstand mit größerer Fläche und konstanter Länge angesehen werden. Da die Flächenabhängigkeit des Widerstandes im Nenner steht, addieren sich die Leitwerte.

Leitwerte.  

$$Y_p = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{A_1 + A_2}{l} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{A_1}{l} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{A_2}{l} = Y_1 + Y_2$$

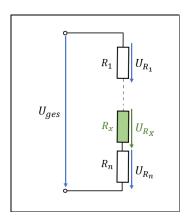


#### 3.2 Stern Dreieck Umformung

#### **Definition** Spannungsteiler

Die Spannungsteilerregel gibt an, wie sich eine Spannung über verschiedene Widerstände aufteilt, wenn diese in **Serie** geschaltet sind.

$$U_{R_x} = U_{ges} \cdot rac{R_X}{\sum R_i}$$



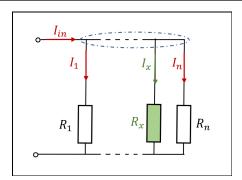
#### Begründung

Gemäss  $U = R \cdot I$  und der Serienschaltung ist der Strom durch alle Widerstände gegeben als  $I = \frac{U_{ges}}{\sum R_i}$ Nun müssen wir nur noch den Strom mit dem gesuchten Widerstand multiplizieren um die Spannung zu erhalten:  $U_{R_X} = R_X \cdot I = R_X \frac{U_{ges}}{\sum R_i}$ 

#### **Definition** Stromteiler

Die Stromteilerregel gibt uns an, wie sich die Ströme in einem Knoten aufteilen, wenn die Widerstände **parallel** geschaltet sind.

$$I_{x} = I_{in} \cdot \frac{(R_{1}||...||R_{n})}{R_{x}}$$



#### Spezialfall 2 Widerstände

Falls der Stromteiler nur mit zwei Widerständen angewendet wird, vereinfacht sich die Formel:

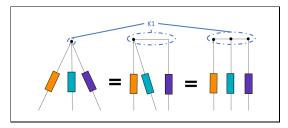
$$I_x = I_{in} \cdot \frac{R_y}{R_x + R_y}$$

Der Widerstand, dessen Strom uns nicht interessiert, steht hierbei im Zähler!

#### 3.2.1 Grundregeln bei Netzwerkumformungen

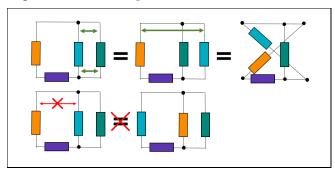
#### **Regel 1** Expandieren von Knoten

Knoten können aufgeteilt und mit Verbindungslinien verbunden werden



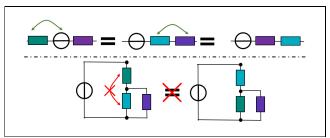
**Regel 2** Verschieben von Elementen

Elemente können entlang von Verbindungslinien ohne Widerständen verschoben werden



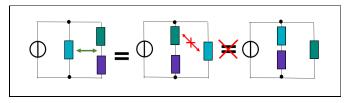
**Regel 3** Vertauschen von Elementen in Serie

Elemente, die **in Serie** geschaltet sind, können vertauscht werden



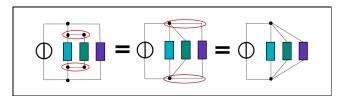
Regel 4 Vertauschen von parallel geschalteten Elementen

Elemente die **parallel** geschaltet sind, können vertauscht werden



Regel 5 Knoten kontrahieren

(Analog zu 1) Knoten können zusammengezogen werden, sofern sie nicht durch einen Widerstand verbunden sind.



35

#### 3.3 Vereinfachungen mithilfe Symmetrieüberlegungen

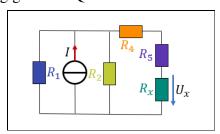
—-TODO—

#### 3.4 Vorgehen um Schaltbilder mit einer Quelle zu vereinfachen

- 1. Bringe Quelle auf die linke Seite
- 2. Forme mit Regel 1 5 das Netzwerk soweit um, bis nur noch Spannungs-/Stromteiler oder einfache Maschen vorhanden sind.
- 3. Expandiere nun das Netzwerk Schritt für Schritt, bis die Spannung über dem gesuchten Widerstand berechnet werden kann.

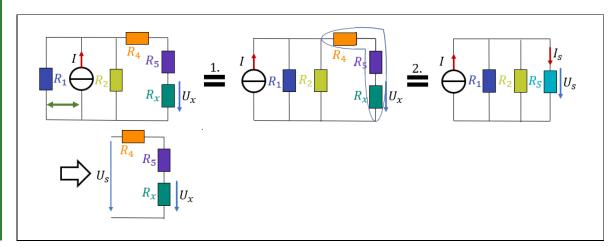
#### Beispiel 7 #1

1) Berechnen sie  $U_x$  in Abhängigkeit des Quellstromes I



#### Lösung

- 1. Gemäss Regel 2 können wir  $R_1$  und die Stromquelle vertauschen.
- 2. Die Widerstände  $R_4$ ,  $R_5$  und  $R_x$  können zu  $R_S = R_3 + R_4 + R_5$  zusammengefasst werden.
- 3. Mithilfe der Stromteilerregel erhalten wir  $I_s = I \cdot \frac{(R_1||R_2||R_s)}{R_s}$  und somit  $U_s = I \cdot (R_1||R_2||R_s)$ 4. Die Spannung  $U_s$  liegt also über dem Widerstand  $R_s$  an. Wenn wir diesen wieder in die
- 4. Die Spannung  $U_s$  liegt also über dem Widerstand  $R_s$  an. Wenn wir diesen wieder in die ursprünglichen 3 Widerstände aufteilen, erhalten wir mithilfe der Spannungsteilerregel  $U_x = U_s \cdot \frac{R_x}{R_4 + R_5 + R_x}$



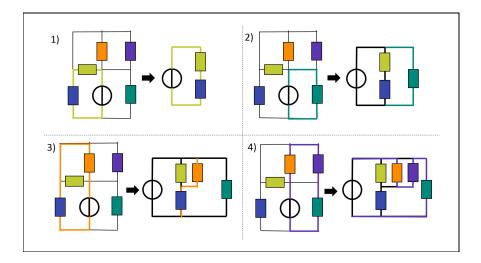
In manchen Fällen kann es schwierig sein, die Quelle auf die linke Seite zu bringen oder das Schaltbild nützlich umzuformen.

Um ein erstes Ersatzschaltbild zu erhalten, kann das "Flussverfahren" angewandt werden.

## Beispiel Flussverfahren

Beim Flussverfahren überlegt man sich sämtliche Arten, wie der Strom von einem Ende der Quelle zum anderen fliessen kann, und zeichnet somit ein Ersatzschaltbild.

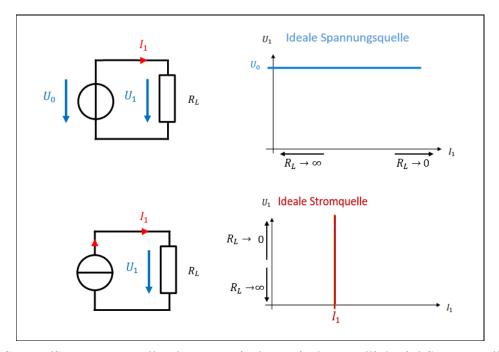
#### **Beispiel**



#### 3.5 Quellen

## **Definition** Ideale Quelle

Eine ideale Strom-/Spannungsquelle liefert immer denselben Strom/dieselbe Spannung, unabhängig von der Last, welche angehängt wird.



Mit idealen Strom-/Spannungsquellen können wir theoretisch unendlich viel Spannung/Strom über einem Lastwiderstand erzeugen.

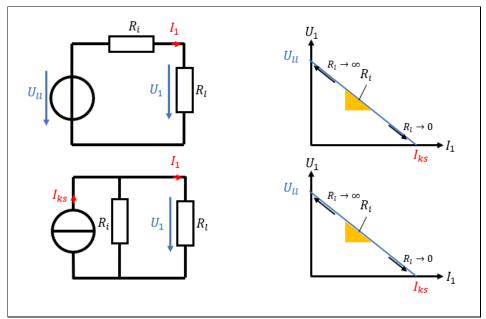
(Beispiel ideale Spannungsquelle im Kurzschluss/ideale Stromquelle im Leerlauf)

Bei einer realen Quelle kann jedoch nur eine endliche Spannung/Strom auftreten, wesshalb wir Verluste innerhalb der Quelle mit einem Innenwiderstand  $R_i$  modellieren.

### **Definition** Reale Quelle

Eine reale Quelle bezeichnet eine ideale Quelle mit Vorwiderstand.

Bei einer **Stromquelle** ist der Widerstand **parallel**, bei einer **Spannungsquelle** ist der Widerstand in **Serie**.



# 3.6 Ersatzquelllen

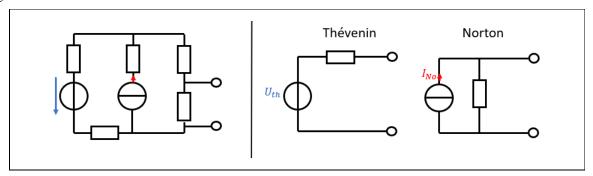
## **Definition** Thévenin / Norton Äquivalent

Jedes Netzwerk mit **linearen** Bauelementen und 2 Klemmen lässt sich als reale Quelle darstellen.

Thévenin Äquivalent Darstellung als reale Spannungsquelle mit Leerlaufspannung, die an den Klemmen auftritt

Norton Äquivalent Darstellung als reale Stromquelle mit Kurzschlussstrom, der an den Klemmen auftritt

Der Innenwiderstand entspricht dem von außen gemessenen Widerstand, wenn alle Quellen zu 0 gesetzt werden.



# ✓ Vorgehen Ersatzquelle für gegebenes Schaltbild mit offenen Klemmen finden

- 1. Betrachte die Schaltung. Sind mehr Stromquellen vorhanden, so ist es häufig einfacher den Kurzschlussstrom zu berechnen. Bei mehr Spannungsquellen die Leerlaufsspannung. Wiederhole folgendes für alle Quellen *i*:
  - 2. Setze alle Strom / Spannungsquellen ausser einer zu 0. (Stromquelle  $\rightarrow$  Leerlauf, Spannungsquelle  $\rightarrow$  Kurzschluss)
  - 3. Versuche die einzelne Quelle auf die linke Seite zu bekommen. (Siehe Skript "Flussverfahren")

#### 4.a) Kurzschlussstrom

- 1. Schliesse die Klemmen kurz und bezeichne den Strom, welcher durch diese Klemmen fliesst als  $I_{ks}^{(i)}$ .
- 2. Versuche mittels Stromteilern den gesuchten Strom zu berechnen. Falls eine direkte Verbindung von Stromquelle über den Kurzschluss zur Quelle zurückfürt, ist der Kurzschlussstrom gleich dem Strom der Quelle (=0 bei Spannungsquelle). Ist die Quelle keine Stromquelle, so kann evt. ein serieller Widerstand verwendet werden, um die Ouelle umzuformen.

## 4.b) Leerlaufspannung

- 1. Zeichnen einen Spannungspfeil zwischen den Klemmen und bezeichne die Spannung als  $U_{II}^{(i)}$ .
- 2. Versuche mittels Spannungsteiler die gesuchte Spannung zu berechnen. Falls kein Strom von der Spannungsquelle fliessen kann (Leerlauf unterbricht die komplette Schaltung), so ist die Leerlaufspannung gleich der Spannung der Spannungsquelle (=0 bei Stromquelle). Ist die Quelle keine Spannungsquelle, so kann evt. ein paralleler Widerstand

#### 5 Innenwiderstand

- 1. Setze alle Quellen auf 0. Versuche nun die Widerstände solange umzuformen, bis nur noch ein Ersatzwiderstand vorhanden ist. (Ggf. "Flussverfahren" mit offener Klemme anwenden)
- 2. Bezeichne den Wert des Widerstandes als  $R_i$
- 6.a) Thévenin Äquivalent Spannungsquelle mit seriellem Innenwiderstand.

verwendet werden, um die Quelle umzuformen.

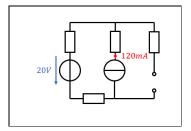
Werte:  $R = R_i$ ,  $U_q = \sum_i U_{LL}^{(i)} = (\sum_i I_{ks}^{(i)}) \cdot R_i$ 6.b) **Norton Äquivalent** Spannungsquelle mit parallelem Innenwiderstand.

Werte:  $R = R_i$ ,  $I_q = \sum_i I_{ks}^{(i)} = \frac{\sum_i U_{LL}^{(i)}}{R_i}$ 

# Beispiel 8 #3 - Thévenin Äquivalente Schaltung

### Aufgabe

Geben sie eine Thévenin Äquivalente Schaltung (Innenwiderstand  $R_i$ ,  $U_{Th}$ ) für folgende Klemmen an. Alle Widerstände haben Wert  $100\Omega$ 



## Lösung

Zuerst berechnen wir die Leerlaufspannung für die Stromquelle:

$$U_{LL_1} = 120mA \cdot 200\Omega = 24V$$

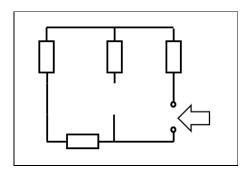
Danach die Leerlaufspannung für die Spannungsquelle:

$$U_{LL_2} = 20V$$

Die Gesamtspannung und somit die Spannung der Ersatzspannungsquelle beträgt:

$$\underline{U_{Th}} = U_{LL_1} + U_{LL_2} = \underline{44V}$$

Nun müssen wir noch den Innenwiderstand berechnen. Dazu setzen wir alle Quellen zu 0 und berechnen den von aussen gemessenen Widerstand:



$$\underline{\underline{R_i}} = 100\Omega + 100\Omega + 100\Omega = \underline{\underline{300\Omega}}$$

# 3.7 Leistungsanpassung

### **Definition** Leistung

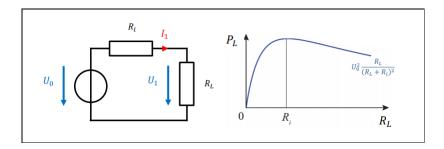
Als Leistung bezeichnen wir das Produkt von Strom und Spannung. Sie bezeichnet die in einer Zeitspanne umgesetzte Energie an einem Bauteil.

$$P := U \cdot I = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R$$

### **Definition** Maximale Leistung

Um bei einer realen Quelle maximale Leistung an einen Lastwiderstand abzugeben, muss der Lastwiderstand gleich gross sein wie der Innenwiderstand der Quelle.

$$R_i = R_L \Rightarrow P = P_{max}$$



# Begründung

Die Leistung an einem Lastwiderstand in Serie ist gegeben als:
$$P_L = U_L \cdot I_L = \frac{U_L^2}{R_L} = \frac{(U_0 \frac{R_L}{R_L + R_i})^2}{R_L} = U_o^2 \cdot \frac{R_L}{(R_L + R_i)^2}$$

$$\frac{d}{dR_L}(P_L) = -U_0^2 \cdot \frac{R_L - R_i}{(R + R_L)^3} = 0 \Rightarrow R_L = R_i \Rightarrow P_L = P_{max}$$

## **Vorgehen** Leistung über einer Last Maximieren

## Falls möglich

- 1. Entferne Komponenten über denen die Leistung maximiert werden soll und ersetze sie mit offenen Klemmen (Fasse die entfernten Komponenten als einen Lastwiderstand zusammen).
- 2. Berechne von den Klemmen den Innenwiderstand.
- 3. Innenwiderstand  $R_i \rightarrow R_L = R_i$
- 4. Falls maximale Leistung gefragt: Berechne Leerlaufspannung oder den Kurzschlussstrom.

$$P_{max} = \frac{U_{LL}^2}{4 \cdot R_i}$$

#### **Sonst**

- 1. Finde einen Ausdruck für  $U_L$  und  $I_L$
- 2. Berechne  $P = U_L \cdot I_L$
- 3. Leite *P* nach dem veränderlichem Widerstand ab und setze zu 0 um ein Maximum zu finden

# Beispiel 9 Leistungsanpassung

todo

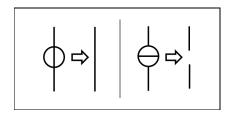
## 3.8 Superpositionsprinzip

Das Superpositionsprinzip besagt, dass wir bei einem Netzwerk mit mehreren Quellen einzelne Teillösungen in Abhängigkeit von nur einer Quelle berechnen und aufsummieren können.

Dies gilt jedoch nicht für die Leistung, da diese nicht linear ist!

Um das Superpositionsprinzip anzuwenden, müssen wir alle ausser eine Quelle auf "0" setzen.

Spannungsquellen werden also mit Kurzschlüssen ersetzt und Stromquellen mit Leerläufen.



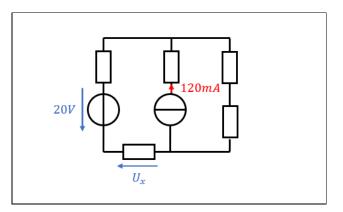
#### Wieso

Eine Spannungsquelle zu "0" zu setzen bedeutet, dass über diesem Bauteil keine Spannung abfallen darf. Über einem Kurzschluss wird nie eine Spannung abfallen, da dieser als Widerstand mit Wert 0 modelliert werden kann.

Eine Stromquelle zu "0" zu setzen bedeutet, dass durch dieses Bauteil kein Strom fliessen darf. Dies entspricht gerade einem Leerlauf, da dieser als Widerstand mit Wert  $\rightarrow \infty$  modelliert werden kann.

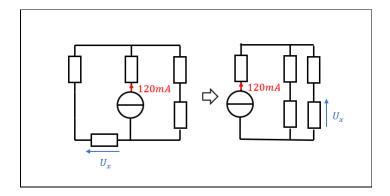
# Beispiel 10 #2

**Aufgabe** Berechnen sie die Spannung  $U_x$  und die Leistung  $P_x$  im folgenden Netzwerk, wenn alle Widerstände  $R=100\Omega$  betragen.



### Lösung

Zuerst setzen wir die Spannungsquelle zu 0 und erhalten das folgende ESB



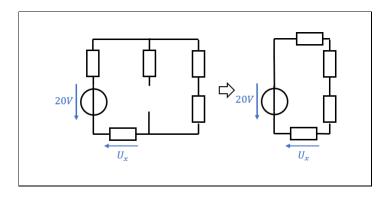
Nun berechnen wir den Strom  $I_{x_1}$  durch den Widerstand mithilfe eines Stromteilers:

$$I_{x_1} = 60mA$$

Die Spannung  $U_x$  ist entgegen der Stromrichtung eingezeichnet:

$$U_{x_1} = -R_x \cdot I_x = -100 \cdot 60 mA = -6V$$

Nun setzen wir die Stromquelle zu 0:



Die Spannung 
$$U_{x_2}$$
 berechnet sich als Spannungsteiler:  $U_{x_2}=20V\cdot\frac{100\Omega}{400\Omega}=5V$ ,  $I_{x_2}=\frac{5V}{100\Omega}=50mA$ 

Schlussendlich berechnet sich die Spannung Teilspannungen: als Summe der

$$U_{\rm r} = U_{\rm r_1} + U_{\rm r_2} = 5V - 6V = -1V$$

$$P_{x} = \frac{U_{x}^{2}}{R_{x}} = 10mW$$

U<sub>x</sub> =  $U_{x_1} + U_{x_2} = 5V - 6V = -1V$ Und die Leistung:  $P_x = \frac{U_x^2}{R_x} = 10mW$ Welche **nicht** der Summe der Teilleistungen entspricht:

$$P_{sum} = P_1 + P_2 = U_{x_1} \cdot I_{x_1} + U_{x_2} \cdot I_{x_2} = 360mW + 250mW = 610mW$$

# 3.9 Analyse umfangreicher Netzwerke

Möchten wir in Netzwerken sehr viele Grössen berechnen, oder ist das Netzwerk sehr komplex, so können andere (meist Computer basierende) Verfahren verwendet.

Sämtliche Verfahren bauen darauf auf, dass für ein beliebiges Netzwerk das Aufstellen sämtlicher Konten und Maschengleichungen genügt, um alle gesuchten Grössen zu berechnen.

#### Unabhängige Gleichungen

Seien z die Anzahl Zweige eines Netzwerkes (Verbindungen 2-er Knoten) und k die Anzahl Knoten, so müssen z linear unabhängige Gleichungen gefunden werden, um alle Grössen im Netzwerk zu berechnen.

Die Gleichungen können folgendermassen gefunden werden:

(k-1) Gleichungen können aus Knotengleichungen gefunden werden. (z - (k-1)) übrige Gleichungen werden mithilfe von Maschengleichungen gefunden.

## ✓ Vorgehen Analyse von Umfangreichen Netzwerke

- Entferne alle Widerstände und Quellen und zeichne das Schaltbild neu.
- Nummeriere alle Konten. Die Anzahl der Knoten wird mit k bezeichnet.
- Alle Verbindungslinien, welche zwei Knoten verbinden, werden als Zweige bezeichnet. #Zweige = z
- Definiere Ströme für jeden Zweig und stelle (k-1) Knotengleichungen auf. Schreibe diese am Besten bereits in Matrix schreibweise:

Bsp: 
$$I_1 + I_2 = I_3$$
,  $I_3 - I_4 = 2A$ :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2A \end{bmatrix}$$

- Finde z (k-1) Unabhängige Maschengleichungen. (Mittels Vollständiger Baum / Auftrennen der Maschen)
- Ersetze die Spannungen der Maschengleichung mit Strom mal Widerstand und ergänze das Gleichungssystem.

Bsp: 
$$U_1 + U_2 = 5V, U_2 - U_3 = U_4$$
  
 $\rightarrow R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 = 5V, R_2 \cdot I_2 - R_3 \cdot I_3 - R_4 \cdot I_4 = 0$   

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ \mathbf{R_1} & \mathbf{R_2} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{R_2} & -\mathbf{R_3} & -\mathbf{R_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2A \\ 5V \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

# 4 Magnetostatik

## 4.1 Das Magnetische Feld und die Lorentzkraft

Analog zum elektrischen Feld definieren wir ein magnetisches Feld, dessen Feldlinien Kräfte auf eine bewegte Ladung auswirken.

Auslöser für das magnetische Feld sind **bewegte Ladungen** welche gemäss der rechten Hand Regel ein Magnetfeld hervorrufen, das diese einschliesst.

Im Falle von Stabmagneten oder Ähnlichem ist es der Spin der Elektronen, welcher das stationäre Magnetfeld auslöst\*

TODO.png

### **Definition** Magnetische Flussdichte B

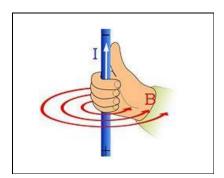
Bewegte Ladungsträger welche sich in der Nähe anderer bewegter Ladungsträger befinden, verspüren eine Kraftwirkung welche senkrecht zur Bewegungsrichtung zeigt.

Analog zum Elektrischen Feld definieren wir ein Magnetisches Feld (= Magnetische Flussdichte) welche diese Kraftwirkung beschreibt.

Die Mangetische Flussdichte, weisst jedem Punkt im Raum einen Vektor zu. Die Resultierende Kraft auf ein Ladungsträger, welcher sich mit Geschwindigkeit V bewegt, berechnet sich aus dem Kreuzprodukt von Geschwindigkeit und Ladung (→ Lorentzkraft)

## **Definition** Rechte Hand Regel

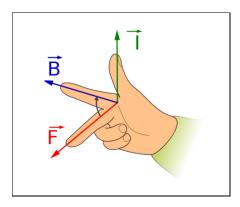
Die Magnetische Flussdichte B um einen stromdurchflossenen Leiter baut sich stets gegen den Uhrzeigersinn auf und ist **immer** geschlossen.



**Gleichung** Lorentzkraft

Bewegte Ladungen in einem Magnetfeld verspüren eine Kraft, welche proportional zur Stärke des B-Feldes und der Geschwindigkeit ist.

Die Kraft steht senkrecht zu den Feld- und Geschwindigkeits-Vektoren.



$$\vec{F}_m = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} = I(\vec{l} \times \vec{B})$$

### Variabeln:

 $F_m$  = Magnetische Kraft  $[F_M] = N$  $\vec{v}$  = Geschwindigkeit der Teilchen  $[v] = \frac{m}{s}$ 

 $\vec{B}$  = Magnetische Flussdichte [B] = T(Tesla)

 $\vec{l}$  = Länge des Leiters im Magnetfeld [l] = m

Die Summe mit der Coulomb Kraft bezeichnet die Lorentzkraft

$$\vec{F}_L = \vec{F}_m + \vec{F}_c = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} = I(\vec{l} \times \vec{B}) + q \cdot \vec{E}$$

In älteren Physikbüchern wird häufig nur die Magnetische Kraftwirkung als Lorentzkraft bezeichnet.

#### **Definition H-Feld**

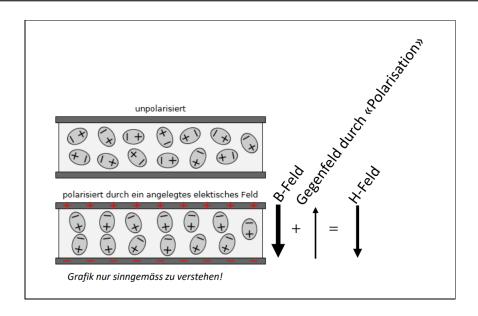
Legen wir ein magnetisches Feld an eine Materie an, so richten sich die eingeschlossenen Teile entgegen dem angelegten Feld aus und " schwächen " dieses.

Das " abgeschwächte " Feld bezeichnen wir als H-Feld und entspricht dem Feld, welches real auf Ladungen wirkt.

Der "Abschwächungsfaktor"  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$  wird als Permeabilität bezeichnet.

Das H-Feld verändert sich bei Materialübergängen, das B-Feld bleibt konstant.

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}$$



## **Gleichung** Durchflutungssatz

Der Durchflutungssatz sagt etwas darüber aus, wie das Magnetische Feld entsteht. Es bringt die **Magnetische Feldstärke H** (Feld) und den **Strom I** (Quelle) in Verbidung. Die Aussage des Durchflutungssatz ist, dass das Kurvenintegral des H-Feldes über eine beliebige **geschlossene** Kurve gerade dem Wert des durch diese Fläche fließendes Stromes entspricht. Diesen Wert definieren wir als Durchflutung Θ

$$\Theta = \oint_{S} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \iint_{A} \vec{j} \cdot d\vec{A} = I_{eff}$$

Dabei ist es wichtig, das nur der **effektiv durch eine Fläche hindurchfliessende Strom** die Magnetische Durchflutung auslöst. Fliesst in einer Fläche gleich viel Strom hinein wie hinaus, ist die Druchflutung gleich 0.

## **Gleichung** Vereinfachter Durchflutungssatz

Für den Fall, dass der Strom N mal durch eine Fläche hindurchfliesst und das H-Feld auf dem gesamten Weg konstant und parallel zum Weg ist, gilt folgende Vereinfachung:

$$\Theta = H \cdot l_s = N \cdot I \rightarrow H = \frac{N \cdot I}{l_s}$$

## Beispiel 11 #4

### **Aufgabe**

Berechnen Sie die magnetische Spannung  $\Theta$  und das H-Feld Feld  $\vec{H}$  um einen unendlich langen, mit Strom I durchflossenen Leiter. Der Radius des Leiters sei  $\rho$ .

### Lösung

Wir wählen als Kurve einen Kreis mit Radius R um unseren Leiter.

Da wir von einem perfekten Leiter ausgehen, treffen wir die Annahme, dass das Magnetfeld achsensymmetrisch und somit konstant entlang des Kreises ist.

Wir erhalten: für  $R > \rho$ :

$$\underline{\underline{\Theta}} = \oint_{2\pi R} \vec{H} \cdot d\vec{S} = \underline{\underline{I}}$$

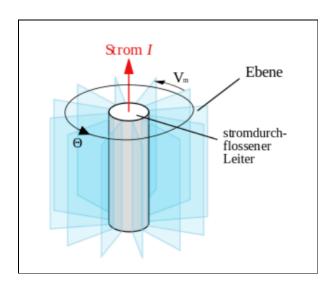
$$\rightarrow |H| \cdot 2\pi R = I \rightarrow \underline{\vec{H}(R)} = \frac{I}{2\pi R} \cdot \vec{e_{\phi}}$$

Für  $R < \rho$ 

$$\underline{\underline{\Theta(R)}} = \oint_{2\pi R} \vec{H} \cdot d\vec{S} = \int_0^R \int_0^{2\pi} \frac{I}{\pi \rho^2} \cdot r \cdot d\varphi \cdot dr = \frac{2 \cdot I}{\rho^2} \cdot \frac{1}{2} R^2 = \underline{\frac{R^2 \cdot I}{\rho^2}}$$

$$\rightarrow |H| \cdot 2\pi R = \frac{I \cdot R^2}{\rho^2} \rightarrow \underline{\vec{H}(R)} = \frac{I}{2\pi \rho^2} \cdot R \cdot \vec{e_{\phi}}$$

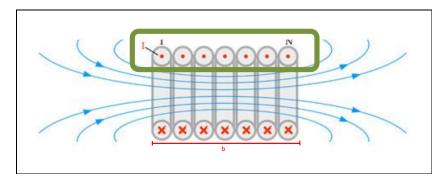
#### **Skizze**



## Beispiel 12 Magnetfeld einer Spule

Gegeben sei eine Spule mit N Wicklungen und der länge 1. Berechnen Sie die Magnetische Feldstärke  $\vec{H}$  in Abhängigkeit des Stromes I, Länge 1 und Wicklungen N.

Es gilt für die Durchflutung bezüglich des Grünen Weges:



$$\Theta_{Spule} = \oint_{\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \iint_{A} \vec{j} \cdot d\vec{A} = N \cdot I \simeq \int_{0}^{b} \vec{H} \cdot d\vec{s}$$

Da die Anordnung **Symmetrisch zur X-Achse** ist, wird das H-Feld auf dem gesamten Weg konstant ist und in X-Richtung zeigen können wir das Integral mit einer Multiplikation ersetzen.

$$\Theta_{Spule} = N \cdot I = H \cdot l_s$$

Und somit gilt für das H-Feld mit Richtungsvektor:

$$H = \frac{N \cdot I}{l_s} = \frac{N \cdot I}{l}$$

$$\vec{H}(\vec{r}) = \begin{cases} 0 & \text{Aussherhalb der Spule} \\ \frac{N \cdot I}{l_s} \vec{e}_x & \text{Innerhalb der Spule} \end{cases}$$

Aus der letzten Aufgabe folgt, dass das Magnetische Feld einer Spule im inneren Näherungsweise konstant ist. Ausserhalb der Windungen ist die Spule feldfrei.

Diese Eigenschaften entsprechen gerade denen, eines Stabmagneten

#### 4.1.1 Verhalten von B und H Feld an Randflächen

todo

#### 4.1.2 Das Reluktanzmodell

**Definition** Magnetische Spannung

Als Magnetische Spannung bezeichnen wir das Wegintegral über die Magnetische Feldstärke H.

$$V_{M_{AB}} := \int_A^B \vec{H} \cdot d\vec{s}$$

Die Magnetische Spannung ist einzig eine Hilfsgrösse, um Werte zu berechnen. Analog zum elektrischen Feld lässt sich auch hier eine Maschengleichung definieren:

$$\oint_{Masche} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \Theta_{Masche}$$

Falls wir nun die Druchflutung  $\Theta$  als Quelle einfügen, gilt für ein magnetisches Netzwerk:

$$\oint_{Masche} \vec{H} \cdot d\vec{s} + \Theta_{Quellen} = 0$$

#### **Definition** Magnetischer Fluss

Als magnetischen Fluss  $\Phi$  bezeichnen wir die "Menge B-Feld", welche durch eine gegebene Fläche fliesst.

$$\Phi := \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \simeq \pm B \cdot A, \quad [\Phi] = T \cdot m^2$$

## **Definition** Magnetischer Widerstand

Als magnetischer Widerstand  $R_m$  bezeichnen wir das Verhältnis zwischen magnetischer Spannung und magnetischem Fluss

Er sagt etwas darüber aus, wie gross der magnetische Fluss bei einer gegebenen magnetischen Spannung ist.

$$R_m = \frac{V_M}{\Phi} \underbrace{=}_{magn.Leiter} \frac{l}{\mu \cdot A}$$

#### Begründung

Wir gehen davon aus, dass die magnetische Spannung über einem Leiter mit Länge 1 anliegt, dessen Querschnittfläche A ist.

$$\frac{V_M}{\Phi} = \frac{\int_0^l \vec{H} \cdot d\vec{s}}{\iint_a \vec{B} d\vec{A}} = \frac{l \cdot H}{\mu \cdot A \cdot H} = \frac{l}{\mu \cdot A}$$

## magnetische Grössen im Vergleich zu eletrischen

	Elektrisch	Einheit	Magnetisch	Einheit
Leitfähigkeit	к	$\left[\frac{1}{\Omega \cdot m}\right]$	$\mu(=\mu_0\cdot\mu_r)$	$\left[\frac{H}{m}\right]$
Widerstand	$R=rac{l}{\kappa A}$	[Ω]	$R_m = rac{l}{\mu A}$	$\left[\frac{1}{H}\right]$
Leitwert	$G=rac{1}{R}$	[ <i>S</i> ]	$\Lambda_m=rac{1}{R_m}$	[H]
Spannung	$U_{AB}=\int_A^B ec{E}\cdot dec{s}$	[ <i>V</i> ]	$\Theta_{AB} = \int_A^B ec{H} \cdot dec{s}$	[ <i>A</i> ]
Strom / Fluss	$I = \iint_{A} \vec{j} \cdot d\vec{A} = \kappa \iint_{A} \vec{E} \cdot d\vec{A}$	[ <i>A</i> ]	$\iint_{A} \vec{B} \cdot d\vec{A} = \mu \iint_{A} \vec{H} \cdot d\vec{A}$	[Wb]
Ohmsches Gesetz	$U = R \cdot I$		$\Theta = R_m \cdot \Phi$	
Maschenregel	$U_0 = \sum_{Masche} U_m$		$\Theta(=NI) = \sum_{Masche} \Theta_m$	
Knotenregel	$\sum_{Knoten} I_k = 0$		$\sum_{Knoten}\Phi_k=0$	

#### **Definition** Reluktanzmodell

Das Reluktanzmodell besagt, dass man ein magnetisches Ersatzschaltbild mit denselben Rechenregeln wie bei einem elektrischen Netzwerk berechnen kann.

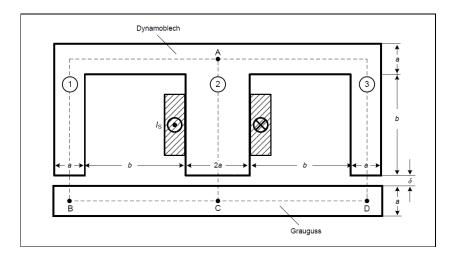
# Vorgehen

- Spulen werden mit Spannungsquellen ersetzt  $V_m = N \cdot I$
- Magnetkerne/Luftspälte etc. werden mithilfe der Länge und Querschnittsfläche als Widerstände modelliert.  $R_m = \mu_A^l$
- Für magnetische Widerstände gelten die gleichen Regeln wie bei elektrischen (Seriellschaltung / Paralellschaltung).

## Beispiel 13 #5

### **Aufgabe Hubmagnet**

Der mittlere Schenkel 2 eines E-Kernes aus Dynamoblech trägt eine Wicklung mit N Windungen. Über die drei Luftspalten mit gleicher Länge  $\delta$  wird ein Anker aus Grauguss mit der Kraft FA angezogen E-Kern und Anker besitzen die gleiche Dicke d.



# Gegeben sind folgende Parameter:

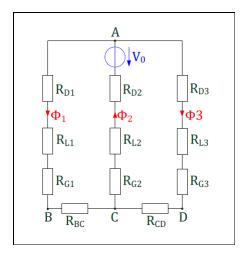
Windungszahl der Wicklung: = 1000  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$ Magnetische Feldkonstante:  $\mu_{rD}$  = 2000 Relative Permeabilität Dynamoblech: Relative Permeabilität Gusseisen: = 250 = 0.1 mm Luftspaltlänge: δ Anzugskraft Anker:  $F_{A} = 150 \text{ N}$ Breite E-Kern und Anker: = 20 mm Abstand der Schenkel: = 80 mm Dicke E-Kern und Anker: = 50 mm

Berechnen sie die magnetische Spannung auf dem Weg ACD.

#### Lösung

Zuerst zeichnen wir ein Reluktanzmodell des Magneten.

Wobei  $R_L$  die Luftspälte,  $R_{Di}$  die Beine des Magneten und  $R_{Gi}$  sowie  $R_{BC}$  und  $R_{CD}$  das Gusseinsenstück modellieren.



Für die Spannungsquelle erhalten wir:

$$V_0 = N \cdot I_s = 1000 \cdot 211.3 mA = 211.3 A$$

Für die Widerstände:

$$R_{D1} = R_{D3} = \frac{2b + 2a}{\mu_0 \mu_{rD} a d} = 79.6 \cdot 10^3 H^{-1}$$

$$R_{D2} = \frac{b + \frac{a}{2}}{2\mu_0 \mu_{rD} a d} = 17.9 \cdot 10^3 H^{-1}$$

$$R_{L1} = R_{L3} = \frac{\delta}{\mu_0 a d} = 79.6 \cdot 10^3 H^{-1}$$

$$R_{L2} = \frac{\delta}{2\mu_0 a d} = 39.8 \cdot 10^3 H^{-1}$$

$$R_{G1} = R_{G3} = \frac{\frac{a}{2}}{\mu_0 \mu_{rG} a d} = 31.8 \cdot 10^3 H^{-1}$$

$$R_{G2} = \frac{\frac{a}{2}}{2\mu_0 \mu_{rG} a d} = 15.9 \cdot 10^3 H^{-1}$$

$$R_{BC} = R_{CD} = \frac{b + \frac{3}{2}a}{2\mu_0 \mu_{rG} a d} = 350.1 \cdot 10^3 H^{-1}$$

Weiter können wir die einzelnen Widerstände seriell zusammenfassen:

$$R_1 = R_{D1} + R_{L1} + R_{G1} = 191 \cdot 10^3 H^{-1}$$

$$R_2 = R_{D2} + R_{L2} + R_{G2} = 73.7 \cdot 10^3 H^{-1}$$

$$R_3 = R_{D3} + R_{L3} + R_{G3} = 191 \cdot 10^3 H^{-1}$$

$$R_F = R_{BC} = R_{CD} = 350.1 \cdot 10^3 H^{-1}$$

Die Spannung  $U_{AC}$  lässt sich als Spannungsteiler berechnen:

$$U_{AC} = U_0 \cdot \frac{((R_1 + R_E)||(R_3 + R_E))}{((R_1 + R_E)||(R_3 + R_E)) + R_2} = 166A$$

Und somit die Spannung  $U_{AD}$ :

$$\underline{\underline{U_{AD}}} = 166A \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_E} = \underline{58.6A}$$

## 4.2 Spule und Induktivität

#### **Definition** Induktivität

Die Induktivität L beschreibt, wieviel magnetischer Fluss  $\Phi$  sich bei einem Strom I im Inneren eines Bauteiles aufbaut.

$$L := \frac{N \cdot \Phi}{I} = \frac{N^2}{R_m}$$

Der Faktor *N* im Nenner kommt daher, dass der Fluss bei einer Spule durch *N* Windungen hindurchfliesst. Somit ist die effektive Fläche des Flusses N mal grösser, wesshalb er N mal gezählt wird.

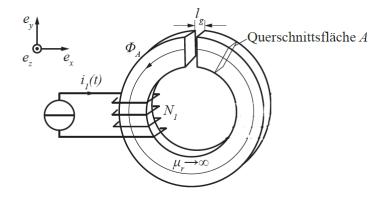
Die in einer Induktivität gespeicherte Energie berechnet sich zu

$$W = \frac{1}{2}L \cdot I^2$$

# Beispiel 14 Berechnen einer Gegeninduktivität

Auf einem Ringkern mit der Querschnittsfläche A und der Permeabilit $\mu_r \to \infty$  ist eine Wicklungen mit N1 angebracht. Der Ringkern besitzt einen Luftspalt mit der sehr kleinen Breite  $l_g$ . Das magnetische Feld kann im Luftspalt als homogen angenommen werden.

- 1) Berechnen sie die Magnetische Flussdichte im Luftspalt.
- 2) Berechnen sie den magnetischen Fluss  $\phi_A$  im Kern.
- 3) Berechnen sie die Induktivität L



#### Lösung

• 1) Es gilt für die Durchflutung bezüglich dem Kreisring:

$$\Theta = \oint_{S} \vec{H} \cdot d\vec{S} = N_1 \cdot i_1(t)$$

Da die Permeabilität des Magneten gegen unendlich strebt und das B-Feld bei senkrechten Materialübergängen konstant ist gilt:

$$\oint_{S} \vec{H} d\vec{s} = \underbrace{\int_{M} \frac{\vec{B}}{\mu_{0} \cdot \mu_{r}} d\vec{s}}_{=0} + \int_{L} \frac{\vec{B}}{\mu_{0}} d\vec{s} = \int_{L} \frac{\vec{B}}{\mu_{0}} d\vec{s}$$

Da des B-feld parallel zum Weg ist und über dem ganzen Weg konstant ist gilt:

$$N_1 \cdot i_1(t) = \oint_s \vec{H} d\vec{s} = \frac{B}{\mu_0} \cdot l_g$$

$$\rightarrow \vec{B} = \frac{N_1 \cdot i_1(t)\mu_0}{l_g} (-\vec{e}_x)$$

• 2) Für den Magnetischen Fluss gilt:

$$\phi_A = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = B \cdot A = \frac{N_1 \cdot i_1(t)\mu_0}{l_g} \cdot A$$

• 3) Da die Spule  $N_1$  Wicklungen aufweist, muss der Fluss  $\phi_A$   $N_1$  mal gezählt werden. Es gilt für die Induktivität:

$$L := \phi i = N_1 \cdot \frac{N_1 \cdot i_1(t)\mu_0}{l_g} \cdot A \cdot \frac{1}{i_1(t)} = \underbrace{\frac{N_1^2 \cdot \mu_0}{l_g} \cdot A}_{}$$

#### **Definition** Serien und Parallelschaltung

Induktivitäten verhalten sich analog zu Widerständen:

#### Serienschaltung

$$L_{serie} = \sum_{i=0}^{n} L_i$$

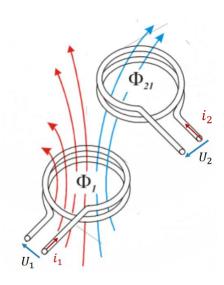
### **Parallelschaltung**

$$\frac{1}{L_{ges}} = \sum_{i=0}^{n} \frac{1}{L_i} | L_{ges} = (L_1 || L_2)$$

## **Definition** Gegeninduktivität

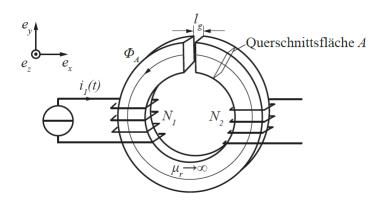
Die Gegeninduktivität beschreibt, wie viel Magnetischer Fluss durch eine **andere** Leiterschleife durchfliesst, abhängig des Stromes in der ersten Schleife.

$$L_{21} = N_2 \cdot \frac{\phi_{21}}{i_1}$$



# Beispiel 15 Berechnen einer Gegeninduktivität

Beim Ringkern aus dem vorherigen Beispiel wird nun eine 2 Spule mit  $N_2$  Wicklungen hinzugefügt. Berechnen sie die Gegeninduktivität  $L_{21}$  bezüglich der Spule mit den  $N_2$  Windungen.



## Lösung

Die Gegeninduktivität beschreibt, wieviel magnetischer Fluss durch die 2. Spule fliesst abhängig des Stromes der ersten Spule:

$$L_{21}:=\frac{\Phi_{s2}}{i_1}$$

Da der Fluss im Magneten selbst gerade  $\Phi_A$  beträgt und dieser durch  $N_2$  Leiterschleifen fliesst, gilt:

$$L_{21} := \frac{\Phi_{s2}}{i_1} = \frac{\Phi_A \cdot N_2}{i_1} = \frac{N_1 \cdot N_2 \cdot \mu_0}{\frac{l_g}{l_g} \cdot A}$$

# 5 Zeitlich veränderliches Magnetfeld

## 5.1 Induktion

einführung

## **Gleichung** Induktionsgesetz

$$\oint_{S} \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \Big( \iint_{A_{s}} \vec{B} \cdot d\vec{A} \Big)$$

### Variablen

B = Magnetische Flussdichte [B] = T

 $A_s$  = Vom Weg S aufgespannte Fläche  $[A_s] = m^2$ 

Falls B Feld Konstant auf Fläche und senkrecht:

$$\oint_{S} \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \big( B_{eff} \cdot A_{s} \big)$$

## **Definition** Bewegungsinduktion

i

## Beispiel 16 Bewegungsinduktion

I TODO

#### **Definition** Selbstinduktion

todo

## **Definition** Gegentinduktion

todo

# 5.2 Charakteristische Gleichungen von Kapazität und Induktivität

## Gleichung Induktivität

todo

#### **Gleichung Kondensator**

Der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung am Kondensator ist wie folgt gegeben

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) dt$$
$$i_c(t) = c \cdot \frac{d}{dt} (u_c)$$

## Begründung

Mit dem Wissen, dass Strom definiert ist als die Ladung pro Zeit  $\frac{dQ}{dt} = I$  folgt folgendes:

$$\frac{\partial}{\partial t}(C \cdot U) = \frac{\partial}{\partial t}(Q)$$

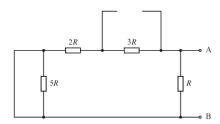
$$C \cdot \frac{dU}{dt} = I \to U(t) = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t I \cdot dt$$

# 6 Anhang

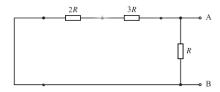
## 6.1 Katalog S.9

- a) Um das Ersatzschaltbild zu berechnen, müssen 2 Grössen berechnet werden:
- 1) Innenwiderstand
- 2) Leerlaufspannung oder Kurzschlussstrom
- 1) Für die Berechnung des Innenwiderstandes werden alle Quellen zu null Gesetzt.
- D.h. Spannungsquellen  $\rightarrow$  Kurzschluss, Stromquellen  $\rightarrow$  Leerlauf

#### Ersatzschaltbild



Da der 5R Widerstand kurzgeschlossen ist, wird niemals Strom durch ihn hindurchfliessen. Somit können wir ihn durch einen Leerlauf ersetzen.



61

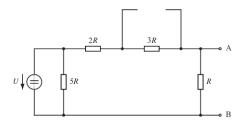
2R und 3R liegen Seriell, somit können sie zu einem Widerstand der Grösse 5R zusammengefasst werden.

Dieser Widerstand ist wiederum parallel zu R, womit wir für den gesamten Widerstand und somit  $R_E$  folgendes erhalten.

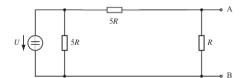
$$R_E = (2R + 3R||R) = \frac{5R^2}{6R} = \frac{5}{6}R$$

2) Nun müssen wir noch die Leerlaufspannung der Ersatzschaltung berechnen. Dazu wenden wir das Superpositionsprinzip an:

Zuerst berechnen wir die Spannung  $U_{AB}$  zwischen den Klemmen A und B in Abhängigkeit der Spannungsquelle:



Die Widerstände 2R und 3R sind seriell.

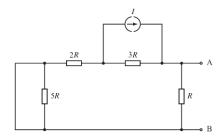


Da die Widerstandände (5R + R und 5R) parallel sind, muss über beiden Ästen die Gleiche Spannung U abfallen.

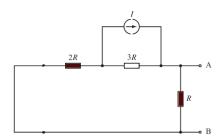
Somit können wir die Spannungsteilerregel anwenden:

$$U_{AB}^{(1)} = U \cdot \frac{R}{R + 5R} = U \cdot \frac{1}{6}$$

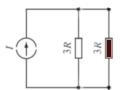
Nun müssen wir noch die Spannung  $U_{AB}^{(2)}$  in Abhängigkeit der Stromquelle berechnen: Dazu setzen wir die Spannungsquelle zu 0:



Der Widerstand  $R_5$  wird wieder kurzgeschlossen.



Die Widerstäde 2R und R können Seriell zusammengefasst werden, wodurch jedoch die Klemmen verschwinden :



Nun können wir mithilfe der Stromteilerregel den Strom durch den roten Widerstand berechnen:

$$I_{Rot} = I_{\frac{3R}{3R+3R}} = \frac{I}{2}$$

Dieser Strom fliesst durch die beiden Widerstände R und 2R somit gilt für die Spannung über dem roten R Widerstand und somit für die Spannung  $U_{AB}^{(2)}$ :

$$U_{AB}^{(2)} = U_R = I_{Rot} \cdot R = \frac{I \cdot R}{2}$$

63

Somit gilt für die Leerlaufspannung gemäss Superposition:

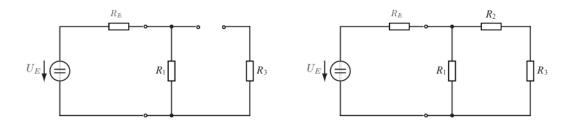
$$U_E = U_{AB}^{(1)} + U_{AB}^{(2)} = \frac{U}{6} + \frac{I \cdot R}{2}$$

b) Es gilt:  $R_E = \frac{5}{6} \cdot 12\Omega = 10\Omega$  und  $U_E = 2V + 3A \cdot 6\Omega = 20V$  Für  $I_E$  gilt:

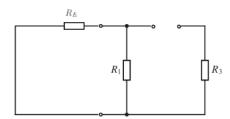
$$I_E = \frac{U_E}{R_E} = \frac{20V}{10\Omega} = 2A$$

c) Um die Leistung über dem Widerstand  $R_2$  zu maximiere, schliessen wir zuerst das Lastnetzwerk an unsere Ersatzquelle an und ersetzen danach den Widerstand  $R_2$  mit offenen Klemmen und Formen erneut das Netzwerk zu einer realen Quelle um. Aus der Vorlesung ist bekannt, dass die Leistung über  $R_2$  genau dann maximal ist, wenn  $R_2 = R_i$  gilt, wobei  $R_i$  den Innenwiderstand gegenüber den Klemmen bezeichnet.

Die Aufgabe reduziert sich als darauf, den Innenwiderstand gegenüber den Klemmen zu berechnen.



Um den Innenwiderstand zu berechnen setzen wir die Quellen zu 0 und formen das Netzwerk um, bis nur noch ein Widerstand vorhanden ist.



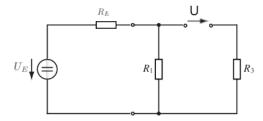
Im ESB sind die Widerstände  $R_E$  und  $R_1$  parallel. Beide zusammen sind wiederum seriell zu  $R_3$ . Somit gilt für den Innenwiderstand:

$$R_i = (R_E || R_1) + R_3$$

Um maximale Leistung an  $R_2$  abzugeben, muss folgendes gelten:

$$R_2 = R_i = (R_E||R_1) + R_3 \Rightarrow R_3 = R_2 - (R_E||R_1)$$
  
 $R_3 = 11.5\Omega - (5\Omega||20\Omega) = 7.5\Omega$ 

d) Um den Spannungsabfall über  $R_2$  zu berechnen, berechnen wir die Leerlaufspannung an den Klemmen:



Da durch den Widerstand  $R_3$  kein Strom fliesst, gilt für die Spannung U:

$$U = U_{R_1} - U_{R_3} = U_{R_1} - 0A \cdot R_3 = U_{R_1}$$

Die Spannung über  $R_1$  können wir mithilfe des Spannungsteilers berechnen:

$$U_{R_1} = U_E \cdot \frac{R_1}{R_E + R_1} = 15V \cdot \frac{20\Omega}{25\Omega} = 12V$$

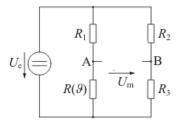
Aus der Vorlesung ist bekannt, dass bei maximaler Leistungabgabe, die Spannung über dem Lastwiderstand gerade die hälfte der Leerlaufspannung beträgt. Somit gilt für die Spannung über  $R_2$ :

$$U_2 = \frac{U}{2} = 6V$$

$$P_2 = \frac{U_2^2}{R_2} = \frac{36V^2}{11.5\Omega} = 3.13W$$

## 6.2 Katalog S.15

• a) Da es sich beim Spannungsmessgerät um ein Messgerät mit unendlich hohem Widerstand handelt, dürfen wir davon ausgehen, dass zwischen den Klemmen A und B kein Strom fliessen kann. Somit können wir die Verbindung zwischen A und B als Leerlauf modelieren.



Da die beiden Widerstandsäste parallel gescchaltet sind, muss über beiden Ästen die gleiche Spannung abfallen:

$$U_e = U_{R_1} + U_{R_{\vartheta}} = U_{R_2} + U_{R_3}$$

Somit können wir die Spannung über  $R_{\vartheta}$  mithilfe des Spannungsteilers berechnen:

$$U_{R_{\vartheta}} = U_e \cdot \frac{R_{\vartheta}}{R_1 + R_{\vartheta}}$$

Die Leistung über einem Widerstand ist definiert als:

$$P_R = U_R \cdot I_R = \frac{U_R^2}{R}$$

Somit gilt für die Leistung über dem Widerstand  $R_{\vartheta}$ ;

$$P_{R_{\vartheta}} = \frac{U_{R_{\vartheta}}^2}{R_{\vartheta}} = (U_e \cdot \frac{R_{\vartheta}}{R_1 + R_{\vartheta}})^2 \cdot \frac{1}{R_{\vartheta}} = \frac{U_e^2 \cdot R_{\vartheta}}{(R_1 + R_{\vartheta})^2}$$

Um den Maximalwert dieser Leistung in Abhängigkeit des Widerstandes  $R_{\vartheta}$  herauszufinden, leiten wir die Leistung nach  $R_{\vartheta}$  ab und setzen sie zu 0:

$$\frac{d}{dR_{\vartheta}}(P_{R_{\vartheta}}) \stackrel{!}{=} 0 \rightarrow R_{\vartheta} = R_1 = 1k\Omega$$

Die benötigte Temperatur berechnet sich zu:

$$R(\vartheta) = 1k\Omega(1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0)) \stackrel{!}{=} 1k\Omega$$
  
$$\Rightarrow \vartheta = \vartheta_0 = 20$$

Für die Spannung  $U_e$  erhalten wir:

$$50mW \stackrel{!}{=} P_{R_{\vartheta}} = U_e^2 \cdot \frac{1k\Omega}{4k\Omega}$$

$$\rightarrow 200mW = U_e^2$$

$$\rightarrow U_e = 14.14V$$

• b) Für die Spannung  $U_m$  können wir folgende Masche aufstellen:

$$U_m = U_{R_{\vartheta}} - U_{R_{\vartheta}}$$

Wobei wir  $U_{R_{\vartheta}}$  und  $U_{R_3}$  mit dem Spannungsteiler berechnen können:

$$U_{R_{\vartheta}} = U_e \frac{R_{\vartheta}}{R_{\vartheta} + R_1}$$
  
 $U_{R_3} = U_e \frac{R_3}{R_2 + R_3}$ 

Somit gilt für  $U_m$ :

$$U_m = U_e \left( \frac{R_{\vartheta}}{R_{\vartheta} + R_1} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right)$$

Mit der Bedingung,  $U_m(\vartheta = \vartheta_0 = 0) = 0V$  erhalten wir:

$$0V = U_e \left( \frac{R(\vartheta_0)}{R(\vartheta_0) + R_1} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) = U_e \left( \frac{0.9k\Omega}{1.9k\Omega} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right)$$

$$\to \frac{R_3}{R_2 + R_3} = \frac{0.9k\Omega}{1.9k\Omega}$$

$$\to R_3 = \frac{0.9}{1.9} \cdot (R_2 + R_3)$$

Für die Leistung gilt:

$$P_{(R_2,R_3)} = \frac{U_e^2}{R_2 + R_3} \stackrel{!}{=} 10mW$$
  
 $\rightarrow (R_2 + R_3) = \frac{U_e^2}{10mW} = 14400\Omega$ 

Somit gilt:

$$R_3 = \frac{0.9k\Omega}{1.9k\Omega} \cdot (14400\Omega) = 6821.05\Omega$$
  
 $R_2 = 14400\Omega - R_3 = 7578.95\Omega$ 

• c) Wir bezeichnen mit  $U_{ideal}$  die Spannung bei idealer Messung und mit  $U_{err}$  die Spannung mit ungenauen Widerständen.

$$\begin{aligned} U_{ideal} &= 12V \left( \frac{R_{\vartheta}}{R_{\vartheta} + R_1} - \frac{R_3}{R_3 + R_2} \right) \\ U_{err} &= 12V \left( \frac{R_{\vartheta}}{R_{\vartheta} + R_1'} - \frac{R_3'}{R_3' + R_2'} \right) \end{aligned}$$

Die Differenz ist:

$$F(R_{\vartheta})) = U_{ideal} - U_{err} = U_e \left( \frac{R_{\vartheta}}{R_{\vartheta} + R_1} - \frac{R_{\vartheta}}{R_{\vartheta} + R_1'} - \frac{R_3}{R_3 + R_2} + \frac{R_3'}{R_3' + R_2'} \right)$$

Der Fehler wird maximal, wenn die Differenz stark negativ wird. Dies ist der Fall, falls  $\frac{R_3'}{R_3' + R_2'} < \frac{R_3}{R_3 + R_2}$  und  $\frac{R_{\vartheta}}{R_{\vartheta} + R_1'} > \frac{R_{\vartheta}}{R_{\vartheta} + R_1}$  gilt. Somt gilt für die Widerstände:

$$R'_3 < R_3 \rightarrow R'_3 = 0.9 \cdot R_3$$
  
 $R'_2 > R_2 \rightarrow R'_2 = 1.1 \cdot R_2$   
 $R'_1 < R_1 \rightarrow R'_1 = 0.9 \cdot R_1$ 

Um die Temperatur herauszufinden, leiten wir die Differenz nach  $R_{\vartheta}$  ab:

$$\frac{\frac{d}{dR_{\vartheta}}(F(R_{\vartheta})) \stackrel{TR}{=} U_e \cdot \left(\frac{R_1}{(R_1 + R_{\vartheta})^2} - \frac{R_1'}{(R_1' + R_{\vartheta})^2}\right) \stackrel{!}{=} 0}{\stackrel{TR}{\to}} R_{\vartheta} = \sqrt{R_1 \cdot R_1'} = 0.949 \cdot R_1 = 949\Omega$$

$$\rightarrow \left(1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0)\right) = 0.949$$

$$\rightarrow \vartheta = 9.8$$

Der Betrag des Fehler berechnet sich zu:

$$U_{err} = 12V \left( \frac{R_{\vartheta}}{R_{\vartheta} + R'_1} - \frac{R'_3}{R'_3 + R'_2} \right) = 1.07V$$
$$U_{ideal} \stackrel{!}{=} 1.07V \rightarrow R_{\vartheta} =$$

## 6.3 Katalog S. ???

a) Es gilt:

$$\iint_A \vec{J}(\vec{r}) \cdot d\vec{A} = I.$$

Falls das J-Feld und die Fläche senkrecht sind und das J-Feld überall auf dieser Fläche gleich Gross ist, vereinfacht sich dies zu:

$$A_{eff}(\vec{r}) \cdot J(\vec{r}) = I \Rightarrow J(\vec{r}) = \frac{I}{A_{eff}(\vec{r})}$$

Wobei  $A_{eff}$  die effektiv vom Strom durchflossene Fläche bezeichnet.

Somit gilt für die Stromdichte im Messwiderstand:

$$J(r) = \frac{I}{d \cdot 2\pi r}$$

und somit in Vektorform (Zylinderkoordinaten):

$$\vec{J}(r) = \frac{I}{d \cdot 2\pi r} \cdot \vec{e}_r$$

b) Der Zusammenhang zwischen E-Feld und J-Feld ist gegeben als:

$$\vec{E} = \frac{1}{\kappa} \cdot \vec{J}$$

Somt gilt für das E-Feld:

$$\vec{E}(r) = \frac{I}{d \cdot 2\pi r \cdot \kappa} \cdot \vec{e}_r$$

Für die Spannung  $U_{AB}$  gilt:

$$U_{AB} = \int_A^B \vec{E}(r) \cdot d\vec{s} = \int_{rac{D_{Aussen}}{2}}^{rac{D_{Aussen}}{2}} E(r) \cdot dr = \int_{rac{D_{Innen}}{2}}^{rac{D_{Aussen}}{2}} rac{I}{d \cdot 2\pi r \cdot \kappa} \cdot dr = \underbrace{rac{I}{\kappa \cdot d \cdot 2\pi} \cdot ln(rac{D_{aussen}}{D_{innen}})}_{}$$

Für den Widerstand R gilt:

$$R_{AB} := \frac{U_{AB}}{I} = \frac{1}{\kappa \cdot d \cdot 2\pi} \cdot ln(\frac{D_{aussen}}{D_{innen}})$$

Mit den Werten:  $D_{aussen}=2cm, D_{innen}=5mm$ , d=3mm und  $\kappa=12\cdot 10^3\frac{S}{m}$  gilt:

$$R_{AB} = \frac{1}{12 \cdot 10^3 \frac{S}{m} \cdot 3 \cdot 10^{-3} m \cdot 2\pi} \cdot ln(\frac{2 \cdot 10^{-2}}{3 \cdot 10^{-3}}) = 8.387 m\Omega$$

c) Wir betrachten beide Fälle (-3mm und +3mm)

+3mm: 
$$\rightarrow R' = \frac{1}{12 \cdot 10^3 \frac{S}{m} \cdot 3 \cdot 10^{-3} m \cdot 2\pi} \cdot ln(\frac{2 \cdot 10^{-2} + 3 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}}) = 9.005 m\Omega \rightarrow \Delta R = |R - R'| = 0.618 m\Omega$$
  
-3mm:  $\rightarrow R' = \frac{1}{12 \cdot 10^3 \frac{S}{m} \cdot 3 \cdot 10^{-3} m \cdot 2\pi} \cdot ln(\frac{2 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}}) = 7.669 m\Omega \rightarrow \Delta R = |R - R'| = 1.336 m\Omega$ 

$$-3\text{mm:} \rightarrow R' = \frac{1}{12 \cdot 10^3 \frac{S}{m} \cdot 3 \cdot 10^{-3} m \cdot 2\pi} \cdot ln(\frac{2 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}}) = 7.669 m\Omega \rightarrow \Delta R = |R - R'| = 1.336 m\Omega$$

Daraus Folgt: Maximaler Fehler bei -3mm. R' ist dann  $7.669m\Omega$  und für den Fehler gilt:  $\Delta R =$  $1.336m\Omega$ 

## d) Beim Messen gilt:

$$\frac{U_{AB}}{R_{AB}} = I \to \Delta I = \left| \frac{U_{AB}}{R_{AB}} - \frac{U_{AB}}{R_{AB}'} \right|$$

$$F = \frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta I}{U_{AB}/R_{AB}} = \left| 1 - \frac{R_{AB}}{R_{AB}'} \right| = \left| 1 - \frac{8.387m\Omega}{7.669} \right| = 9.28\%$$

e) es gilt:  $U_{AC} = \int_{r_a}^{r_c} E \cdot dr$  und  $U_{CB} = \int_{r_c}^{r_b} E \cdot dr$ . Das Integral  $\int_{r_a}^{r_b} E \cdot dr$  haben wir bereits ausgerechnet. Es ergibt:  $\frac{I}{\kappa \cdot d \cdot 2\pi} \cdot ln(\frac{r_b}{r_a})$  Somit lautet die Gleichung:

$$\frac{\frac{I}{\kappa \cdot d \cdot 2\pi} \cdot ln(\frac{r_c}{\frac{D_{innen}}{2}}) = \frac{I}{\kappa \cdot d \cdot 2\pi} \cdot ln(\frac{\frac{D_{aussen}}{2}}{r_c})$$

$$\Rightarrow \frac{2r_c}{D_{innen}} = \frac{D_{aussen}}{2r_c} \rightarrow r_c = \frac{\sqrt{D_{aussen} \cdot D_{innen}}}{2} = 5mm$$