

## 1. Elektrische Energiewandler - Einführung

### 1.1 Grundsätzliche Einteilung elektrischer Energiewandler

*Elektrische Energiewandler* formen elektrische Energie um, wobei unterschiedliche Typen von Wandlern bekannt sind.

- **Elektrische Energie** wird wieder in elektrische Energie umgewandelt durch Transformatoren, DC-DC-Wandler, Schaltnetzteile, etc.
- **Mechanische Energie** wird in elektrische Energie umgewandelt (und umgekehrt) durch die elektromechanischen Energiewandler (elektrische Maschinen, elektromagnetische Aktoren wie z.B. Antriebe für Stellventile), etc. Es werden rotierende und linear bewegende Ausführungsformen unterschieden.
- **Chemische Energie** (Bindungsenergie in Molekülen) wird in elektrische Energie und umgekehrt durch Batterien, Brennstoffzellen etc. umgewandelt.
- **Licht** (elektromagnetische Welle!) wird in elektrische Energie (und umgekehrt) durch Photozellen, Leuchtdioden, etc. umgewandelt.
- **Kernenergie** wird direkt in elektrische Energie in Radionuklidbatterien umgewandelt.
- **Strömungsenergie** (mechanische Energie in strömenden Medien wie z. B. elektrisch leitfähige Gase) wird direkt in elektrische Energie in magnetohydrodynamischen Wandlern umgeformt (z. B. Satellitenpositionierantrieb).

Hier werden die Transformatoren und die elektrischen Maschinen grundsätzlich dargestellt.

#### Beispiel 1.1-1:

##### *Elektromotor (Bild 1.1a)*

Der **Elektromotor** ist ein rotatorischer **elektromechanischer** Energiewandler, der elektrische Energie aus dem elektrischen Netz entnimmt und in mechanische Energie umformt. Diese Energie wird zum Antrieb einer mechanischen Arbeitsmaschine, z. B. einer mit dem Elektromotor gekuppelten Pumpe, die Grundwasser hoch pumpt, benötigt. Die **Drehzahl** des rotierenden Läufers (Rotors) des Elektromotors  $n_M$  ist die Anzahl der Umdrehungen des Motorläufers je Zeiteinheit (z. B. 1500 Umdrehungen je Minute,  $n_M = 1500/\text{min}$ ). Sie ist bei direkter ("starrer") Kupplung mit der Arbeitsmaschine auch die Drehzahl  $n_A$  dieser Arbeitsmaschine (siehe Formelzeichen-Übersicht).

#### Beispiel 1.1-2:

##### *Linearmotor (Bild 1.1b)*

Linear bewegende Elektromotoren (**Linearmaschinen**) sind durch die Geschwindigkeit  $v_M$  ihres bewegten Sekundärteils gekennzeichnet, die in der Regel auch die Geschwindigkeit  $v_A$  der angetriebenen Arbeitsmaschine ist. Linearmaschinen werden z. B.

- in Werkzeugmaschinen verwendet, wo der Schlitten mit dem Drehmeißel bewegt wird,
- bei Flugzeugkatapulten,
- bei Hochgeschwindigkeitszügen im Verbund mit magnetischem Schweben (z. B. YAMANASHI-Projekt in Japan mit  $v_M = 550 \text{ km/h}$  Geschwindigkeit) u. ä.

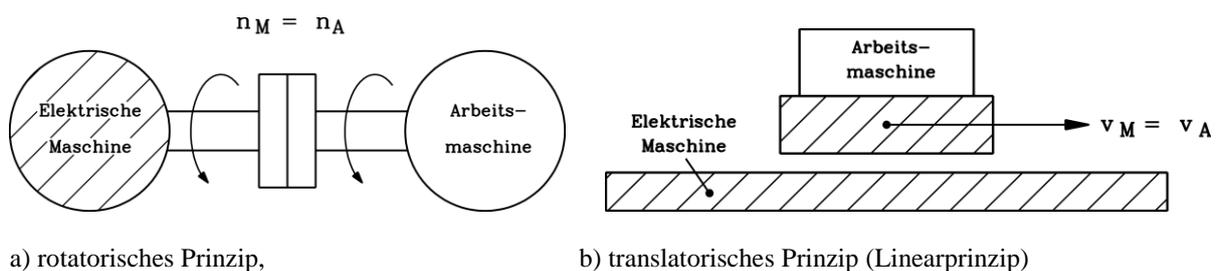


Bild 1.1: Elektrische Maschine als Antrieb einer mit ihr gekuppelten Arbeitsmaschine

## 1.2 Elektrische und magnetische Energiewandlung

Elektrische Energiewandler basieren für Leistungen ab etwa 1 Watt aufwärts bis hin zu größten Leistungen auf **magnetischen Feldern**. Nur bei kleinsten Wandlern ("Mikrotechnik") wird die Energiewandlung auf Basis des elektrischen Feldes realisiert. Warum? Dies kann anhand der im magnetischen bzw. elektrischen Feld gespeicherten Energie beantwortet werden.

Im Elektromagnetismus sind

- **elektrisches Feld**  $E$  bzw. **elektrische Flussdichte**  $D = \varepsilon E$  ("dielektrische Verschiebung")
- und **magnetisches Feld**  $H$  bzw. **magnetische Flussdichte**  $B = \mu H$  ("magnetische Induktion") prinzipiell miteinander verknüpft.

Bei niedrigen Änderungsraten dieser Feldgrößen (= niedrige Frequenzen  $f$  von wenigen Hz bis einige kHz) kann diese Kopplung vernachlässigt werden, so dass elektrisches und magnetisches Feld getrennt betrachtet werden. Die **Energiedichte**  $w$  (= Energie je Volumeneinheit) im elektrischen Feld  $E$  bzw. im magnetischen Feld  $H$  ist

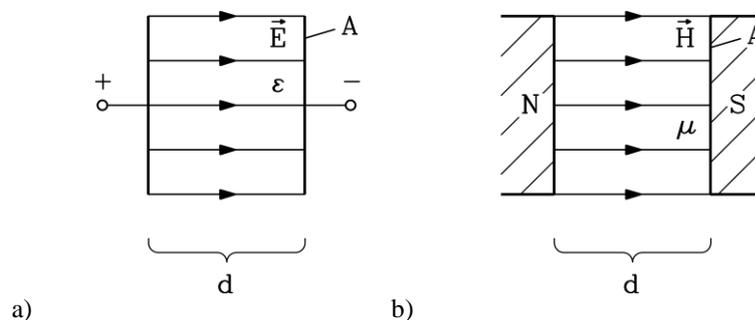
$$w = \frac{\varepsilon \cdot E^2}{2} = \frac{D^2}{2\varepsilon} \quad \text{bzw.} \quad w = \frac{\mu \cdot H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu} \quad (1.1)$$

Die in einem **Kondensator** (Plattenabstand  $d$  zwischen Plus- und Minusplatte, Plattenfläche  $A$ ) (Bild 1.2a) gespeicherte elektrische Energie  $W$  ist das Produkt "Volumen x Energiedichte":

$$W = (A \cdot d) \cdot \frac{\varepsilon \cdot E^2}{2} \quad (1.2)$$

Die in einem Luftspalt (Länge  $d$ ) zwischen zwei Polschuhen eines **Magneten** (Nord- und Südpol, Polfläche  $A$ ) gespeicherte magnetische Energie  $W$  (Bild 1.2b) ist "Luftspaltvolumen x Energiedichte":

$$W = (A \cdot d) \cdot \frac{\mu \cdot H^2}{2} = (A \cdot d) \cdot \frac{B^2}{2\mu} \quad (1.3)$$



**Bild 1.2:** Gespeicherte Energie: a) elektrische Energie im Plattenkondensator, b) magnetische Energie im Luftspalt zwischen zwei Polschuhen eines Magneten. (Annahme: idealisiertes Homogenfeld, Streufelder an den Rändern des Kondensators bzw. Magneten vernachlässigt).

### Beispiel 1.2-1:

Vergleich der gespeicherten Energie in einem Kondensator mit der magnetischen Energie in einem Luftspalt gleichen Volumens ( $d = 1 \text{ mm}$  und  $A = 1 \text{ m}^2$ ):

a) Kondensator: Dielektrikum "Luft", Dielektrizitätskonstante:  $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$  As/(Vm).

In Luft ist die elektrische Feldstärke durch die Durchschlagfeldstärke  $E_D$  der Luft (ca. 30 ... 40 kV/cm) begrenzt.

$$\text{Elektrische Energie: } W = A \cdot d \cdot \frac{\epsilon_0 E^2}{2} = 1 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{8.854 \cdot 10^{-12} \cdot (4 \cdot 10^6)^2}{2} = \underline{\underline{0.07}} \text{ Ws}$$

b) Magnetfeld: Permeabilitätskonstante von Luft:  $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Vs/(Am).

Das Eisen der Polschuhe des Magneten sättigt ab ca.  $B = 1.7$  T, so dass hier  $B = 1$  T verwendet wird.

$$\text{Magnetische Energie: } W = A \cdot d \cdot \frac{B^2}{2\mu_0} = 1 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1^2}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = \underline{\underline{400}} \text{ Ws}$$

### Anmerkung:

Moderne magnetische Energiespeicher mit supraleitenden Spulen (zur Vermeidung von Stromwärmeverlusten) z. B. zur Überbrückung von Stromausfällen nutzen den in (1.3) beschriebenen physikalischen Effekt zur Speicherung von magnetischer Energie.

### Mit welcher Zugkraft $F$ ziehen sich die Platten des Kondensators bzw. die Oberflächen der Magnetpolschuhe an?

Die gespeicherte Energie  $W$  kann in mechanische Arbeit ("Kraft x Weg") verwandelt werden, wenn durch die Anziehungskraft  $F$  die beiden Platten des Kondensators bzw. die beiden Polschuhoberflächen sich aufeinander zu bewegen, bis sie einander berühren. Sie legen dabei den Weg  $d$  zurück.

$$\boxed{F = W / d = \frac{\epsilon \cdot E^2}{2} \cdot A} \quad \text{bzw.} \quad \boxed{F = \frac{B^2}{2\mu} \cdot A} \quad (1.4)$$

### Beispiel 1.2-2:

Elektrische und magnetische Zugkraftdichte  $f = F/A$  (zu Bsp. 1.2-1):

a) Kondensator:  $\epsilon = \epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$  As/(Vm),  $E_D = 40$  kV/cm =  $4 \cdot 10^6$  V/m :

$$f = \frac{\epsilon_0 \cdot E^2}{2} = \frac{8.854 \cdot 10^{-12} \cdot (4 \cdot 10^6)^2}{2} = \underline{\underline{70.8}} \text{ N/m}^2$$

b) Magnet: Permeabilitätskonstante:  $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Vs/(Am),  $B = 1$  T :

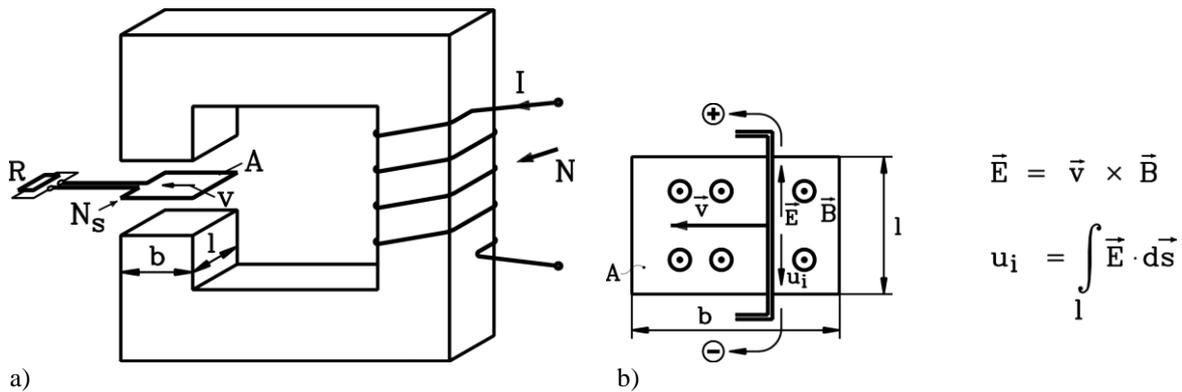
$$f = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{1^2}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = \underline{\underline{398089}} \text{ N/m}^2$$

### Fazit:

Das magnetische Feld erlaubt wesentlich höhere Energiedichten (hier:  $400/0.07 = 5700$  !) bzw. Kräfte, so dass **elektrische Energiewandler bevorzugt mit magnetischen Feldern arbeiten**. Nur bei Mikromotoren (kleine Kräfte) werden auch elektrostatische Kräfte zum Bewegen der Motorläufer eingesetzt (z. B. Ausnutzung des Piezoeffekts).

Die Kraftwirkung kann unmittelbar aus dem **Feldlinienbild** verstanden werden (Bild 1.2). Die  $E$ - bzw.  $B$ -Feldlinien können in ihrer Wirkung wie "elastische Gummischnüre" aufgefasst werden, die sich nach Möglichkeit verkürzen wollen und daher auf die Kondensatorplatten bzw. Polschuhflächen eine Zugkraft ausüben.

1.3 Beispiel eines einfachen elektromechanischen Energiewandlers



**Bild 1.3:** Einfacher elektromechanischer Energiewandler: a) Eine Spule wird durch eine mechanische Kraft in einem Magnetfeld, das zwischen zwei Eisen-Polen von einer Erregerspule erzeugt wird, bewegt. b) In die bewegte Spule wird eine elektrische Spannung induziert, so dass bei Belastung der Spule mit einem Widerstand Strom fließen kann. Es ist somit mechanische Bewegungsenergie der Spule in elektrische Energie gewandelt worden (Spule ist elektrischer Generator).

Eine Spule mit  $N_s$  Windungen wird durch eine mechanische Kraft  $F_m$  in einem Magnetfeld  $B_\delta$ , das zwischen zwei Polen eines magnetischen Eisenkreises von einer Erregerspule ( $N$  Windungen, Erregerstrom  $I$ ) erzeugt wird, mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegt. In die bewegte Spule wird durch Bewegungsinduktion eine elektrische Spannung  $u_i$  induziert, die bei konstanter Geschwindigkeit  $v$  und räumlich konstantem Feld  $B_\delta$  (Homogenfeld) eine Gleichspannung  $U_i$  ist (Bild 1.3).

$$U_i = N_s \cdot v \cdot B_\delta \cdot l \tag{1.5}$$

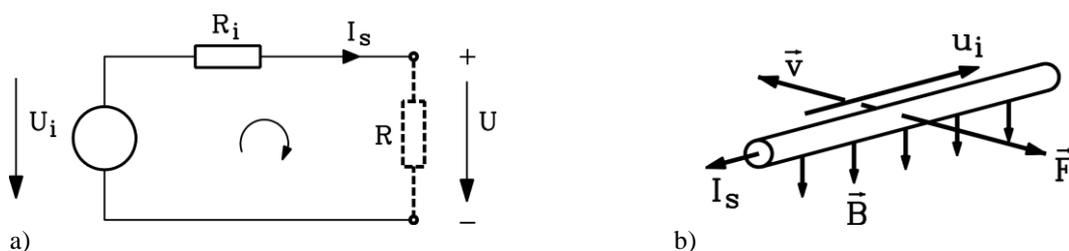
Wird die Spule ( $R_i$  : Spuleninnenwiderstand) mit dem Widerstand  $R$  belastet, so fließt ein Spulenstrom

$$I_s = U_i / (R + R_i) \tag{1.6}$$

GEGEN die Richtung der induzierten Spannung  $U_i$  und IN Richtung des äußeren Spannungsfalls  $U$  am Widerstand  $R$  (Bild 1.4a). Es tritt daher eine bremsende LORENTZ-Kraft

$$F = N_s \cdot I_s \cdot B_\delta \cdot l \tag{1.7}$$

an der Spule auf (Bild 1.4b).



**Bild 1.4:** a) Elektrisches Ersatzschaltbild der bewegten Spule als Generator, b) bremsende LORENTZ-Kraft auf die stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld

Um die Bewegung der Spule mit konstanter Geschwindigkeit  $v$  aufrecht zu erhalten, muss daher ständig eine mechanische Kraft  $F_m = F$  entgegen der Richtung von  $F$  aufgebracht werden.

Von dem die Spule antreibenden mechanischen Antriebssystem wird der Spule die **mechanische Leistung**

$$P_m = F_m v = P_{in} \quad (1.8)$$

zugeführt, die in elektrische, „innere“ Leistung  $P_i$  umgewandelt wird. Abgegeben wird die **elektrische Leistung**  $P_{out}$  an den Belastungswiderstand  $R$ .

$$P_{in} = F_m \cdot v = F \cdot v = N_s I_s l B_\delta v = I_s (N_s v B_\delta l) = I_s U_i = P_i \quad (1.9)$$

$$P_{out} = R I_s^2 = \frac{R \cdot U_i^2}{(R + R_i)^2} \quad (1.10)$$

Das Verhältnis von abgegebener zu zugeführter Leistung ist der **Wirkungsgrad**  $\eta$ .

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{R}{R_i + R} < 1 \quad (1.11)$$

#### Beispiel 1.3-1:

Zahlenwerte zum einfachen elektromechanischen Energiewandler:

Spule:  $N_s = 5$ , Magnetfeld  $B_\delta = 1.2$  T, Geschwindigkeit  $v = 100$  m/s = 360 km/h, Länge der Spulenseite  $l = 0.5$  m,  $R_i = 0.1$  Ohm,  $R = 1$  Ohm:

$$U_i = N_s \cdot v \cdot B_\delta \cdot l = 5 \cdot 100 \cdot 1.2 \cdot 0.5 = 300 \text{ V}$$

$$I_s = U_i / (R + R_i) = 300 / (0.1 + 1) = 272.73 \text{ A}$$

$$F = N_s \cdot I_s \cdot B_\delta \cdot l = 5 \cdot 272.73 \cdot 1.2 \cdot 0.5 = 818.18 \text{ N}$$

$$P_m = F_m v = P_{in} = 818.18 \cdot 100 = 81818 \text{ W}$$

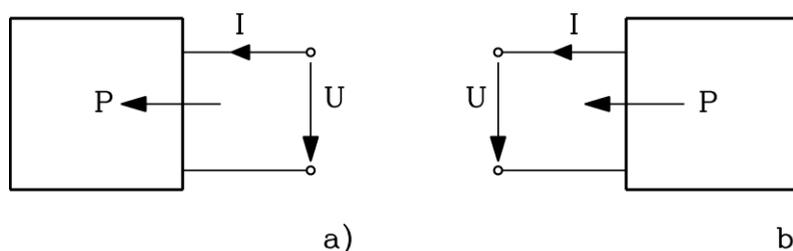
Kontrolle:

$$P_{in} = P_i = I_s U_i = 272.73 \cdot 300 = 81818 \text{ W}$$

$$P_{out} = R I_s^2 = 1 \cdot 272.73^2 = 74382 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{74382}{81818} = 0.909 \quad \text{bzw.} \quad \eta = \frac{1}{0.1 + 1} = 0.909$$

### 1.4 Zählpeilsysteme



**Bild 1.5:** Positive Strom-, Spannungs- und Leistungsflussrichtung, a) Verbraucher-Zählpeilsystem, b) Erzeuger-Zählpeilsystem

Fasst man den Energiewandler als **Black-Box** auf, so kann gemäß Bild 1.5a) bei positiver an den Klemmen anliegender Spannung  $U$  ein IN den Wandler fließender Strom positiv gezählt werden. Dann ist auch die zugeführte elektrische Leistung  $P = U \cdot I$  positiv zu zählen. Sie wird dem Wandler zugeführt; er "verbraucht" diese Leistung. Dieses Zählpfeilsystem heißt "**Verbraucher-Zählpfeilsystem**", weil die vom Wandler aufgenommene elektrische Leistung positiv gezählt wird. In gleicher Weise wird die vom Wandler abgegebene mechanische Leistung positiv gezählt.

Beispiel 1.4-1:

*Elektromotor, VZS:*

Ein Elektromotor nimmt elektrische Energie auf und wandelt sie in mechanische Energie um. Er ist ein elektrischer Verbraucher.

Elektromotor: Nennleistung = mechanische Abgabeleistung: 10 kW, Wirkungsgrad: 0.9

- Zugeführte elektrische Leistung:  $P_1 = 10/0.9 = 11.1 \text{ kW} > 0$

- Abgegebene mechanische Leistung:  $P_2 = 10 \text{ kW} > 0$

- Verluste im Motor:  $P_d = P_1 - P_2 = 11.1 - 10 = 1.1 \text{ kW} > 0$

Beispiel 1.4-2:

*Elektrischer Generator, VZS:*

Ein Generator nimmt mechanische Energie auf und wandelt sie in elektrische Energie um. Er ist ein elektrischer Erzeuger.

Lichtmaschine im Auto: Nennleistung = ele. Abgabeleistung: 750 W, Wirkungsgrad: 0.7

- Abgegebene elektrische Leistung:  $P_1 = -750 \text{ W} < 0$

- Zugeführte mechanische Leistung:  $P_2 = -750/0.7 = -1071 \text{ W} < 0$

- Verluste im Generator:  $P_d = P_1 - P_2 = -750 - (-1071) = 321 \text{ W} > 0$

Die Verluste sind "verbrauchte" Leistung und daher im VZS stets positiv.

Wird umgekehrt ein AUS dem Wandler fließender Strom positiv gezählt, so ist auch die zugehörige, vom Wandler abgegebene elektrische Leistung  $P$  positiv ("**Erzeuger-Zählpfeilsystem**", EZS). **In diesem Skriptum wird im Folgenden das Verbraucher-Zählpfeilsystem (VZS) verwendet.**

Elektrische Verbraucher wie Heizwiderstände, Elektromotoren, Batterien im Ladezustand, etc. nehmen im VZS positive Wirkleistung ( $P > 0$ ) aus dem Netz auf.

Elektrische Erzeuger wie Generatoren, Batterien im Entladezustand, energieliefernde Brennstoffzellen etc. nehmen im VZS negative Wirkleistung aus dem Netz auf ( $P < 0$ ); sie liefern Wirkleistung ins Netz.

Beispiel 1.4-3:

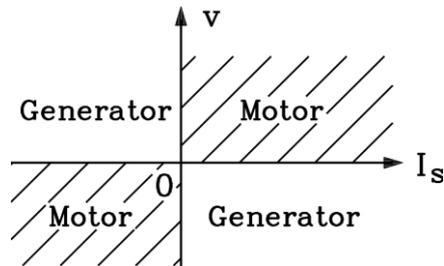
*Energiewandler von Bsp. 1.3-1 im Verbraucher-Zählpfeilsystem:*

Generatorischer Betrieb	Motorischer Betrieb
$v > 0, B_\delta > 0 \Rightarrow U_i > 0$	
$I_s < 0, v > 0$	$I_s > 0, v > 0$
$P_i = U_i I_s < 0$	$P_i = U_i I_s > 0$
$P_{out} < 0$	$P_{out} > 0$
$P_m = P_{in} < 0$	$P_m = P_{in} > 0$
$I_s$ - $v$ -Ebene: <b>2. Quadrant</b>	$I_s$ - $v$ -Ebene: <b>1. Quadrant</b>

Tabelle 1.1: Generatorische und motorische Energiewandlung im Verbraucherzählpfeilsystem

Der Energiewandler arbeitet als Generator, daher ist bei positiver Geschwindigkeit  $v$  und positivem Feld  $B_\delta$  die Spannung  $U_i$  positiv, aber der Strom gemäß Bild 1.5a im VZS negativ:  $I_s = -272.73$  A, ebenso  $P_e = -81818$  W und  $P_m = -74382$  W.

Bei Umkehr der Stromrichtung (Stromzufuhr aus einer externen Spannungsquelle, Vorzeichenumkehr bei  $I_s$ ) wirkt die LORENTZ-Kraft in Richtung der Spulenbewegung und bewegt sie daher (MOTOR-Prinzip). In der  $I_s$ - $v$ -Ebene kann Generator- und Motorbetrieb durch Einteilung in "Quadranten" dargestellt werden. Bei negativer Geschwindigkeit  $v < 0$  (= umgekehrte Bewegungsrichtung) können ebenfalls motorischer und generatorischer Betrieb der Spule eingestellt werden (**3. und 4. Quadrant**).



**Bild 1.6:** Vier-Quadrantenbetrieb: Verbraucher-Zählpeilsystem (VZS):  
 $v > 0, I_s > 0$  und  $v < 0, I_s < 0$ : Motor       $v > 0, I_s < 0$  und  $v < 0, I_s > 0$ : Generator