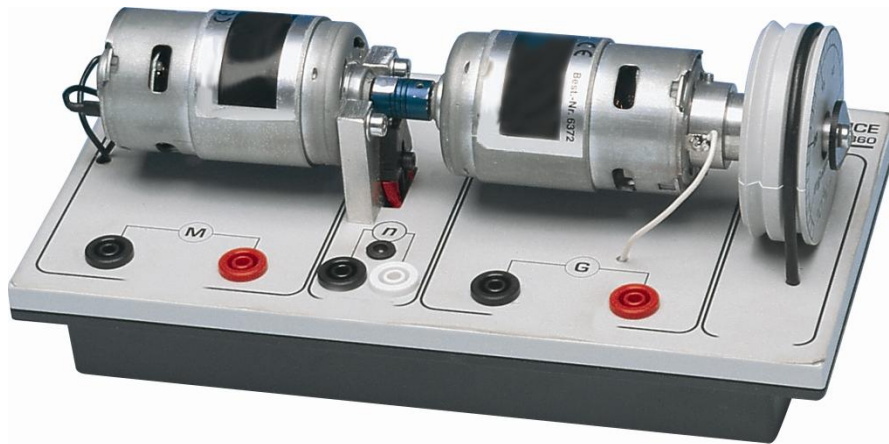


## Motor-Generator-Modell



### 1. Vorstellung des Gerätes

#### 1.1 Zweck

Das Modell ist ein Beispiel für eine Energiekette, deren Zweck es ist, die Schüler mit folgenden physikalischen Phänomenen vertraut zu machen

- Messung des Drehmomentes
- Demonstration der Energieumwandlung
- Berechnung des Wirkungsgrades
- Energietransfer innerhalb einer Schaltung
- usw.

#### 1.2. Beschreibung

Zwei kleine elektrische Motoren sind miteinander mechanisch verbunden, einer arbeitet als Motor, der andere als Generator. Auf der Achse sitzt ein kleiner Magnet, der sich vor einer Spule dreht. Damit kann die Drehzahl mit einem Frequenzmesser oder Oszilloskop gemessen werden.

Außerdem ist ein Tachogenerator gekoppelt, der eine der Drehzahl proportionale Spannung liefert. Damit kann die Drehzahl mit einem Voltmeter gemessen werden.

Auf der Achse des Generators sitzt ein Kraftmesser als Messgerät für das Drehmoment mit einer Skala 0 bis  $30 \cdot 10^{-3}$  mit Nullpunkteinstellung.

Motor: im Leerlauf 12 V – 15.600 U/min - 0,6 A

bei maximaler Belastung 12 V – 13.000 U/min - 3 A -  $165 \cdot 10^{-3}$  Nm.

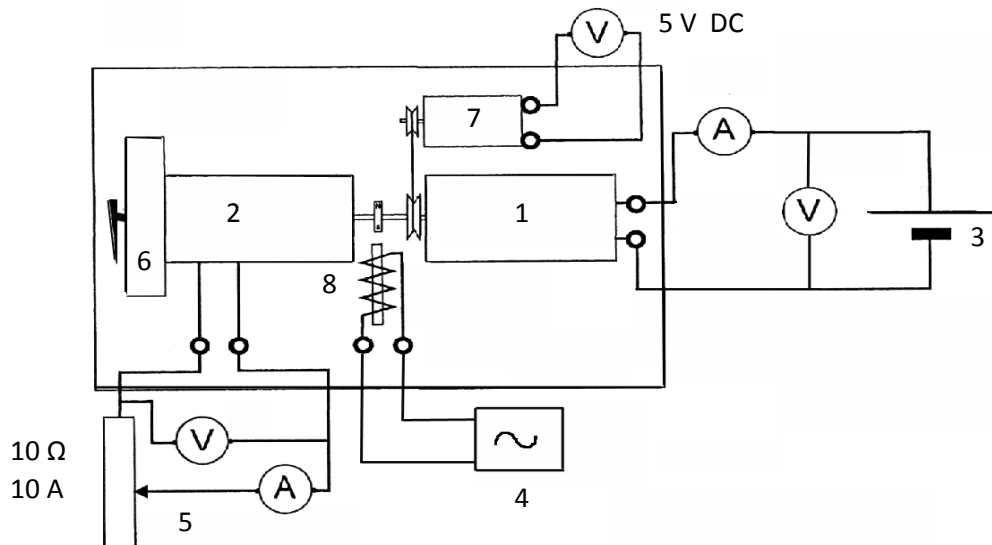
bei Überlastung (Stillstand): 1 Nm, Leistung 20 W (Wirkungsgrad 60 %).

Abmessungen: Grundplatte 220 x 120 x 30 mm, Gewicht 800 g.

#### Erforderliche Geräte

- Netzgerät 12 V DC, ca. 5 A - Spannungsmesser - Strommesser
- Schiebewiderstand ca. 10  $\Omega$  ca. 10 A

- Oszilloskop oder Zähler oder Frequenzmesser



### Aufbau

- |   |                           |
|---|---------------------------|
| 1 = Motor                                   | 5 = Schiebewiderstand     |
| 2 = Generator                               | 6 = Drehmomentmesser      |
| 3 = Netzgerät 3 - 7 V                       | 7 = Tachogenerator        |
| 4 = Zähler, Frequenzmesser oder Oszilloskop | 8 = Dauermagnet und Spule |

### 2. Mögliche Versuche

- Energie-Bilanz
- aufgenommene Leistung  $P_A = U \cdot I$
- Verluste: Joulscher Effekt  $R \cdot I^2$ , Reibungsverluste (konstant)  $P_C$
- nutzbare elektrische Leistung  $P_{EU} = E \cdot I$
- nutzbare mechanische Leistung  $P_U = P_{EU} - P_C$
- Wirkungsgrad  $\eta_M = \frac{P_U}{P_A}$
- Gesamtleistung  $P_R = U_R \cdot I_R$

Versuche im Leerlauf: 
$$U = \frac{E'}{R \cdot I} \text{ mit } E' = n \cdot N \cdot \Phi$$

Folgende Kurve kann gezeichnet werden:  $n = f(U)$  mit Werten für  $U$  von 0.....8 V.

Die so erhaltene Gerade wird nachgewiesen durch: 
$$n = \frac{U - R \cdot I}{N \cdot \Phi}$$

Versuche unter Last:

Die Last wird durch den Generator dargestellt.

Der Motor wird mit etwa 6 V betrieben.

An den Generator wird ein Schiebewiderstand ca. 10  $\Omega$ , 10 A angeschlossen.

Man kann untersuchen:

- $n = f(I)$  Winkelgeschwindigkeit (U = konst.)
- $C_U = f(I)$  Drehmoment (n = konst.)
- $C_U = f(n)$  Drehmoment (U = konst.)

Mit dieser letzten Kurve kann der Arbeitsbereich des Motors in Funktion der mechanischen Eigenschaften des zu untersuchenden Systems bestimmt werden.

$n = f(I)$  ist eine Gerade, bestimmt durch  $C_U = \frac{N \cdot \Phi \cdot I}{2\pi} - C_P$  (U und  $\Phi$  sind konstant)

$C_U = f(I)$  ist eine Gerade (der Art  $y=a \cdot x-b$ )  $C_U = \frac{k \cdot U}{R} - n \frac{N \cdot \Phi}{R} - C_P$

$C_U = f(n)$  ist eine Gerade (der Art  $y=a \cdot x-b$ )  $C_U = \frac{k \cdot U}{R} - n \frac{N \cdot \Phi}{R} - C_P$

### 3. Drehmoment: Untersuchung der Motor-Generator-Einheit

Bestimmung der Parameter des Motors:

Annahme: die angelegte Spannung ist bekannt

Zu bestimmen sind:

#### 3.1 Der Spulenwiderstand des Motors R

Man lässt einen Strom, z. B. 1 A, fließen (Rotor des Motors ist blockiert).

Man notiert die entsprechende Spannung. Diese Messung ist mehrmals bei verschiedenen Stellungen des Rotors zu wiederholen, da je nach Stellung des Kollektors bzw. der Bürsten unterschiedliche Windungszahlen gemessen werden können. Der Mittelwert der Messungen ist eine gute Annäherung für den Widerstand.

Der Widerstand R der Wicklung beträgt etwa 0,8  $\Omega$

#### 3.2 Leerlauf-Drehzahl: $\omega_0$

Der Motor wird an die Spannung U angeschlossen.

Die Verlustenergie der Anordnung ist, außer dem geringen Verlust durch den Jouleschen Effekt in den Spulen, nur abhängig von den Reibungsverlusten. Man kann außerdem annehmen, dass das Verhältnis der Verluste  $C_P$  praktisch konstant ist.

Die Drehzahl wird mit einem Zähler oder Frequenzmesser (oder Oszilloskop) gemessen, der an die Spule auf der Grundplatte angeschlossen wird. Vor der Spule dreht sich ein kleiner Stabmagnet, der an der Motor-Generator-Achse befestigt ist.

Die Drehzahl kann ebenfalls über den kleinen Tachogenerator und ein angeschlossenes Voltmeter gemessen werden. Die gemessene Spannung ist proportional der Rotations-Geschwindigkeit  $\omega_v$ .

Die Messung der Stromstärke erlaubt die Schätzung von  $C_p = \frac{U \cdot I}{\omega_v}$

### 3.3 Drehmoment des blockierten Motors:

Der Motor wird an die Spannung U angeschlossen.

Man nutzt die Tatsache, dass Motor und Generator gleich sind. Man benutzt den Generator, der direkt mit einem Kraftmesser gekoppelt ist, an dem das Drehmoment abgelesen werden kann.

Wenn die Motor-Generator-Achse blockiert ist und der Generator wie folgt an ein Netzgerät angeschlossen ist:

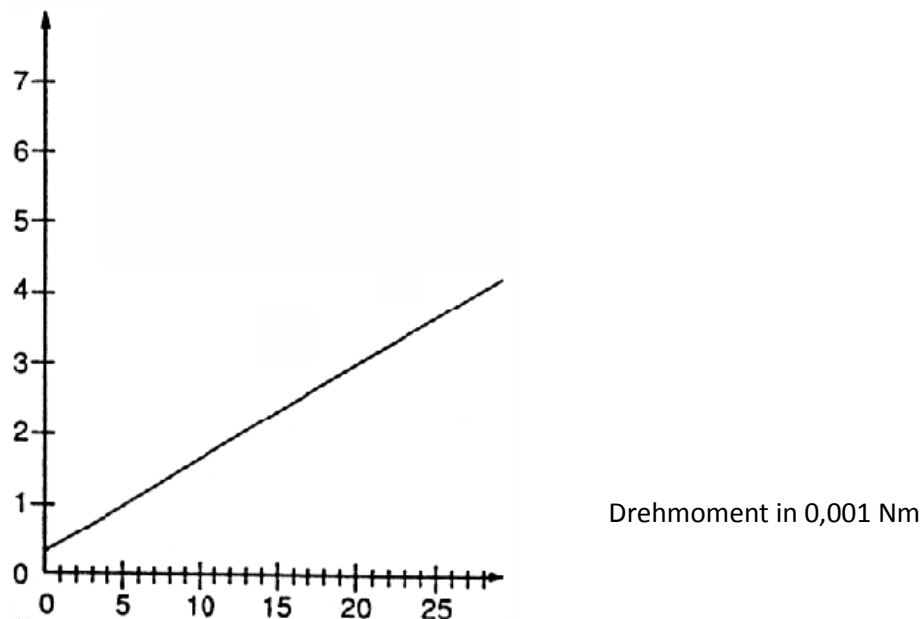
- a) schwarze Buchse an Plus-Pol des Netzgeräts
- b) rote Buchse an Minus-Pol des Netzgeräts

Die Stromstärke und das Drehmoment werden gemessen. Führen Sie mehrere Messungen bei unterschiedlichen Stellungen der Motor-Generator-Achse durch, da je nach Stellung des Kollektors bzw. der Bürsten unterschiedliche Windungszahlen gemessen werden können.

- Mittelwert berechnen
- Sicherstellen, dass Drehmomentmesser auf Null zurückgeht
- Weitere Messungen durchführen

Bei mehreren Messungen mit verschiedenen Werten von U erhält man die Kurve aus Abb. 1 (Stromstärke I abhängig vom Drehmoment).

I in A

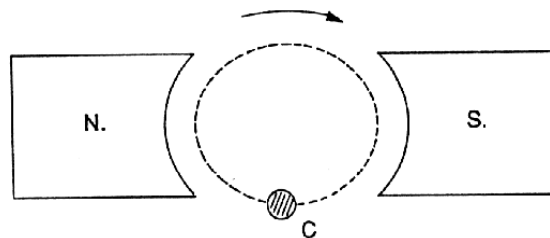


Theoretische Untersuchungen:

Beide Motoren sind Gleichstrom-Motoren, die Erregung wird erzeugt durch Permanent-Magnete - 2 Pole.

Diese Motoren sind robust und zuverlässig, sie werden in Spielzeugen, Ventilatoren, kleinen Werkzeugmaschinen, usw. eingesetzt.

Man geht von einem bipolaren Motor aus. Ein Leiter C am Rotor, der von einem Strom  $I_1$  durchflossen ist, durchläuft das gesamte vom Nordpol ausgehende Magnetfeld während einer 1/2 Umdrehung.



Die Wirkarbeit ist:

$$W = I_1 \cdot \Delta\Phi = \frac{1}{2} \cdot \Delta\Phi$$

Wobei:  $I$  ist die Stromstärke

$I_1$  ist die Stromstärke beim Durchlaufen des Magnetfeldes in einer Richtung.

Obiges gilt für 1/2 Umdrehung, für eine Zeit  $\Delta t$  gilt:  $\Delta t = \frac{1}{2} \div n = \frac{1}{2n}$

Ein bipolarer Motor mit  $N$  Windungen pro Pol hat folgende elektrische Leistung:

$$P_{EU} = \frac{N \cdot W}{\Delta t} = n \cdot N \cdot \Delta\Phi \cdot I = E \cdot I$$

Drehmoment des Motors

$$P = C_{EM} \cdot \omega \quad (\text{klassische Formel})$$

Wobei hier  $P = P_{EU}$  ist

$$C_{EM} = \frac{P_{EU}}{\omega} = \frac{n \cdot N \cdot \Phi \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{N \cdot \Phi}{2 \cdot \pi} \cdot I$$

Das nutzbare Moment ist nach Abzug der mechanischen Verluste etwas kleiner

$$C_U = C_{EM} - C_P$$

Dieses Moment ist an der Welle des Motors verfügbar

$$C_U = \frac{N \cdot \Phi}{2 \cdot \pi} \cdot I - C_P$$

$C_P$  wird verursacht durch die Reibung, kann als näherungsweise konstant bezeichnet werden.

Das nutzbare Moment  $C_U$ , das man messen kann, ist in Abb. 3 dargestellt.

Man kann die Kurve von 2 Punkten betrachten:

1. Messung bei Leerlauf-Drehzahl
2. Messung bei blockiertem Motor (Geschwindigkeit = 0)

Aus diesen letzten Messungen hat man Zugang zu:

### Nutzbare mechanische Leistung

Das ist das Produkt aus Drehmoment und der Winkelgeschwindigkeit der Rotation.

Aus der Formel

$$C_U = C_{EM} - C_P = \frac{k \cdot U}{R} - n \frac{N \cdot \Phi}{R} - C_P$$

kann man  $n$  als Funktion von  $C_U$  darstellen  $n = \frac{R}{n \cdot \Phi} \left( \frac{k \cdot U}{R} - C_P - C_U \right)$

und man kann  $P$  errechnen

$$P_U = C_U \cdot \omega = C_U \cdot 2\pi \cdot n = \frac{2\pi \cdot C_U \cdot R}{n \cdot \Phi} \left( \frac{k \cdot U}{R} - C_P - C_U \right)$$

$$P = \frac{2\pi}{n \cdot \Phi} \left( k \cdot U - C_P \cdot R \right) C_U - \frac{2\pi \cdot R}{n \cdot \Phi} C_U^2$$

Die Kurve  $P = f(C_U)$  ist eine Parabel.

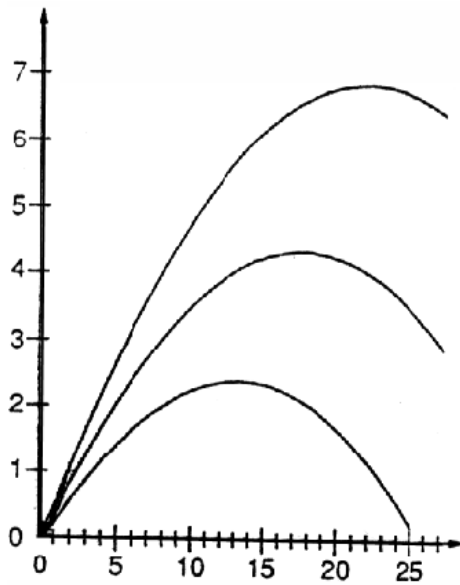
Wenn  $C_U = 0$  und  $P = 0$  ist (Leerlauf):

$P = 0$  wenn:

$$C_U = \frac{n \cdot \Phi}{2\pi \cdot R} \cdot \frac{2\pi}{n \cdot \Phi} \left( k \cdot U - C_P \cdot R \right) = \frac{k \cdot U}{R} - C_P$$

(entspricht dem Moment bei blockierter Motor-Generator-Welle)

Praktisch kann man vorgenannte Funktion als Kurve aufzeichnen, indem man das Produkt von  $C_U$  und  $\omega$  Punkt für Punkt aufzeichnet (siehe Abb. 2)



Nutzbare Leistung bei U = 5 V; 4 V; 3 V:

Aus der Grafik kann man die Bereiche maximaler Leistung erkennen, in denen man sich beim Betrieb eines Motors bewegen sollte. Moment in 0,001 Nm.

Winkelgeschwindigkeit

Das elektromagnetische Moment des Motor-Generator-Modells ist proportional I:

$$C_{EM} = \frac{N \cdot \Phi}{2\pi} \cdot I = k \cdot I$$

I kann ersetzt werden aus:  $U = R \cdot I + E'$  mit  $E' = n \cdot N \cdot \Phi$

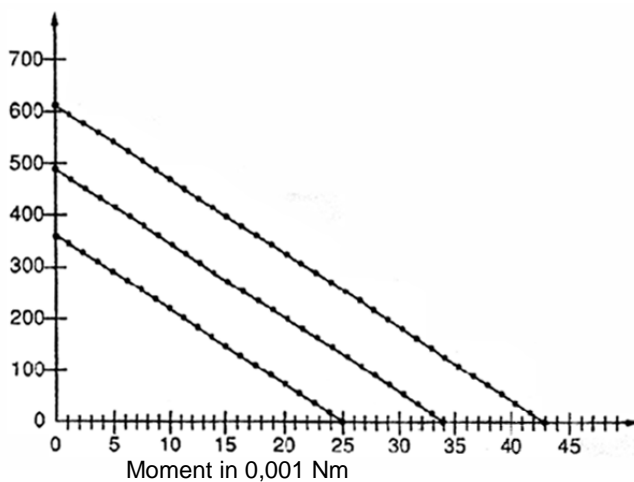
$$C_{EM} = k \left( \frac{U - n \cdot N \cdot \Phi}{R} \right) = \frac{k \cdot U}{R} - n \frac{N \cdot \Phi}{R}$$

Wenn  $n = 0$  ist  $C_{EM} = \frac{k \cdot U}{R}$

(entspricht dem Moment bei blockierter Motor-Generator-Welle)

Diese Gerade kann experimentell ermittelt werden. Man zeichnet die Gerade für die

Winkelgeschwindigkeit in Abhängigkeit von dem nutzbaren Moment  $C_u$ .

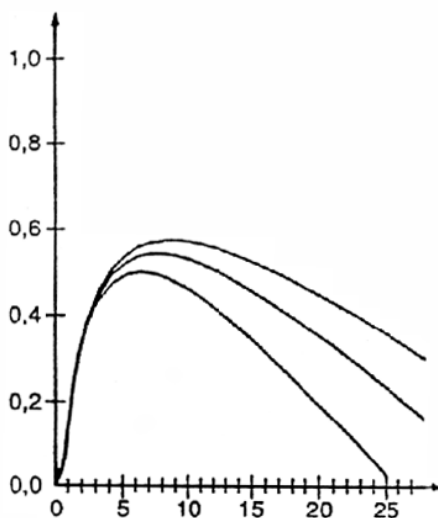


$C_u$  liegt leicht unter  $C_{EM}$  ( $C_{EM} = C_u + C_p$ ), wobei  $C_p$  das durch Reibung verursachte Moment ist (s. Abb. 3).

Winkelgeschwindigkeit bei U = 3V; 4V; 5V.

Mit der gleichen Serie von Messungen kann man den Wert von  $I$  in Abhängigkeit von  $C_U$  bei einer gegebenen Spannung aufzeichnen. In der gleichen Weise wie in Abb. 3 dargestellt, kann man Punkt für Punkt die Kurve  $P_A = U \cdot I$  (absorbierte Leistung), über die man den Wirkungsgrad des Motors bestimmen kann: (siehe Abb. 4)

$$\eta = \frac{P_U}{P_A}$$



Wirkungsgrad

Wirkungsgrad bei  $U = 3V; 4V; 5V$ .

Moment in 0,001 Nm

Die Auswertung dieser Kurve zeigt dem Anwender des Motor-Generator-Modells den Arbeitsbereich mit dem höchsten Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad dieses Modells von ca. 0,55 erreicht nicht den Wert größerer Maschinen.

#### Ergebnisse:

Mit dem Motor-Generator-Modell lassen sich verschiedene Parameter für den Motor berechnen nach Durchführung folgender Messreihen:

1. Durch eine gegebene Spannung
2. Messung der Leerlaufdrehzahl
3. Messung und Berechnung bei blockierter Motorwelle von
 
$$\omega = f(C_U)$$

$$P = f(C_U)$$

$$\eta = f(C_U)$$

Der zweite Motor, aufgebaut als Generator, hat die gleichen Daten, wie der erste. Das Motor-Generator-Modell eignet sich besonders, um in Schülerübungen z. B. die Leistungsbilanz der Einheit festzustellen.

Die Leistung  $P_A$  wird durch Messung von  $U$  und  $I$  sehr einfach gemessen:  $P_A = U \cdot I$ .

Der Motor arbeitet im Prinzip bis 12 V, beste Ergebnisse erzielt man bei Spannungen zwischen 3 und 7 V.

Ein Teil der Leistung geht durch den Jouleschen Effekt in der Wicklung des Motors verloren. Die Messung der Verlustleistung wurde am Anfang dieser Anleitung beschrieben.



Ein weiterer Teil der Leistung geht durch Reibung verloren. Dieser Verlust bewegt sich in der Größenordnung der Verluste durch den Jouleschen Effekt.

Die Winkelgeschwindigkeit kann auf zwei Arten gemessen werden, die am Anfang dieser Anleitung beschrieben wurden.

Das Drehmoment  $C_U$  wird direkt am Drehmomentmesser gemessen, der am Generator befestigt ist.

Die mechanische Leistung an der Achse wird wie folgt berechnet:  $P_U = C_U \cdot 2\pi \cdot n$

Die Verlustleistung durch Reibungsverluste der Einheit kann man schätzen:

$$P_C = P_A - R \cdot I^2 - 2\pi \cdot n \cdot C_U$$

Man kann davon ausgehen, dass für jede Maschine das Reibungsmoment konstant ist.

$$C_P = \frac{P_C}{2\omega} = \frac{P_C}{2\pi \cdot n}$$

Der Generator kann mit einem Schiebewiderstand (etwa  $10 \Omega - 10 A$ ) belastet werden.

Mit der Messung von  $I_R$  und von  $U_R$  an den Klemmen des Generators kann die elektrische Leistung  $P_R$  bestimmt werden:  $P_R = U_R \cdot I_R$

und die Verlustleistung durch den Jouleschen Effekt:  $P = R \cdot I_R^2$

Der Vergleich der Leistungen ermöglicht die Berechnung verschiedener Wirkungsgrade:

des Motors

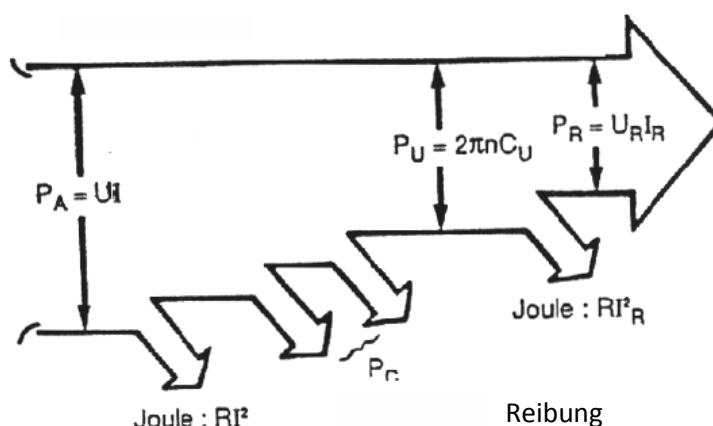
$$\eta_M = \frac{P_U}{P_A}$$

und des Generators

$$\eta_G = \frac{P_R}{P_U}$$

Die Werte bewegen sich bei etwa 50 %, wobei  $\eta_M > \eta_G$

### Leistungs-Schema



Wenn Sie Änderungs- und/oder Verbesserungsvorschläge haben, so können Sie uns diese gerne mitteilen.