

## 2.3 Drehfeldmaschinen

### Dreiphasensysteme für Strom und Spannung

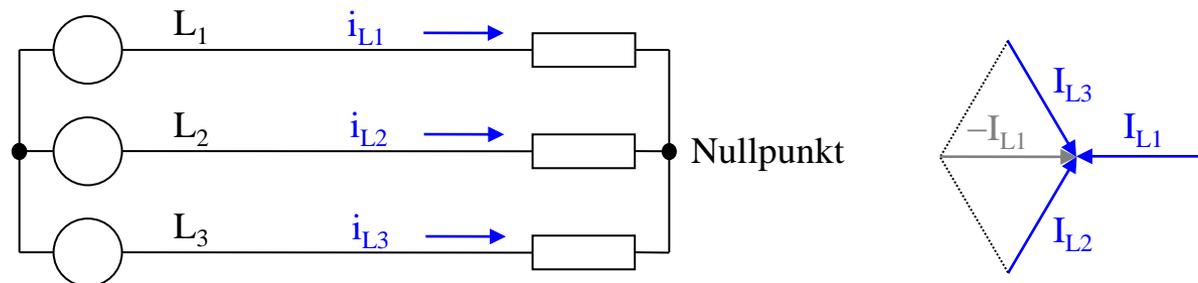
**Dreiphasensystemen** → weitere gewichtige Argumente für Nutzung von Wechselstrom → allgemein in **Elektroenergieversorgung** durchgesetzt.

**Zweiphasensystem:** → gegenüber einfachem Wechselstrom

1. Bei Phasenverschiebung von  $180^\circ$  wird Stromsumme beider Rückleiter Null und Leitermaterial kann gespart werden.
2. Bei Phasenverschiebung von  $90^\circ$  entsteht für  $90^\circ$  räumlich versetzte Magnetpulen → **magnetisches Drehfeld**.  $|B| = \text{const}$ , Richtung  $\alpha = \omega t$ .

**Dreiphasensystem:** → Kombination beider Möglichkeiten bei gleicher Phasenverschiebung von  $120^\circ$ .

3. Außerdem zwischen jedem Leiter und Nullpunkt einfacher Wechselstrom.



Weitere Phasen → keine zusätzlichen Vorteile.

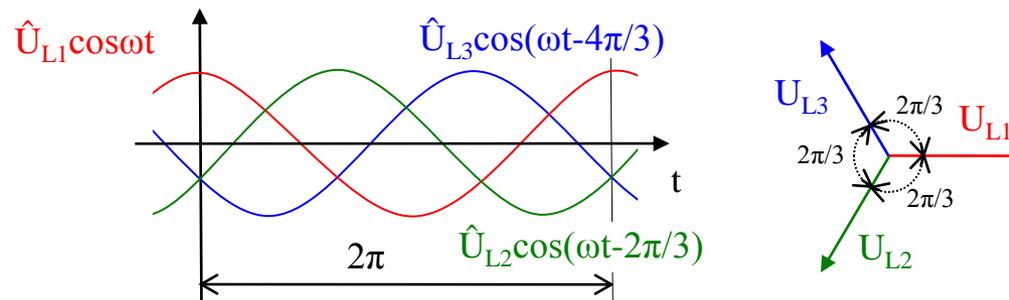
Insbesondere **Drehfeldmaschinen** waren entscheidend für Dreiphasensysteme.

**Symmetrisches Dreiphasensystem** besteht aus drei Spannungen mit je  $120^\circ$  (oder  $2\pi/3$ ) Zeitverschiebung.

$$u_{L1} = \hat{U} \cos(\omega t)$$

$$u_{L2} = \hat{U} \cos(\omega t - 2\pi/3)$$

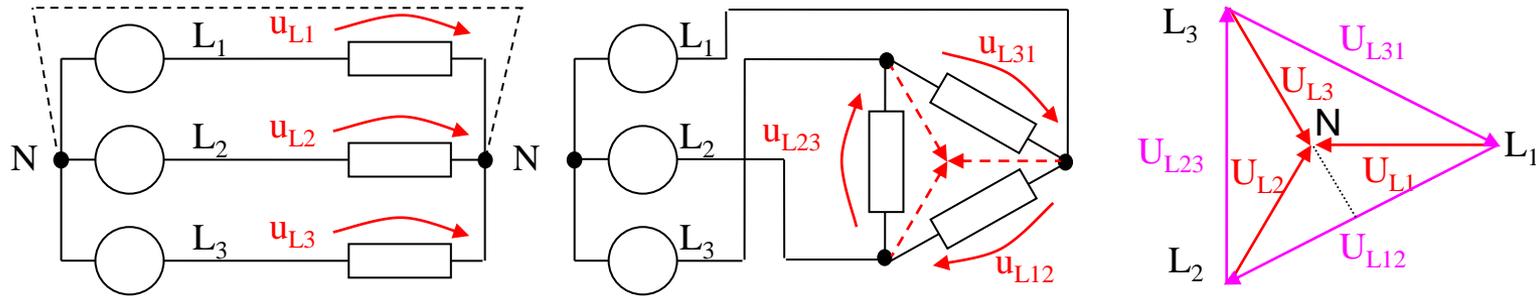
$$u_{L3} = \hat{U} \cos(\omega t - 4\pi/3)$$



**Praxis** → außer  $L_1, L_2$  und  $L_3$  ein **Nullleiter** (N) für Ausgleichsströme zwischen Nullpunkten. Zusätzlich Schutzleiter (PE) (im Normalfall ungenutzt, aber bei Schäden Schutzfunktionen).

**Fernleitungen** → in der Regel nur drei Leiter ( $L_1, L_2, L_3$ ) + ev. Blitzschutzleitern.

## Stern- und die Dreieckschaltung



**Sternschaltung:** Last zwischen Leiterspannung und Nullpunkt

**Dreieckschaltung:** Last zwischen zwei Leitern

(Der virtuell vorhandene Nullpunkt ist nicht nutzbar).

Zeigerbild → Zusammenhang zwischen **Leiter- und verketteten Spannungen**.

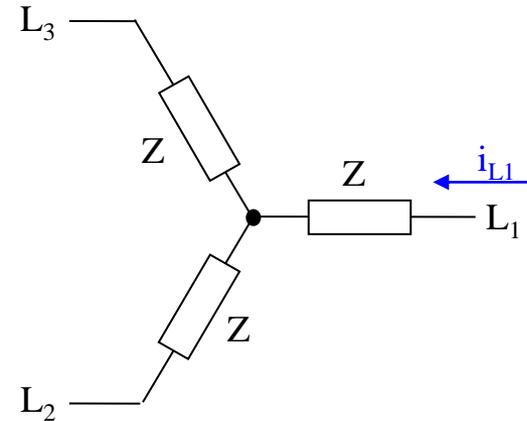
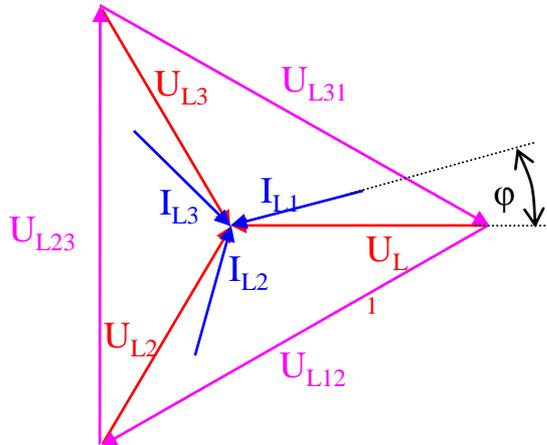
→ Dreieck  $L_1 - L_2 - N$  mit Winkeln  $30^\circ$ ,  $120^\circ$  und  $30^\circ$

→  $U_{L12} = U_{L1} \sqrt{3}$

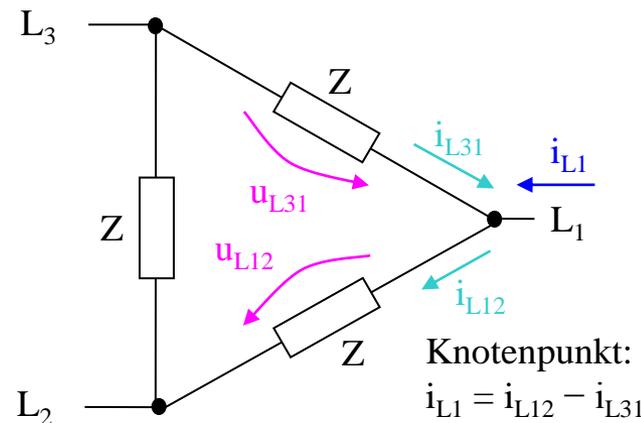
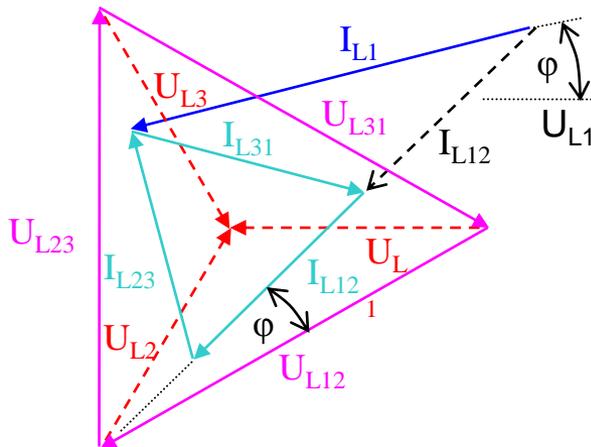
→ in einem Dreiphasensystem immer zwei Spannungen  $U$  und  $U\sqrt{3}$

- z.B. 230 V und 400 V
- Lastwiderstände oder Wicklungen für 230 V
  - Sternschaltung an 400 V
  - Dreieckschaltung 230 V

symmetrische **Last mit Blindanteil** → je die gleiche Phasenverschiebung



- Spannungen zwischen zwei Leitern  $U_{L12}$ ,  $U_{L23}$  und  $U_{L31}$  immer messbar.
- Für Leiterspannungen  $U_{L1}$ ,  $U_{L2}$  und  $U_{L3}$  ist Nullpunkt notwendig.
- Bei Sternschaltung nur Leiterströme  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$  und  $I_{L3}$
- Bei Dreieckschaltung nur Ströme  $I_{L12}$ ,  $I_{L23}$  und  $I_{L31}$



gleiche  
Spannungen  
und Last

**Leistung** bei symmetrischen Dreiphasensystemen:

**Sternschaltung** (d.h.  $I_{\text{Zuleitung}} = I_L$ )

$$P_{\text{Stern}} = 3 U_L I_L \cos\varphi = 3 (U_{LL}/\sqrt{3}) I_L \cos\varphi$$

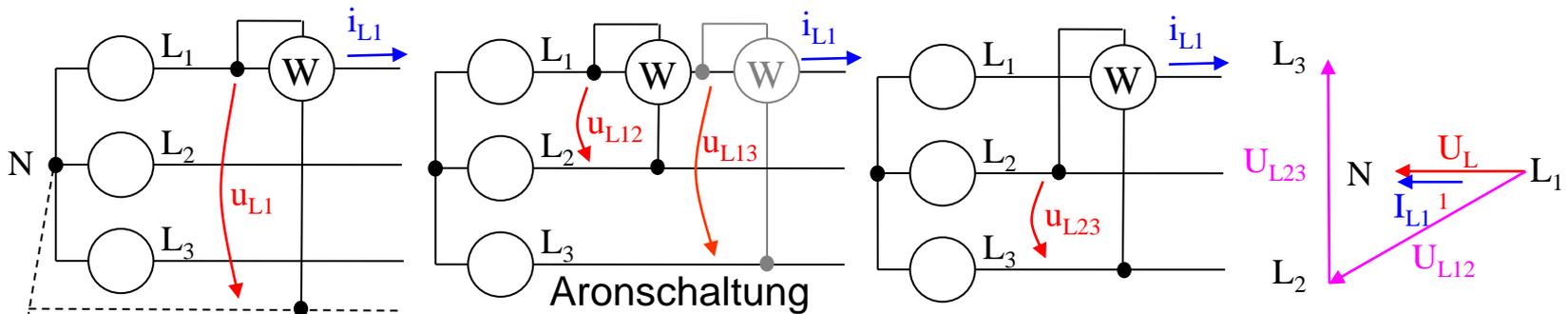
$$= \sqrt{3} U_{LL} I_L \cos\varphi$$

**Dreieckschaltung** (d.h.  $I_{\text{Zuleitung}} = \sqrt{3} I_{LL}$ )

$$P_{\text{Drei}} = 3 U_{LL} I_{LL} \cos\varphi$$

$$= \sqrt{3} U_{LL} I_L \cos\varphi \quad (= 3 U_L I_L \cos\varphi)$$

Leistung unabhängig von der Schaltung nach den gleichen Formeln



$$P_{\text{Anzeige}} = U_L I_L \cos\varphi$$

$$\rightarrow P = 3 P_{\text{Anzeige}}$$

$$P_{\text{Anzeige}} = U_{LL} I_L \cos(30^\circ - \varphi)$$

$$= U_{LL} I_L \cos(30^\circ + \varphi)$$

$$= U_{LL} I_L \sqrt{3} \cos\varphi$$

$$P_{\text{Anzeige}} = U_{LL} I_L \cos(90^\circ + \varphi)$$

$$= U_{LL} I_L \sin(\varphi)$$

$$\rightarrow P_B = \sqrt{3} P_{\text{Anzeige}}$$

- Für **unsymmetrische Last** (verschiedene  $Z_1, Z_2, Z_3$ ) → Ströme in Leitern ungleich  
→ Ausgleichsstrom bei vorhandenem Nullleiter (nur bei starrer Quelle  $R_i \ll Z$  und mit Nullleiter Spannungen symmetrisch, ohne nicht)  
→ Spannungsdifferenz zwischen den Nullpunkten ohne Nullleiter  
→ Aronschaltung liefert ohne Nullleiter weiter das richtige Ergebnis.

Jedes unsymmetrische System kann **zerlegt werden** in je ein

–symmetrisches **Mitsystem**:

$$u_{m1} = U_m \cos(\omega t - \varphi_m), u_{m2} = U_m \cos(\omega t - \varphi_m - 2\pi/3) \text{ und } u_{m3} = U_m \cos(\omega t - \varphi_m - 4\pi/3)$$

–symmetrisches **Gegensystem**:

$$u_{g1} = U_g \cos(\omega t - \varphi_g), u_{g2} = U_g \cos(\omega t - \varphi_g + 2\pi/3) \text{ und } u_{g3} = U_g \cos(\omega t - \varphi_g + 4\pi/3)$$

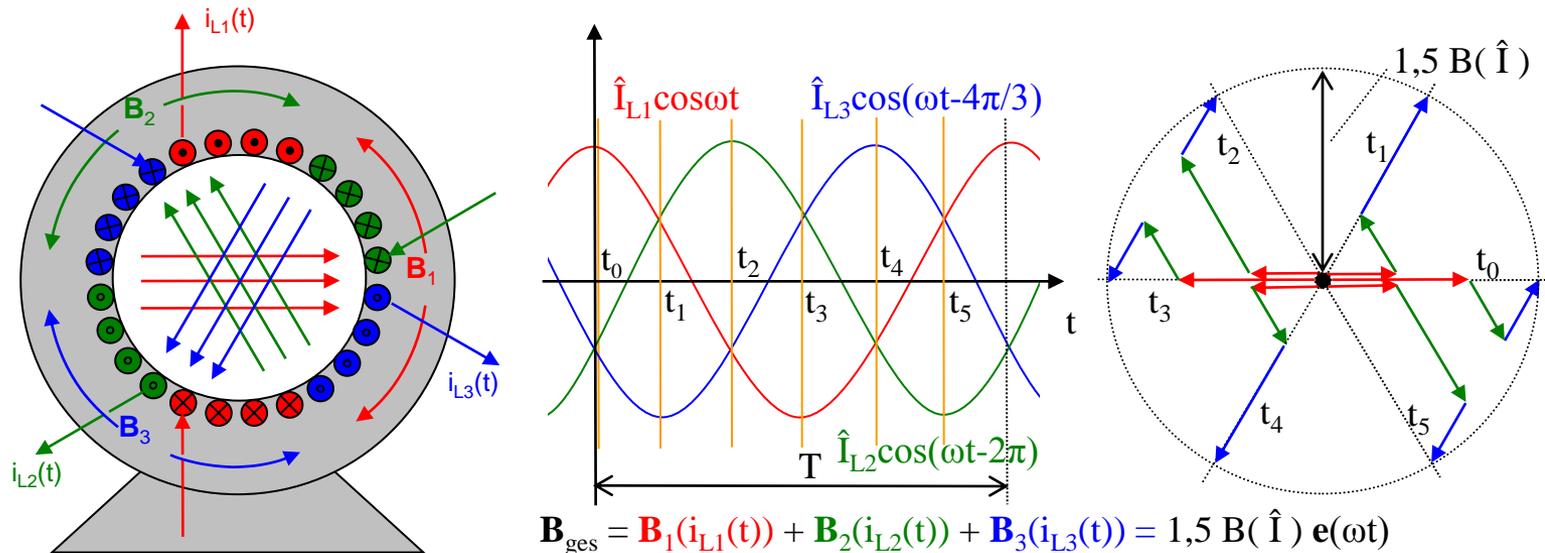
–**Nullsystem**:

$$u_{01} = u_{02} = u_{03} = U_0 \cos(\omega t - \varphi_0)$$

Diese symmetrischen Komponenten sind für viele Untersuchungen hilfreich  
Nullsystem ist für Spannung mit Nullleiter oder für Strom ohne Nullleiter „Null“.

## Das Drehfeld

Für ein **Drehfeld** wird ein symmetrischer **Dreiphasenstrom** an drei (bzw.  $p$  mal drei) gleiche, aber auf einem Zylinder je um  $120^\circ$  **versetzt angeordnete Spulenpaare** angeschlossen.



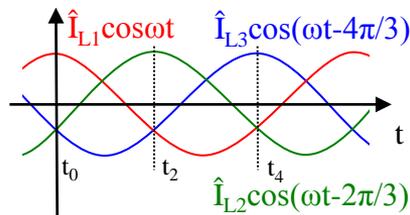
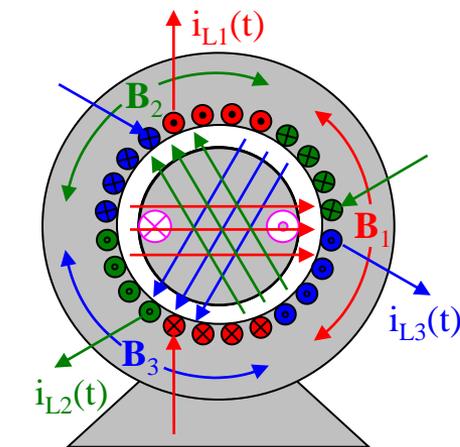
- Betrag des Gesamtfeldes  $|\mathbf{B}_{\text{ges}}| = 1,5 B(\hat{I})$
- Richtung zeitproportional  $\alpha = \omega t$ , also nach Phasenfolge  $\mathbf{B}_1$ ,  $\mathbf{B}_2$  und  $\mathbf{B}_3$  (gegen Uhrzeiger, positiv). Umgekehrte Phasenfolge  $\rightarrow$  Drehrichtung umgekehrt.
- Magnetische Rückschluss über äußeren Zylinderring
- **Drehfeld**  $\rightarrow$  Hauptanwendung: Asynchronmaschine, Synchronmaschine.

## Asynchronmaschine

**Asynchronmaschinen** (ASM) → zwei Bauformen: - Schleifringläufer  
- Kurzschlussläufer

Wichtige praktische Anwendungen: **Einphasenbetrieb** und **Spaltnotor**.

Sonderfall: **Wicklung** im Drehfeld **unbeweglich** angebracht → ähnlich wie die Sekundärwicklung bei einem Transformator → **Phasenschiebertransformator**



**Wicklung parallel zu  $B_1$**

- Für  $t_0$  → Drehfeld in Richtung  $B_1$
- **Relativbewegung** Leiter - Feld → Uhrzeigerrichtung
- → Kraft nach vorn (UVW-Regel) → Induktion in gezeichnete Richtung
- Fluss **durch** Wicklung hat bei  $t_0$  größte zeitliche Änderung →  $u_{\text{ind}} = \hat{U}$

→ **Strom gleichphasig zu  $i_{L1}(t)$**

**Wicklung parallel zu  $B_2$**

→ **Strom gleichphasig zu  $i_{L2}(t)$ .**

**Wicklung parallel zu  $B_3$**

→ **Strom gleichphasig zu  $i_{L3}(t)$ .**

→ **Strom erzeugt jeweils ein Magnetfeld  $90^\circ$  hinterher**

Fließt **infolge Induktion Läuferstrom**, muss er der Ursache – **Relativbewegung** zwischen Wicklung und Drehfeld – **entgegenwirken**.

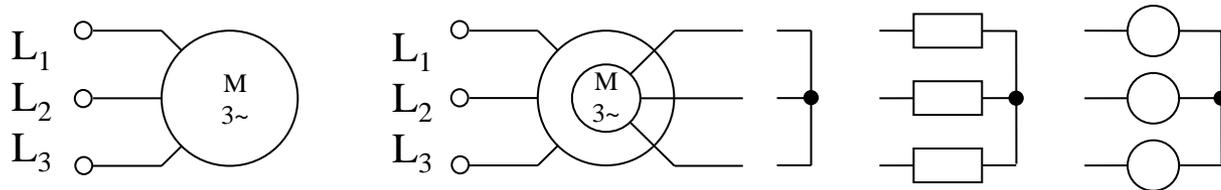
→ **Läufer muss sich mit Drehfeld mitdreht**.

→ Bei **gleicher** Geschwindigkeit (synchrone Drehzahl  $n_0$ ) keine Induktion, da magnetische Fluss konstant bleibt.

→ Durch **mechanische Belastung** des Läufers langsamer – also **asynchron**.

**Kurzschlussläufer:** rings um Läufer dicke Leiterstäbe in Nuten gegossen, an Stirnseiten mit starken Ring kurzgeschlossen.

**Schleifringläufer:** drei Wicklungen in Nuten angeordnet, über drei Schleifringe zugänglich.



**Synchrone Drehzahl** entspricht **Umlauf des Drehfeldes** → festgelegt durch Netzfrequenz und Polpaarzahl.

$$n_0 = \frac{f_{\text{Netz}}}{p} \quad \text{für 50 Hz} \quad n_0 = \frac{50 \text{ Hz}}{p} = \frac{3000}{p} \text{ min}^{-1}$$

Abweichung von synchronen Drehzahl → **Schlupf**  $s$

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$$

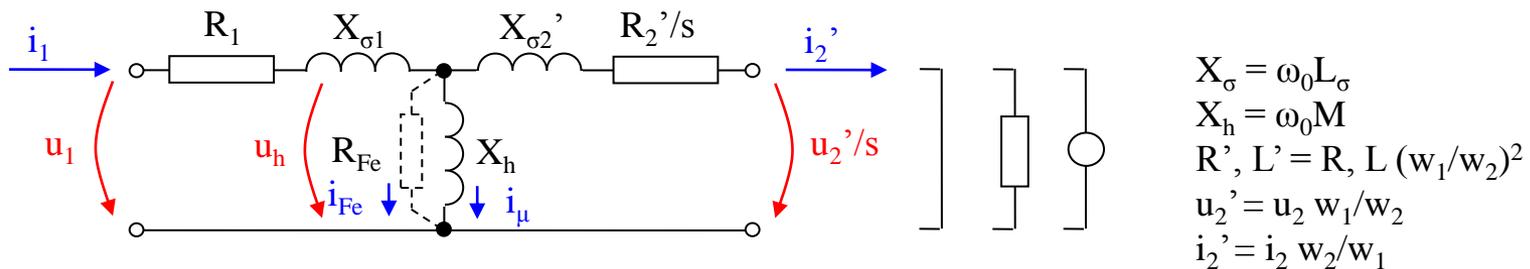
Ersatzschaltung → **reduzierte Transformatorersatzschaltung**

**Problem:** geringere Ausgangsfrequenz  $\omega_2 = \omega_0 - \omega = s \omega_0$

→ Ausgangsseite **durch s dividieren**, so dass  $j\omega_2 \underline{i}_2 / s = j\omega_0 \underline{i}_2$  wird

$$\underline{u}_1 = R_1 \underline{i}_1 + jX_{\sigma 1} \underline{i}_1 + jX_h (\underline{i}_1 - \underline{i}_2')$$

$$\underline{u}_2' / s = -R_2' \underline{i}_2' / s - jX_{\sigma 2}' \underline{i}_2' + jX_h (\underline{i}_1 - \underline{i}_2')$$



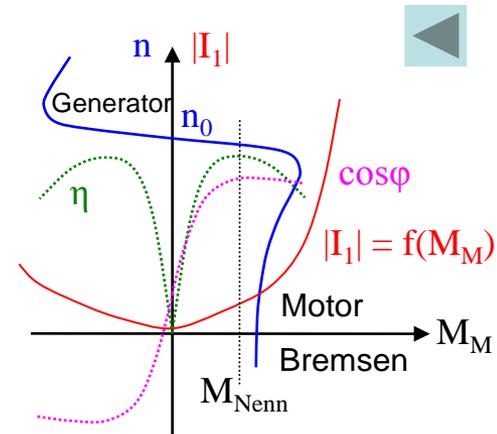
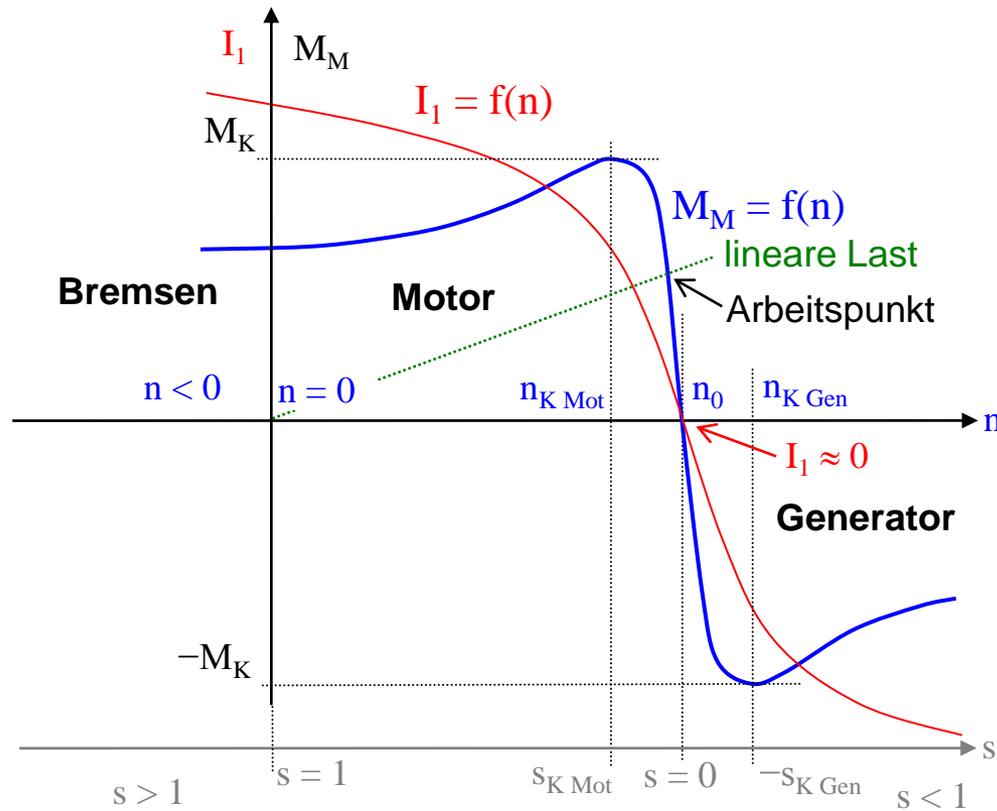
$R_2'/s$  enthält sowohl **Verlustleistung des Drahtes** als auch gesamte **mechanische Leistung** (Reibungsverluste und abgegebene Leistung).

→  $n = n_0 \rightarrow (s = 0) \rightarrow R_2'/s = \infty \rightarrow i_2' = 0 \rightarrow P_{\text{mech}} = 0$  – d.h. **Leerlauf**

→ **Stillstand** (durch Bremsen) →  $s = 1 \rightarrow R_2'$  nur Wicklungsverluste

→ Beim **Kurzschlussläufer** wird  $u_2'/s = 0$





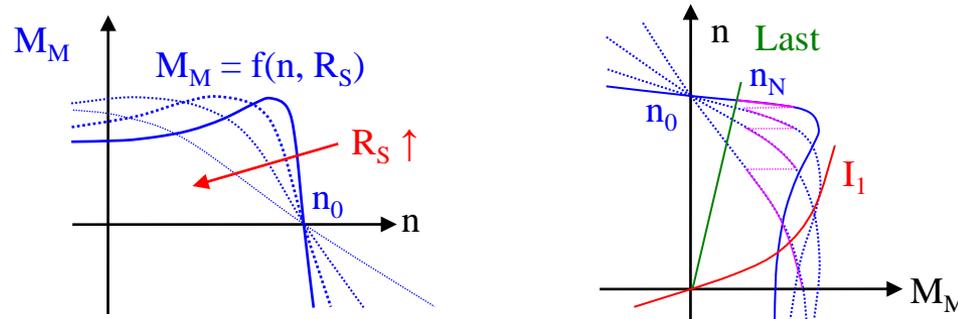
Kennlinien zu  $f(M_M)$  umgeformt

$|I_1|$  und  $\cos\phi$  exakter als  $I_1$  Betrag mit Vorzeichen

Gerade bei  $n_0 \rightarrow$  Kennlinien ähnlich der Gleichstromnebenschlussmaschine  
 Nur zwischen Kippmomenten stabilen Betrieb  
 Drehzahlabfall 3 ... 5 %  $\rightarrow$  Drehzahl fast konstant

**Asynchronmaschine** kann nur im Bereich der Geraden  $n_{K\text{ Mot}} < n \leq n_0$  für Motorbetrieb und  $n_0 \leq n < n_{K\text{ Gen}}$  für Generatorbetrieb genutzt werden.

**Schleifringläufer:** Widerstände an Schleifringe  $\rightarrow R_2'$  größer  $\rightarrow I_2'$ ,  $I_1$  kleiner  
 $\rightarrow$  weniger steile Gerade bei  $n_0$



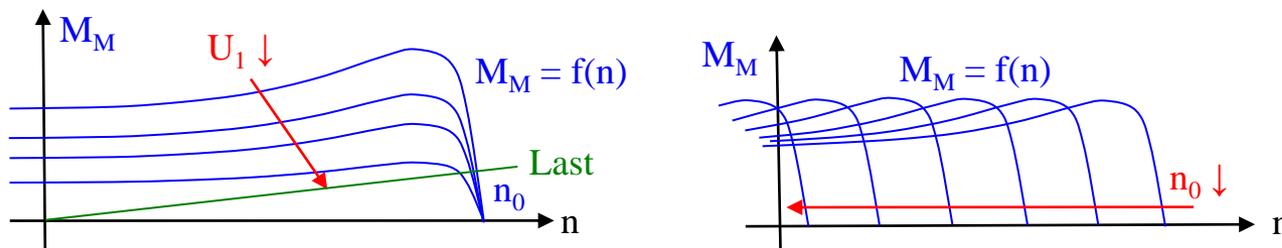
**Schleifringläufer:** (wie Gleichstromnebenschlussmaschine)

$\rightarrow$  schrittweise Läuferwiderstände  $\rightarrow$  Anfahren mit kleineren Strömen

**Kurzschlussläufer:**  $\rightarrow$  Stern-Dreieck-Umschaltung Ständerseite  $\rightarrow$  Anfahren  
 (neben der Geometrie der Kurzschlussstäbe)

**Veränderung der Drehzahl:**

- die Läuferwiderstände (nur Schleifringläufer),
- die Größe  $U$  der Ständerspannungen
- die Kreisfrequenz  $\omega$  der Ständerspannungen



**Läuferwiderstände** → gute, verlustbehaftete Drehzahlstellung.

**Ständerspannung** → kleine Drehzahländerung → für Steuerung ungeeignet

**Ständerfrequenz** → sehr gute Ergebnisse

### **Vergleich zur Drehzahlregelung:**

→ nur Regelung **Ständerfrequenz** → gute Ergebnisse

→ Mit leistungselektronischen Frequenzumrichtern heute realisierbar

### Heute z.T. auch **feldorientierte Regelung**

→ Statorstrom ( $I$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$ ) → **Aufteilung** in zwei Stromkomponenten

- drehmomentbildende (analog Ankerstrom GSM)

- flussbildende (analog Erregerstrom der GSM)

→ Drehmoment als auch Drehzahl regelbar

**Bremsbetrieb** (Gegenrichtungsbetrieb) → relativ hoher Strom,  
→ keine ausreichende Wirkung

**Bremsmotoren** → Scheibenbremse in Motor integriert

**Generatorbetrieb** → teilweise selbstständig während Motorbetrieb  
→ Nutzung heute bei Windkraftanlagen  
→ nur im Parallelbetrieb zum Netz (Erregung,  $\cos\varphi$ )

## Umfangreiche Typenreihen

- Kurzschlussläufer in Standardausführung
- Bremsmotore
- Getriebemotore

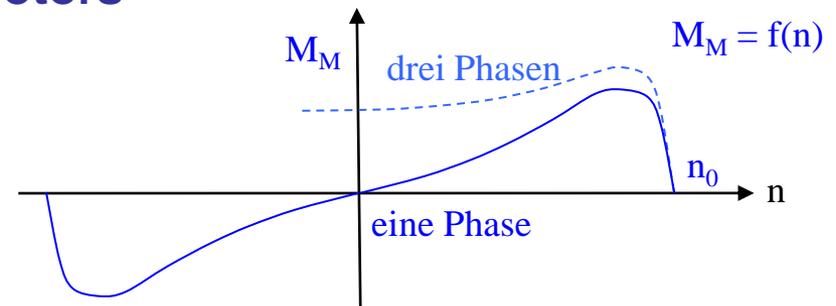
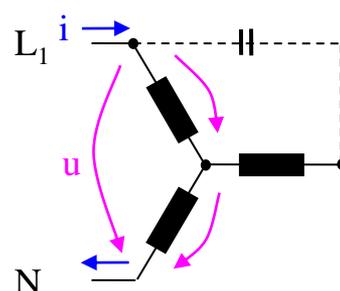
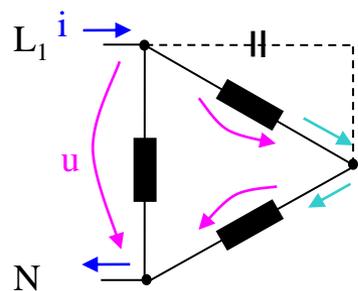
**Wirkungsgrad** von  $\eta = 0,77$  bei kleinen Motoren (ca. 1 kW)  
bis  $\eta = 0,92$  bei großen ( $>100$  kW)

## Kühlung

in der Regel **selbstgekühlte** Ausführung (außen Gehäuse umströmende Luft)  
(selten durchströmende Luft)

nur großen Maschinen **fremdgekühlt** (Gebläse, in Ausnahmen Flüssigkeiten)

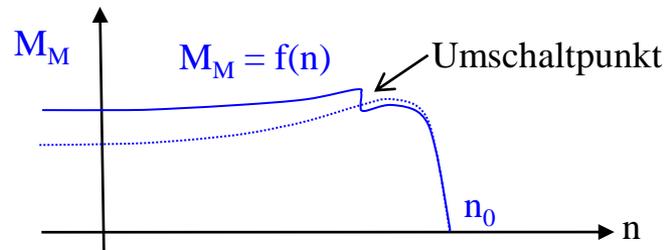
## Einphasenbetrieb des Asynchronmotors



Ohne zusätzlichen Kondensator → kein Anlaufmoment

→ unabhängig von angeschlossener Spannung beide Drehrichtungen

Durch **Phasenverschiebung beim Laufen**: Wechselfeld → elliptisches Drehfeld  
→ ca. 60 bis 70 % der Leistung, mehr Motorgeräusche  
Zusatzkondensator → **Hilfsphase**, die eigenständigen Anlauf ermöglicht



Infolge **Veränderung der Phasenverschiebung bei Betrieb**

→ für Anlauf **anderer Kondensator** als bei Nennbetrieb

→ Anlasskondensator (üblicherweise durch Fliehkraftschalter) abgeschaltet

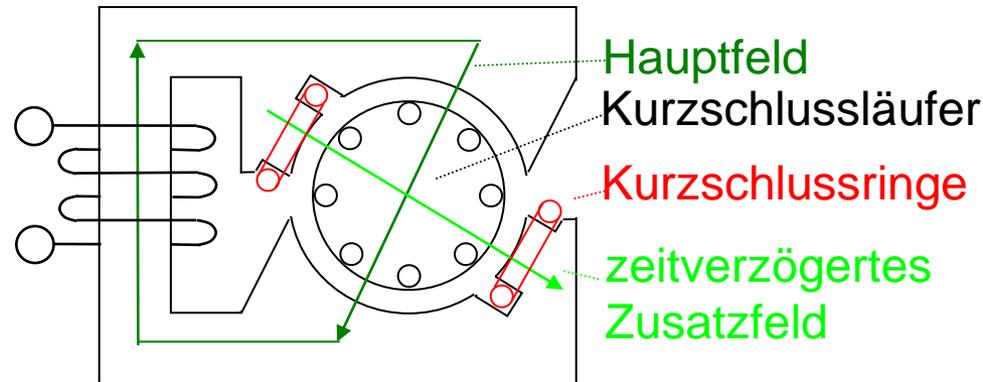
Kondensator **kann so dimensioniert** werden, dass **Anlaufmoment größer** als bei vergleichbarem Dreiphasenbetrieb bzw. über dem Kippmoment

Motore für **Einphasenbetrieb vorgesehen**

→ Einphasenmotore mit Hilfswicklungen und entsprechendem Kondensator

→ fast Leistung bzw. Drehmoment eines vergleichbaren Dreiphasenbetriebes

**Spaltmotor:** die Bauform für Kleinantriebe unter ca. 100 W



Gleicht **Einphasenbetrieb mit Hilfswicklung**

**Polschuhe** an einer **Seite** mit **Spalt** und mit **Kurzschlussring**

→ Induzierte Wirbelströme in Kurzschlussringen

→ **zeitverzögertes** Zusatzfeld in **versetzten Richtungen**

→ elliptisches **Drehfeld**

- einfache robuste kleine Motore
- Wirkungsgrad von 15 bis 25 %
- werden z.B. eingesetzt für
  - Lüfter in Backöfen
  - kleine Wasserpumpen (Aquarien bis Heizungsanlagen)
  - weitere Kleinantriebe (alte Tonbandgeräte)