

# Grundlagen elektrische Antriebe

## Kapitel 1: Einführung

Prof. Dr.-Ing. A. Kleimaier

# Inhalt

## Kapitel 1: Einführung

- 1.1 Ziele der Vorlesung
- 1.2 Inhalt und Literatur
- 1.3 Organisatorisches
  
- 1.4 Beispiele für elektrische Antriebe
- 1.5 Antriebssysteme
- 1.6 Arbeitsmaschinen
- 1.7 Entwicklungstendenzen

# 1.1 Ziele der Vorlesung

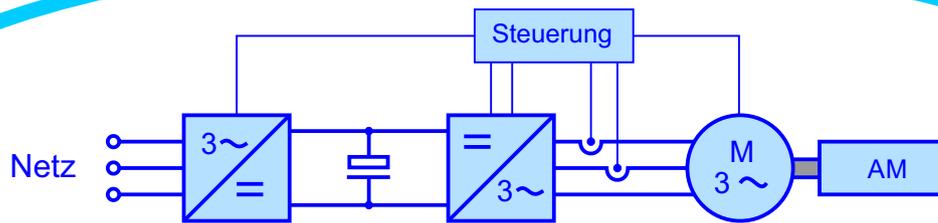
## Systemverständnis

- Anforderungen an Komponenten und Gesamtsystem
- Einsatzgebiete und Antriebsvarianten in der Praxis
- Aktuelle Entwicklung

## Fähigkeiten

- Spezifikation erstellen
- Vermessung & Test
- Inbetriebnahme

## Elektrischer Antrieb



## Detailwissen

- Grundlagen elektrische Maschinen
- Betriebsverhalten und Mechanik
- Sensorik – Steuerung – Regelung
- Grundbegriffe Leistungselektronik

## Fähigkeiten

- Aufbau und Wirkprinzip verstehen
- Berechnen können: Verknüpfung von Systemzustand  $\leftrightarrow$  Rechnung

# 1.1 Ziele der Vorlesung

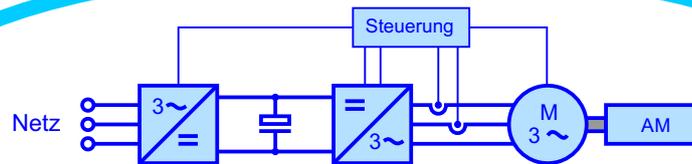
## Interdisziplinäre Zusammenarbeit

- *Kunde*
- *Projektleitung*
- *Entwicklerteam*
- *Lieferanten*

### Elektrotechnik

- Systemspezifikation
- Auslegung Magnetkreis
- Simulation
- Schaltungsentwicklung
- Regelung & Sensorik
- Software/Kommunikation
- Inbetriebnahme

### Elektrischer Antrieb



### Maschinenbau

- Systemspezifikation
- konstruktive Auslegung
- Simulation
- Materialdefinition
- Elektrokonstruktion
- Festigkeit

### SW-Engineering

- Systemspezifikation
- Simulation
- Betriebssystem
- Reglersoftware
- Kommunikation
- Vernetzung

## 1.2 Inhalt und Literatur

### Ergänzende Literatur

#### Grundlagen:

Fischer, Rolf	Elektrische Maschinen	Carl Hanser Verlag
Flegel, Birnstiel, Nerreter	Elektrotechnik für Maschinenbau und Mechatronik	Carl Hanser Verlag
Hagl, Rainer	Elektrische Antriebstechnik	Hanser Fachbuchverlag
Probst, Uwe	Servoantriebe in der Automatisierungstechnik	Vieweg + Teubner
Stöltzing, Kallenbach, Amr.	Handbuch Elektrische Kleinantriebe	Carl Hanser Verlag

#### Weiterführend:

Binder, Andreas	Elektrische Maschinen und Antriebe	Springer
Bolte, Ekkehard	Elektrische Maschinen	Springer
Meyer, Manfred	Elektrische Antriebstechnik Band I / II	Springer
Nuß, Uwe	Hochdynamische Regelung elektrischer Antriebe	VDE Verlag
Schröder, Dierk	Elektrische Antriebe - Grundlagen	Springer
Schröder, Dierk	Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen	Springer

## 1.2 Inhalt und Literatur

### Gliederung der Vorlesung

**Kapitel 1:** Einführung – Beispiele, Anwendungsgebiete

**Kapitel 2:** Grundlagen Magnetischer Kreis

3: Aufbau und Betriebsverhalten der Gleichstrommaschine

4: Gesteuerter Betrieb der Gleichstrommaschine

4a: Leistungselektronik für Gleichstrommaschinen

5: Drehzahl geregelter Gleichstromantrieb: Systemanalyse

6: Elektrofahrzeuge

Grundverständnis  
elektrischer Antrieb

- Gleichstrommaschine
- Steuerung & Regelung
- Gleichrichter, DC-Steller

**Kapitel 7:** Grundlagen Drehfeldmaschinen

8: Aufbau und Betriebsverhalten der Asynchronmaschine

9: Gesteuerter Betrieb der Asynchronmaschine

10: Betriebsarten und drehzahlvariabler Betrieb der ASM

10a: Leistungselektronik für Drehfeldmaschinen

Drehfeldmaschinen:

- Drehfeldwicklung
- Asynchronmaschine
- Wechselrichtertechnik

**Kapitel 11:** Aufbau und Betriebsverhalten Synchronmaschine

12: Aktuelle Entwicklung: neue Maschinenvarianten

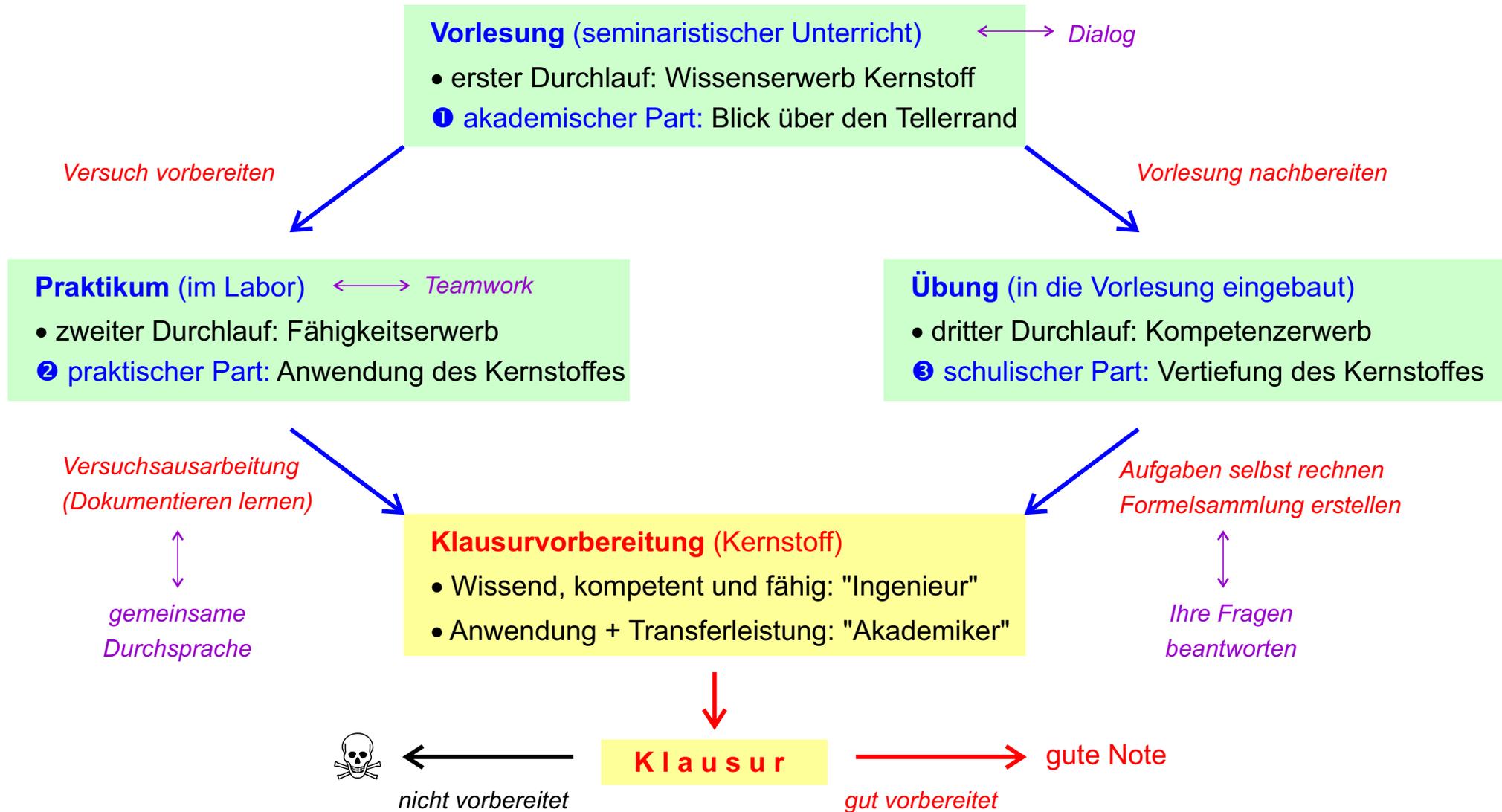
13: Ansteuerung und Systemverhalten BLDC-Motor

Synchronmaschine:

- fremderregte SM
- PMSM, MDM, BLDC-Motor

# 1.3 Organisatorisches

## Das Lehrkonzept steht auf 3 Säulen



## 1.4 Beispiele für elektrische Antriebe

### kleine Asynchronmaschine am Netz mit Stirnradgetriebe

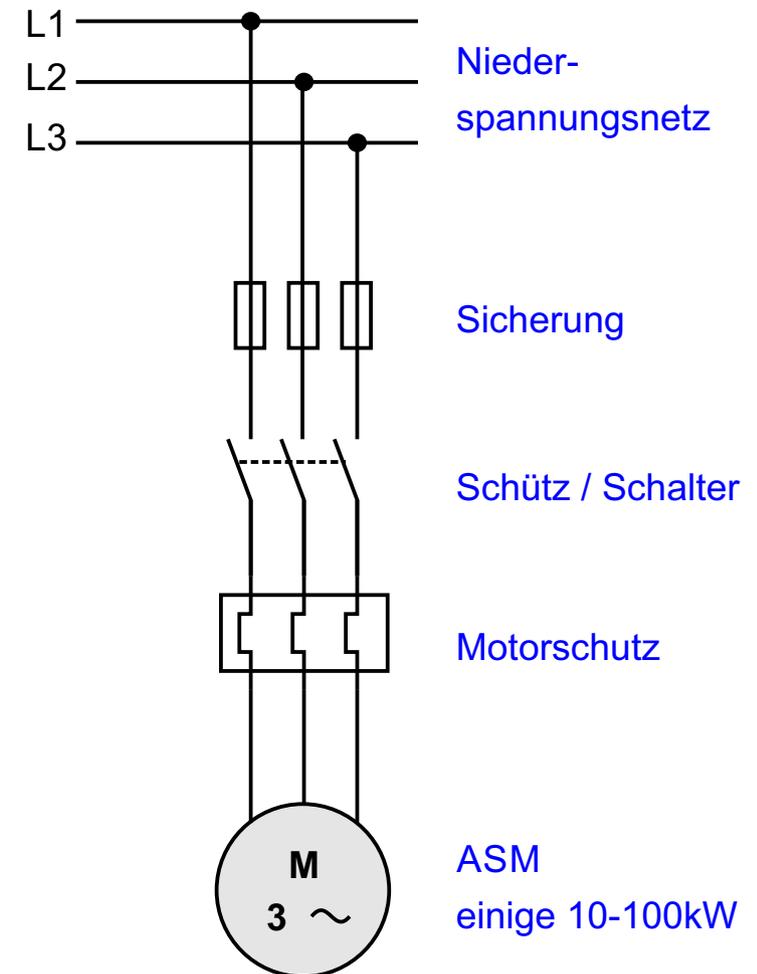
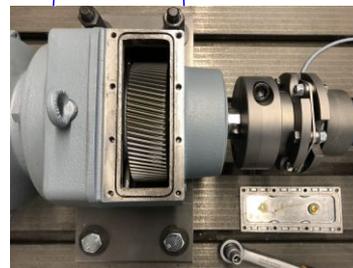
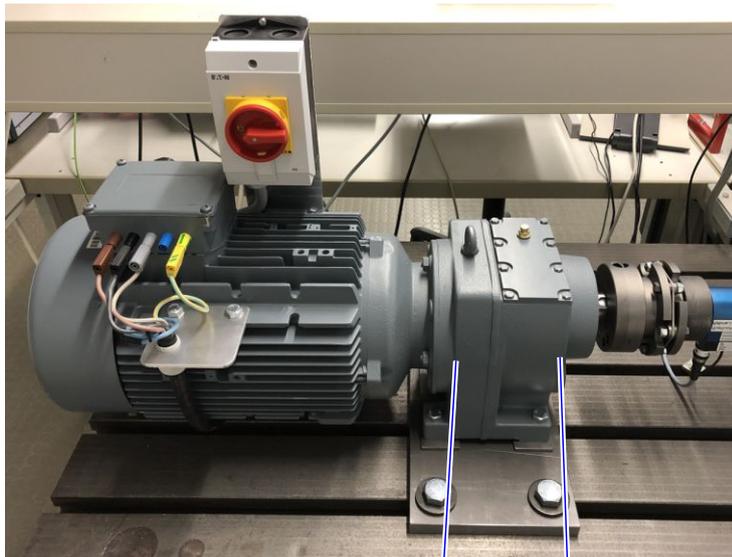
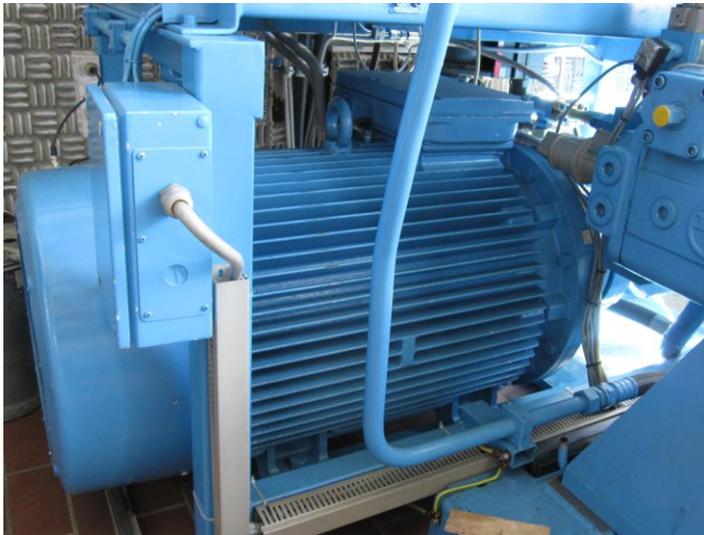


Bild: A. Kleimaier, HAW Landshut

# 1.4 Beispiele für elektrische Antriebe

## große Asynchronmaschine am Netz

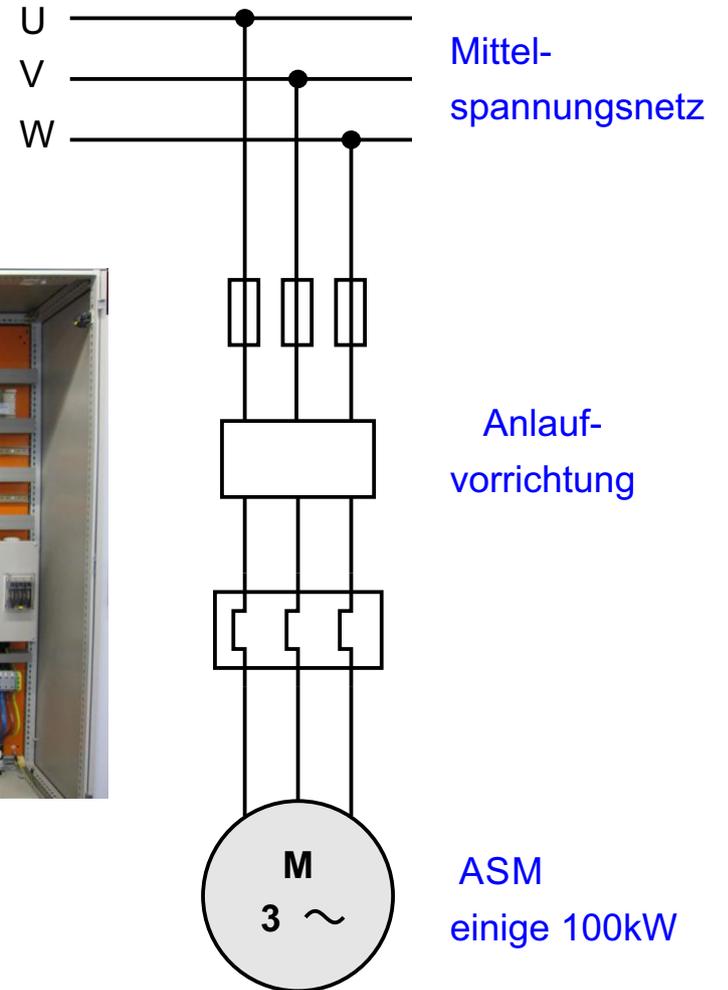
Prüfstandsantrieb mit hydraulischer Drehzahlverstellung, ASM läuft als Pumpenantrieb.



220kW-ASM



Schaltschrank mit Schütz-Schaltung für Y/Δ-Hochlauf



Bilder: A. Kleimaier, HAW Landshut

## 1.4 Beispiele für elektrische Antriebe

### "klassischer" Gleichstromantrieb an B6-Brücke



Thyristorstromrichter

Fremdbelüftete Gleichstrommaschine

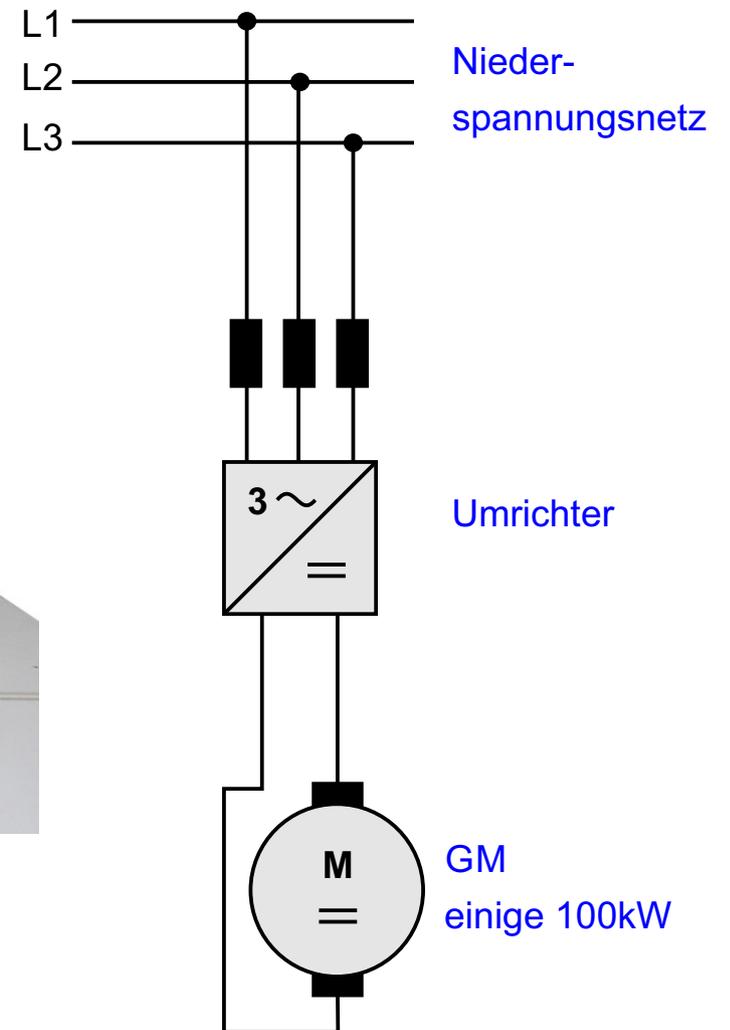


Bild: A. Kleimaier, HAW Landshut

# 1.4 Beispiele für elektrische Antriebe

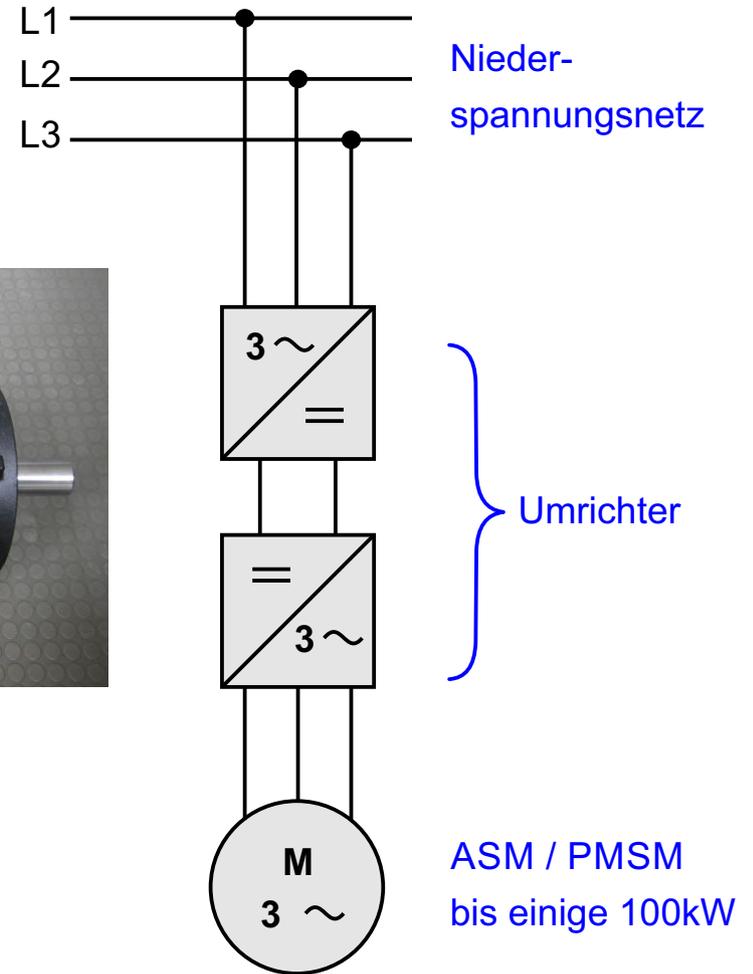
## Drehzahl geregelter Antrieb mit Frequenzumrichter



Frequenzumrichter mit Netzfilter 100kVA



Asynchronmaschine 78kW



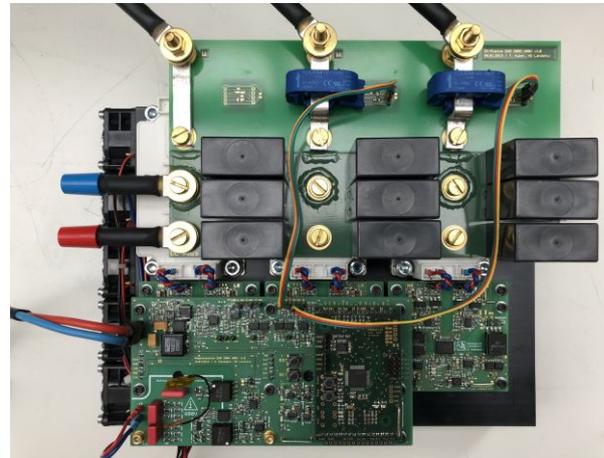
Bilder: A. Kleimaier, HAW Landshut

# 1.4 Beispiele für elektrische Antriebe

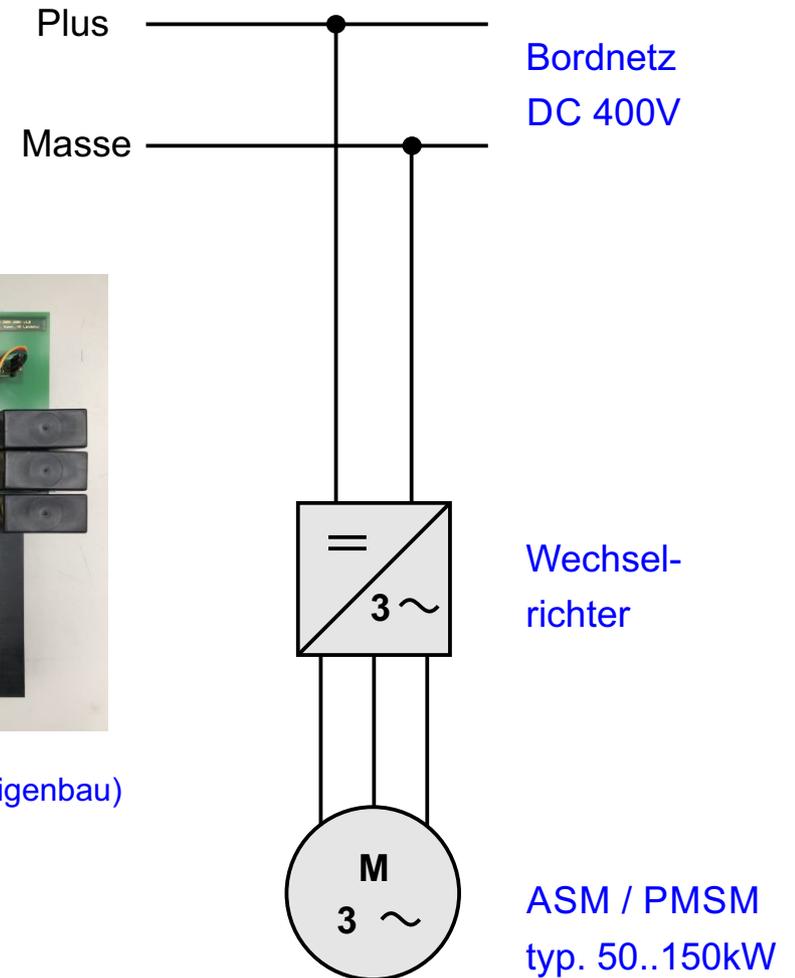
## Traktionsantrieb Elektrostraßenfahrzeug



Traktionsmotor Nissan Leaf, 80kW



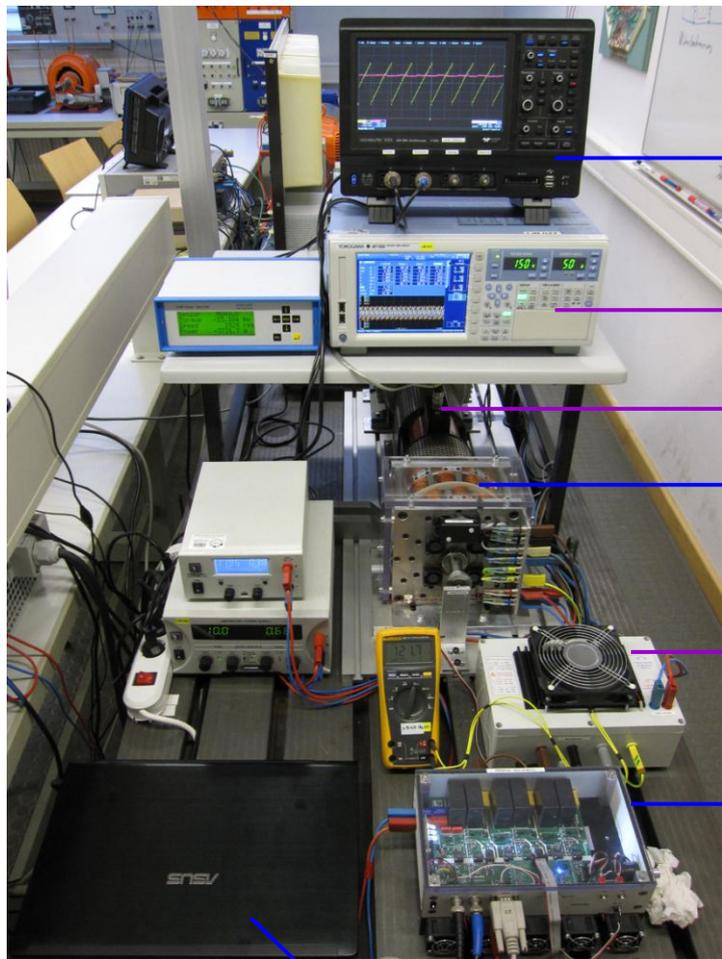
Traktionswechselrichter 120kVA (Eigenbau)



Bilder: HAW Landshut

# 1.4 Beispiele für elektrische Antriebe

## Neuartiges Maschinenkonzept auf dem Prüfstand



Oszi

Leistungsanalysator

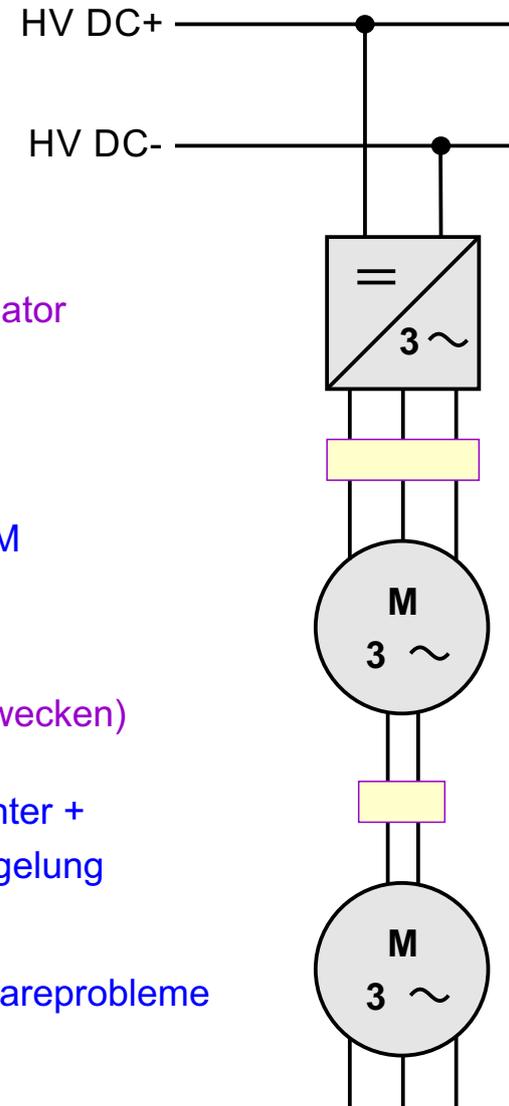
Messwelle

Prüfling, hier:  
Axialfluss-PMSM

Sinusfilter  
(hier: zu Messzwecken)

SiC-Wechselrichter +  
µC mit Vektorregelung

Quelle für Softwareprobleme



Netzteil DC 600V  
mit elektron. Last

Wechsel-  
richter

Leistungsanalysator  
hier: mit Sinusfilter

Prüfling

Messwelle

Prüfstands-  
maschine

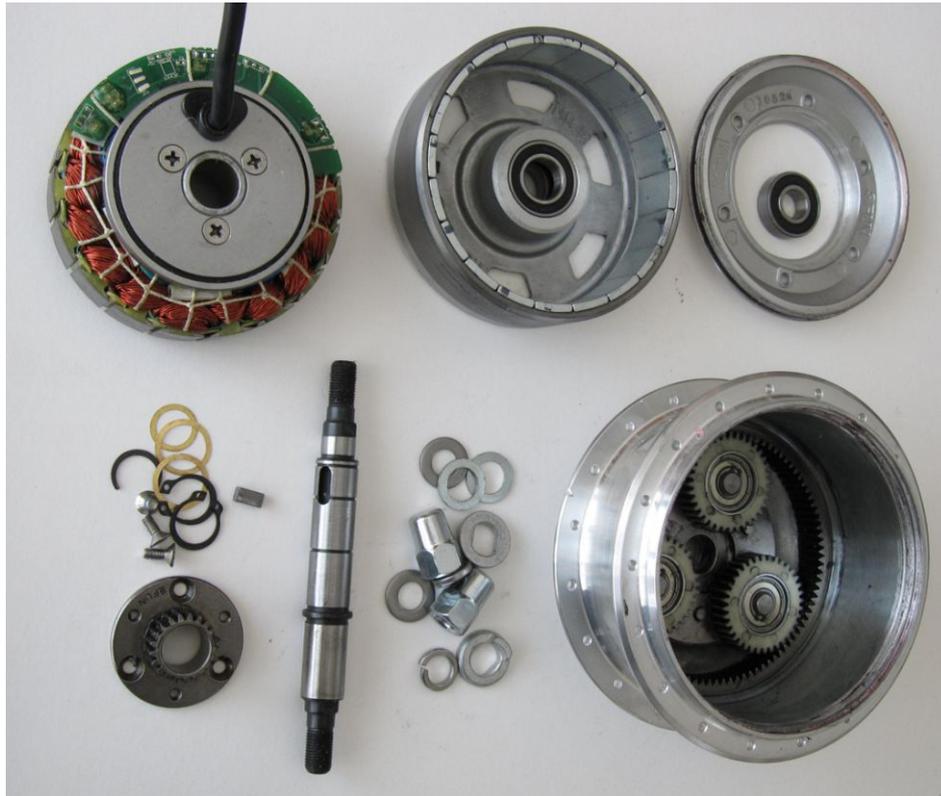
Bilder: HAW Landshut

# 1.4 Beispiele für elektrische Antriebe

## Pedelec-Nabenmotor

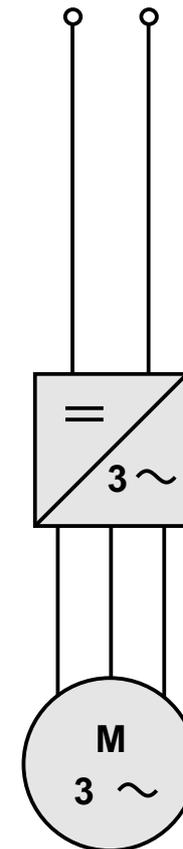
Stator mit  
Wicklung

Rotor mit Magneten  
(Außenläufer)



Planetengetriebe  
mit Freilauf

Akkupack



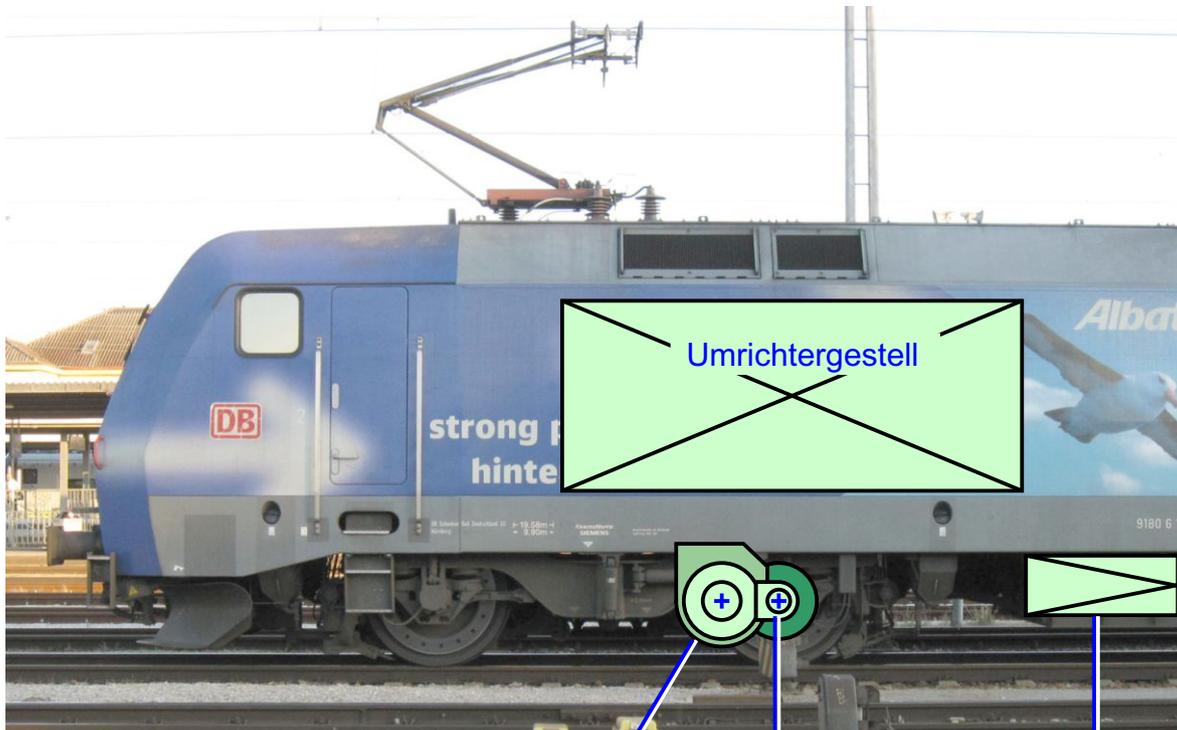
Motor Controller

BLDC-Motor  
(EC-Motor)  
250W

Bilder: A. Kleimaier

## 1.4 Beispiele für elektrische Antriebe

### Traktionsantrieb Schienenfahrzeug mit Drehstromantriebstechnik



BR152

Fahrmotor  
(hier: Tatzlagerantrieb)

Radsatzwelle

Trafo

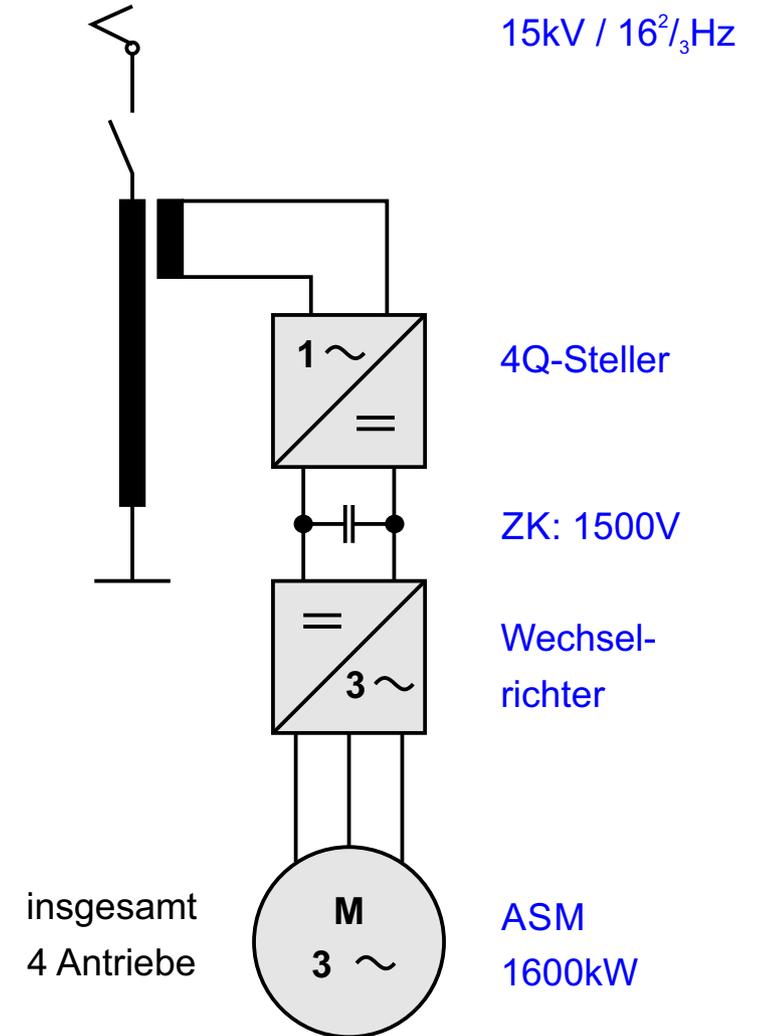


Bild: A. Kleimaier

## 1.4 Beispiele für elektrische Antriebe

### Traktionsantrieb Schienenfahrzeug mit konventioneller Schaltwerkstechnik



BR111: Schaltwerkslokomotive mit Gummiringfederantrieb  
Weiterentwicklung der BR 110 aus den 1950er-Jahren

Bild: A. Kleimaier

15kV /  $16\frac{2}{3}$ Hz



Rein elektromechanische Steuerung:

Hochspannungs-Schaltwerk:  
Spartrafo mit Anzapfungen  
ergibt 28 Fahrstufen

4x Einphasen-  
Reihenschluss-  
maschine 900kW

## 1.4 Beispiele für elektrische Antriebe

### Drehzahl-"geregelt" Handbohrmaschine



prinzipiell gleiches Maschinenkonzept:  
Einphasenreihenschlussmaschine

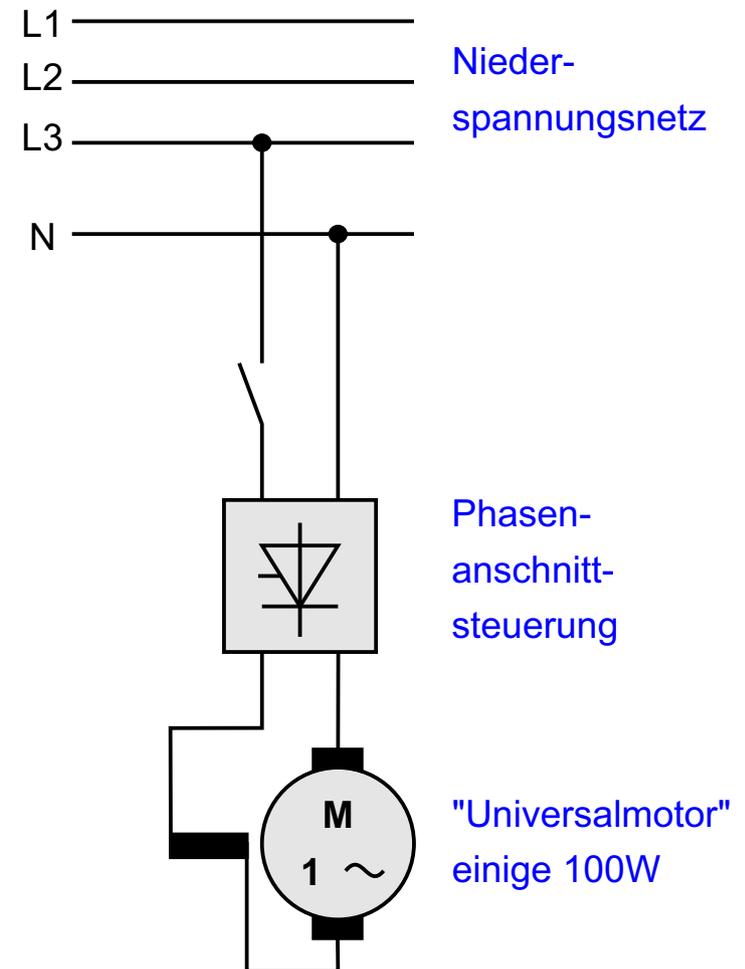


Bild: A. Kleimaier

## 1.4 Beispiele für elektrische Antriebe

### Kleinantrieb für Werkzeugmaschine



Hier: Drehmaschine mit 2 Drehzahlstufen und Rechts/Linkslauf  
Maschine: polumschaltbare, 2-strängige ASM mit Kondensator, 550W

Alternativ: polumschaltbare, 3-strängige ASM mit Steinmetzschaltung

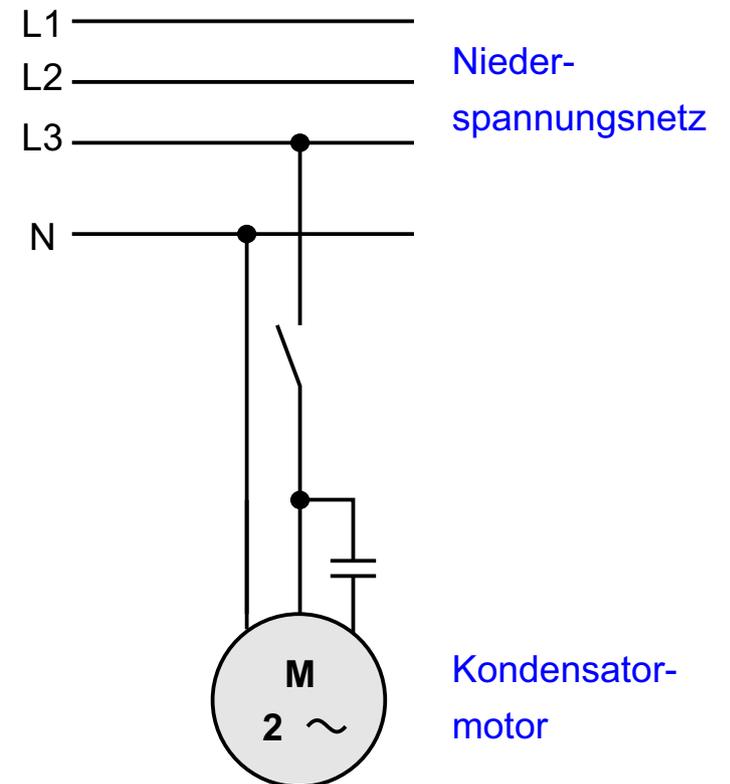


Bild: A. Kleimaier

# 1.4 Beispiele für elektrische Antriebe

## Bohrmaschine mit Stufenlosgetriebe

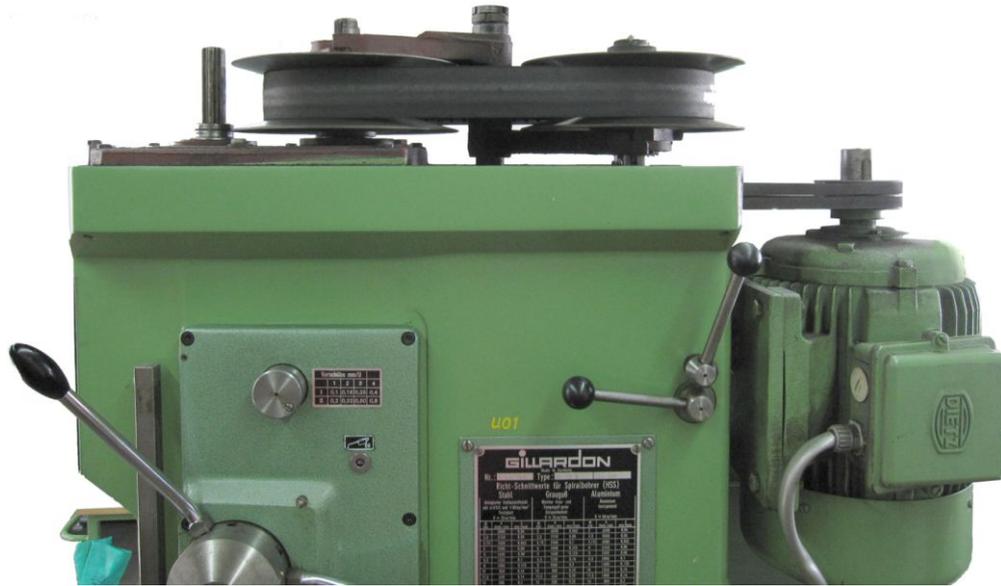
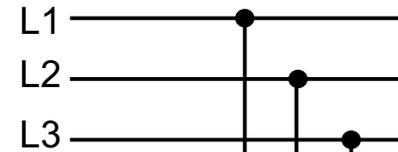


Bild: A. Kleimaier, HAW Landshut

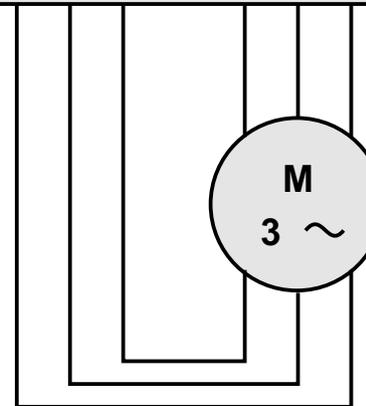
Stufenlosgetriebe:  
Kegelscheiben mit  
Keilriemen

ASM: zusätzlich  
2 feste Stufen



Nieder-  
spannungsnetz

Kontinuierliche  
Drehzahlverstellung  
rein mechanisch



ASM  
polumschaltbar  
720Upm / 1.8kW  
2890Upm / 3.5kW

# 1.4 Beispiele für elektrische Antriebe

## Prüfstand 1 im Labor Elektrische Antriebe

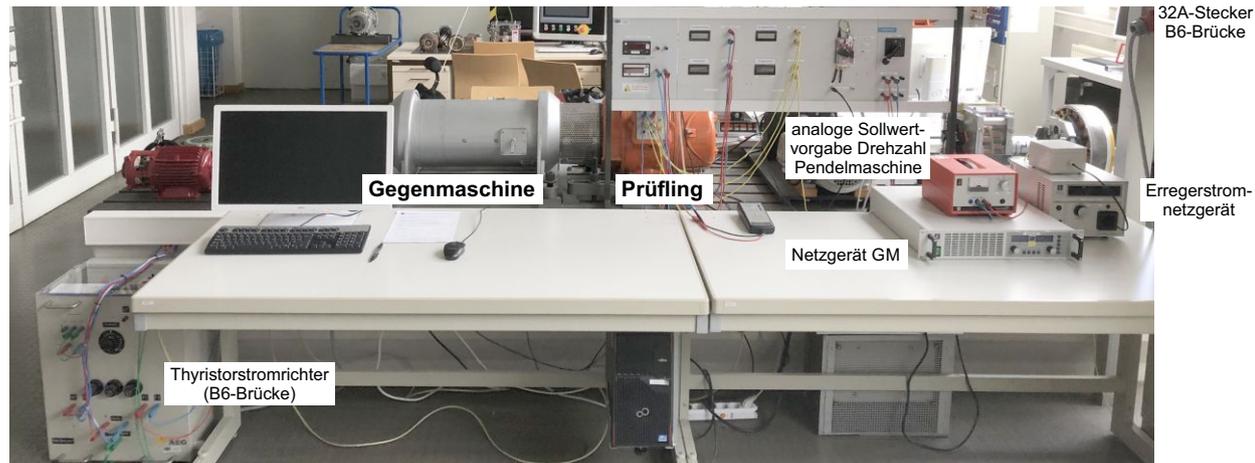
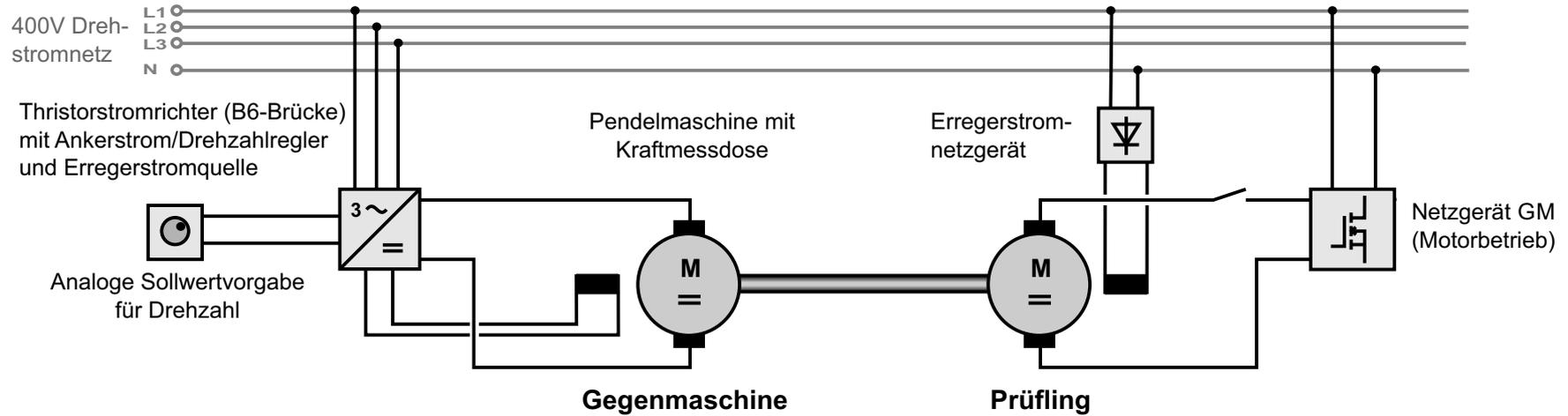


Bild: A. Kleimaier, HAW Landshut

# 1.4 Beispiele für elektrische Antriebe

## Prüfstand 2 im Labor Elektrische Antriebe

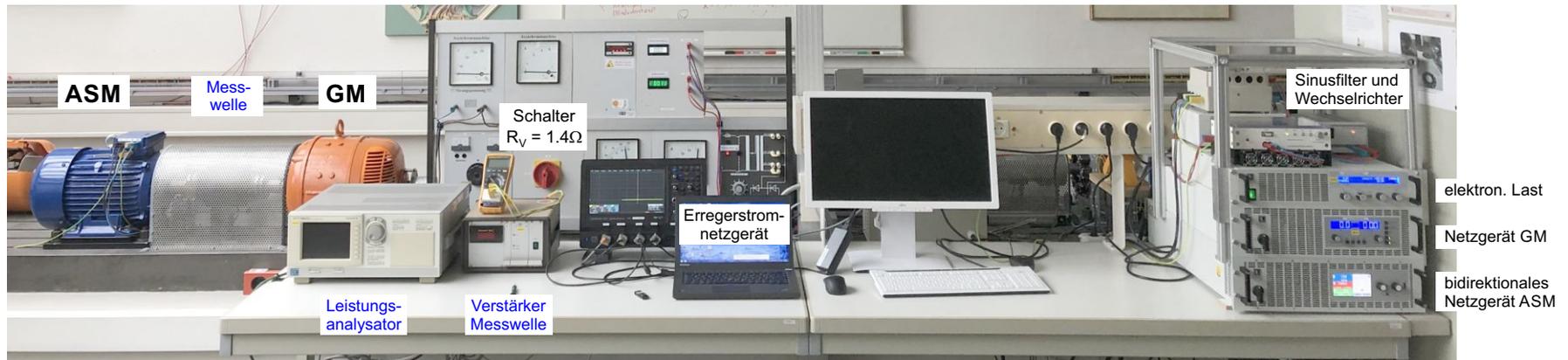
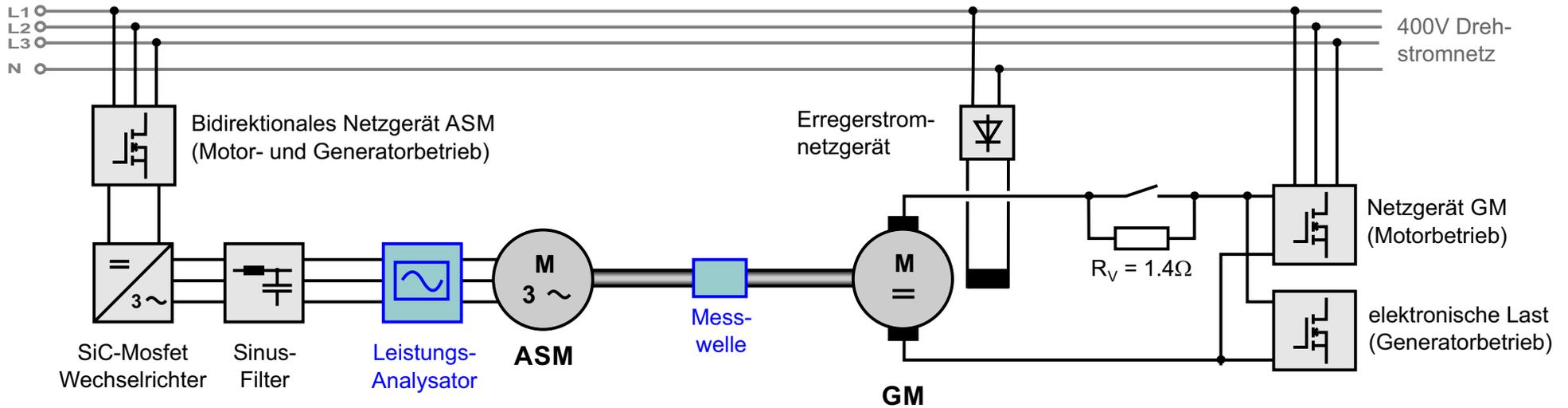


Bild: A. Kleimaier, HAW Landshut

## 1.4 Beispiele für elektrische Antriebe

### Zusammenfassung aus 1.4

**Es gibt unterschiedliche Maschinenvarianten:**

- Gleichstrommaschine (GM)
- Einphasen-Reihenschlussmaschine
- Asynchronmaschine (ASM)
- Synchronmaschine (SM)
- Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)
- Brushless DC Motor (BLDC) bzw. EC-Motor
- und weitere Varianten: MDM, TFM, Axialflussmaschine, SRM, SynRM, ...

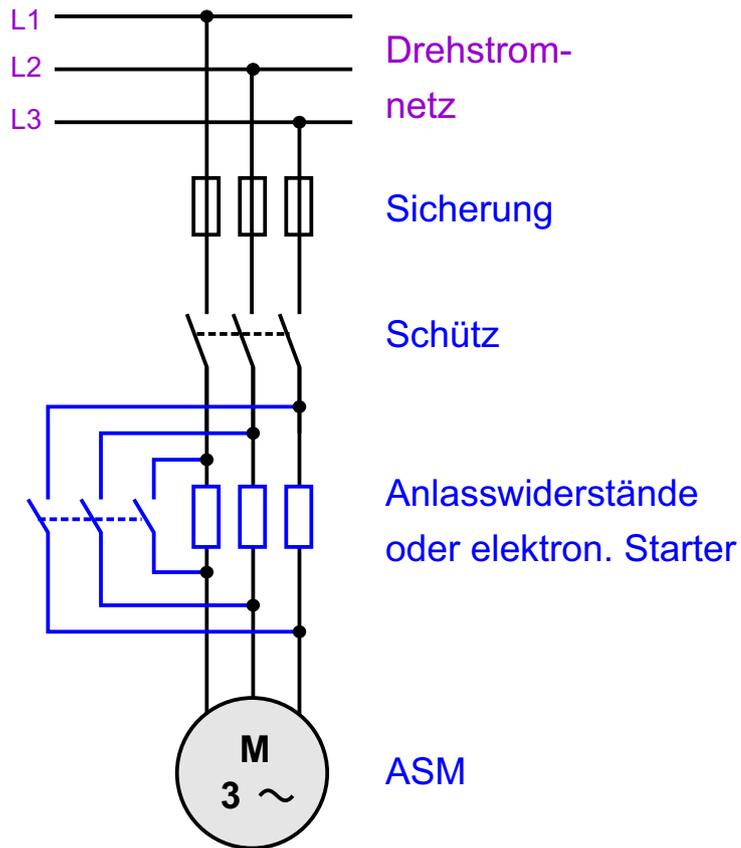
**Es gibt unterschiedliche Antriebsstrukturen:**

- Maschine fest an einem Netz
- Maschine mit Anlaufvorrichtung
- Maschine mit Wechselrichter für drehzahlvariablen Betrieb

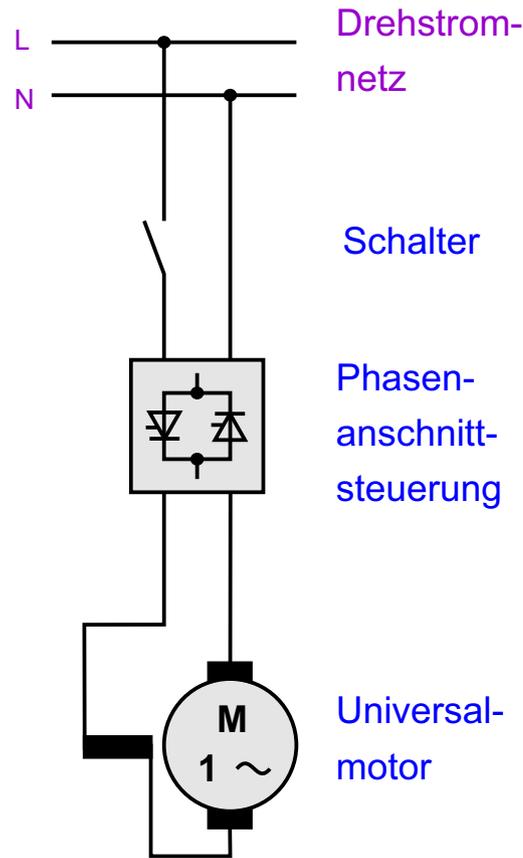
# 1.5 Antriebssysteme

## Antriebe am starren Netz bzw. mit Drehzahlsteuerung

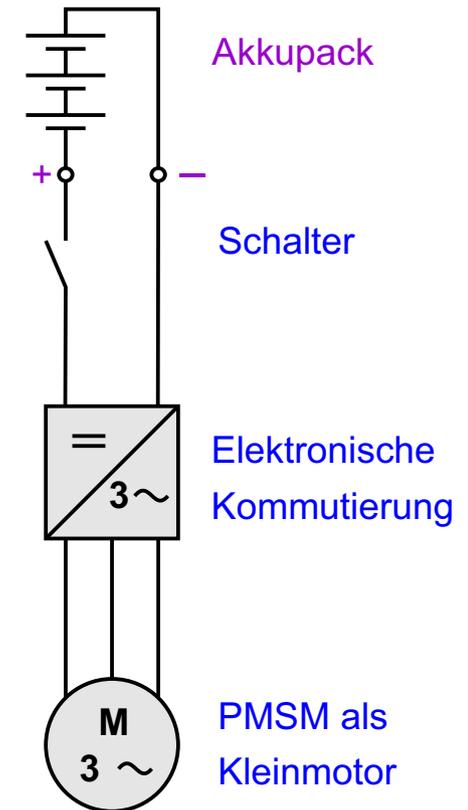
Standard-Drehstromantrieb



Elektrowerkzeuge, Haushalt



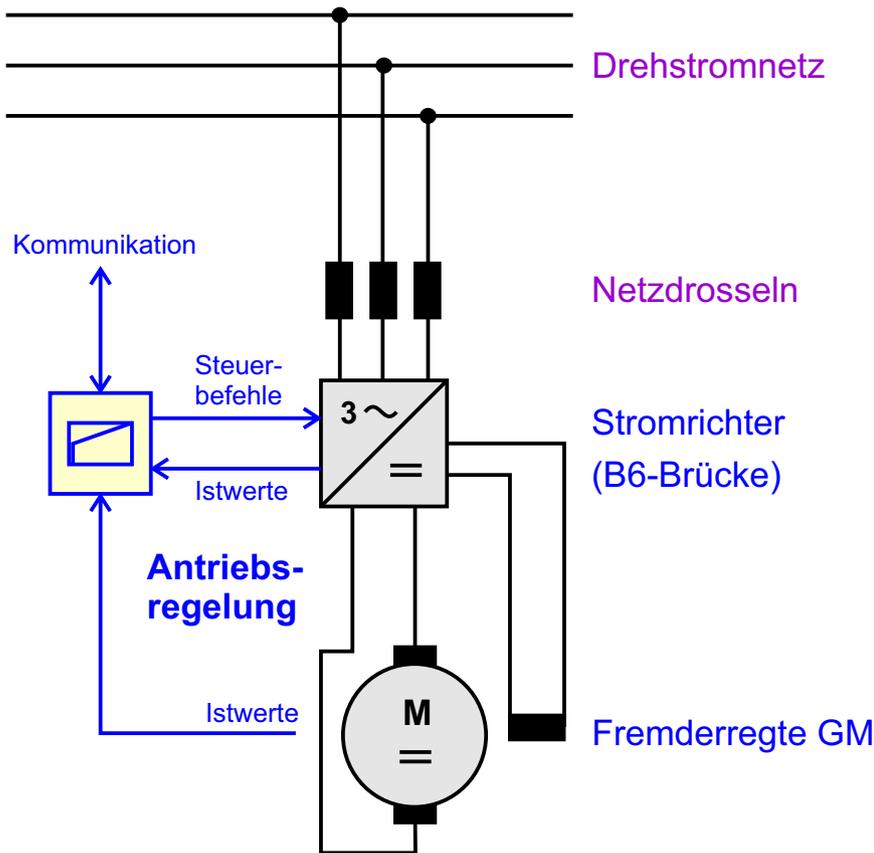
BLDC-Motor / EC-Motor



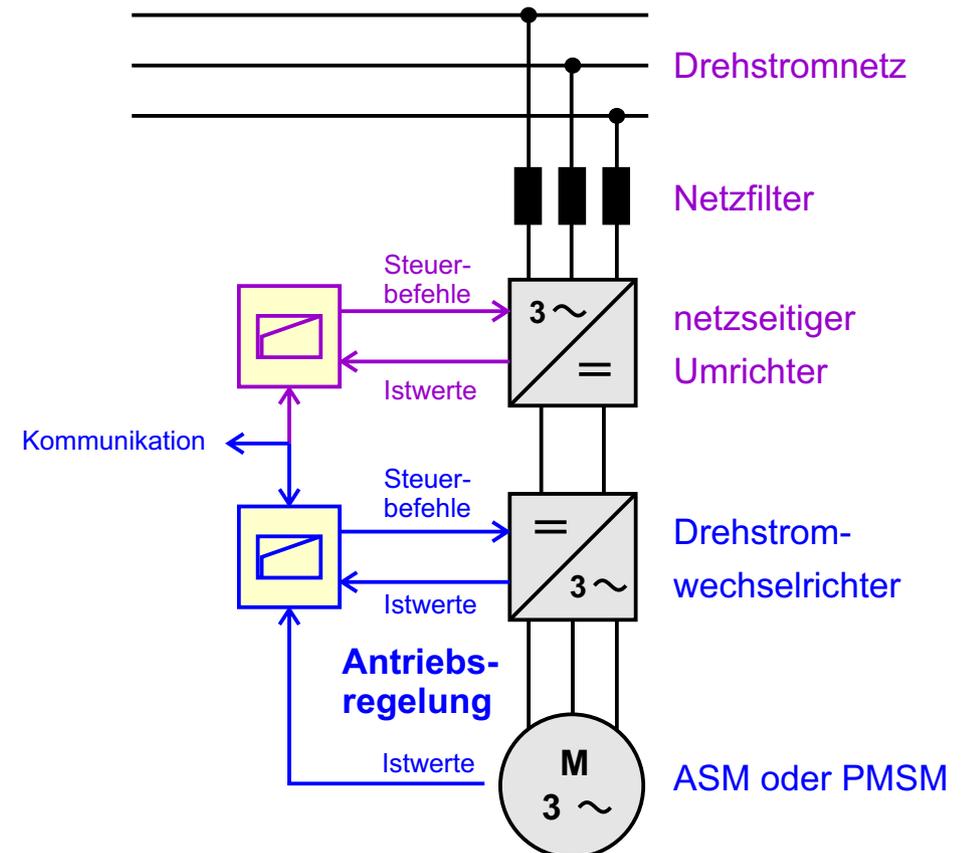
# 1.5 Antriebssysteme

## Antriebe mit Stromregelung und ggf. überlagerter Drehzahlregelung

klassischer drehzahlvariabler Antrieb  
mit Stromrichter und Gleichstrommaschine

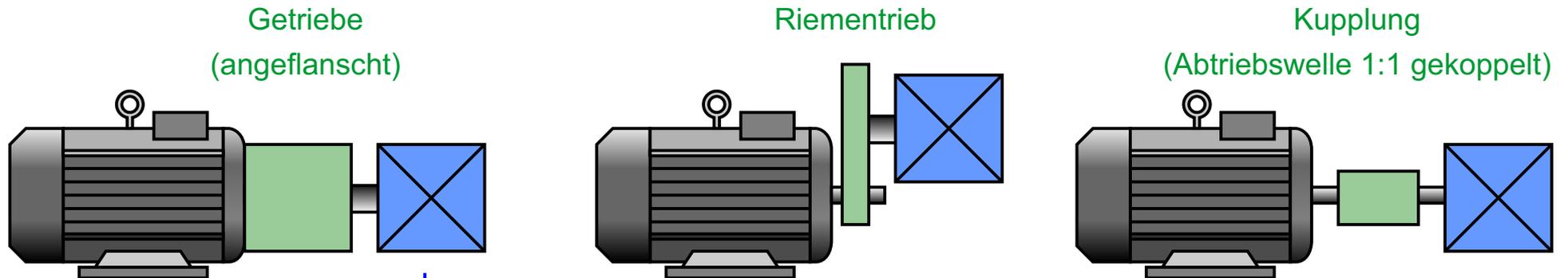


moderner drehzahlvariabler Antrieb  
mit Frequenzumrichter und Drehfeldmaschine



## 1.5 Antriebssysteme

### Abtriebswelle – mechanische Schnittstelle – Arbeitsmaschine

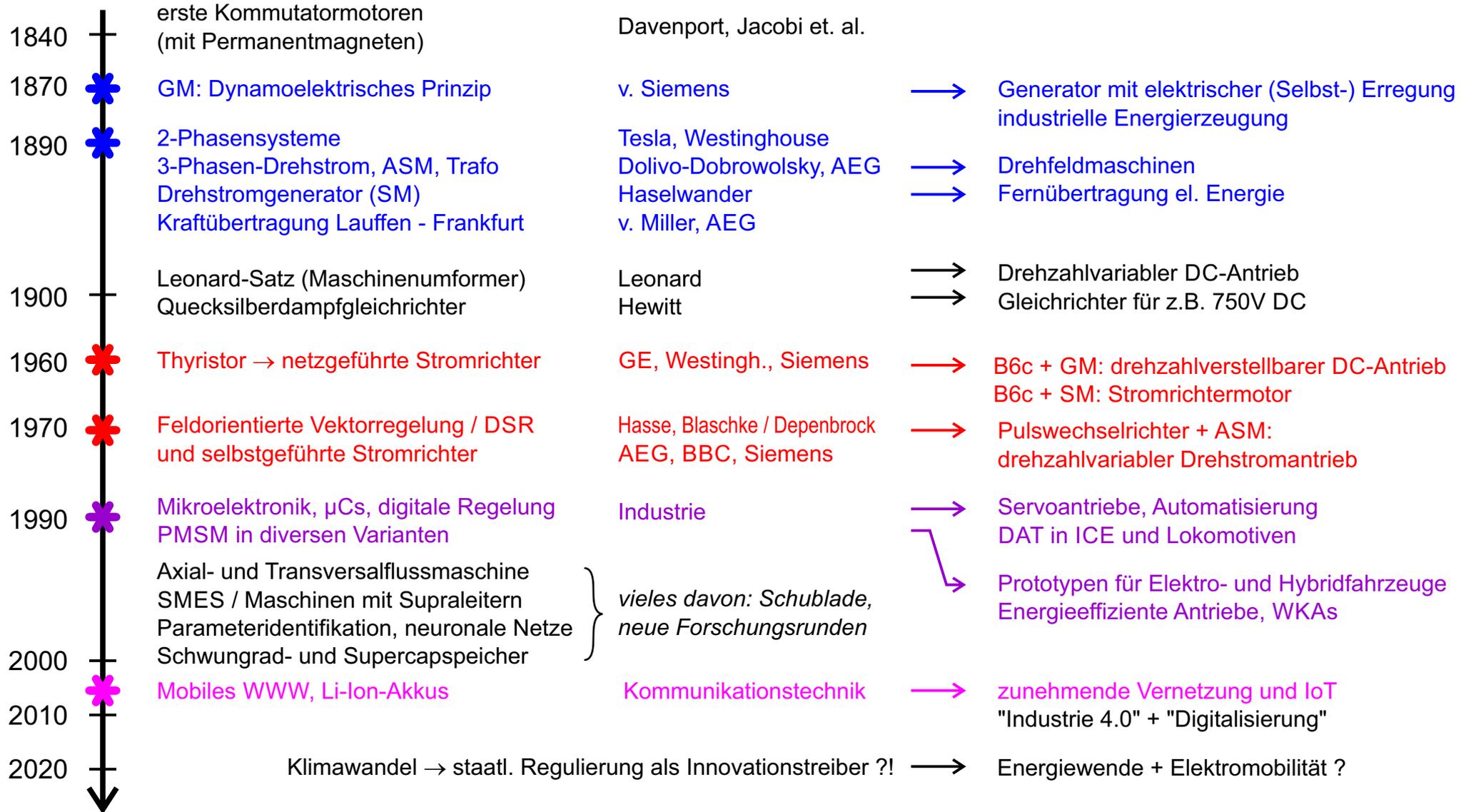


#### Arbeitsmaschine

- Werkzeugmaschinen: Hauptantrieb, Spindelantrieb, Vorschub, ...
- Automatisierungstechnik – Robotik: Positionierantriebe, Aktuatoren, ...
- Aufzug, Kran, Hebezeug, Förderanlagen, ...
- Lüfter, Pumpen, Kompressoren
- Kalander, Extruder, Walzwerke, Erzmühlen
- Schwungradspeicher
- Prüfstände
- Traktion: Elektroauto, Schienenfahrzeug, Schiffsantrieb, ...
- ...

# 1.6 Entwicklungstendenzen

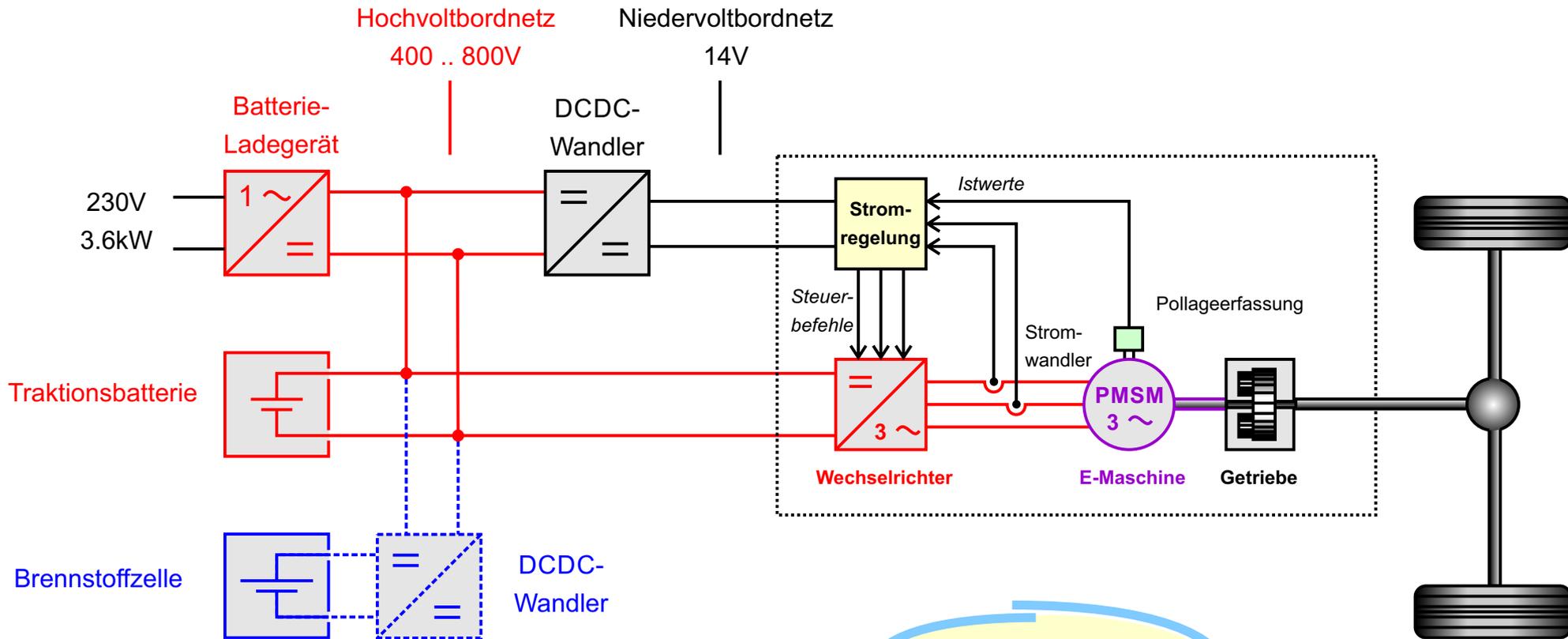
## Historie bis heute: wichtige Entwicklungsstufen





# 1.6 Entwicklungstendenzen

## Elektrifizierung im Automobil: Elektrofahrzeug



**Schlüsseltechnologie:  
Leistungselektronik**

Brennstoffzelle als primäre Energiequelle

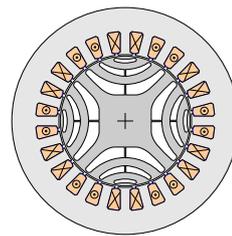
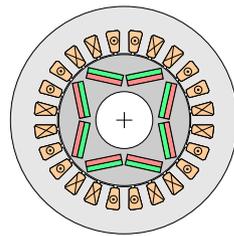
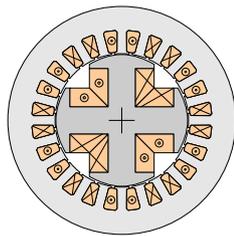
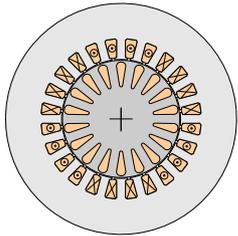
⇒ "Brennstoffzellenfahrzeug"

- kleine Traktionsbatterie als Puffer erforderlich
- oder: Brennstoffzelle dient als Reichweitenverlängerer

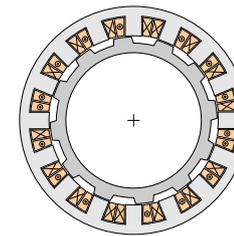
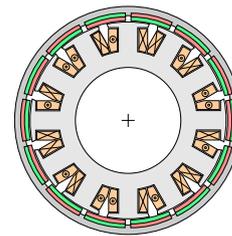
# 1.6 Entwicklungstendenzen

## Anwendungsspezifische Maschinenvarianten

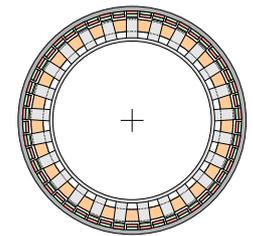
**Stator:**  
verteilte Wicklung, klassische Drehfeldmaschinen



**Stator:**  
konzentrierte Wicklung



**Stator:**  
Ringwicklung



**Rotor:**  
Käfigläufer  
(kurzgeschlossen)

**Rotor:**  
Schenkelpole,  
elektr. Erregung

**Rotor:**  
Permanent-  
magnete

**Rotor:**  
Flussbarrieren  
(ohne Magnete)

**Rotor:**  
Permanentmagnete  
hier: Außenläufer

**Rotor:**  
Zähne  
hier: Innenläufer

**Rotor:**  
Permanentmagnete  
hier: Außenläufer

**ASM**

**fremderregte SM**

**PMSM**

**synchrone RM**

**PMSM mit Einzel-  
zahnwicklung**

**SRM  
(geschaltete RM)**

**TFM (Transversal-  
flussmaschine)**

Standardantriebe,  
Schienenfahrzeuge

Kraftwerks-  
generatoren

Elektrofahrzeuge,  
Servomotoren

ggf. Alternative  
zu ASM

Starter-Generator,  
BLDC-Motor,  
Direktantriebe  
"Torquemotor"

in abgewandelter  
Form: Schrittmotor

Forschung:  
Direktantriebe,  
Radnabenmotor

ASM, PMSM, PMSM mit Einzelzahnw. und SRMs sind prinzipiell auch als Axialflussmotor oder Linearantrieb ausführbar

## 1.6 Entwicklungstendenzen

...in der Elektrischen Antriebstechnik:

### Anwendung:

- zunehmende Antriebselektrifizierung
- neuer Automatisierungsschub
- mehr Regenerative Energieerzeugung
- mehr Energieeffiziente Antriebe
- Einstieg in die Elektromobilität

← **Nutzung neuer Technologien:**  
Industrie 4.0, IOT → weiterer Ausbau der Automatisierung  
SiC-Halbleiter → Umbruch in der Leistungselektronik

### Aufgabenfelder:

- Anspruchsvollere Steuerung/Regelung
- Einsatz neuer Maschinenvarianten
- Knowhowaufbau in der Automobilindustrie
- Maschine + LE als integriertes System
- interdisziplinäres Arbeiten + SW-Entwicklung

### Schlagworte

- "Digitalisierung":  $\mu$ Cs / DSPs / FPGAs  
in der EAT seit ca. 1990
- "KI": neural networks, adaptive Regelung
- model based predictive control