

2 Elektrische Maschinen in Kraftfahrzeugen

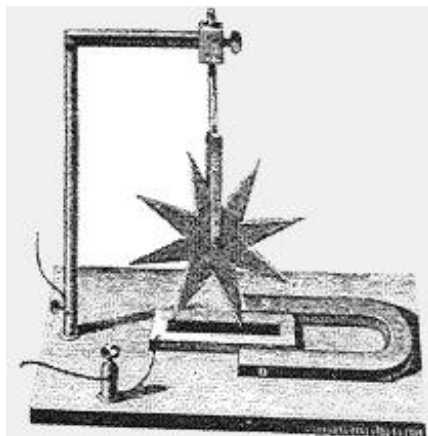
2.1 Grundlagen

2.2 Drehstromgenerator

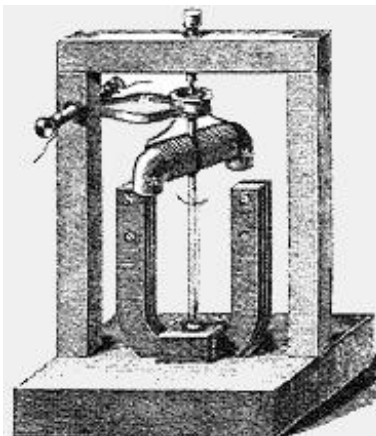
2.3 Starter

2.4 Starter-Generator-Maschinen

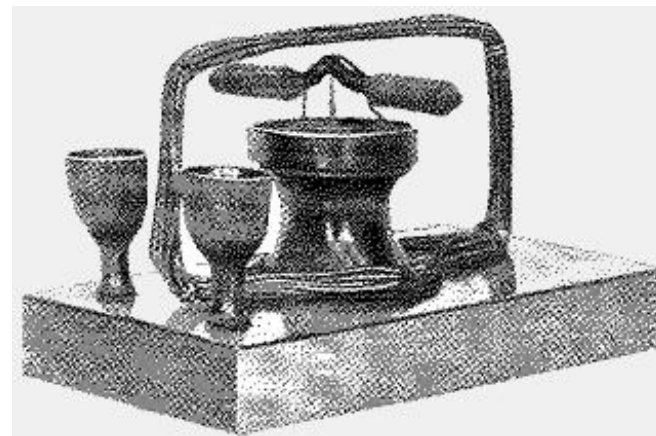
2.5 Hybridantriebe



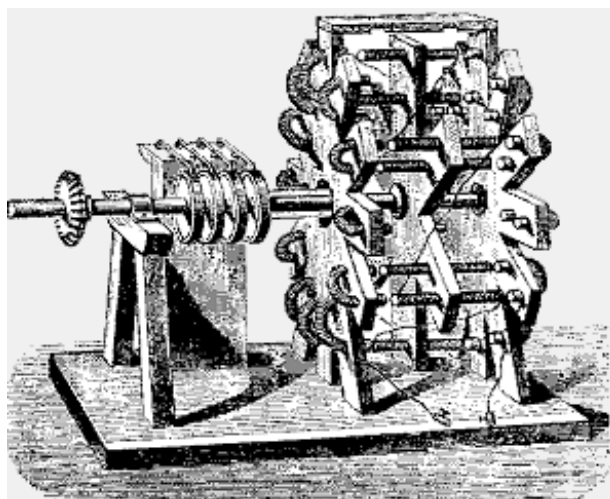
Barlow'sches Rad
(1823)



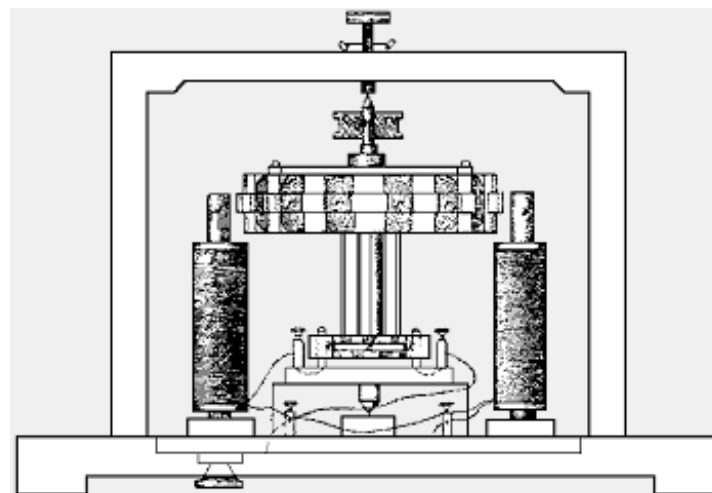
Ritchie's Apparat
(1833)



Jedlik's Apparat
(1827/28)

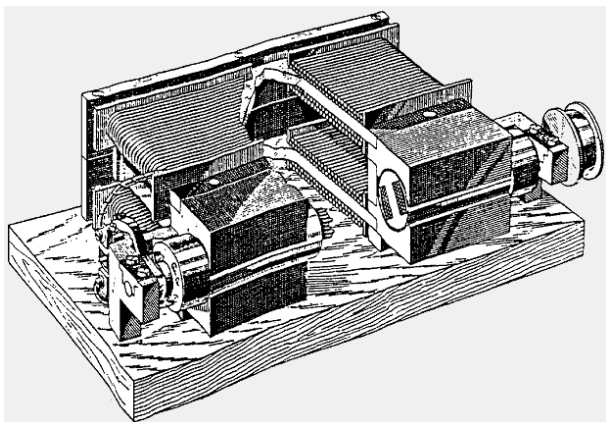


Erster „Elektromotor“ von
Ernst Moritz Hermann von Jakobi
(1838)



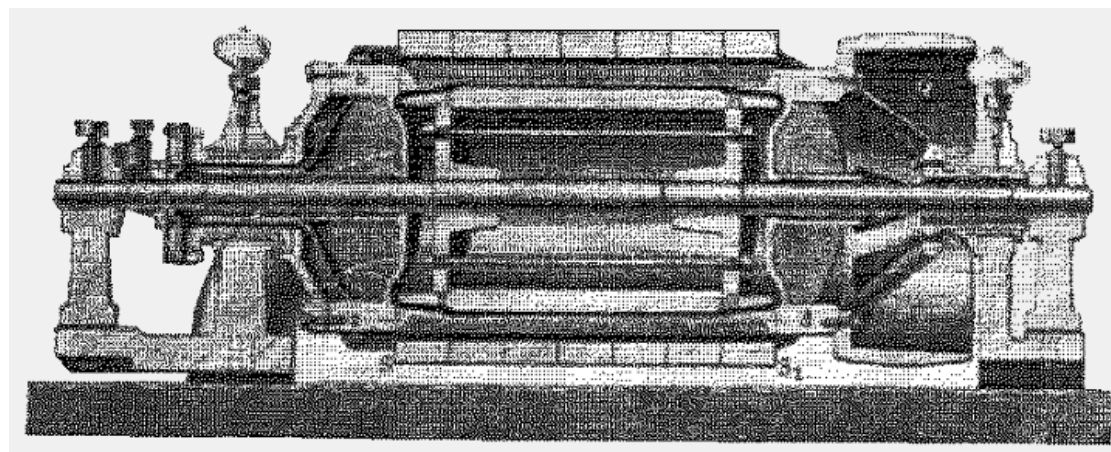
Pacinotti's Motor mit Ringanker
und mehrfach geteiltem Kollektor
(1860)

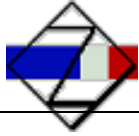
Erste elektrische Versuchsapparate



Werner von Siemens (1866): Erster „Dynamo“

**Motor mit Trommelanker
von Friedrich von Hefner-
Alteneck (1872)**





2 Elektrische Maschinen in Kraftfahrzeugen

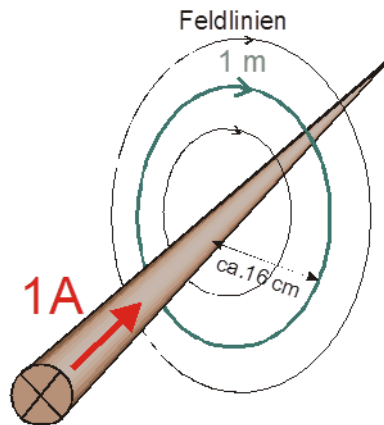
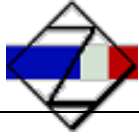
2.1 Grundlagen

2.2 Drehstromgenerator

2.3 Starter

2.4 Starter-Generator-Maschinen

2.5 Hybridantriebe

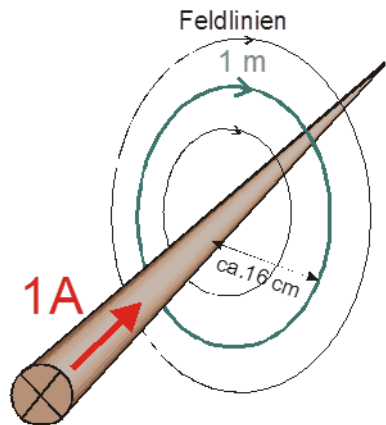


Stromdurchflossene elektrische Leiter \rightarrow magnetisches Feld. Das Produkt aus magnetischer Feldstärke H und Länge der Feldlinie l ist konstant und entspricht der Stärke des Magnetfeld erzeugenden Stromes I .

In einer Spule wird die Feldstärke um die Anzahl der Windungen verstärkt.

(gilt nur für homogenes Feld, sonst: $\oint H \cdot ds = \sum_v I_v$)

Das Produkt $I \cdot N$ wird auch elektrische Durchflutung genannt und stellt im Magnetkreis eine magnetische Spannungsquelle Θ dar.

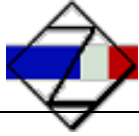


Analogie zum elektrischen Stromkreis:
mang. Spannungsquellen Θ und magn. Spannungsabfälle V .

Ebenso gilt in einem umlaufenden/geschlossenen Magnetkreis:

Jede magn. Feldstärke erzeugt einen magn. Fluss Φ ,
der vom spezifischen magn. Leitwert μ (Permeabilität)
und von der Querschnittsfläche A_q abhängt.

Der spezifische magn. Leitwert wird aus der magn. Feldkonstante μ_0
und der relativen Permeabilitätszahl μ_r gebildet.

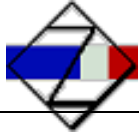


Die Magnetflussdichte B bzw. magn. Induktion ist unabhängig vom Querschnitt:

Analogie zum elektrischen Stromkreis - Ohmsches Gesetz des Magnetkreises:

Λ ist der magn. Leitwert.

Dieser bzw. der magn. Widerstand ist in einigen Materialien – insbesondere in Eisen – von der Feldstärke abhängig und somit nicht konstant \rightarrow Magnetisierungskurve.



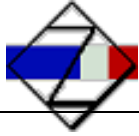
Wirkungskette:

Umkehrung:

Transformatorprinzip

Induktionsgesetz:

Dabei ist die induzierte Spannung ihrer Ursache entgegen gerichtet (Lenz'sche Regel).

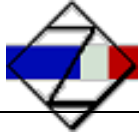


erweiterte Wirkungskette:

elektrische Maschinen als Motoren

Umkehrung:

elektrische Maschinen als Generatoren



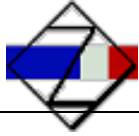
Bei Drehbewegungen ändert sich der wirksame magn. Fluss idealisiert:

Die induzierte Spannung ist also:

mit der Amplitude:

und der Frequenz:

Der magn. Fluss wird auch als Erregerfluss,
das Magnetische Feld als Erregerfeld bezeichnet.
Entsprechend bekommt der magn. Fluss den Index F ($\Phi_F = \text{ErregerFluss}$).



Der Effektivwert der induzierten Spannung ist:

Und unter der Voraussetzung rein sinus- bzw. cosinusförmigen Spannungsverlaufes ist:

Bei elektrischen Maschinen hängt die induzierte Spannung von mehreren unterschiedlichen Faktoren ab:

- Zahl der Polpaare
- Zahl der Anker- bzw. Ständerzweigpaare
- Windungszahl
- konstruktiv bedingtes Abweichen von idealer sinusförmiger Induktion.

Diese Faktoren werden in einer für jede Maschine individuellen Maschinenkonstante **k** zusammengefasst.



Erste grundlegende Gleichung für elektrische Maschinen:

induzierte Maschinenspannung

Produkt aus induzierter Spannung U_q und Maschinenstrom I ergibt innere Leistung P_i .

Sie ist das Bindeglied zwischen elektrischer und mechanischer Seite einer Maschine.

elektr. Seite

innere Leistung

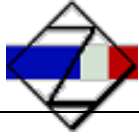
mech. Seite

Werden mech. und magn. Verluste vernachlässigt, entspricht die innere Leistung P_i

- der abgegebenen mech. Leistung (Motor)

bzw.

- der aufgenommenen mech. Leistung (Generator).



Zweite grundlegende Gleichung für elektrische Maschinen:

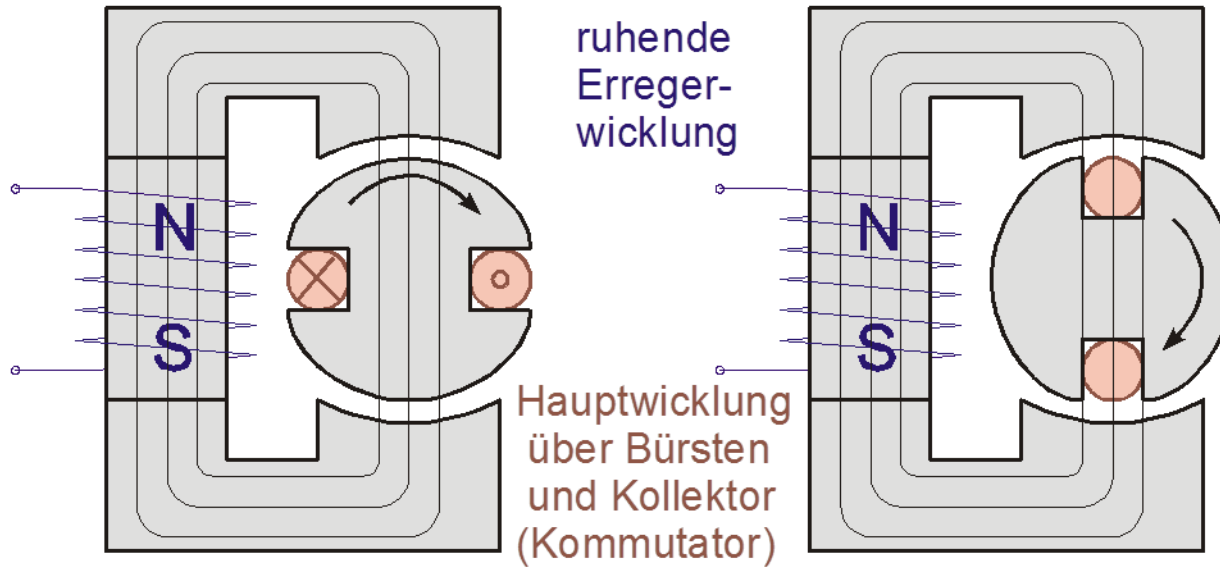
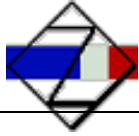
Maschinenstrom

elektr. Seite

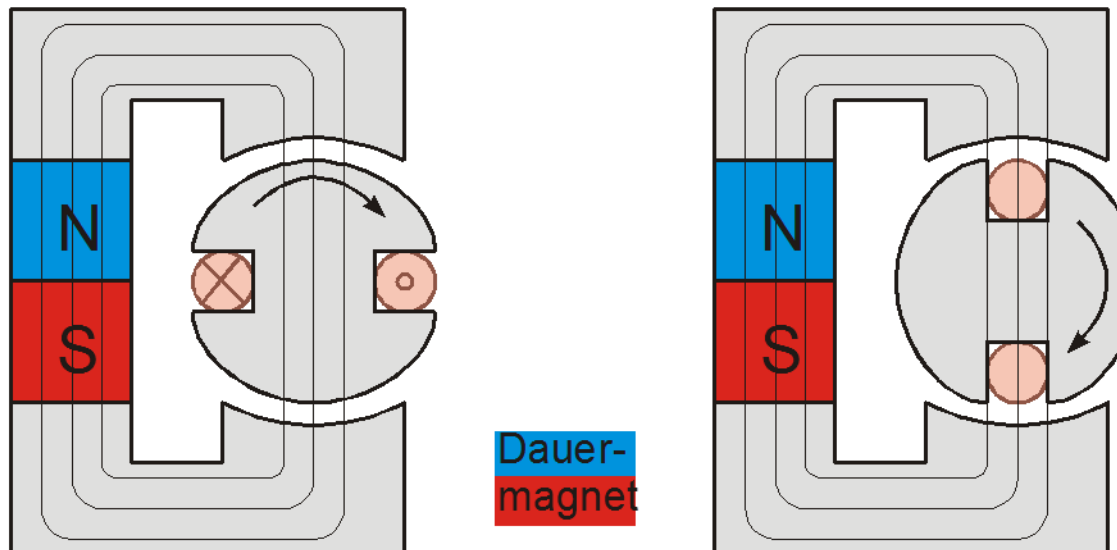
innere Leistung

mech. Seite

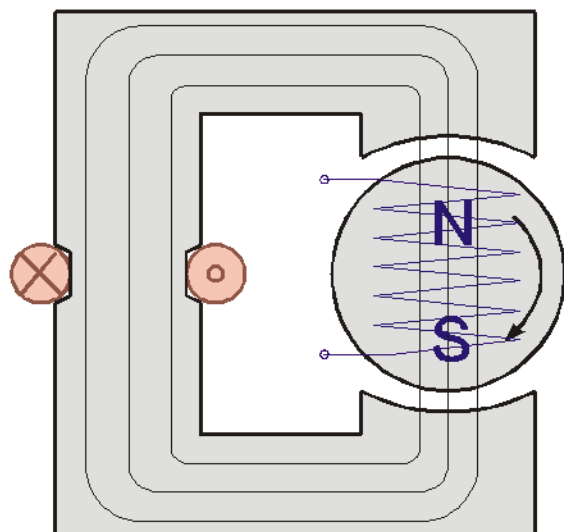
Schema einprägen!



Außenpolmaschinen (mit mechanischer Kommütierung für Gleichstromnetze)

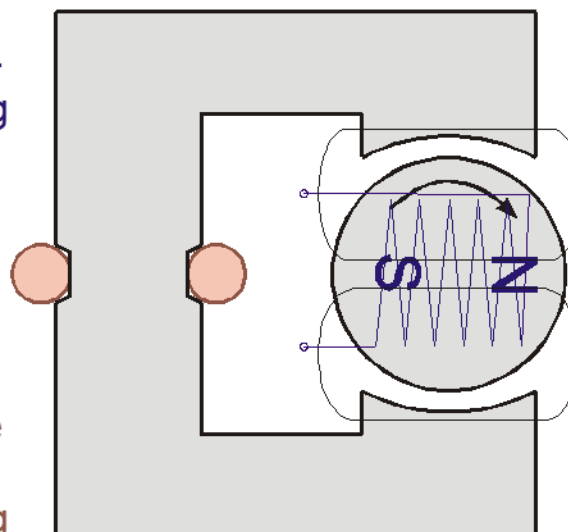


- Anwendung im Kfz:
- Starter
 - Kleinmotoren
 - Gleichstromgener.*
 - Antriebsmaschinen*
(* veraltet)



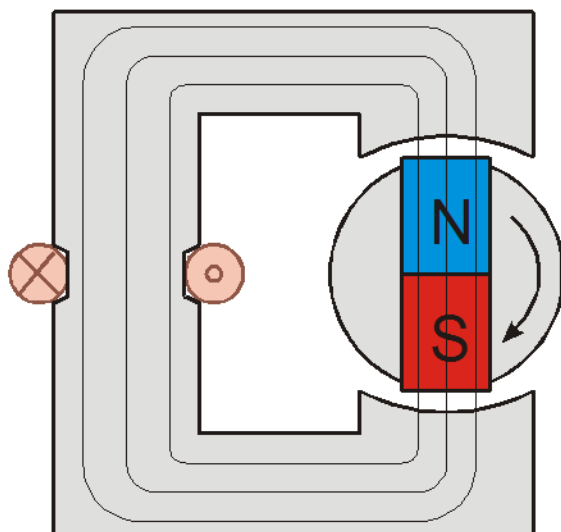
Erreger-
wicklung
über
Bürsten
und
Schlei-
f-
ringe

ruhende
Haupt-
wick-
lung

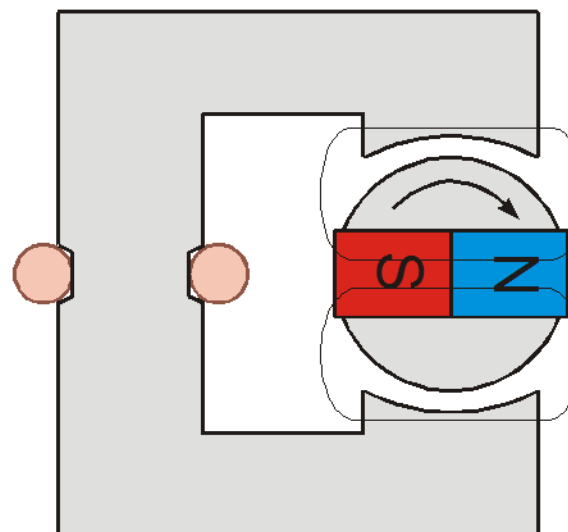


Innenpolmaschinen

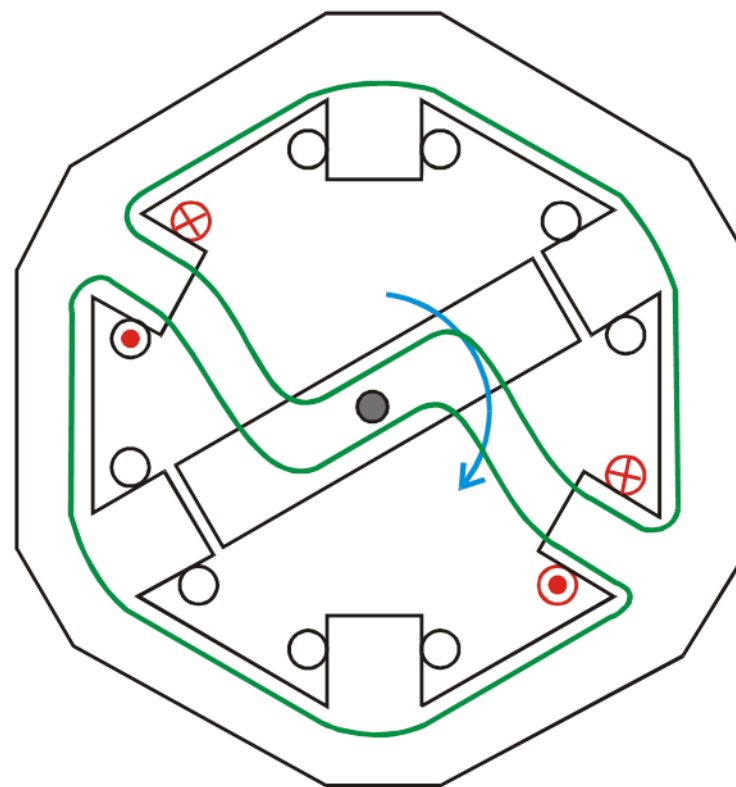
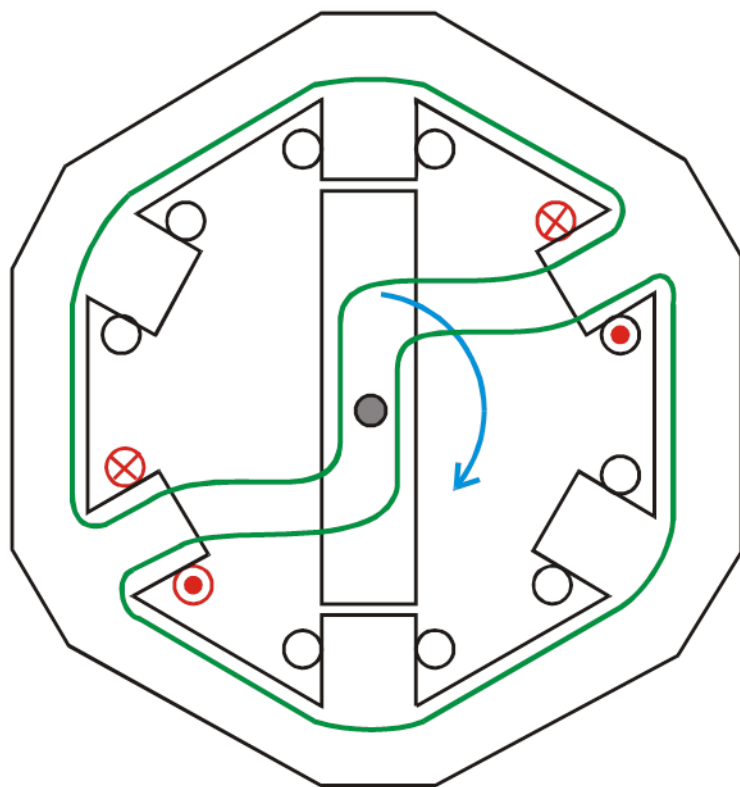
**(im Kfz-Bordnetz
elektronische
Komm-
utierung
erforderlich)**



Dauer-
magnet

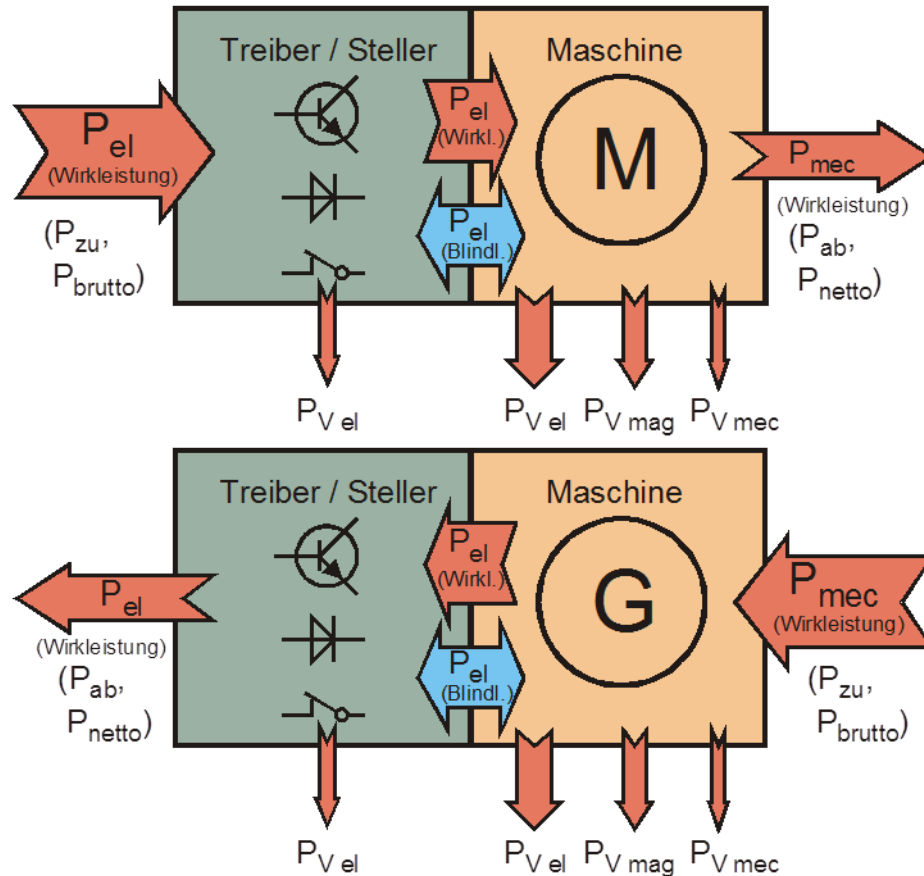
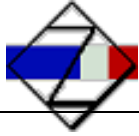


Anwendung im Kfz:
- Drehstromgenerator
- Antriebsmaschinen
- moderne Kleinmot.



Reluktanzmaschinen nur mit ruhenden Hauptwicklungen

Beispiel Schrittmotor mit elektronischer Ansteuerung



Leistungsbilanz elektrischer Maschinen im Kfz-Bordnetz

Treiber/Steller:

$P_{V_{el}}$ = Stromwärmeverluste an:

- bipolaren Leistungstransistoren $P_V \sim I_C (+I_C^2)$
- unipolaren Leistungstransistoren $P_V \sim I_D^2$
- Leistungsdioden $P_V \sim I_C (+I_C^2)$
- Bürstenübergangsverluste $P_V \sim I_A$

Maschine:

- $P_{V_{el}}$ = Stromwärmeverluste an Haupt- und Erregerwicklung (Kupferverluste) $P_V \sim I_A (+I_F^2)$
- $P_{V_{mag}}$ = Wirbelstrom- und Hystereseverluste (Eisenverluste) $P_V \sim B (f^2+f)$
- $P_{V_{mec}}$ = Lüfter- und Reibungsverluste $P_V \sim n^3$



Zählfeilsystem(e)

Grundsätzliche Empfehlung: Immer Leistungsfluss betrachten!

Im deutschsprachigen Raum übliches System:

Eine in einen Stromkreis eingespeiste Leistung (bspw. an einer Spannungsquelle) wird als negative Leistung betrachtet.

→ Spannungs- und Strompfeile sind zueinander entgegengerichtet.

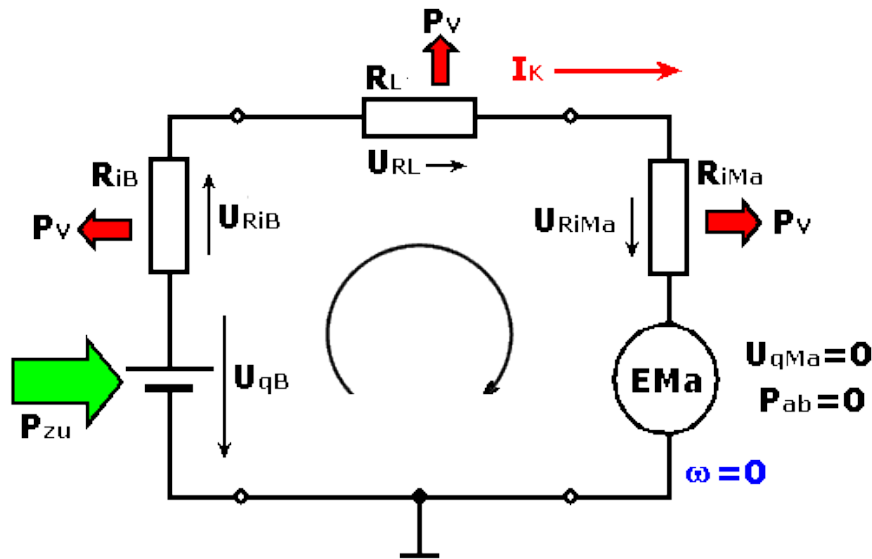
Eine aus einem Stromkreis entnommene Leistung (bspw. an einem Verbraucher) wird als positive Leistung betrachtet.

→ Spannungs- und Strompfeile sind zueinander gleichsinnig.

(Dies entspricht dem Verbraucher-Zählfeilsystem.)



Beispiel: Kurbelwellen-Starter-Generator als universelle elektrische Maschine



Der KSG soll den Verbrennungsmotor starten.
Unmittelbar nach dem Einschalten des Stromes fließt der sog. Kurzschlussstrom. Dabei erreicht die elektrische Maschine ihr höchstes Drehmoment, jedoch entsteht weder eine induzierte Quellspannung noch gibt die Maschine eine Nutzleistung ab, da die Drehzahl noch Null ist.

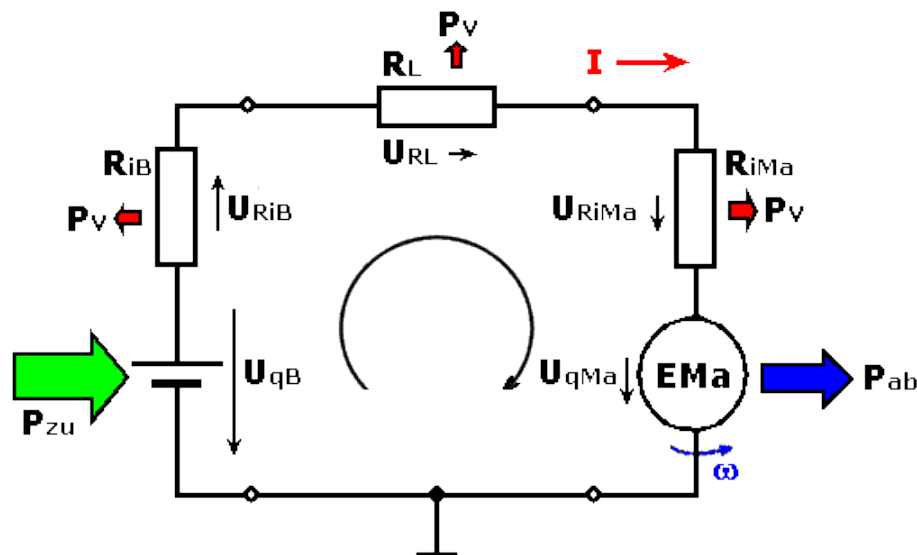
Leistungsbilanz: $-P_{zu} + P_{VRiB} + P_{VRL} + P_{VRiMa} = 0$

Die Batterie wird entladen. Die dabei entnommene Leistung wird nur in Wärme umgewandelt.

Maschensatz (Leistungsbilanz durch gemeinsamen Strom teilen.): $-U_{qB} + U_{RiB} + U_{RL} + U_{RiMa} = 0$



Beispiel: Kurbelwellen-Starter-Generator als universelle elektrische Maschine

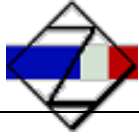


Der KSG dreht den Verbrennungsmotor durch. Das Drehmoment verringert sich, die Drehzahl steigt. Ebenso wächst die induzierte Quellenspannung. Dabei erreicht der KSG seine Höchstleistung im Motorbetrieb.

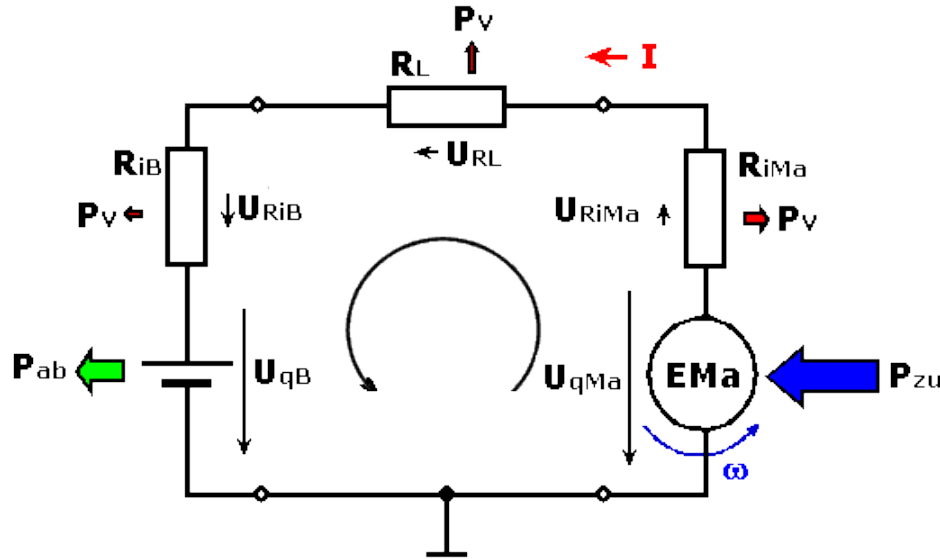
Leistungsbilanz: $-P_{zu} + P_{V_{RiB}} + P_{V_{RL}} + P_{V_{RiMa}} + P_{ab} = 0$

Die der chemischen Energie der Batterie entnommenen Leistung wird wenigstens zu einem Teil in mechanische Leistung gewandelt.

Maschensatz: $-U_{qB} + U_{RiB} + U_{RL} + U_{RiMa} + U_{qMa} = 0$



Beispiel: Kurbelwellen-Starter-Generator als universelle elektrische Maschine



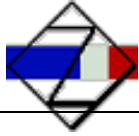
Nach dem Anspringen des Verbrennungsmotors ist er in der Lage, den KSG anzutreiben, d.h. der Leistungsfluss kehrt sich um. Aufgrund der nun höheren Quellspannung der Maschine kehrt sich auch die Stromrichtung um.

Leistungsbilanz: $+P_{ab} + P_{V_{RiB}} + P_{V_{R_L}} + P_{V_{RiMa}} - P_{zu} = 0$

Nur ein Teil der mechanischen Leistungsaufnahme steht für das Laden der Batterie zur Verfügung. Der Rest wird in Wärme umgewandelt.

Maschensatz: $+U_{qB} + U_{RiB} + U_{R_L} + U_{RiMa} - U_{qMa} = 0$

Der Zusammenhang zwischen Drehzahl und induzierter Quellspannung ist nicht starr, sondern wird abhängig von der Bauart der Maschine durch die ansteuernde Leistungselektronik bestimmt. Außerdem ist aufgrund der Blindwiderstände in der Maschine die tatsächlich induzierte Quellspannung meist sehr viel höher, als die nach außen wirksame Quellspannung.



2 Elektrische Maschinen in Kraftfahrzeugen

2.1 Grundlagen

2.2 Drehstromgenerator

2.2.1 Leerlaufkennlinie (Spannungskennlinie)

2.2.2 Mechanischer Aufbau

2.2.3 Elektrischer Aufbau

2.2.4 Belastungskennlinie (Stromkennlinie)

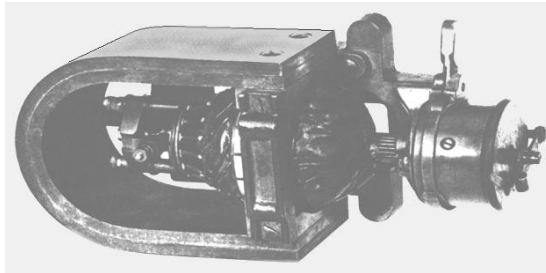
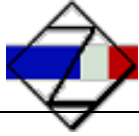
2.2.5 Verluste/Wirkungsgrad

2.2.6 Spannungsregelung

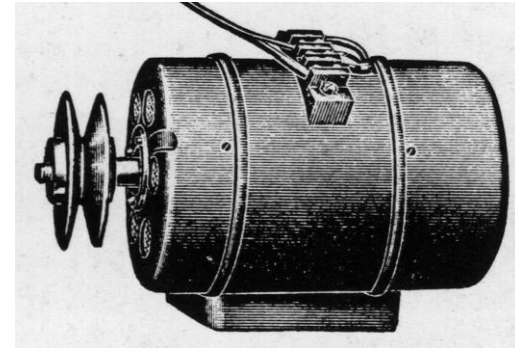
2.3 Starter

2.4 Starter-Generator-Maschinen

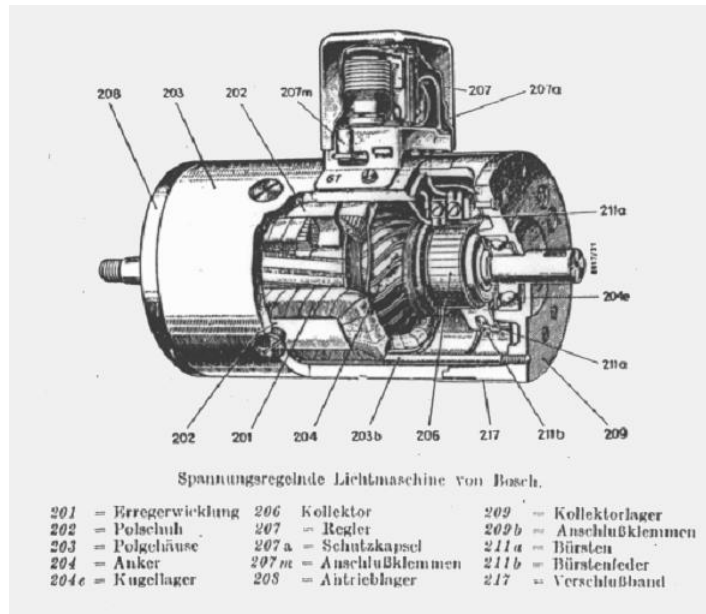
2.5 Hybridantriebe



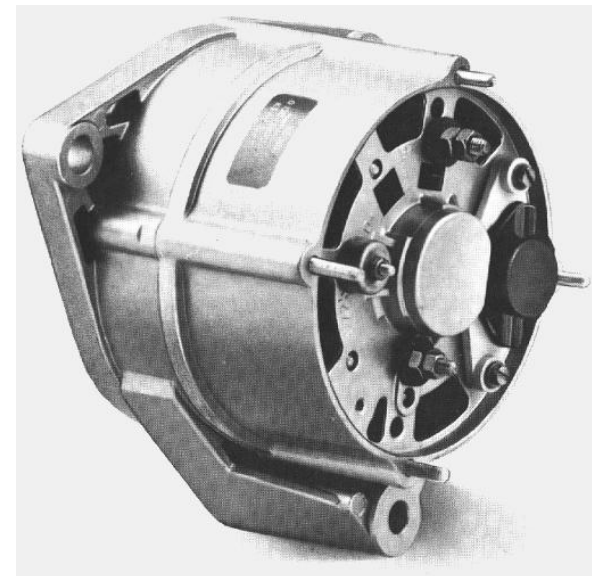
**Lichtmaschine mit angebautem
Zündunterbrecher (Firma Bosch 1906)**



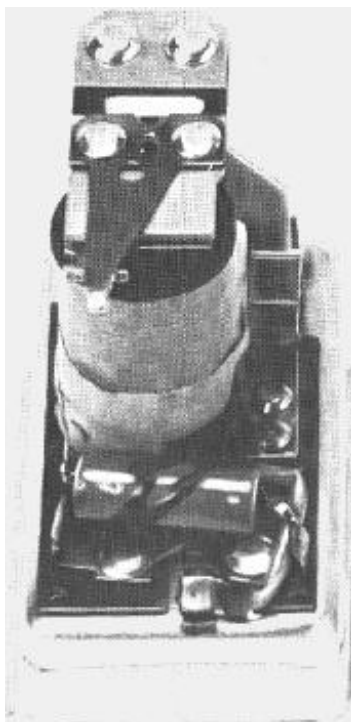
**Gleichstromlichtmaschine –
noch ohne Regler (um 1910)**



**Spannungsgeregelter Gleichstromgenerator
(Firma Bosch um 1925)**



**Drehstromgenerator
(ältere Bauart)**



**Elektro-
mechanischer
Regler**

100%

240 g

**Karosserie-
anbau**



**Elektronischer
Regler der
1. Generation**

ca. 20%

55 g

**Generator-
anbau**

Entwicklung der Spannungsregler



**Elektronischer
Regler der
2. Generation**

ca. 3%

22 g

**Generator-
an- bzw. einbau**



2 Elektrische Maschinen in Kraftfahrzeugen

2.1 Grundlagen

2.2 Drehstromgenerator

2.2.1 Leerlaufkennlinie (Spannungskennlinie)

2.2.2 Mechanischer Aufbau

2.2.3 Elektrischer Aufbau

2.2.4 Belastungskennlinie (Stromkennlinie)

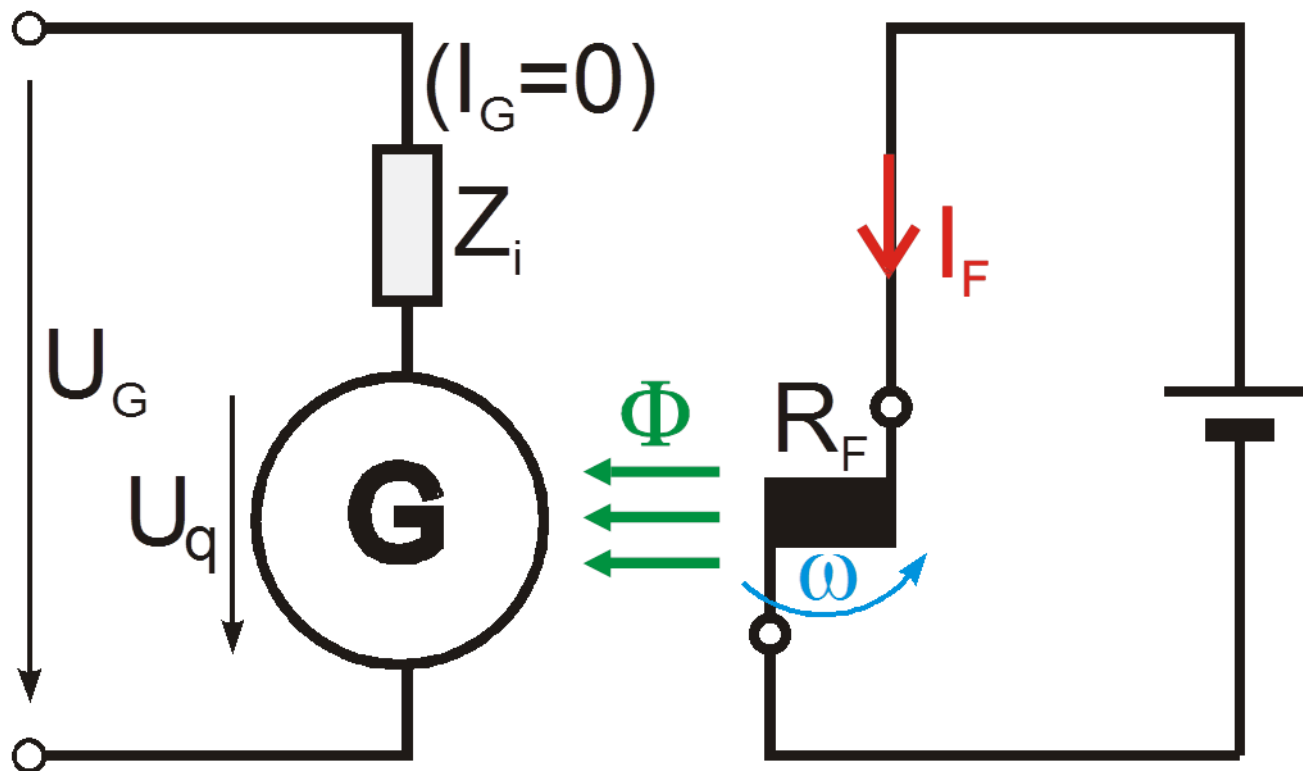
2.2.5 Verluste/Wirkungsgrad

2.2.6 Spannungsregelung

2.3 Starter

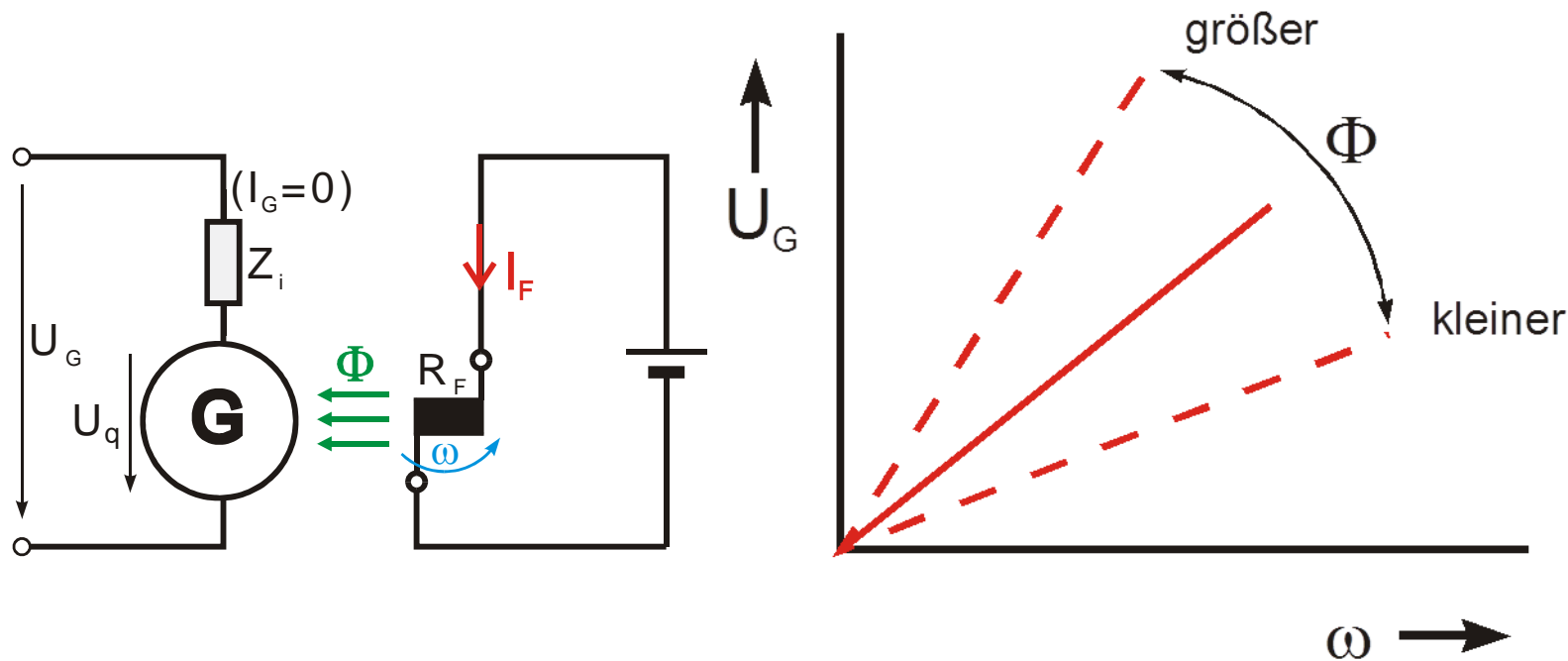
2.4 Starter-Generator-Maschinen

2.5 Hybridantriebe

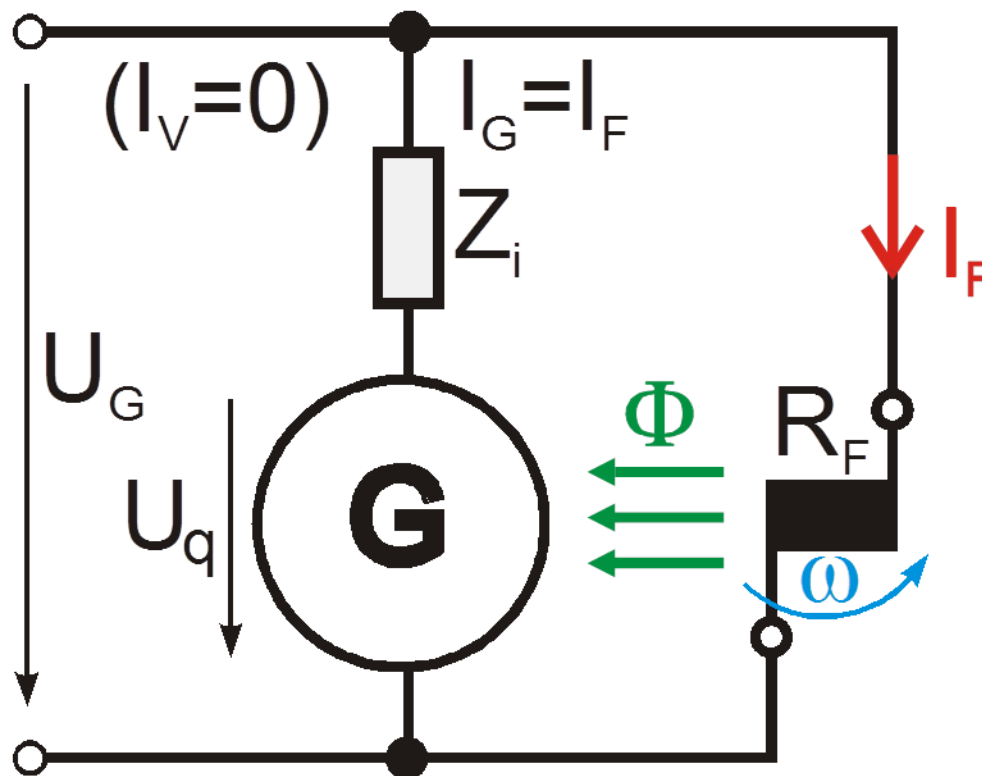


Ersatzschaltbild – fremd erregter Generator

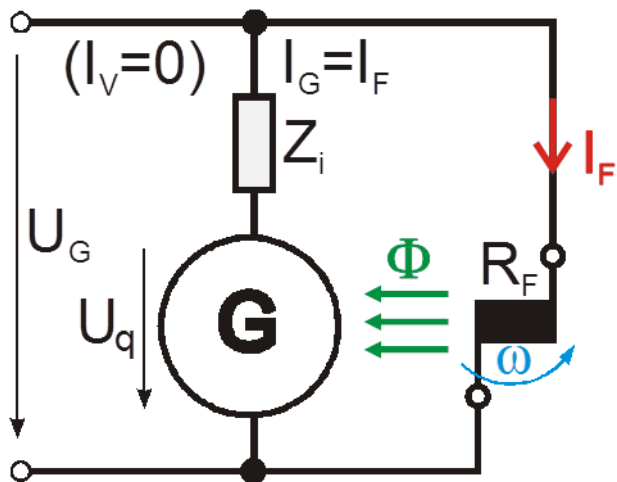
Generator-Spannungsgleichung:



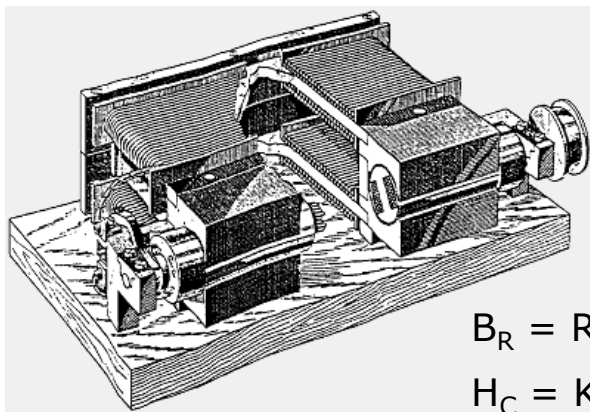
Leerlaufkennlinie (Spannungskennlinie) des fremd erregten Generators



Ersatzschaltbild – selbst erregter Generator

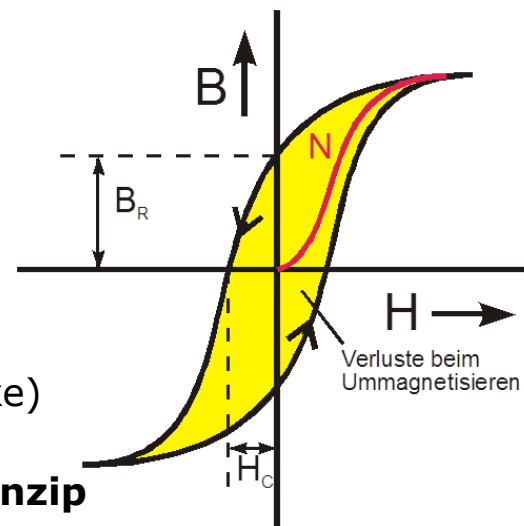


Der Generator erzeugt seine Erregung selbst.

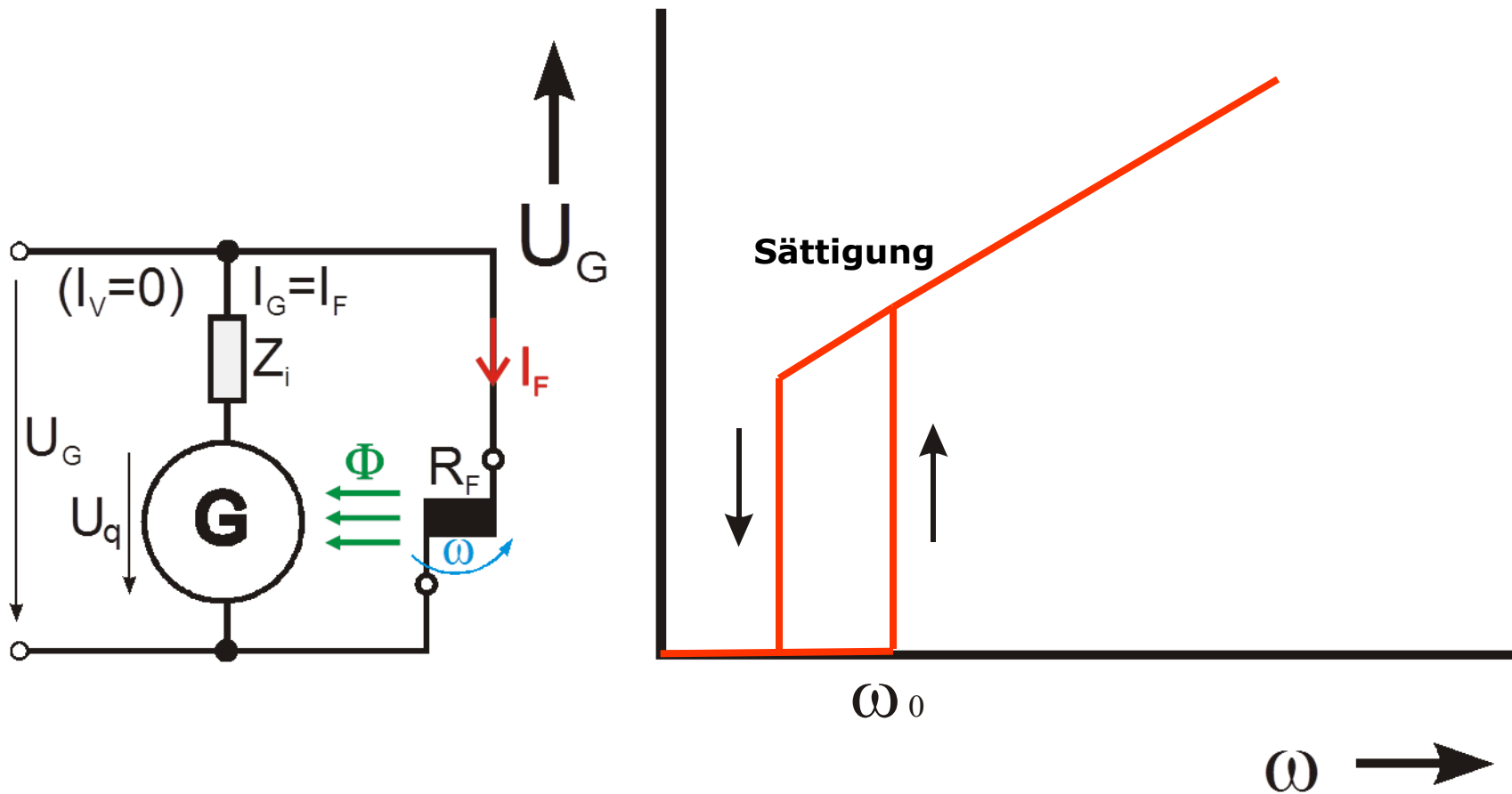


B_R = Remanenz/Restmagnetismus

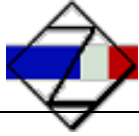
H_C = Koerzitiv-Feldstärke
(entmagnetisierende Feldstärke)



1866 - Werner von Siemens: dynamo-elektrisches Prinzip



Leerlaufkennlinie (Spannungskennlinie) des selbst erregten Generators



2 Elektrische Maschinen in Kraftfahrzeugen

2.1 Grundlagen

2.2 Drehstromgenerator

2.2.1 Leerlaufkennlinie (Spannungskennlinie)

2.2.2 Mechanischer Aufbau

2.2.3 Elektrischer Aufbau

2.2.4 Belastungskennlinie (Stromkennlinie)

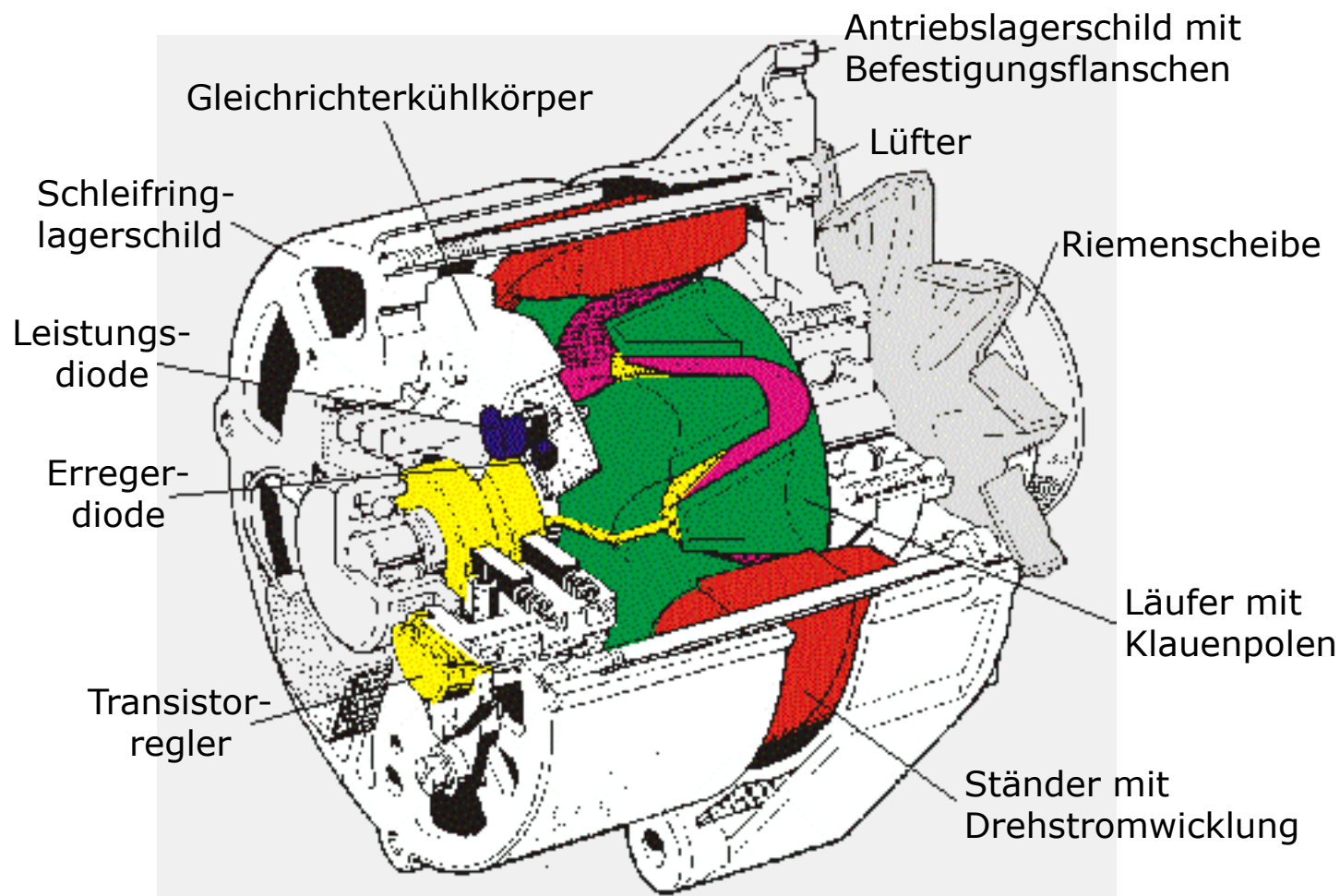
2.2.5 Verluste/Wirkungsgrad

2.2.6 Spannungsregelung

2.3 Starter

2.4 Starter-Generator-Maschinen

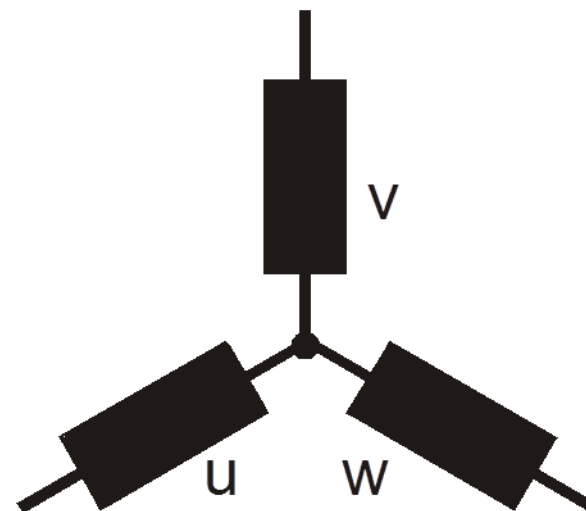
2.5 Hybridantriebe

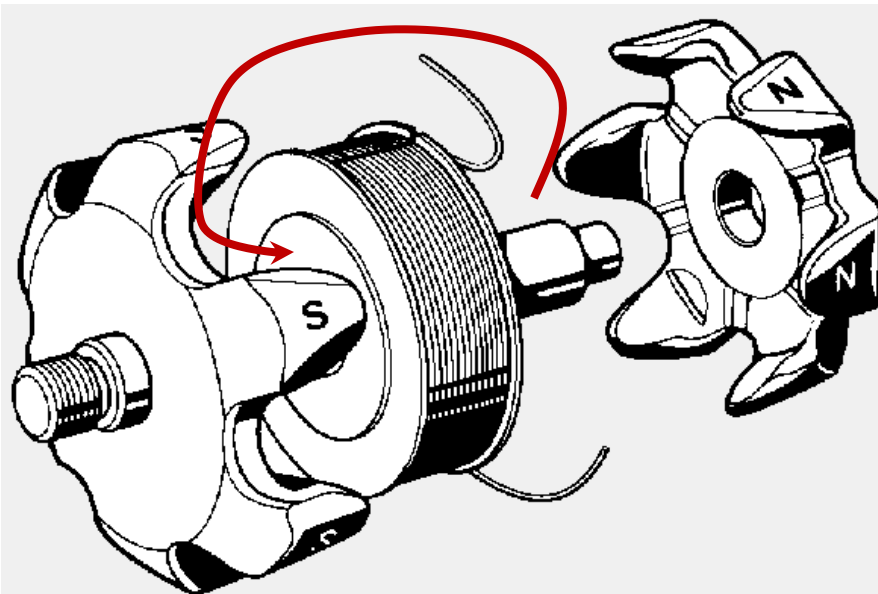


Drehstromgenerator – Bauart Klauenpolgenerator

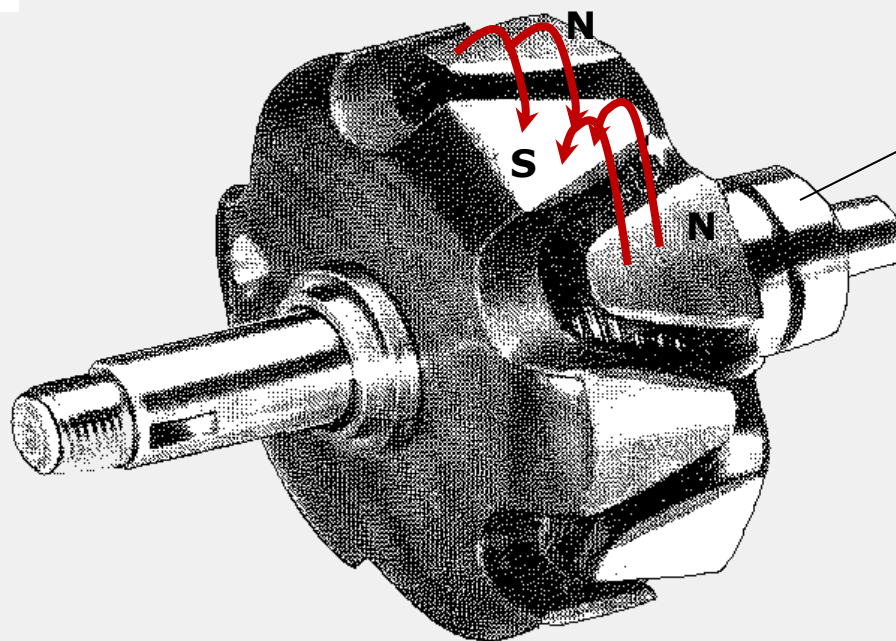


- ruhende Hauptstromwicklungen (Induktionsspulen) im Ständer
 - drei Wicklungsstränge, elektrisch um 120° versetzt
 - Wicklungen geometrisch um die Anzahl der (Klauen)-Polpaare in Teilwicklungen zerlegt und auf den gesamten Umfang des Ständers verteilt.





- Läufer mit einer axial angeordneten Erregerwicklung
- Stromübertragung durch Schleifringe
- Magnetflusswechsel zur Induktion in den Ständerspulen durch besondere Geometrie der Klauenpole



Schleifringe

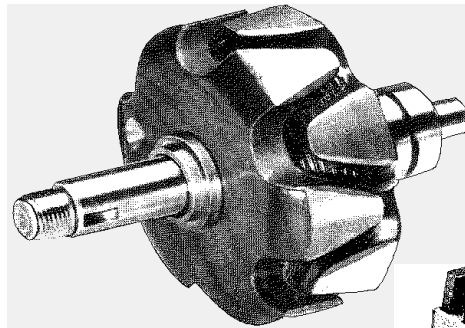


- weitere Bauteile:

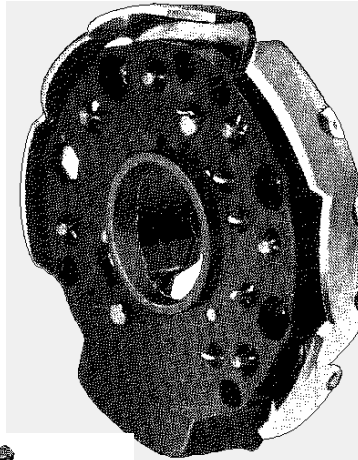
**Ständer mit
Drehstromwicklung**



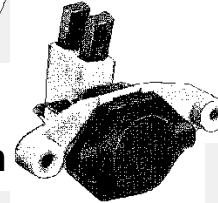
**Läufer mit
Klauenpolen**



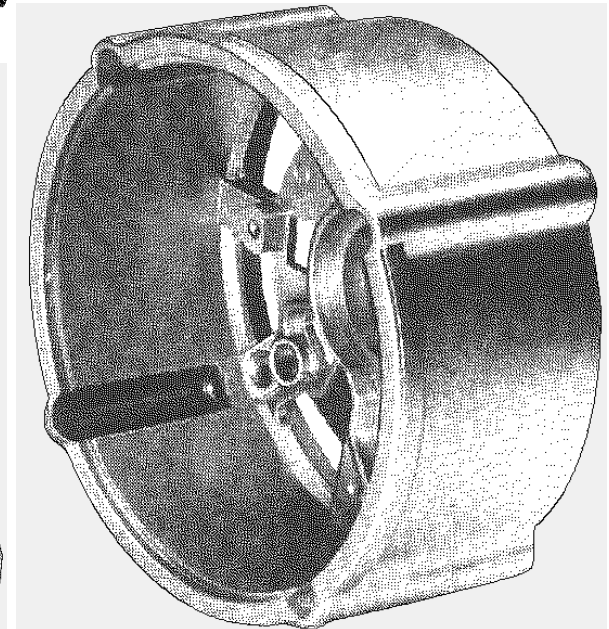
**Gleichrichter-
Kühlkörper**



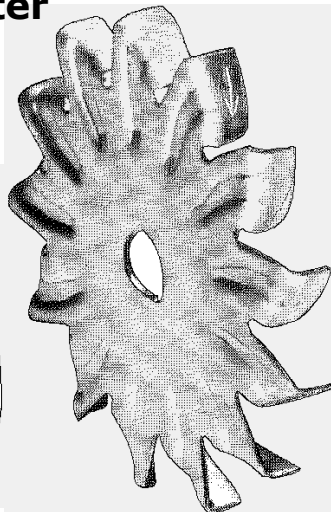
**Transistorregler
und Kohlebürsten**



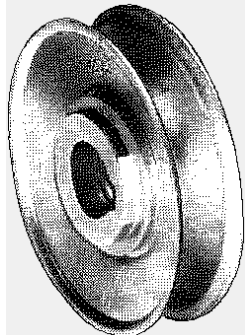
Schleifringlagerschild



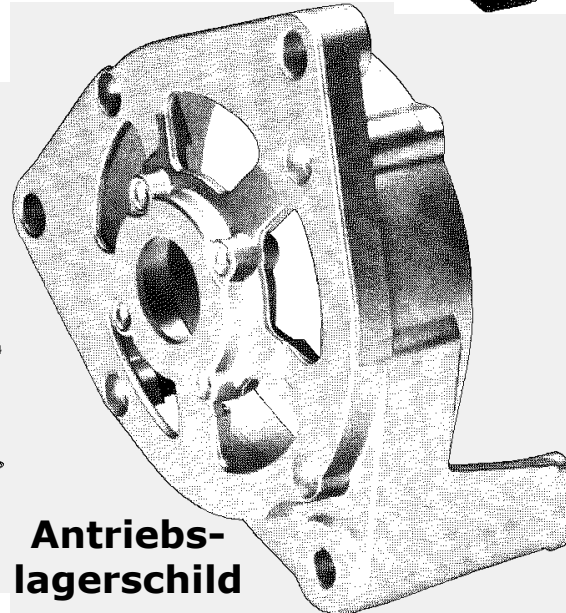
Lüfter

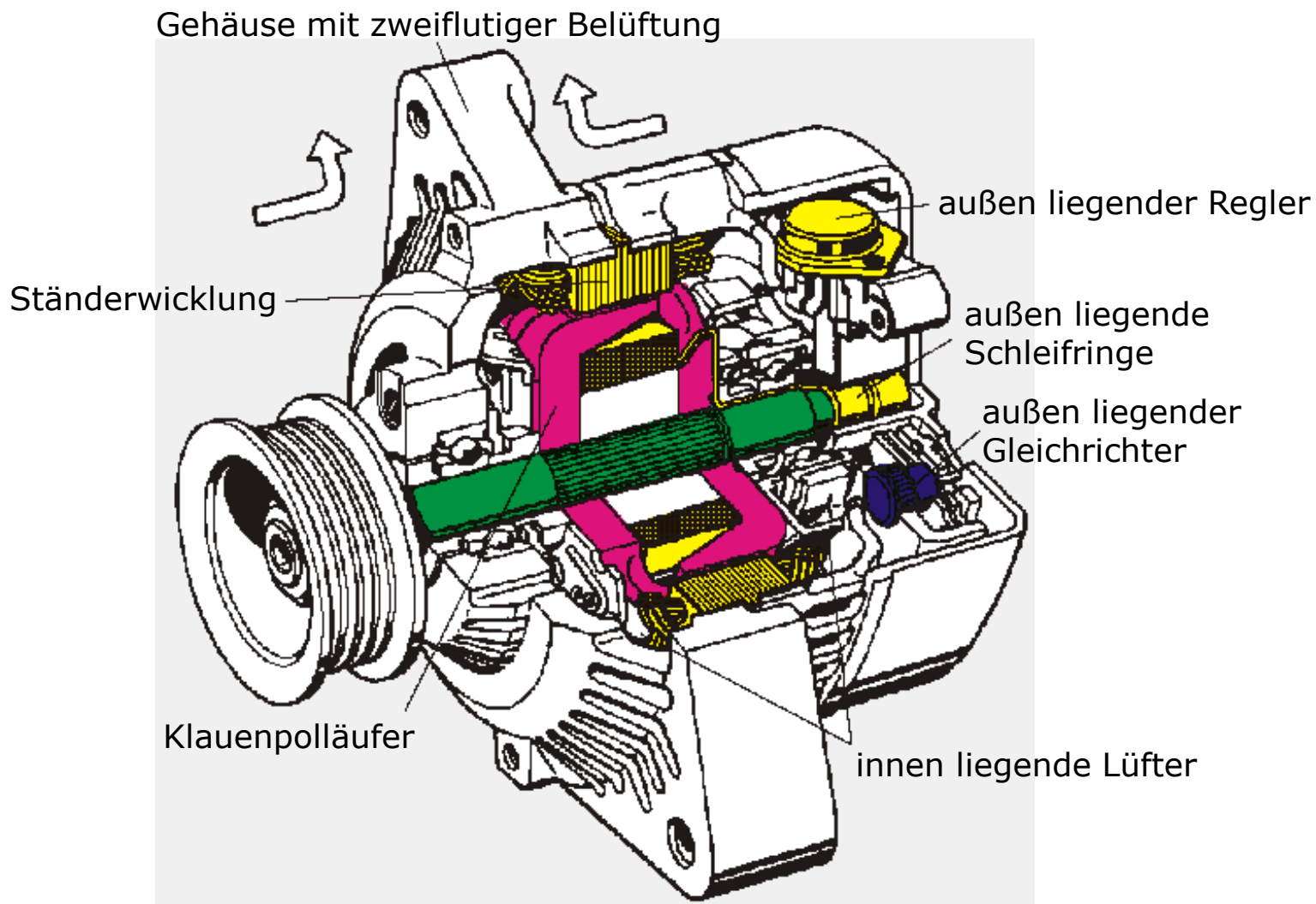


**Keilriemen-
scheibe**



**Antriebs-
lagerschild**

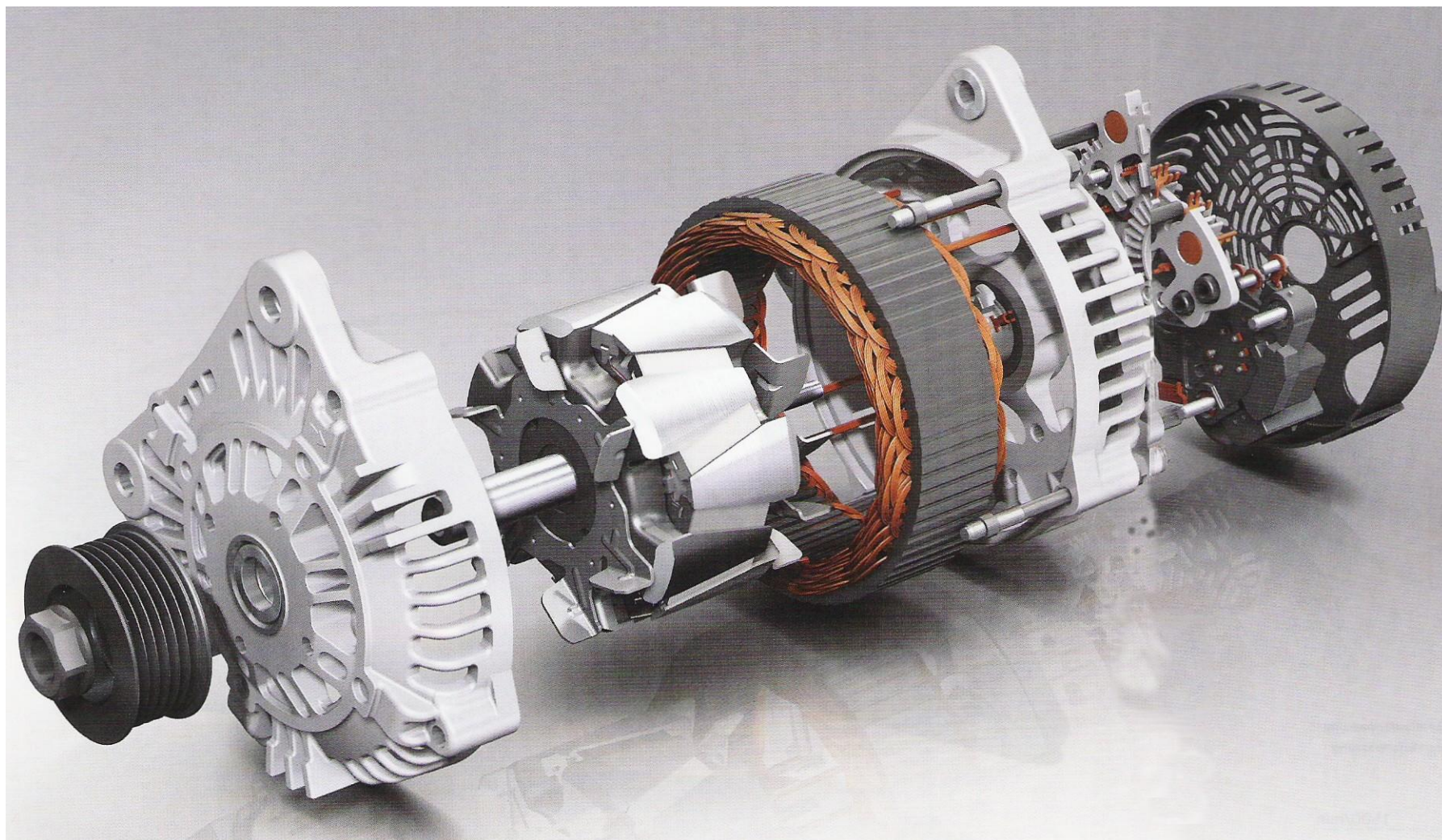




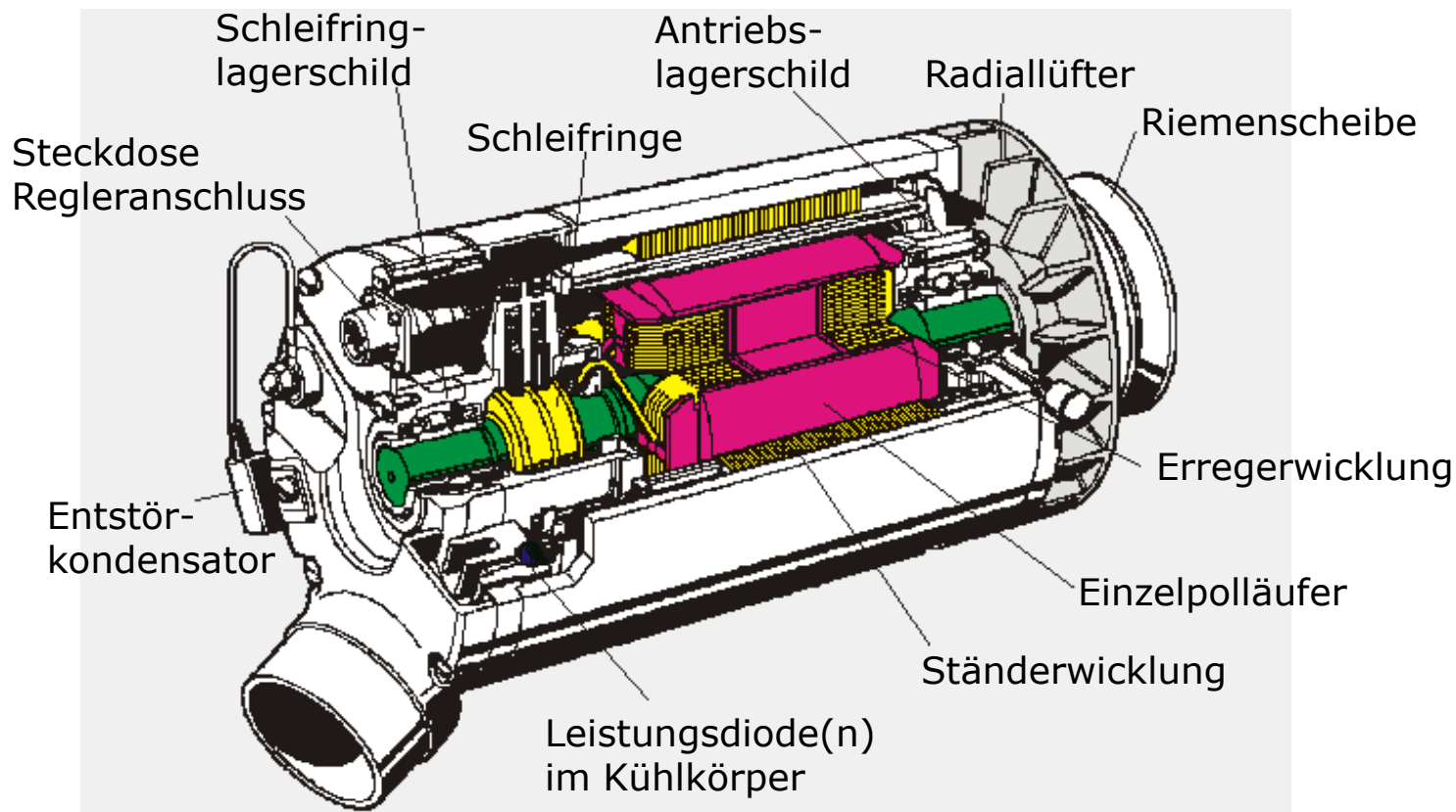
Compact-Generator



**Drehstrom-
generator 150 A
(flüssigkeitsgekühlt)**



180 A/2,5 kW – Generator (Audi A6 – siebente Generation 2011)



Einzelpolgenerator für Leistungen ab 5 kW



2 Elektrische Maschinen in Kraftfahrzeugen

2.1 Grundlagen

2.2 Drehstromgenerator

2.2.1 Leerlaufkennlinie (Spannungskennlinie)

2.2.2 Mechanischer Aufbau

2.2.3 Elektrischer Aufbau

2.2.4 Belastungskennlinie (Stromkennlinie)

2.2.5 Verluste/Wirkungsgrad

2.2.6 Spannungsregelung

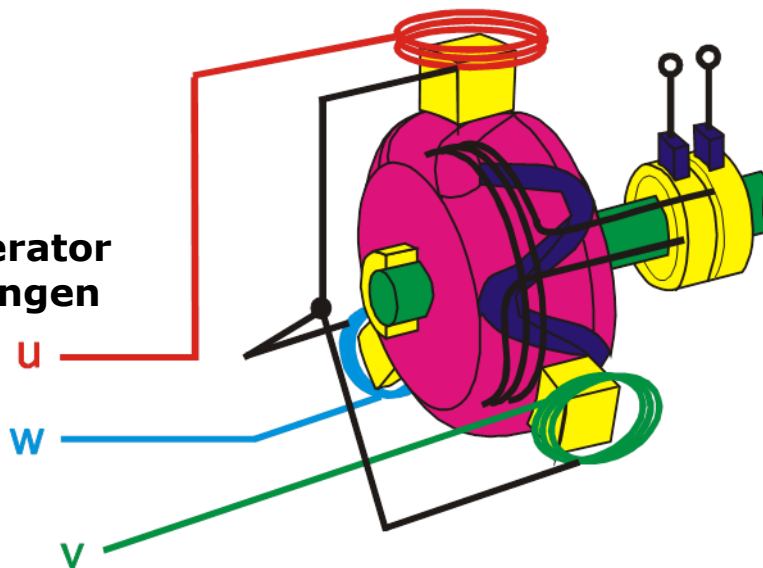
2.3 Starter

2.4 Starter-Generator-Maschinen

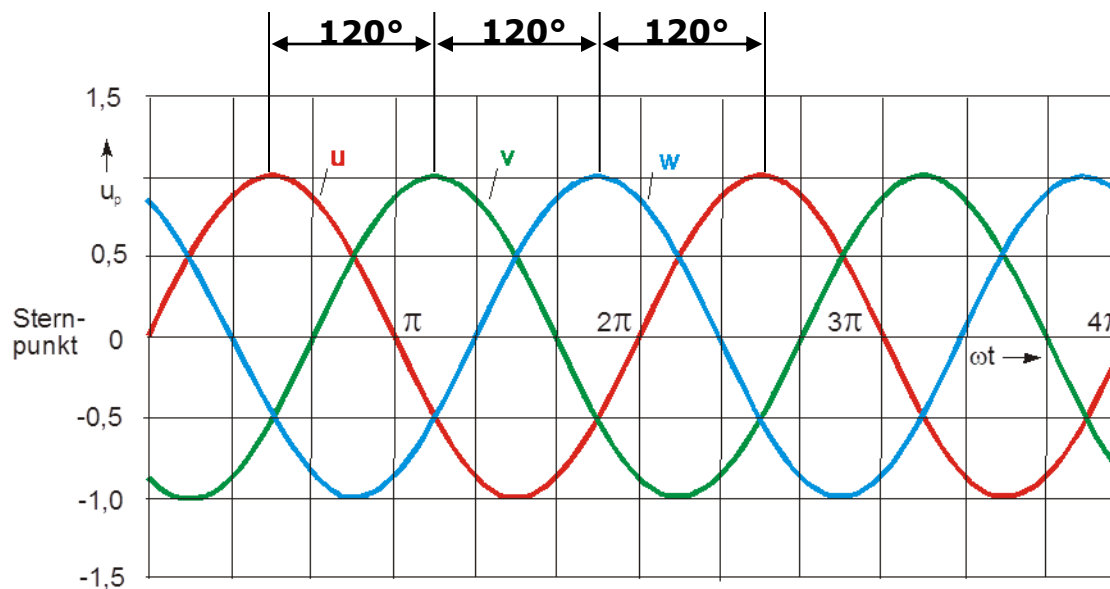
2.5 Hybridantriebe

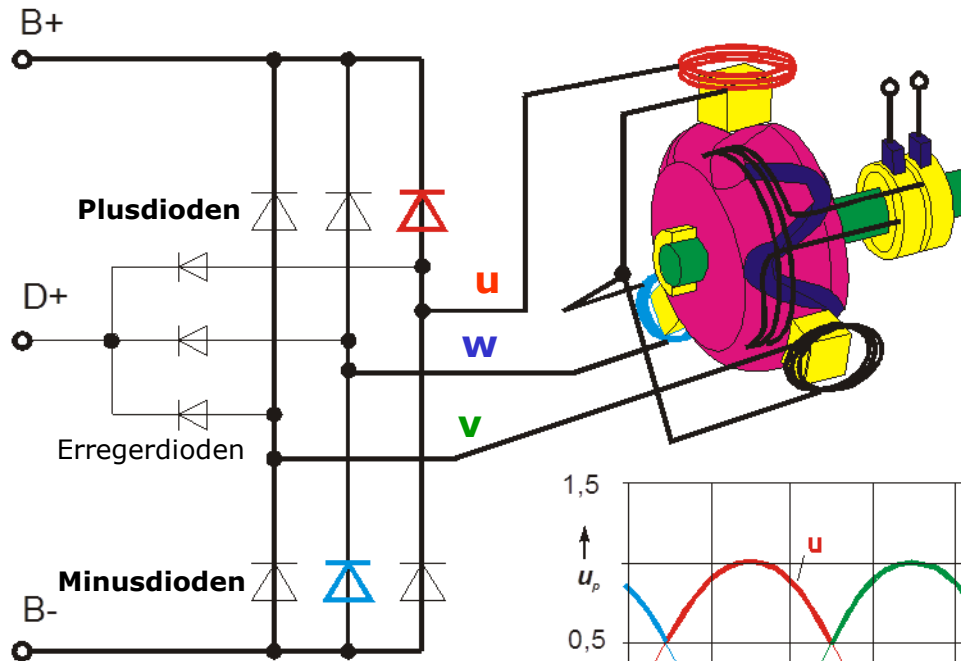


Drehstromgenerator Phasenspannungen

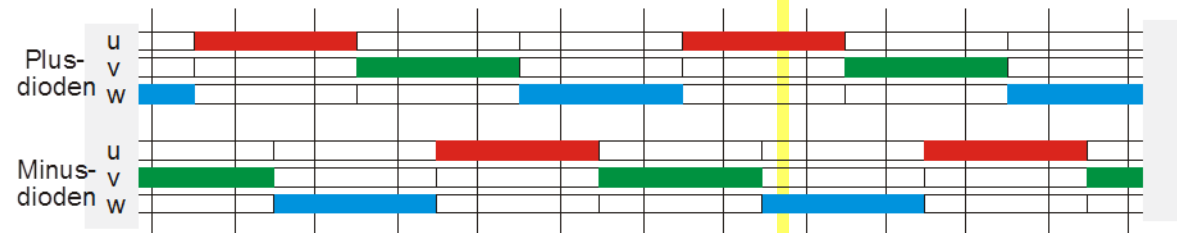
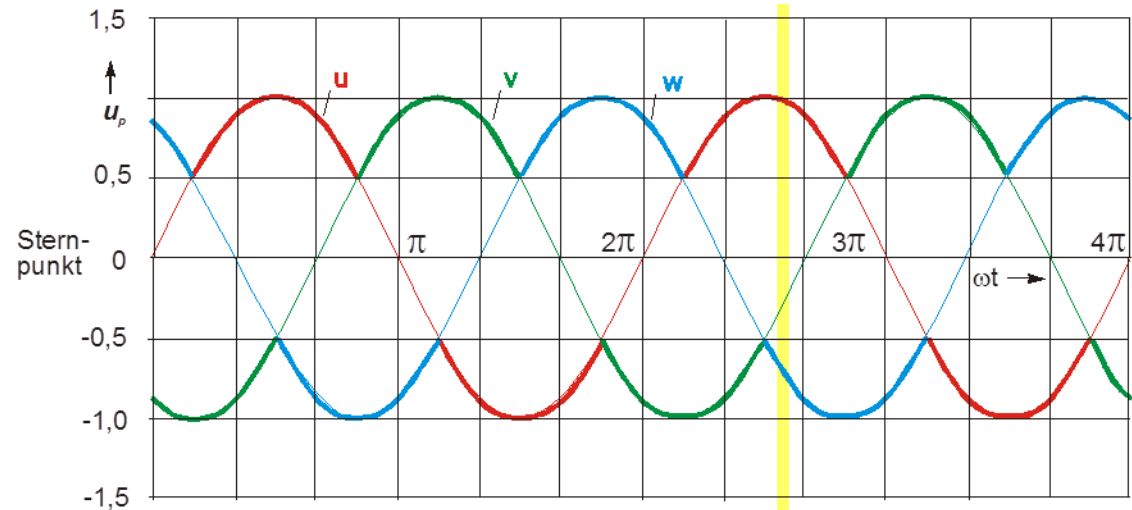


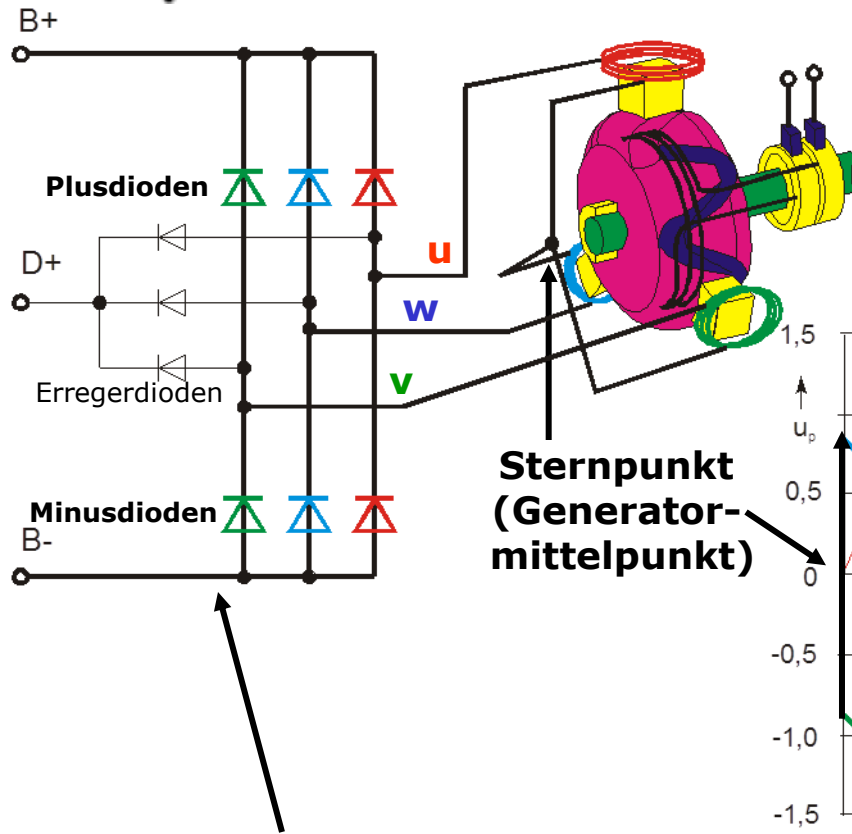
- Drei Wicklungsstränge, in denen sinusförmige Wechselspannung induziert wird.
- Phasenspannungen jeweils um 120° versetzt





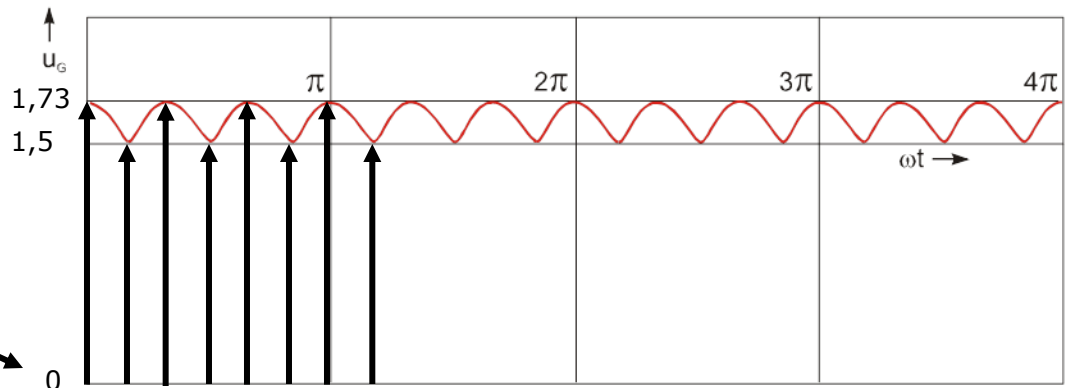
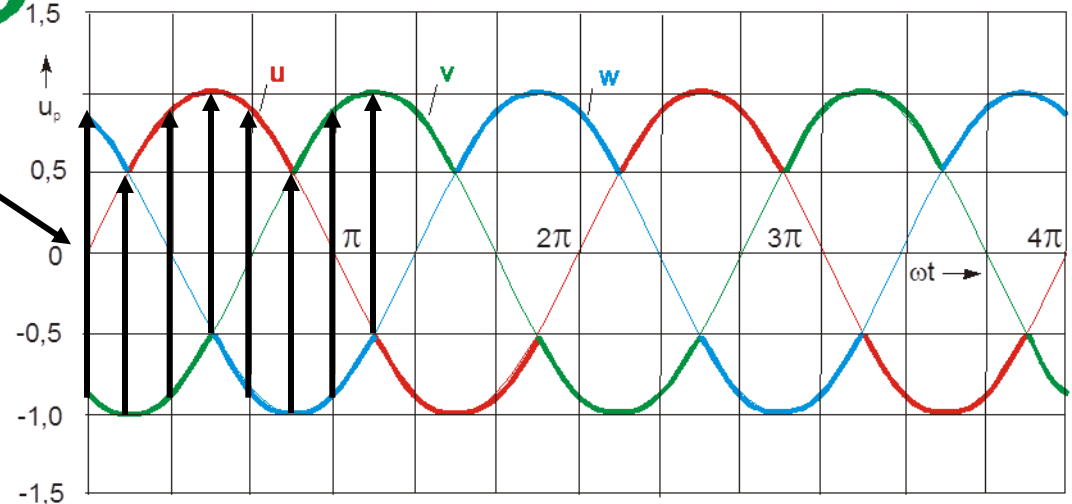
Drei-Phasen-Brückenschaltung:
- Schalterfunktion der Dioden
→ unabhängig vom Drehwinkel
immer nur zwei Phasen sowie die
jeweilige Plus- und Minusdiode
am momentanen Stromfluss
beteiligt

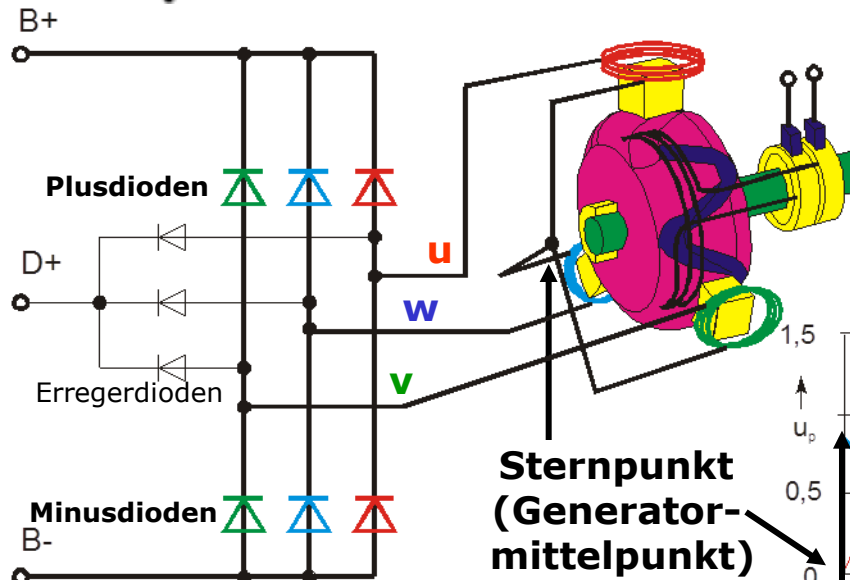




- Fahrzeug-null-Potenzial nicht am Generator-Mittelpunkt, sondern am Sammelanschluss der Minusdioden (B- = Fahrzeugbezugspotenzial)

**Fahrzeug-
bezugs-
potenzial**



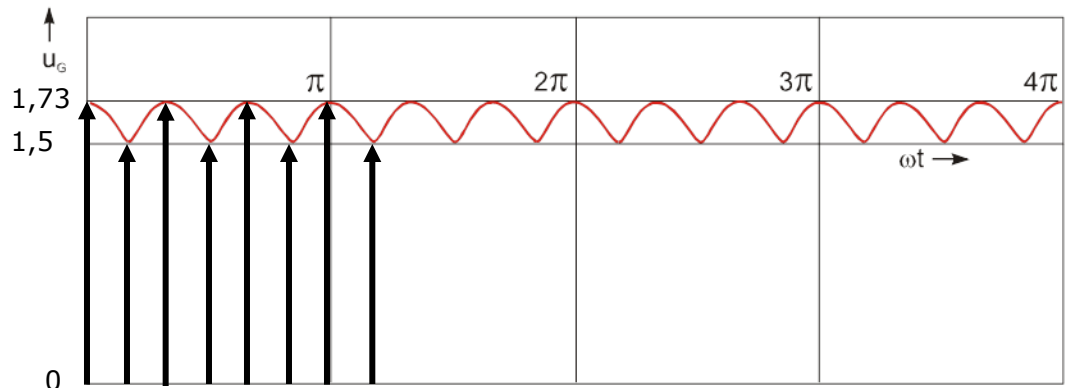
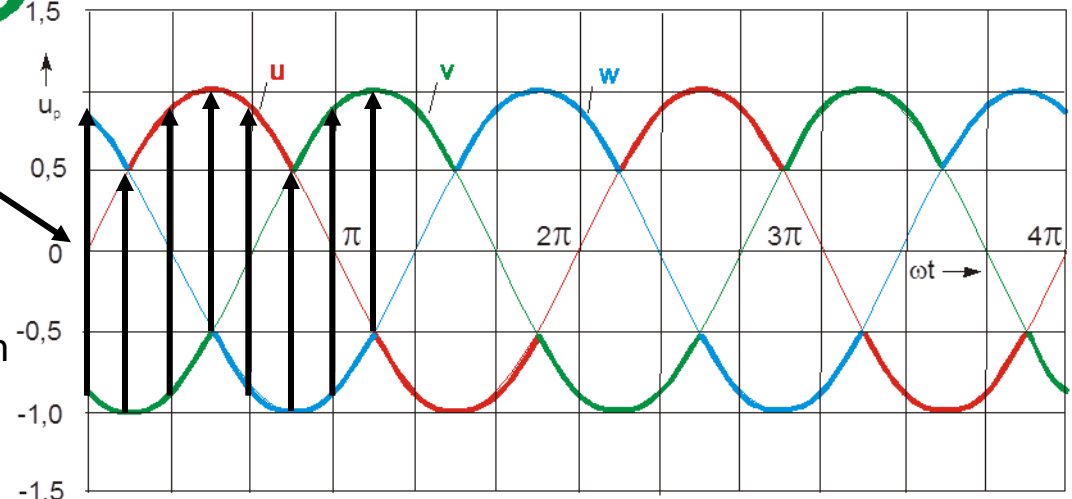


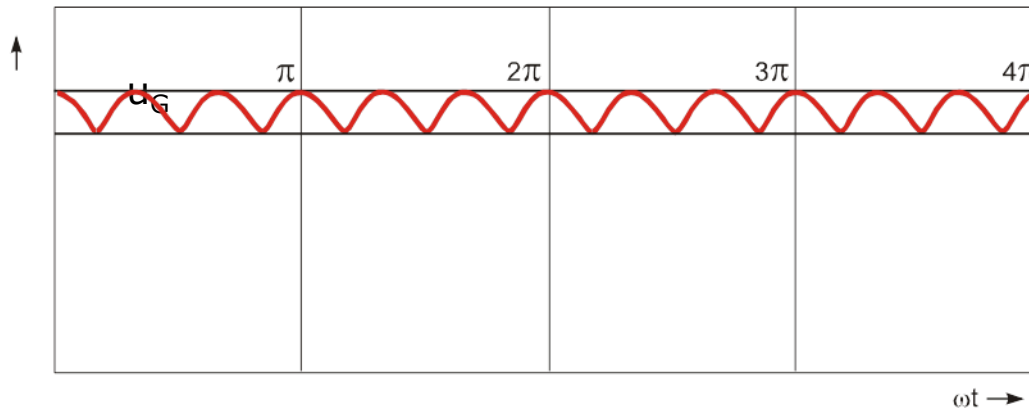
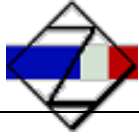
- Fahrzeug-null-Potenzial nicht am Generator-Mittelpunkt, sondern am Sammelanschluss der Minusdioden (B- = Fahrzeugbezugspotenzial)

- Am Sammelanschluss der Plusdioden (B+) des Generators entsteht eine wellige Gleichspannung U_G (sechsfache Welligkeit zur Frequenz einer Phase)

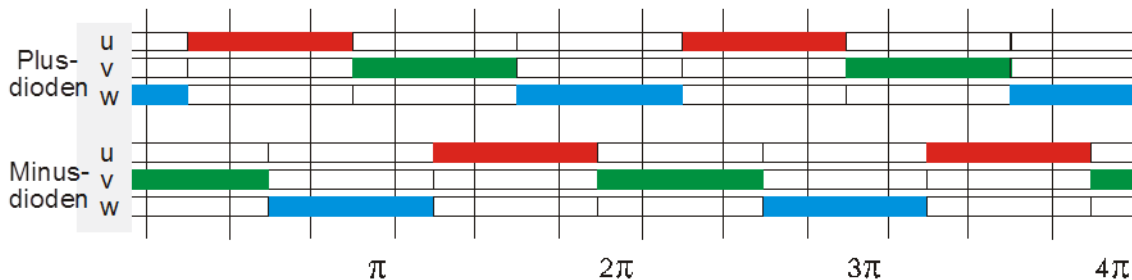
mit den Maxima $U_{\max} = 1,73 u_{\text{Ph max}}$ und den Minima $U_{\min} = 1,50 u_{\text{Ph max}}$ (d.h. $U_{\min} = 0,86 U_{\max}$).

- Mittelwert (Effektivwert) der gleichgerichteten Spannung:
 $U_{=} = 2,34 U_{\text{Ph}} = 1,66 U_{\text{Ph max}}$.

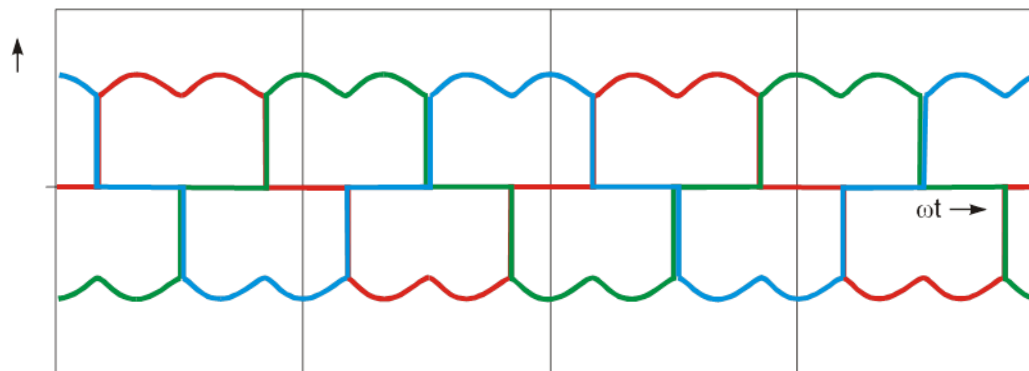




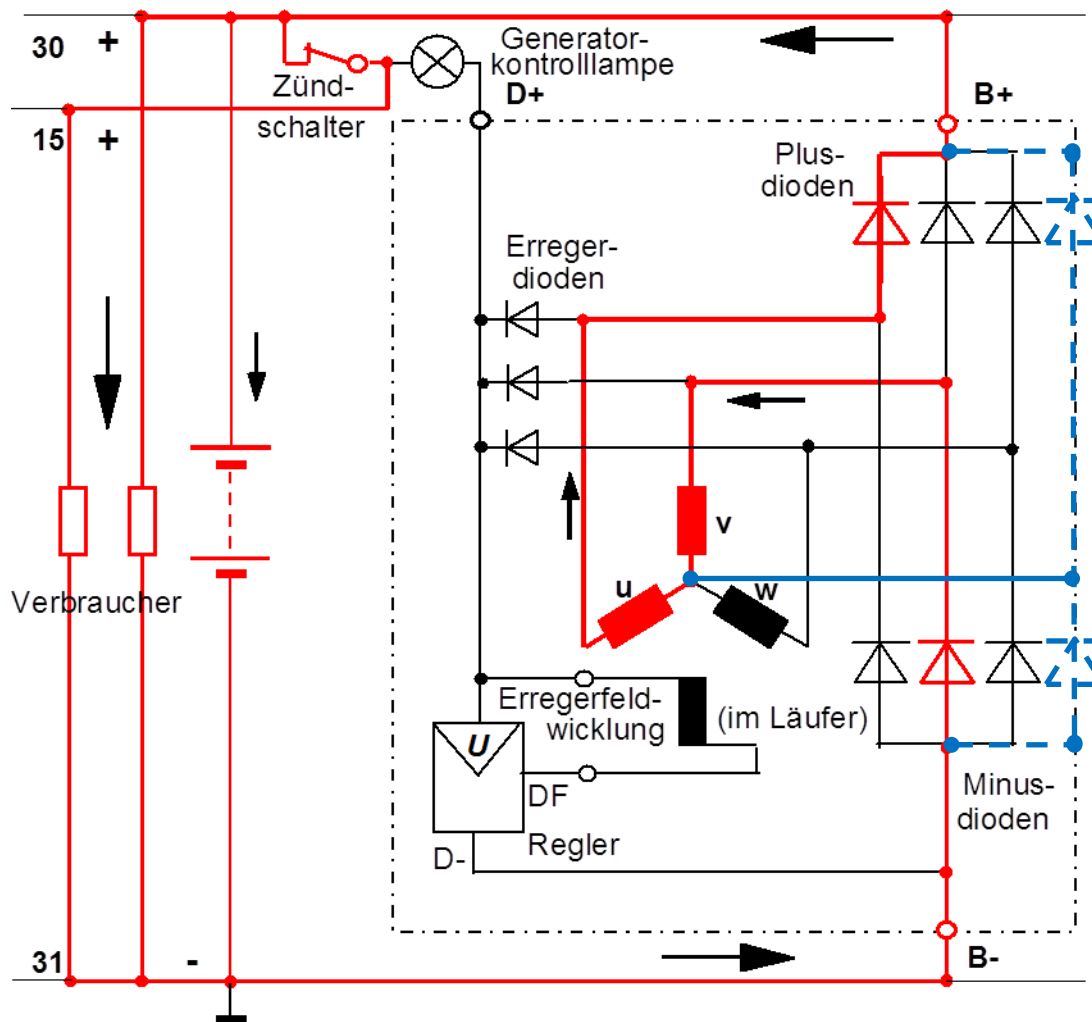
- Die etwas wellige Gleichspannung des Drehstromgenerators wird im Bordnetz – insbesondere durch die Batterie – geglättet.



- In den drei Phasen des Generators fließt jedoch aufgrund der Schaltfunktion der Dioden ein treppenförmiger Wechselstrom.



- Erst außerhalb des Generators (nach den Dioden an den Sammelanschlüssen B+ und B-) wird daraus ein ebenfalls etwas welliger Gleichstrom.



Stromfluss:

vom Mittelpunkt

→ positivste Phase
(gegenüber Mittelpunkt)

→ Plusdiode

→ Sammelanschluss B+

→ Verbraucher (und event.
Batterie bei Ladung)

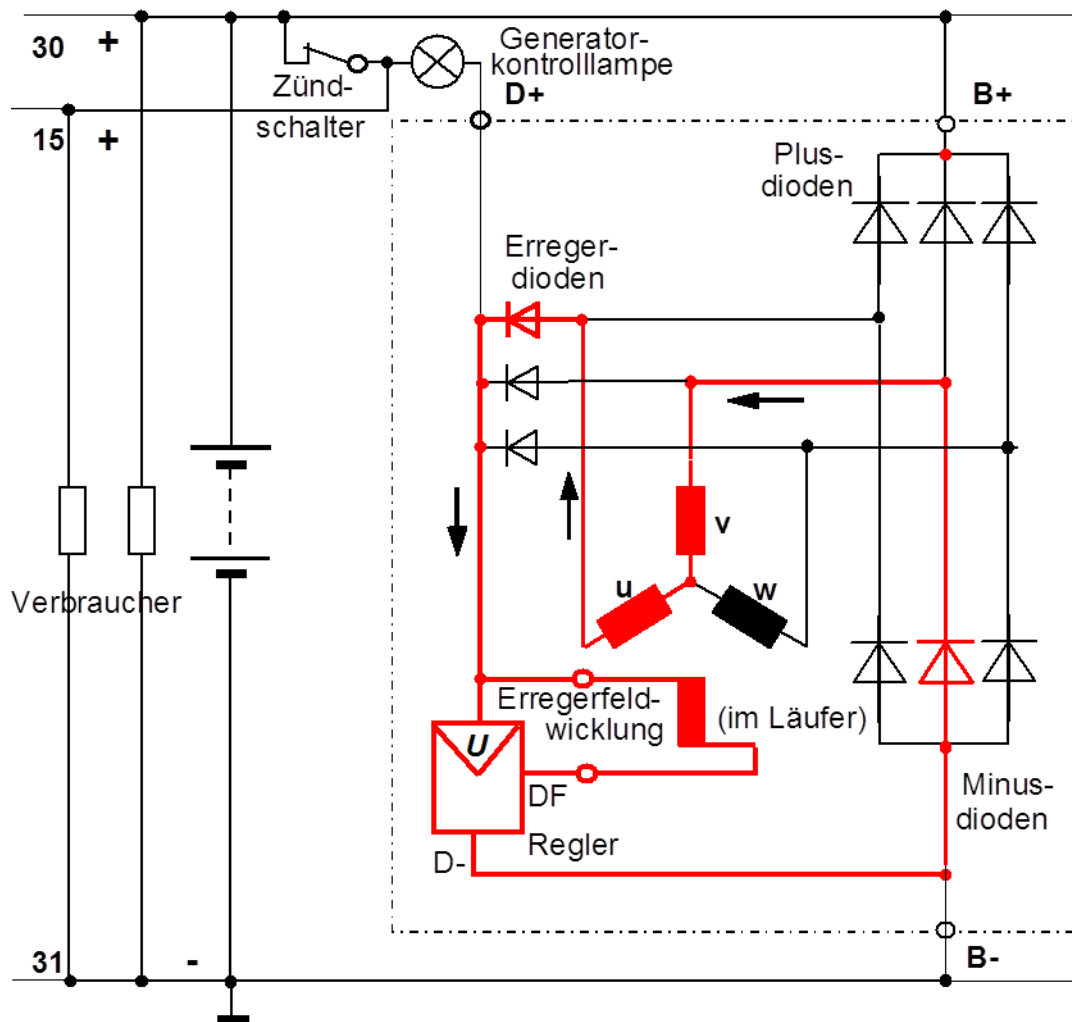
→ Sammelanschluss B-

→ Minusdiode

→ negativste Phase
(gegenüber Mittelpunkt)

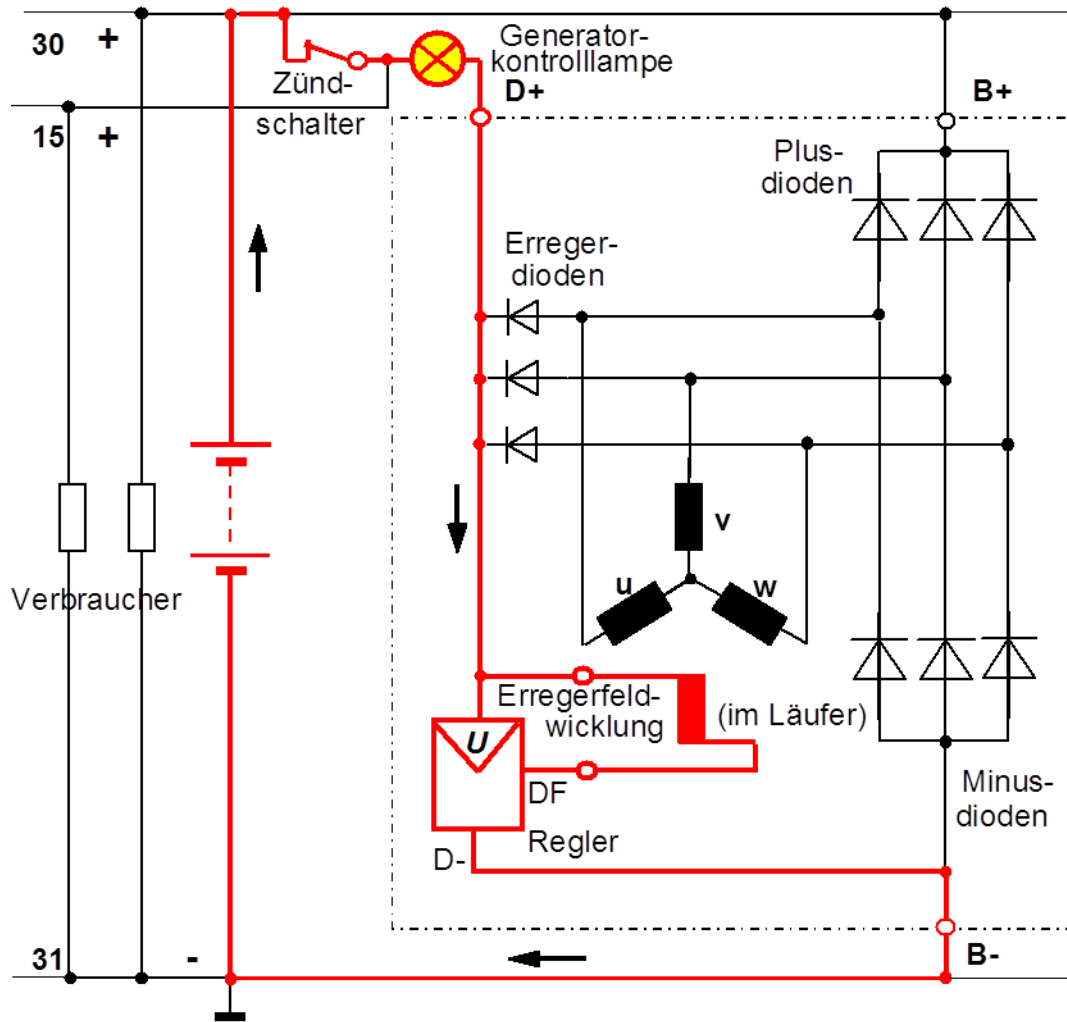
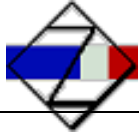
→ Mittelpunkt

Drehstromgenerator - Hauptstromkreis



- eigenständiger kleiner Stromkreis zur Selbsterregung des Generators über Erregerdioden (Funktion wie Plusdioden), Erregerfeldwicklung (im Läufer), Regler und Minusdioden

Drehstromgenerator - Erregerstromkreis

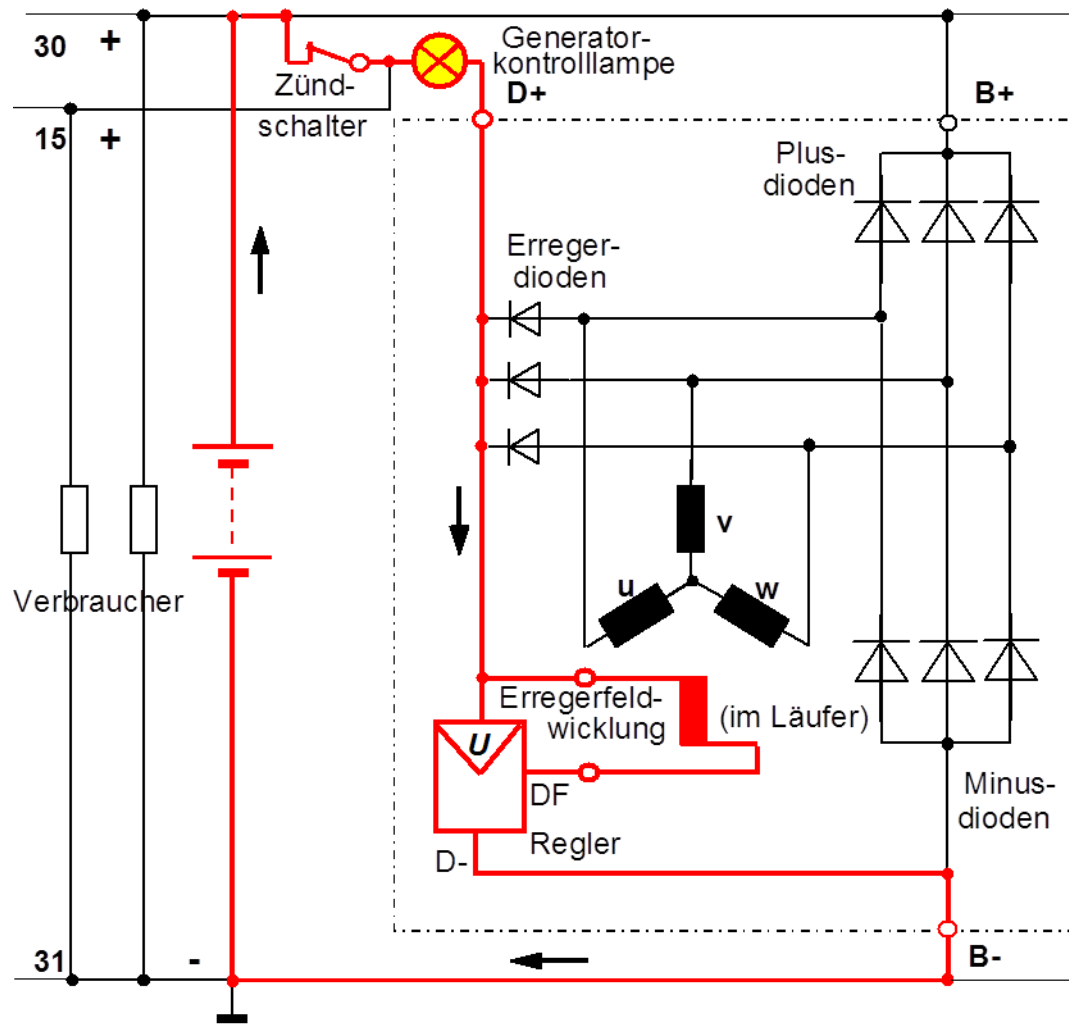


Vorerregung
zum Unterstützen des
Anlaufens der Selbsterregung,
weil

aufgrund der Dioden der
Selbsterregungseffekt erst
einsetzen kann, wenn die durch
Remanenz erzeugte Spannung
die zweifache Flussspannung
der Dioden (etwa 1,4 V)
erreicht bzw. überschritten hat

und die Remanenz aufgrund
der Regelbarkeit bei hohen
Drehzahlen und der magn.
Verluste (Hysterese) nicht
beliebig erhöht werden kann.

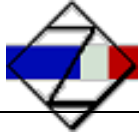
Drehstromgenerator – Stromkreis Vorerregung



Generatorkontrolllampe mit Doppelfunktion:

1. Leistung bzw. Widerstand der Kontrolllampe bestimmt die Stromstärke der Vorerregung und damit die Einsetzdrehzahl des Selbsterregungseffektes.
2. Nach Einsetzen des Selbsterregungseffektes erreicht die Spannung des Generators schnell die Bordspannung (Batteriespannung).
→ Potenzialunterschied zwischen B+ und D+ wird null und die Kontrolllampe verlischt.

Drehstromgenerator – Stromkreis Vorerregung



2 Elektrische Maschinen in Kraftfahrzeugen

2.1 Grundlagen

2.2 Drehstromgenerator

2.2.1 Leerlaufkennlinie (Spannungskennlinie)

2.2.2 Mechanischer Aufbau

2.2.3 Elektrischer Aufbau

2.2.4 Belastungskennlinie (Stromkennlinie)

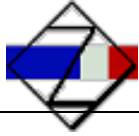
2.2.5 Verluste/Wirkungsgrad

2.2.6 Spannungsregelung

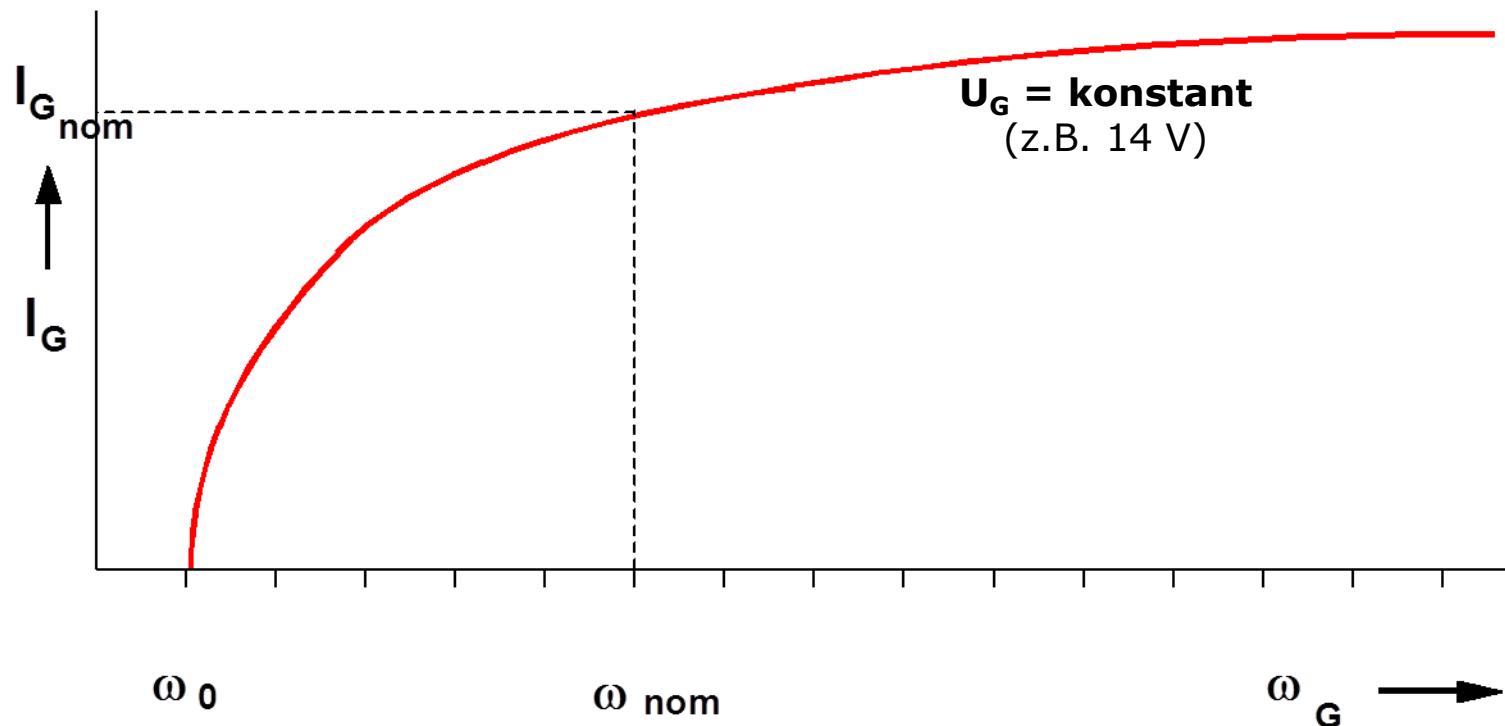
2.3 Starter

2.4 Starter-Generator-Maschinen

2.5 Hybridantriebe



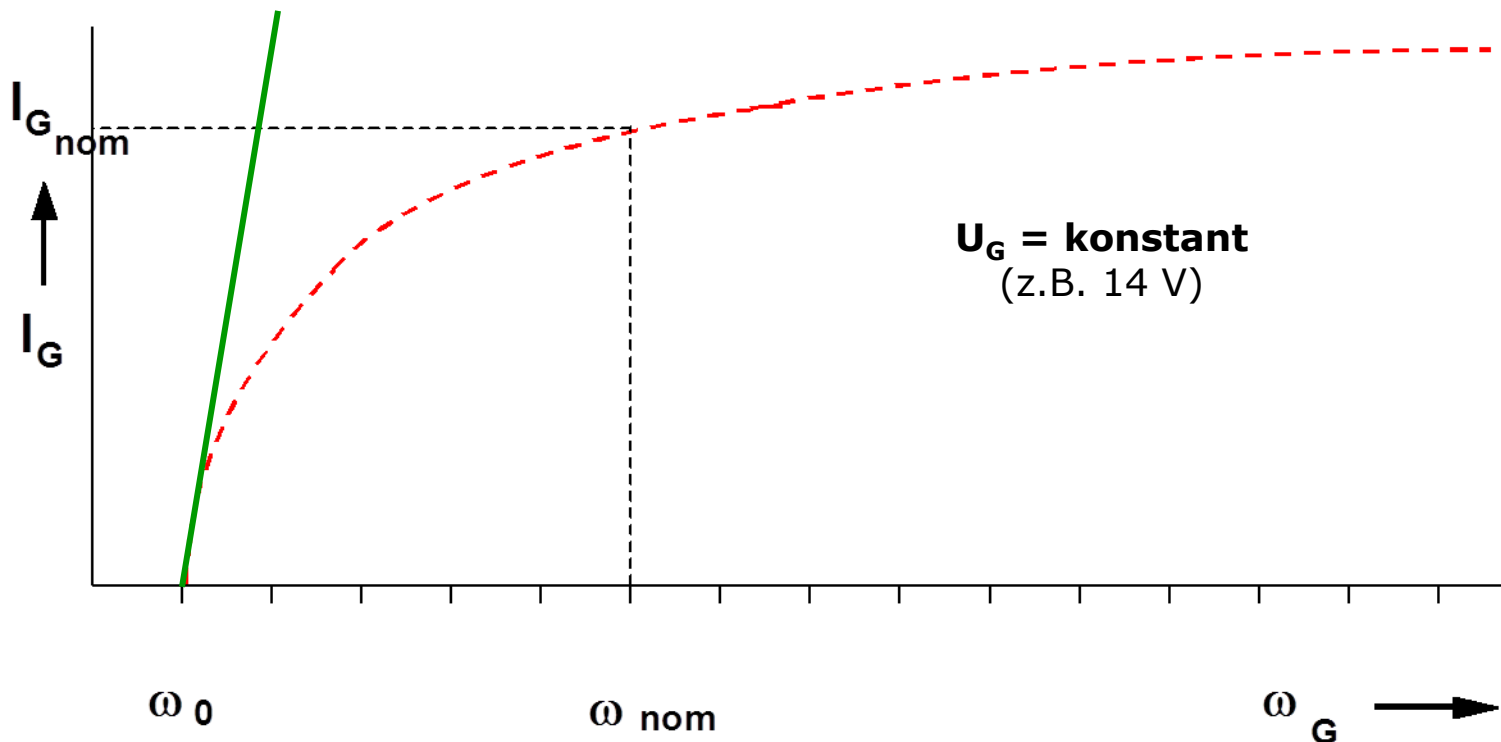
→ Scheinbar müsste der Generatorstrom linear ansteigen.



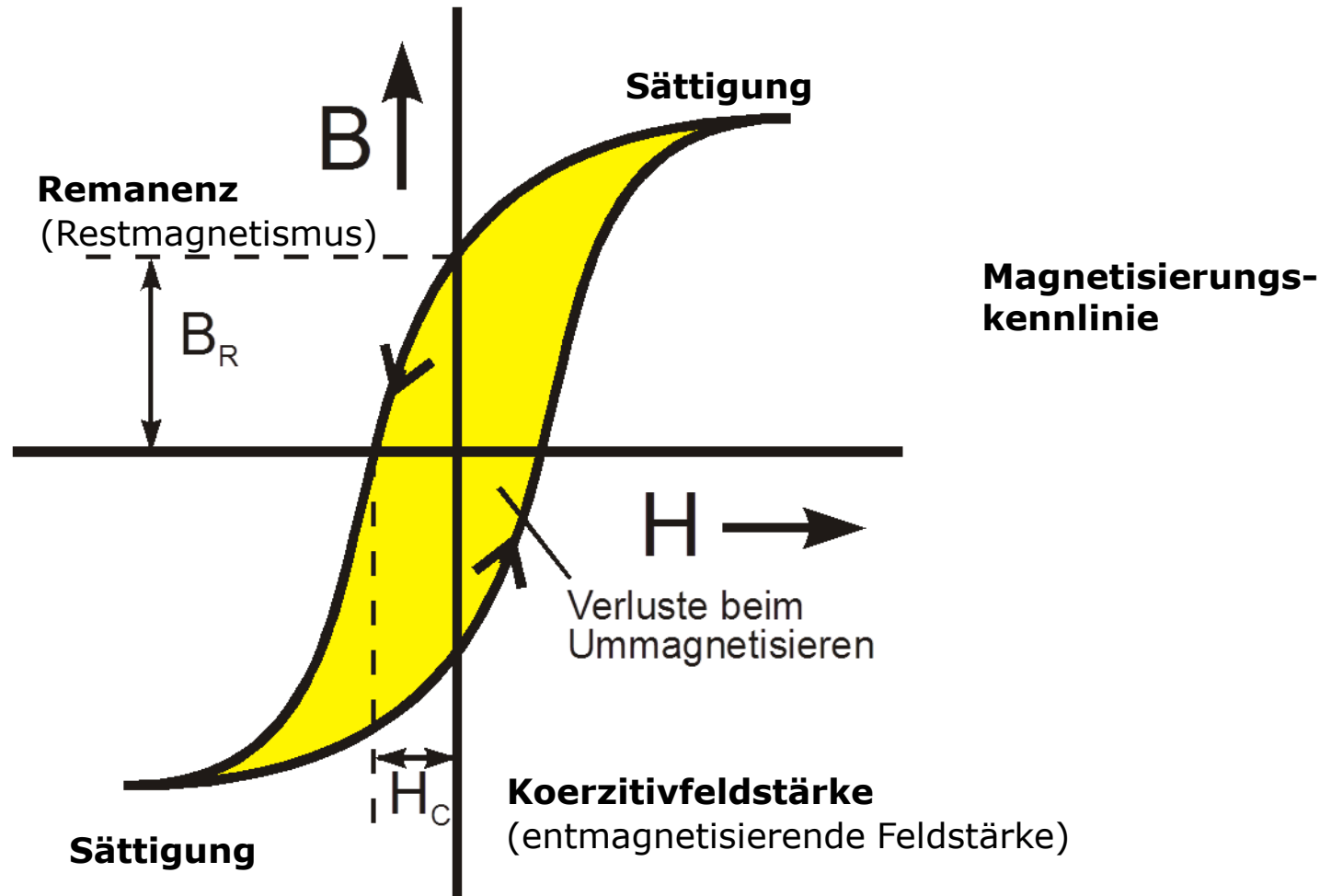
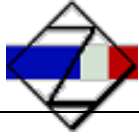
Drehstromgenerator - Belastungskennlinie

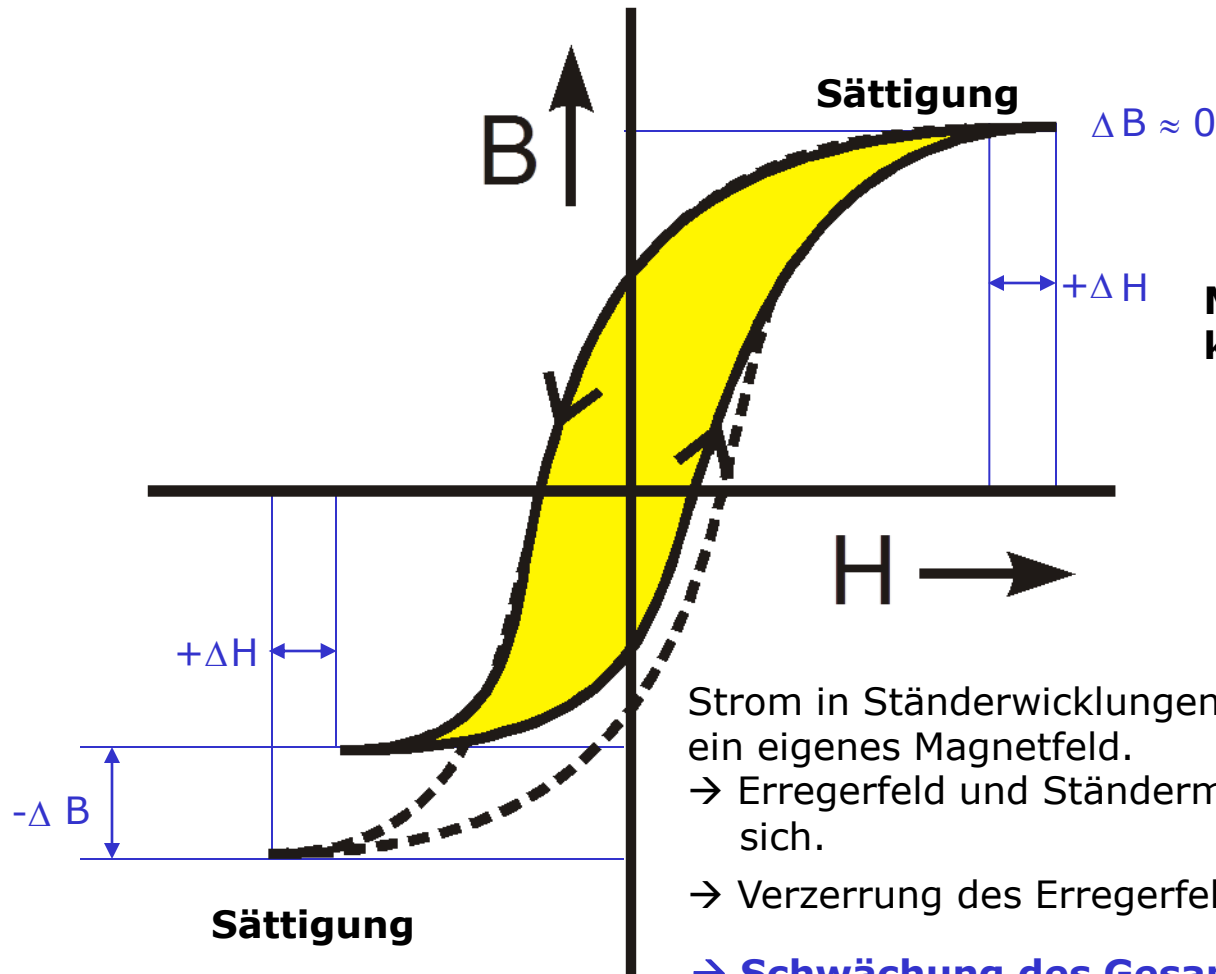
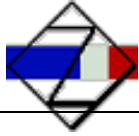


linearer Anstieg nur am Beginn der Kennlinie



Drehstromgenerator - Belastungskennlinie





Magnetisierungskennlinie

Einfluss der Ständer- bzw. Ankerrückwirkung

Strom in Ständerwicklungen erzeugt zwangsläufig ein eigenes Magnetfeld.

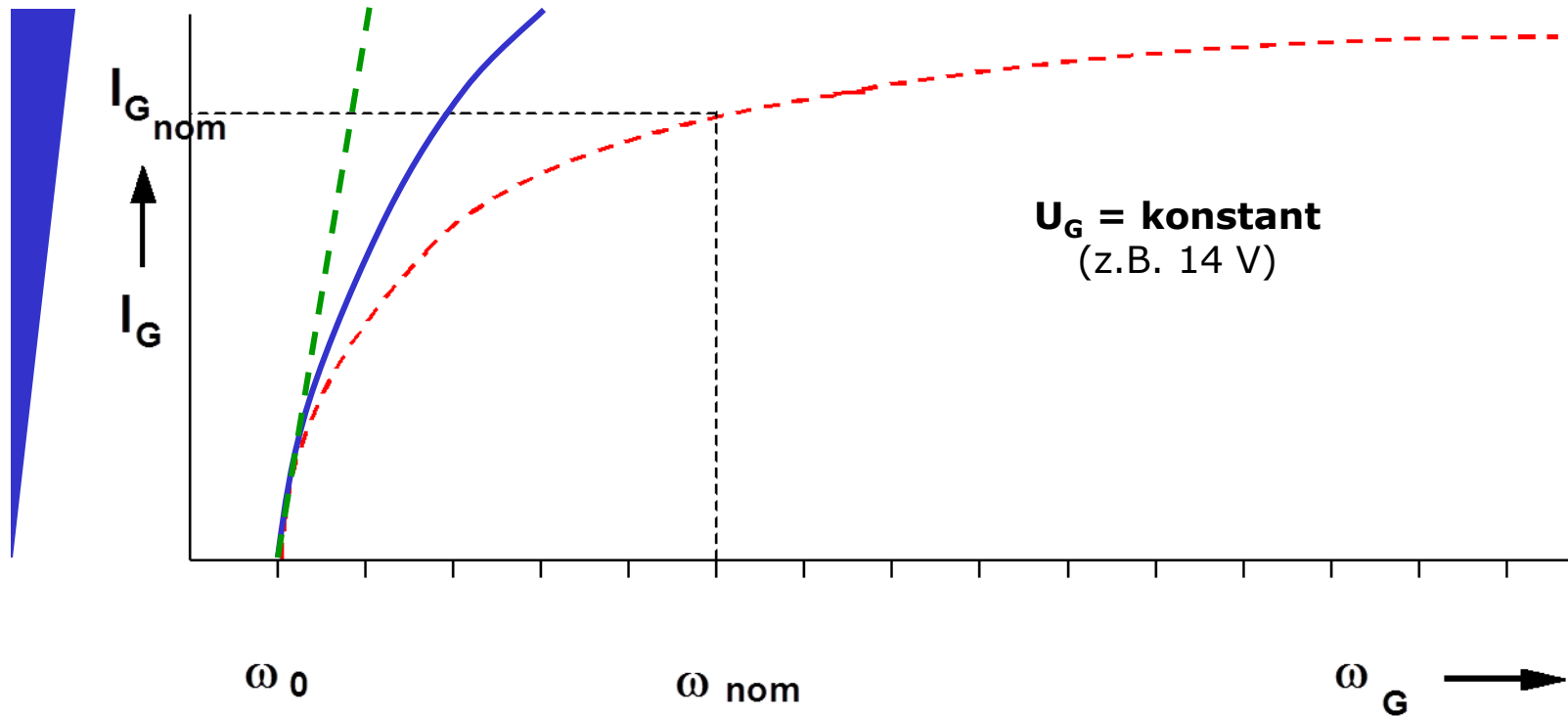
→ Erregerfeld und Ständermagnetfeld überlagern sich.

→ Verzerrung des Erregerfeldes (Oberwellen) und

→ **Schwächung des Gesamtmagnetflusses** aufgrund der Sättigung des Eisens.



linearer Anstieg nur im unteren Teil der Kennlinie



Abknicken der Kennlinie durch den
Einfluss der Ständerrückwirkung
(stromstärkeabhängig)

Drehstromgenerator - Belastungskennlinie

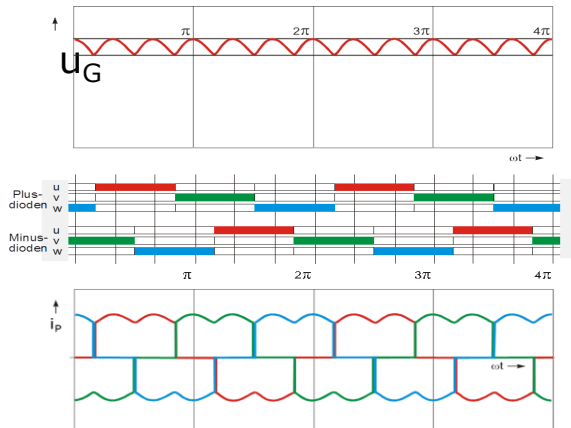


Anwachsen der induktiven Widerstände der Ständerwicklung

In den Ständerwicklungen des Drehstromgenerators fließt ein treppenförmiger **Wechselstrom**.

Spulen haben einen frequenzabhängigen Wechselstromwiderstand $X_L = \omega \cdot L$ (Blindwiderstand).

→ Generatorinnenwiderstand ist ein komplexer Widerstand:



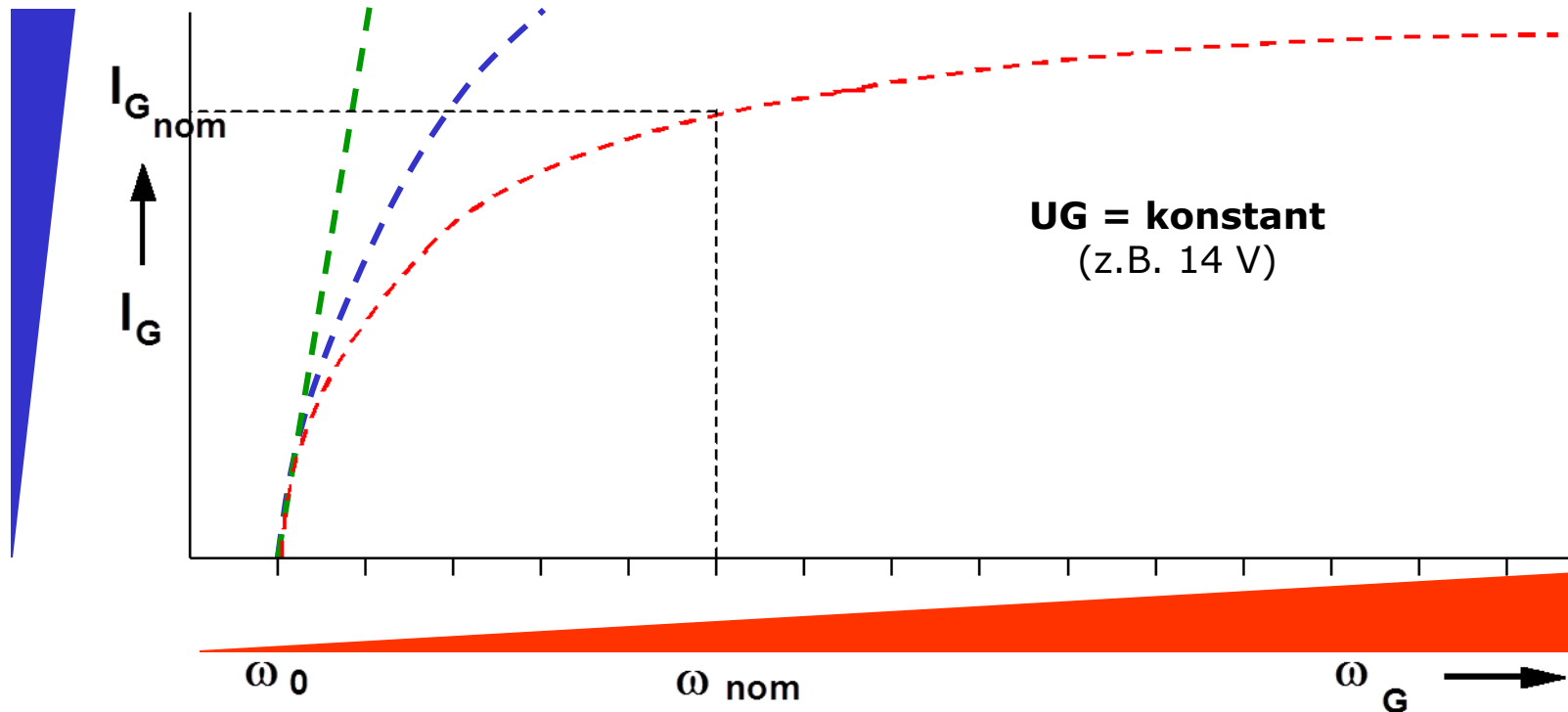
Bei niedrigen Drehzahlen (Winkelgeschwindigkeit ist klein):

Bei hohen Drehzahlen (d.h. im Abknickbereich):

→ I_G strebt einem maschinentypischen Höchstwert zu:



linearer Anstieg nur im unteren Teil der Kennlinie



Abknicken der Kennlinie durch den Einfluss der Ständerrückwirkung (stromstärkeabhängig)

weiteres Abknicken der Kennlinie durch den Einfluss der induktiven Widerstände der Ständerwicklung des Generators (drehzahlabhängig)

Drehstromgenerator - Belastungskennlinie



2 Elektrische Maschinen in Kraftfahrzeugen

2.1 Grundlagen

2.2 Drehstromgenerator

2.2.1 Leerlaufkennlinie (Spannungskennlinie)

2.2.2 Mechanischer Aufbau

2.2.3 Elektrischer Aufbau

2.2.4 Belastungskennlinie (Stromkennlinie)

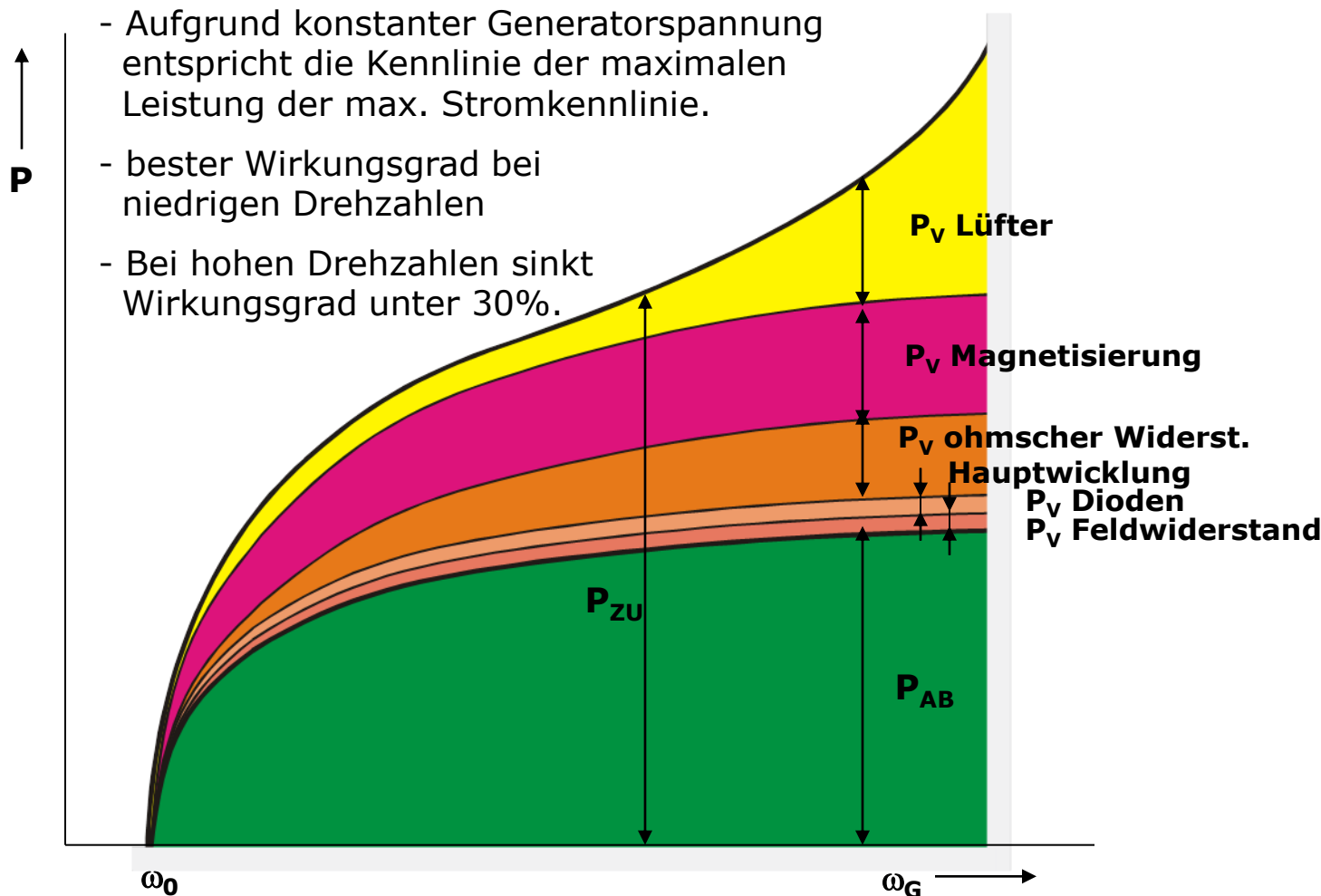
2.2.5 Verluste/Wirkungsgrad

2.2.6 Spannungsregelung

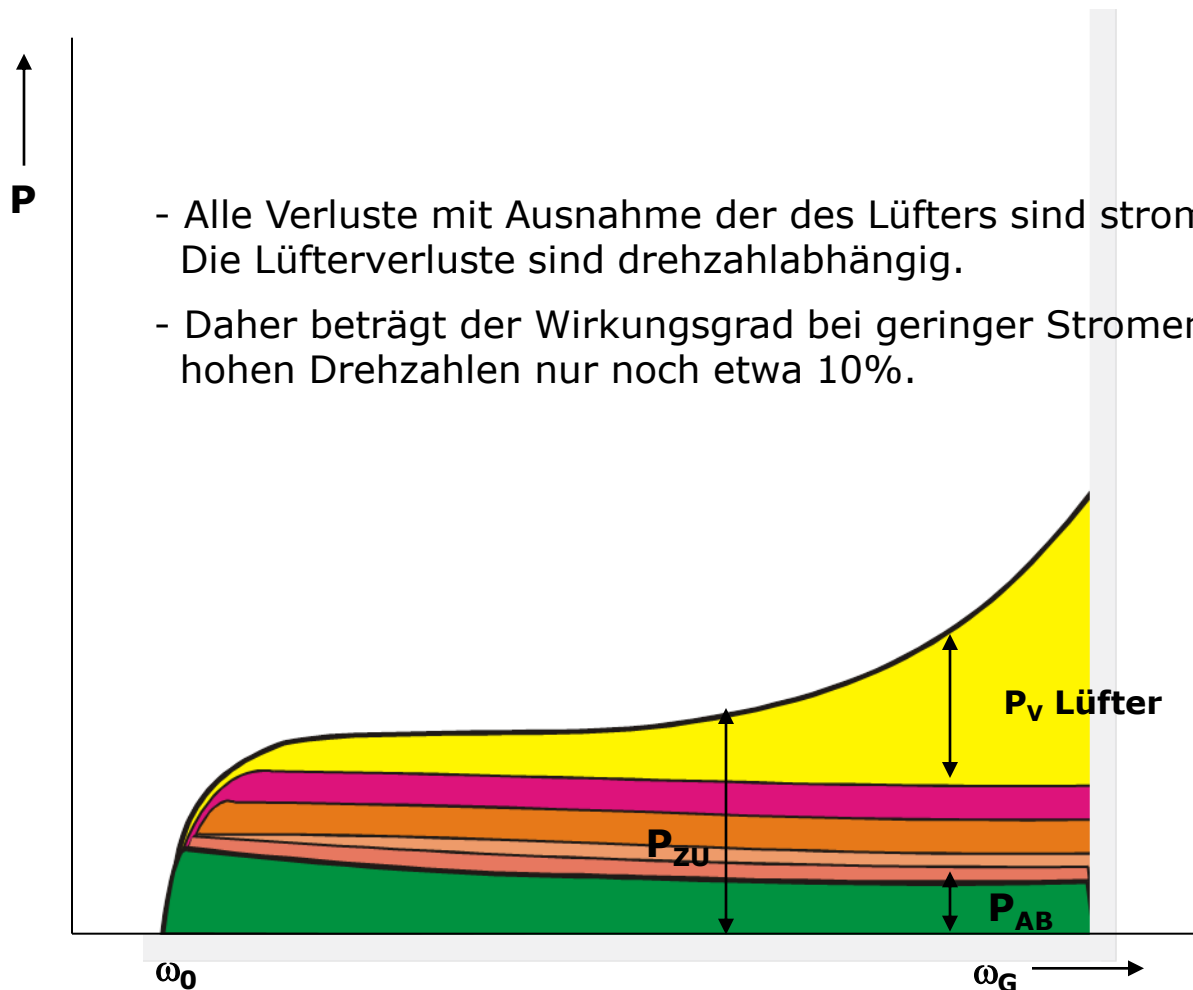
2.3 Starter

2.4 Starter-Generator-Maschinen

2.5 Hybridantriebe

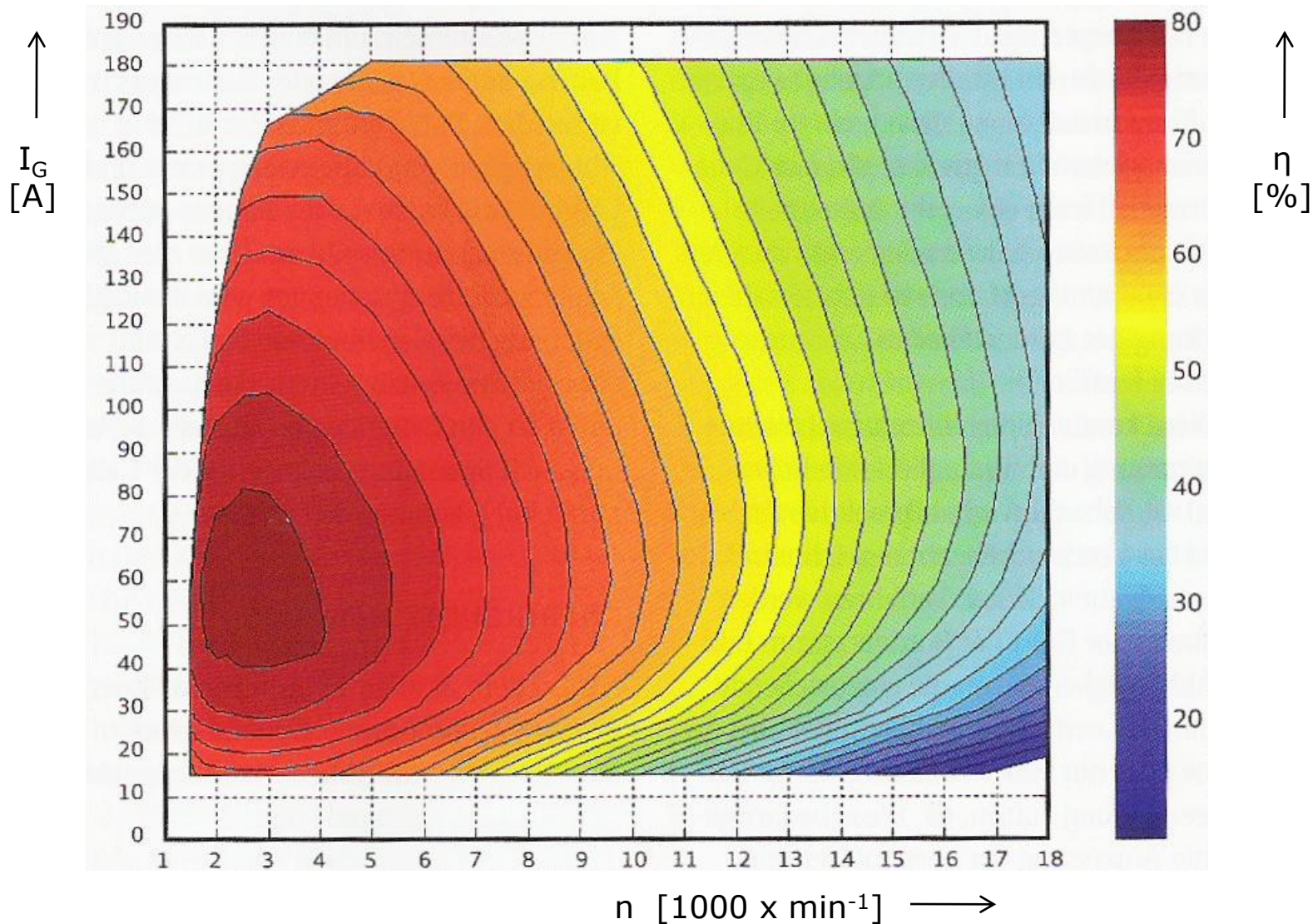


**Drehstromgenerator – Leistungsbilanz
(volle Generatorleistung)**

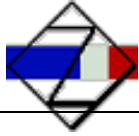


- Alle Verluste mit Ausnahme der des Lüfters sind stromstärkeabhängig. Die Lüfterverluste sind drehzahlabhängig.
- Daher beträgt der Wirkungsgrad bei geringer Stromentnahme und hohen Drehzahlen nur noch etwa 10%.

**Drehstromgenerator – Leistungsbilanz
(geringe Generatorleistung)**



Wirkungsgrad 180 A Generator im Drehzahl-Generatorstrom-Kennfeld



2 Elektrische Maschinen in Kraftfahrzeugen

2.1 Grundlagen

2.2 Drehstromgenerator

2.2.1 Leerlaufkennlinie (Spannungskennlinie)

2.2.2 Mechanischer Aufbau

2.2.3 Elektrischer Aufbau

2.2.4 Belastungskennlinie (Stromkennlinie)

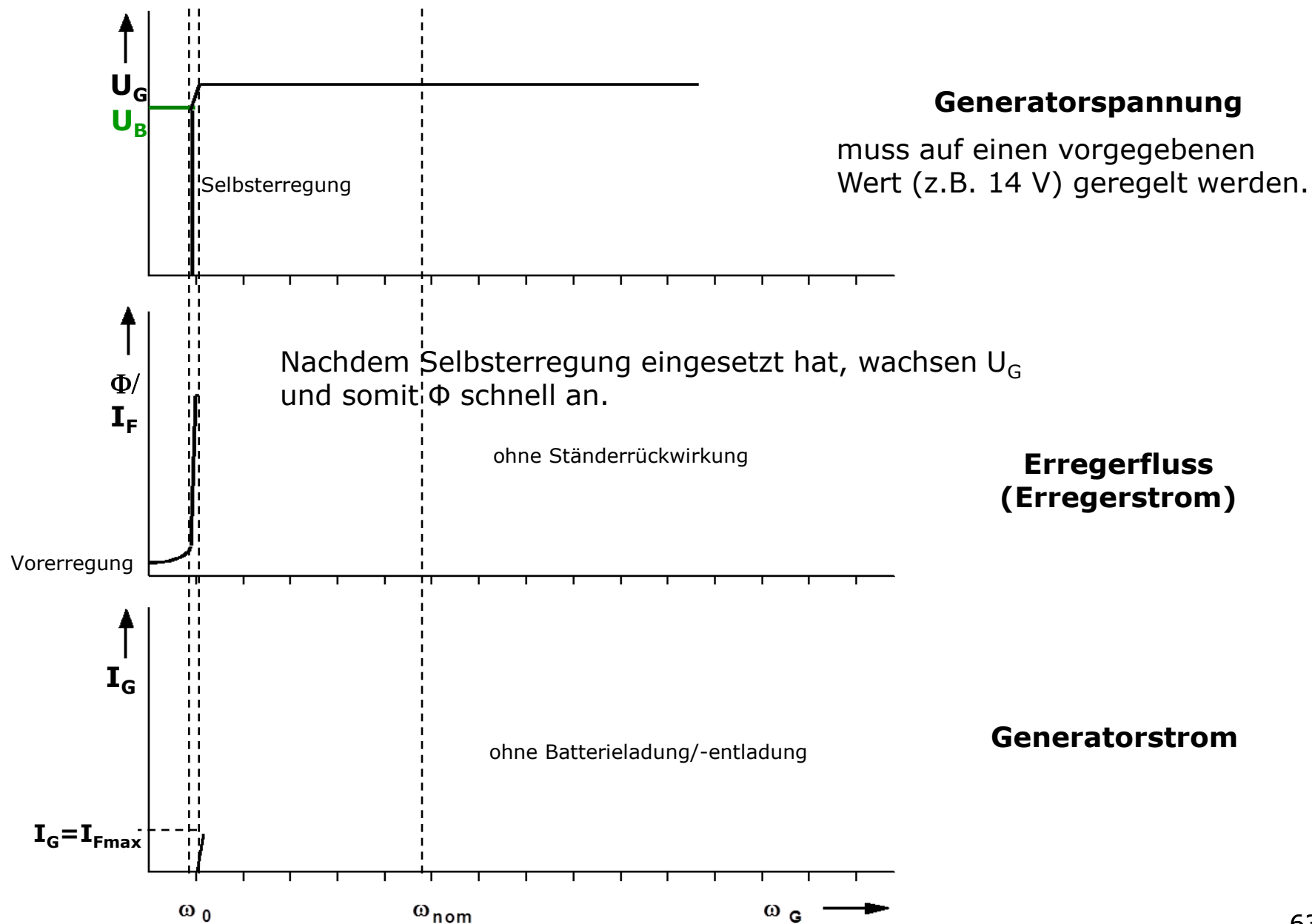
2.2.5 Verluste/Wirkungsgrad

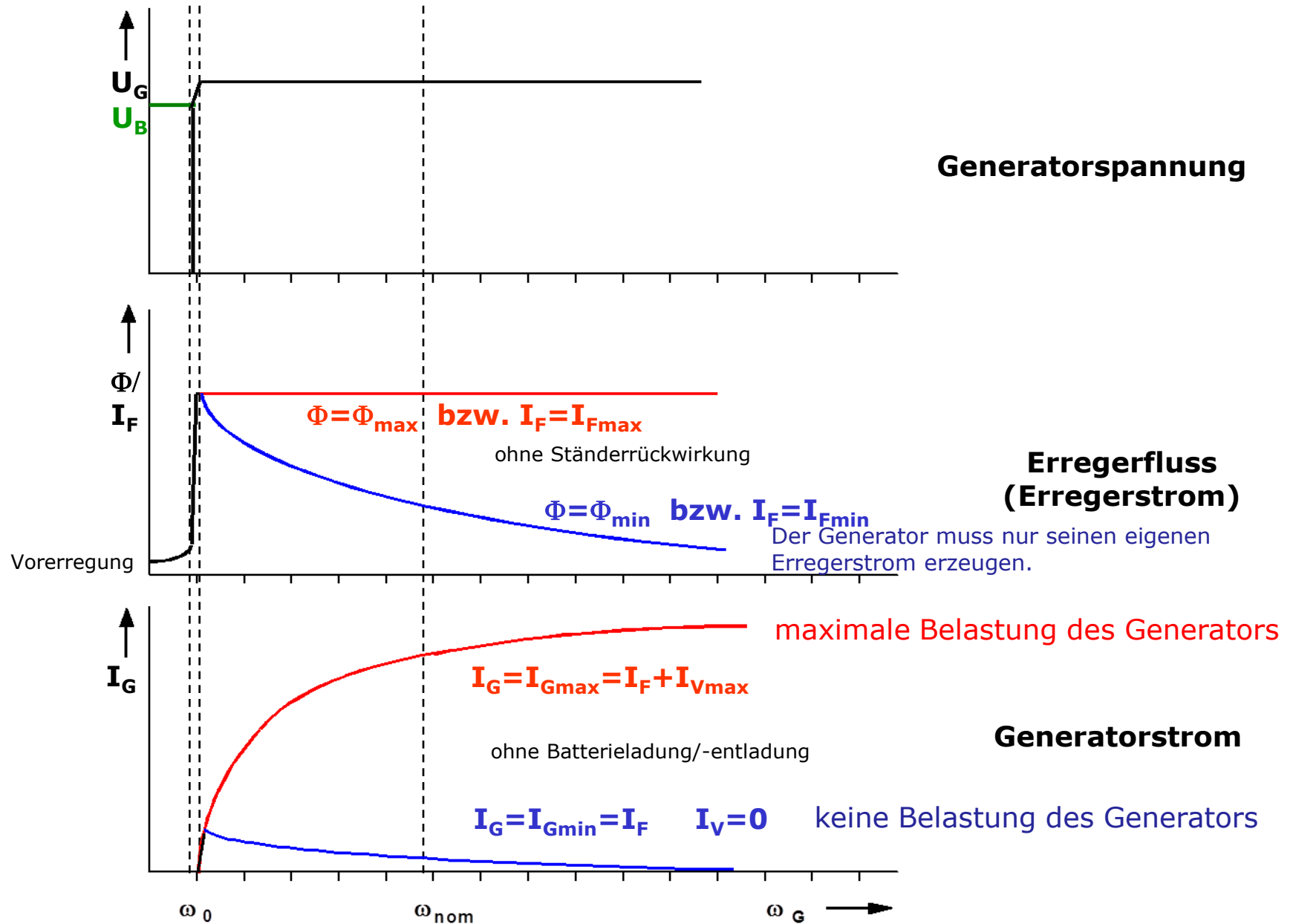
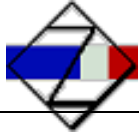
4.2.6 Spannungsregelung

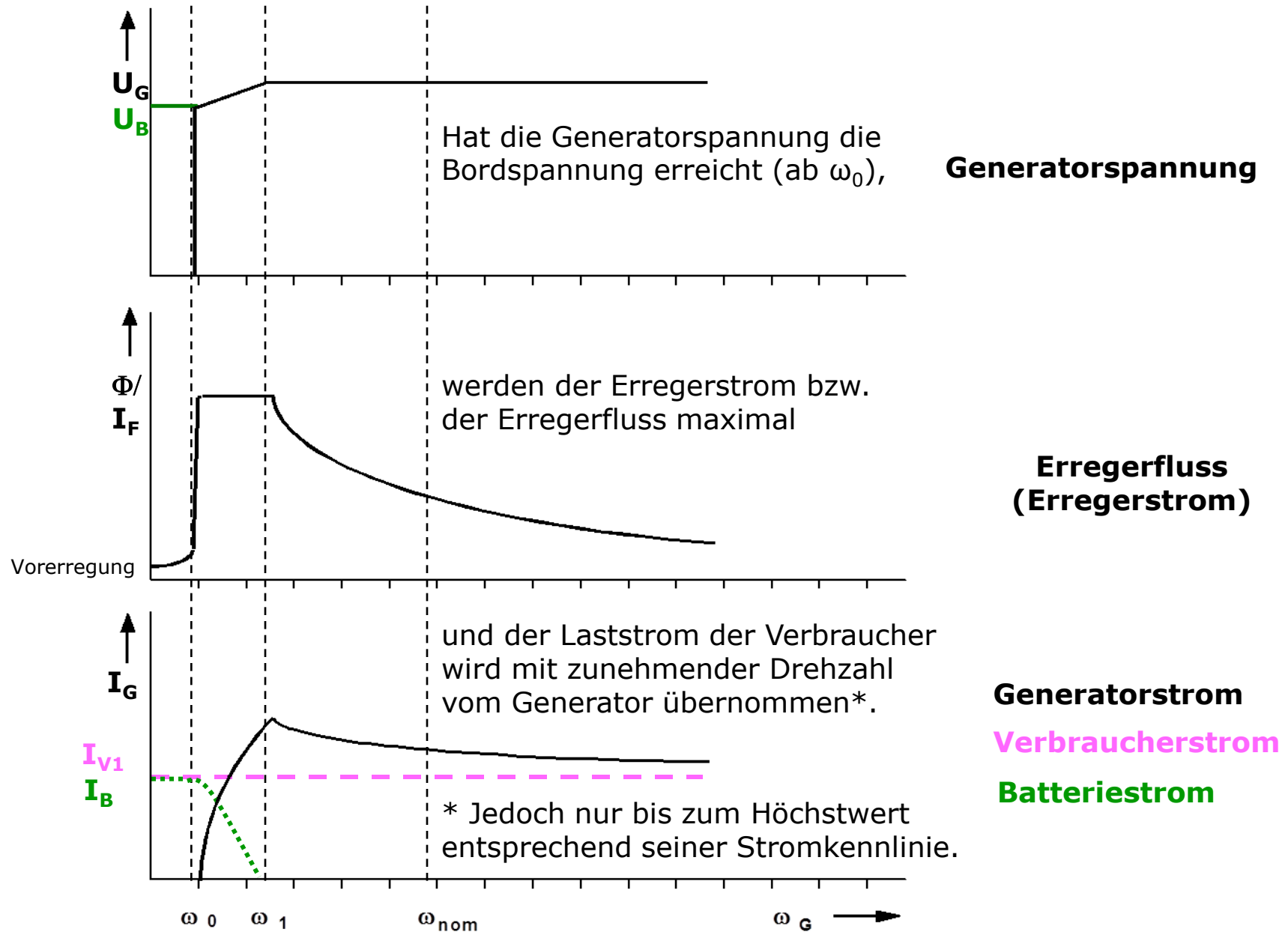
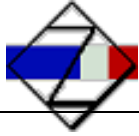
2.3 Starter

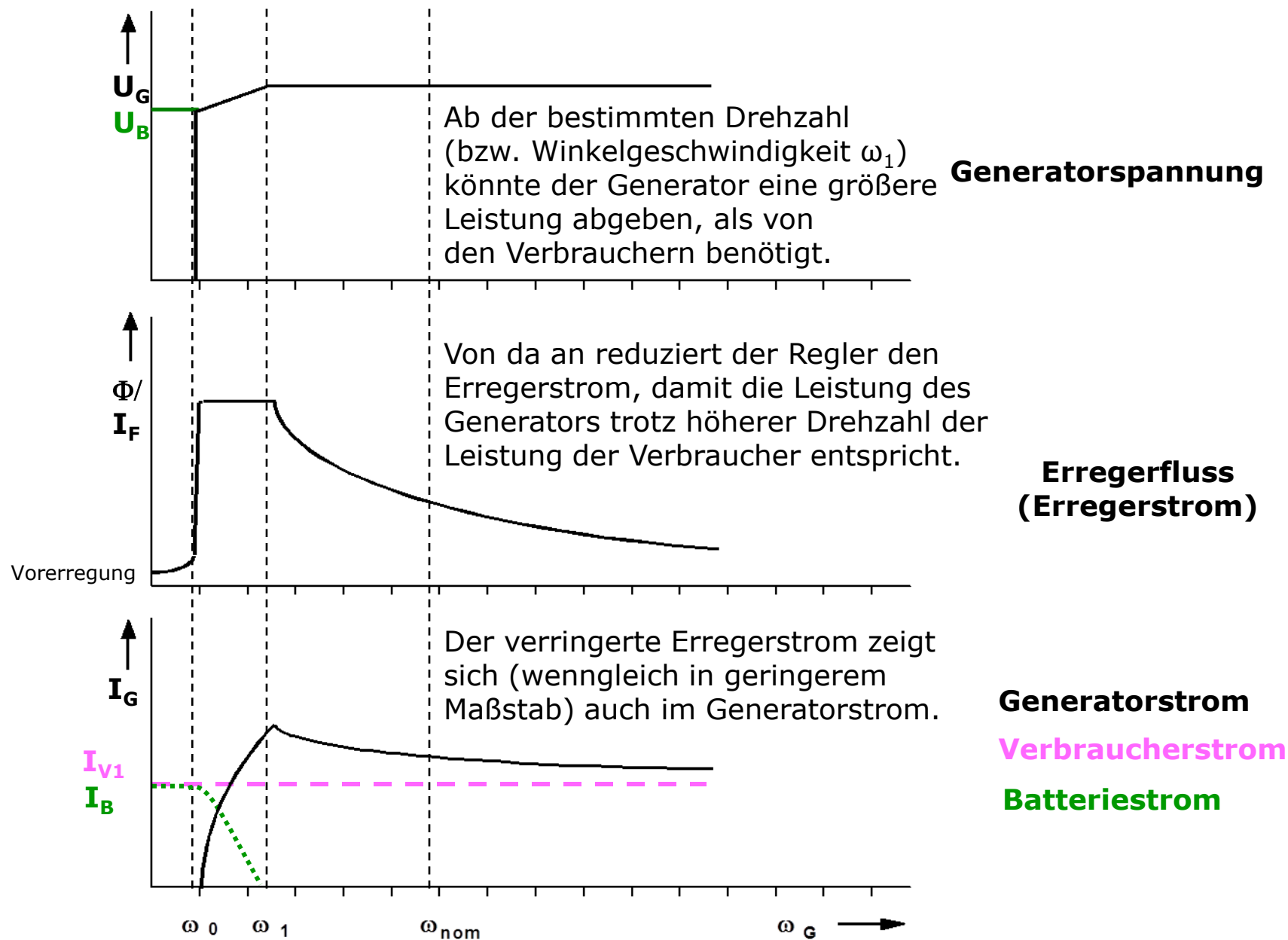
2.4 Starter-Generator-Maschinen

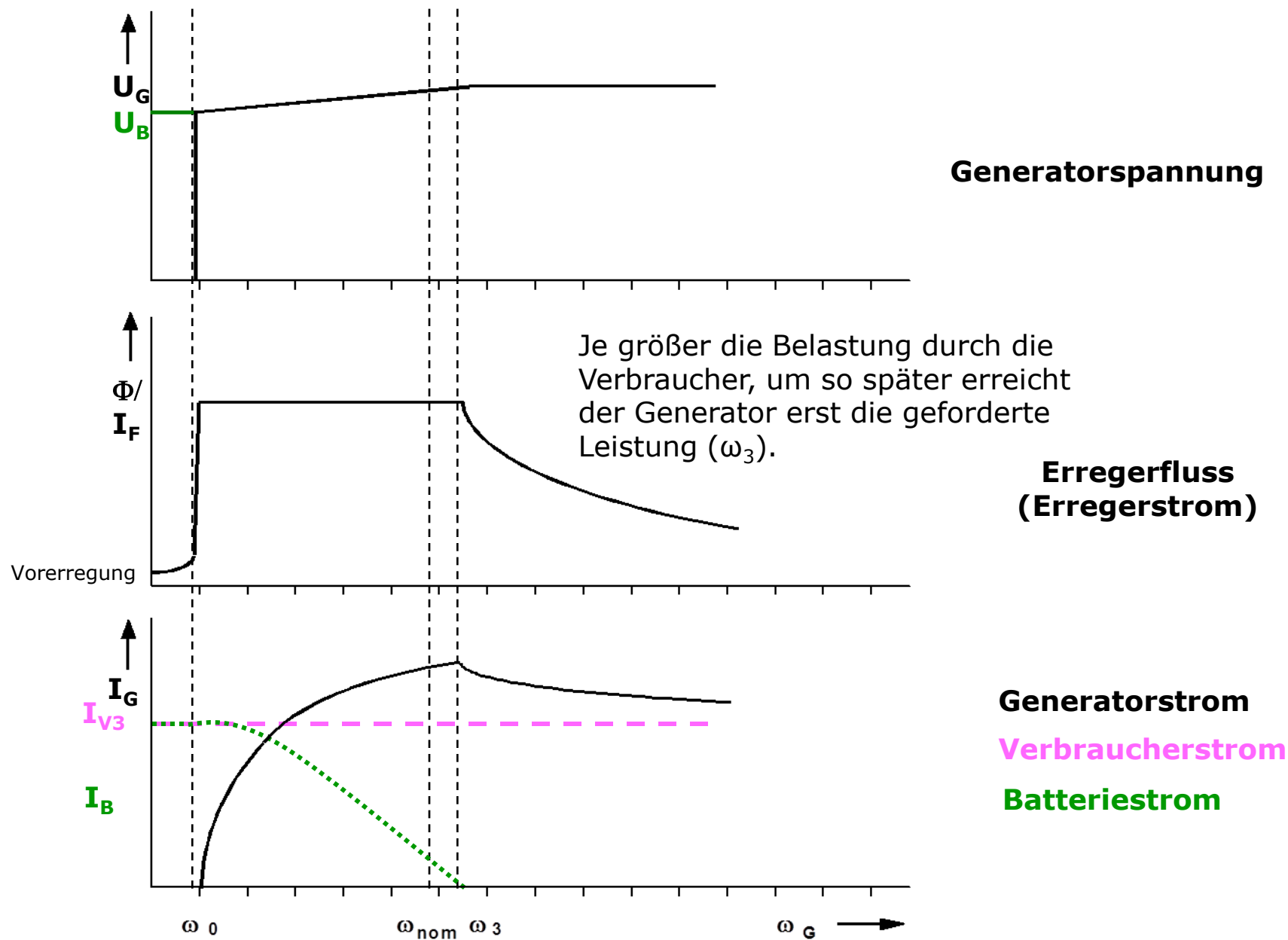
2.5 Hybridantriebe













Regelungsprinzip

Annahme 1:

Maschinenkonstante k , Generatorinnenwiderstand Z_i und Belastungsstrom der Verbraucher I_V seien konstant.

Die Generatorspannung U_G soll unabhängig von der Winkelgeschwindigkeit ω konstant bleiben.

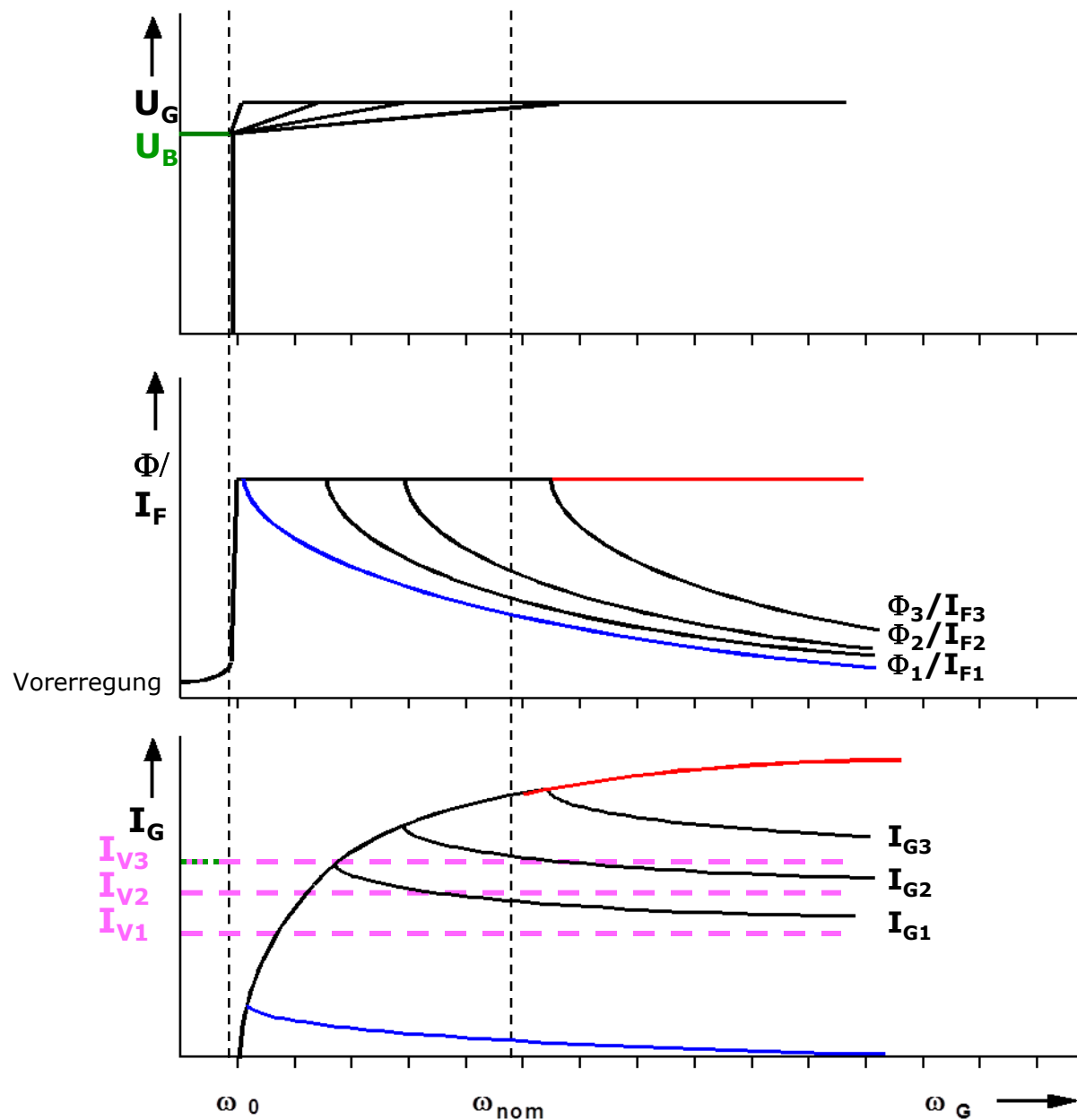
→ Φ und somit I_F müssen umgekehrt zu ω verändert werden.

Annahme 2:

Maschinenkonstante k , Generatorinnenwiderstand Z_i und Winkelgeschwindigkeit ω seien konstant.

Die Generatorspannung U_G soll unabhängig vom Belastungsstrom der Verbraucher I_V konstant bleiben.

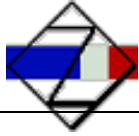
→ Φ und somit I_F müssen im gleichen Sinn zu I_V verändert werden.



Generatorspannung

Erregerfluss
(Erregerstrom)

Generatorstrom
Verbraucherströme

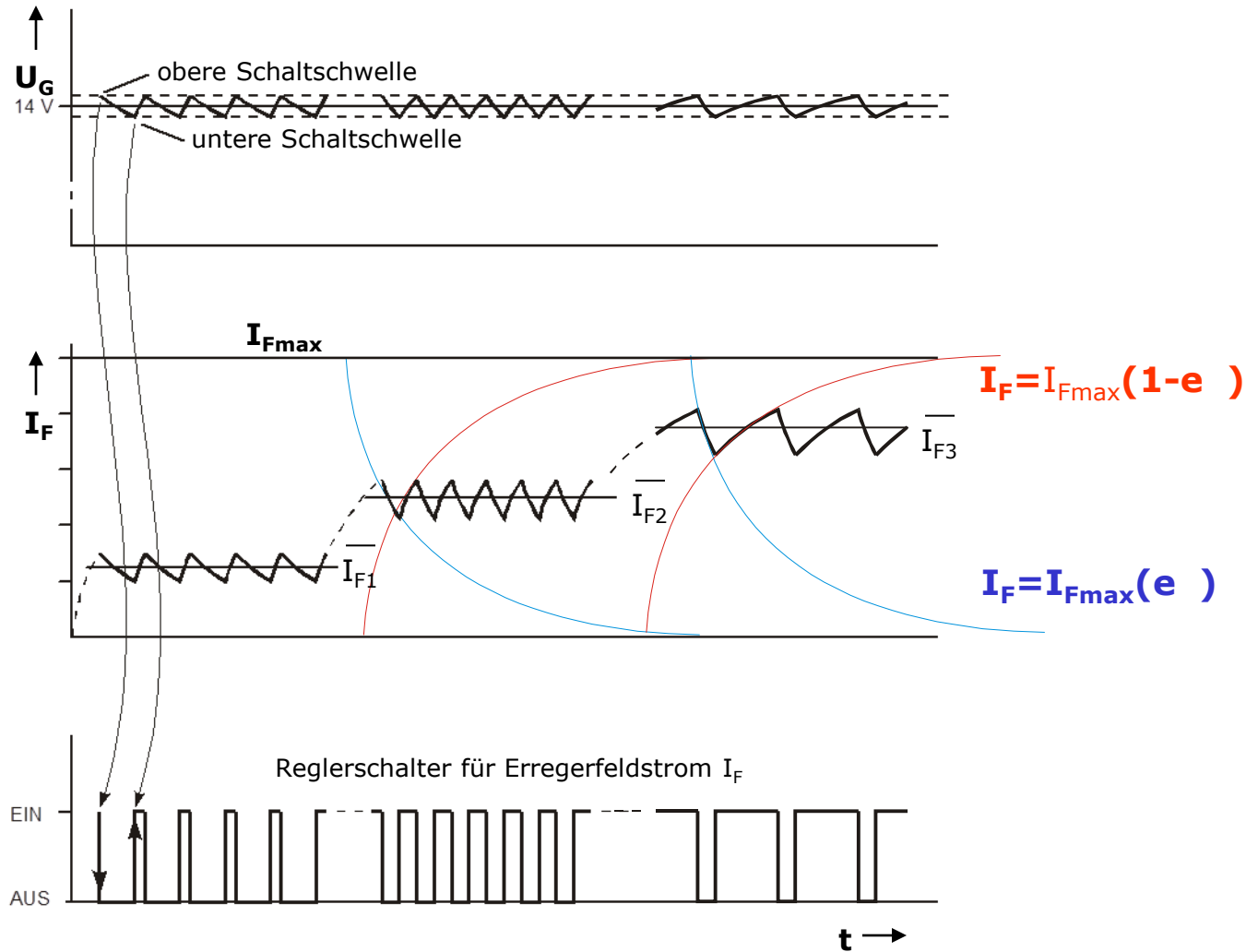
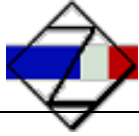


Regelungsprinzip

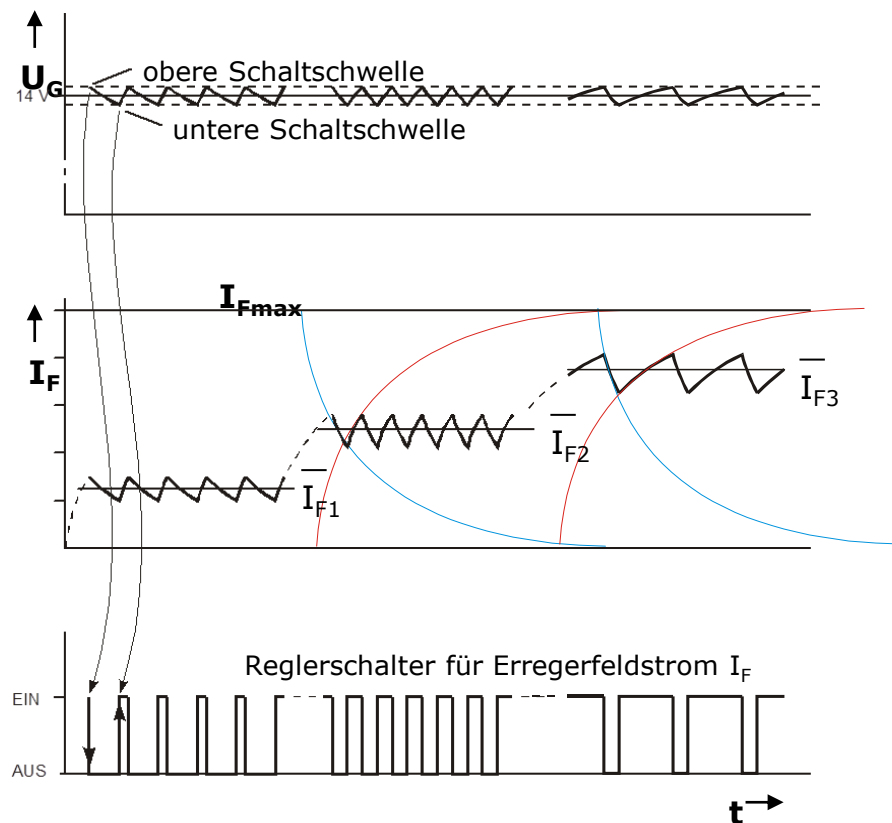
Gesamtgleichung für
Spannungsregelung:

$$\Phi = \frac{U_G + Z_i \cdot I_V}{k \cdot \omega - \frac{Z_i \cdot R_{mag}}{N}}$$

Analoge Regelung zwar möglich,
verwendet wird aber seit fast 100 Jahren eine robuste Zweipunktregelung.
(Erfinder war der Amerikaner Allen Augustus Tirrill (1872 – 1925).)

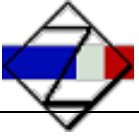


Prinzip der Zweipunktregelung

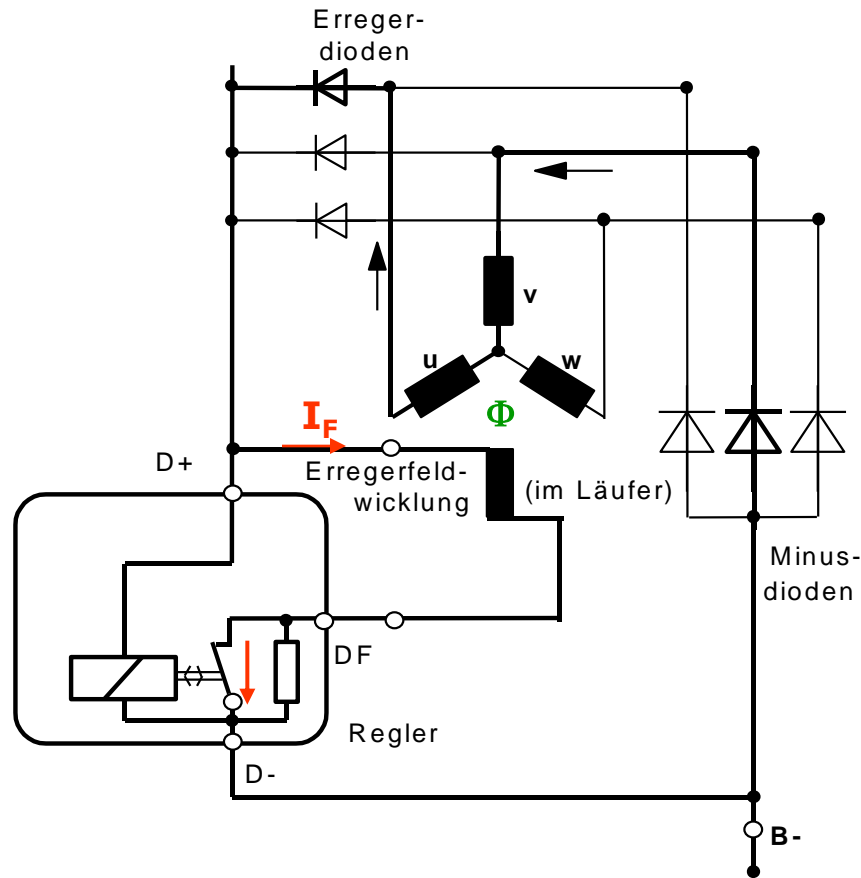


- Erregerstrom I_F wird bei Erreichen der Schaltschwellen ein- bzw. ausgeschaltet.
- Dabei wird das Magnetfeld auf- bzw. abgebaut.
- Es entsteht ein sägezahnförmiger Verlauf des Erregerstromes um einen Mittelwert.
- Je nach Belastung und Drehzahl des Generators stellen sich unterschiedliche Mittelwerte ein.

Prinzip der Zweipunktregelung



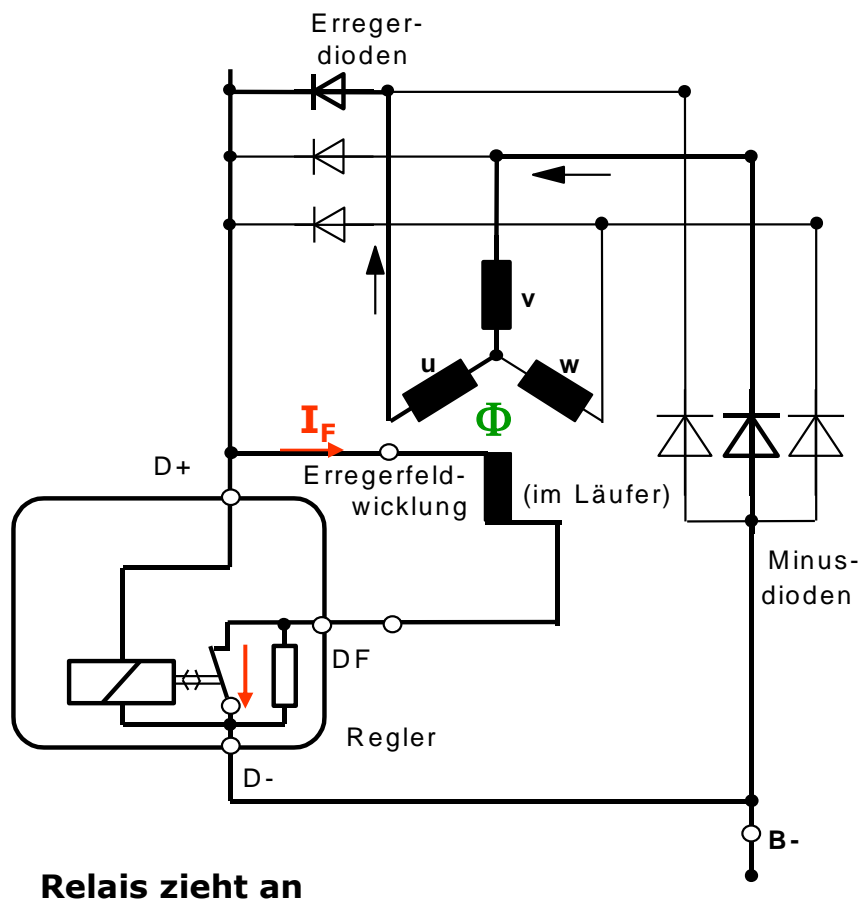
$D+ < 14 V$



Spannungsregelung
Prinzip
elektro-mech. Regler



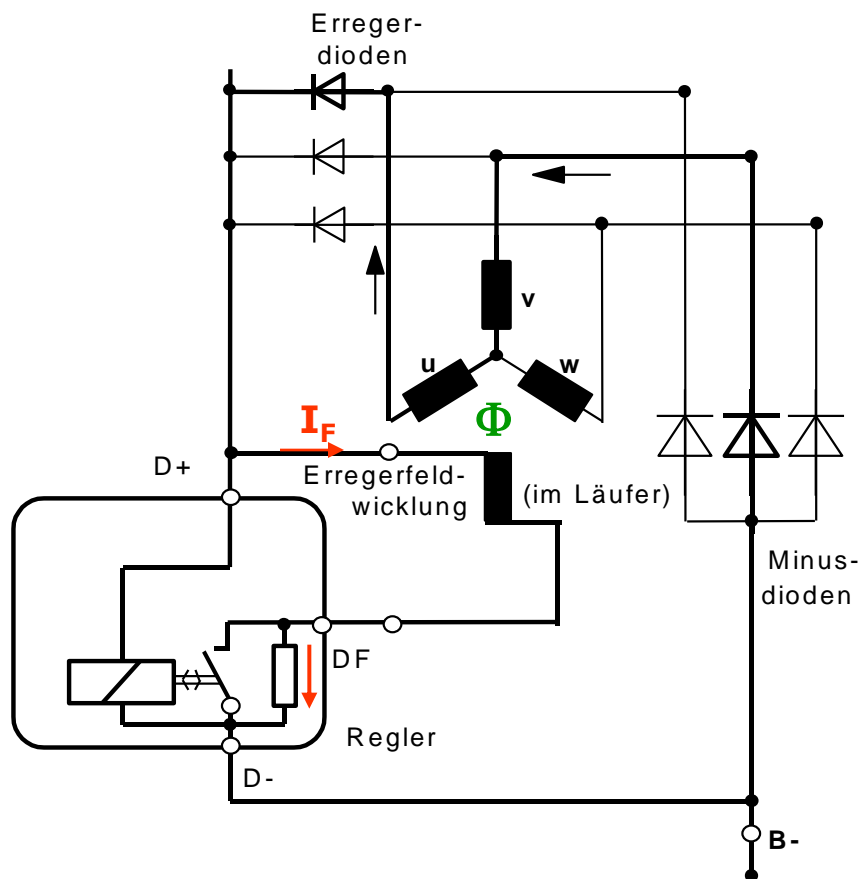
D+ > 14 V



**Spannungsregelung
Prinzip
elektro-mech. Regler**



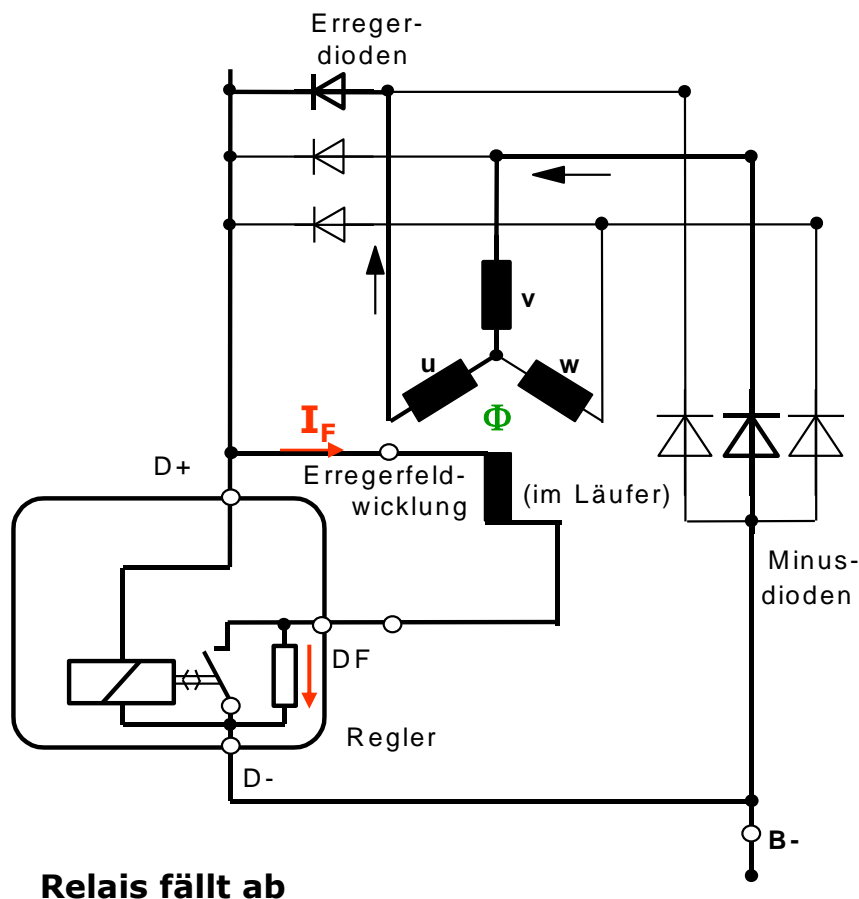
D+ > 14 V



**Spannungsregelung
Prinzip
elektro-mech. Regler**



$D+ < 14 V$

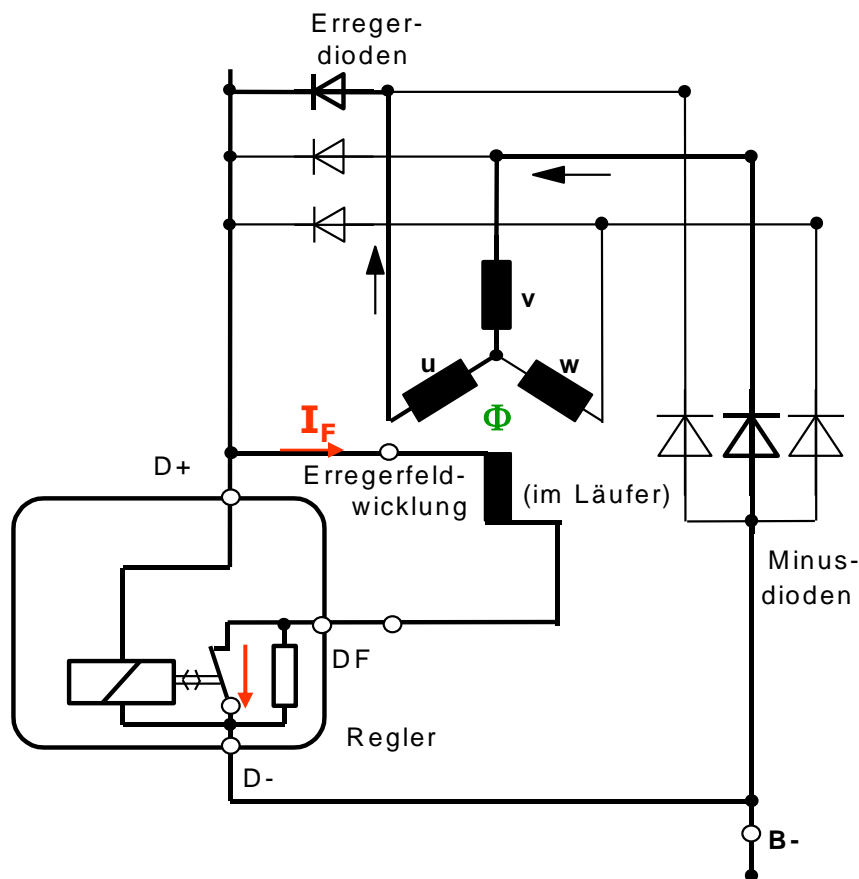


Spannungsregelung
Prinzip
elektro-mech. Regler

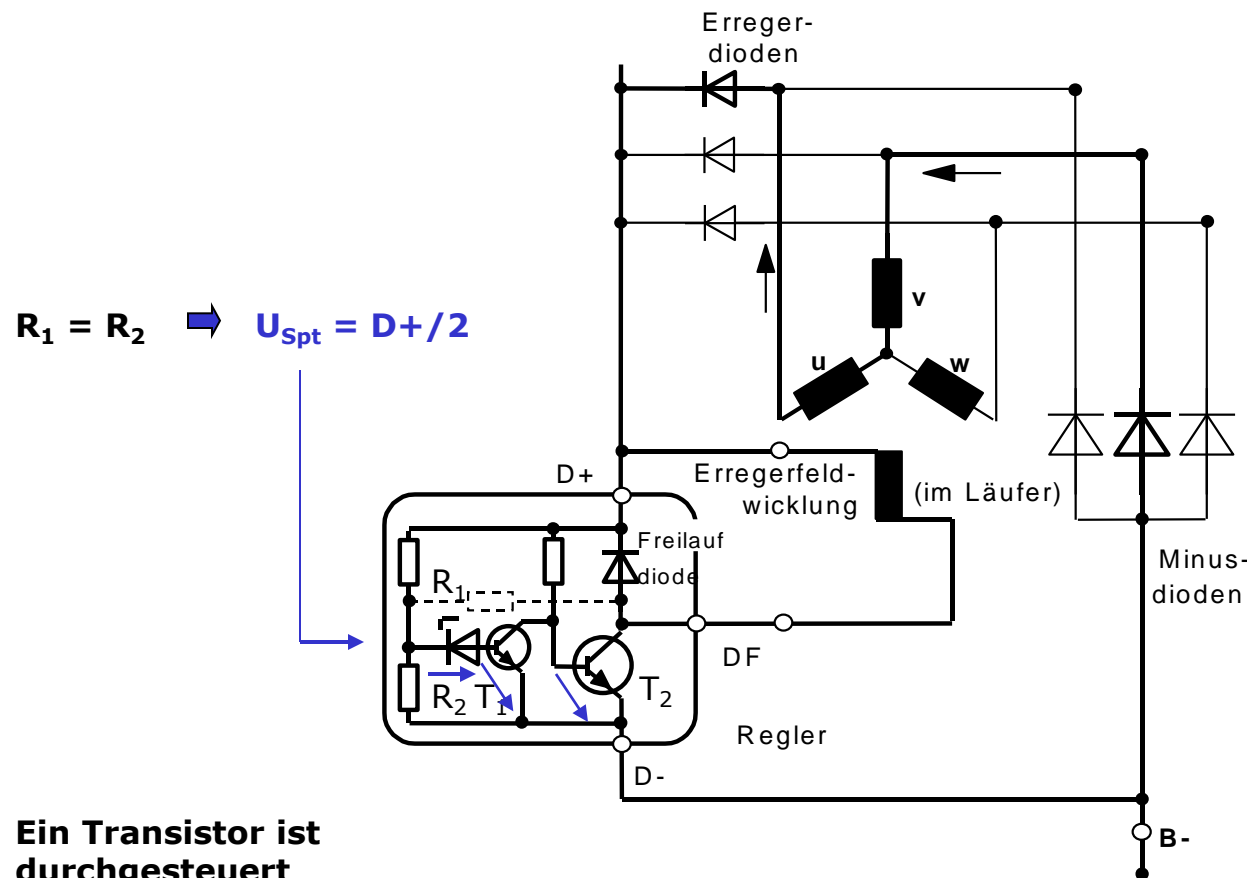
Relais fällt ab



D+ < 14 V



**Spannungsregelung
Prinzip
elektro-mech. Regler**



Spannungsregelung Prinzip elektronischer Regler

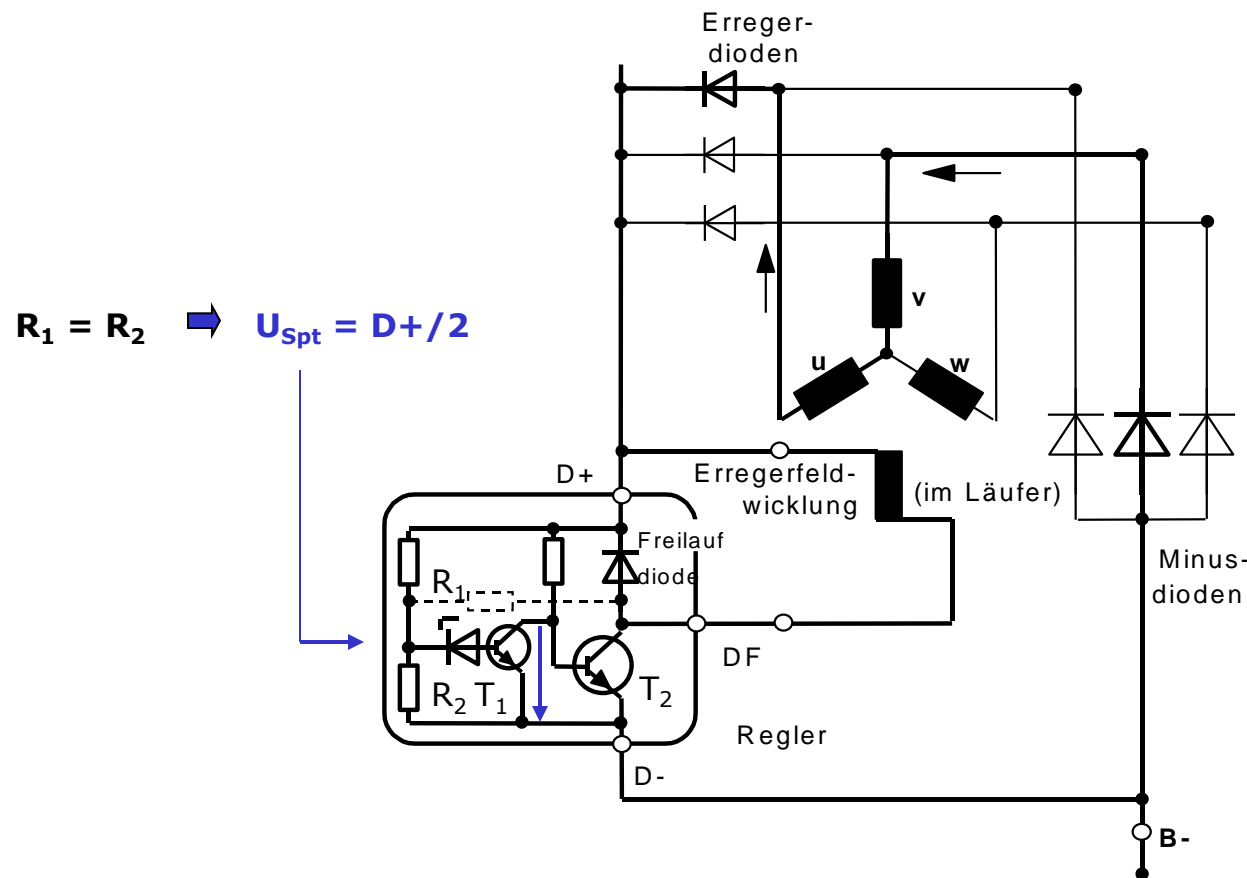
$$R_1 = R_2 \Rightarrow U_{Spt} = D+/2$$

Ein Transistor ist durchgesteuert (eingeschaltet), wenn Basisstrom fließt, dabei ist $U_{BE} \geq 0,7 \text{ V}$

Z-Diode mit $U_z = 6,3 \text{ V}$



Basisstrom T_1 kann nur fließen, wenn $U_{Spt} \geq 7 \text{ V}$ bzw. wenn $D+ \geq 14 \text{ V}$



Spannungsregelung Prinzip elektronischer Regler

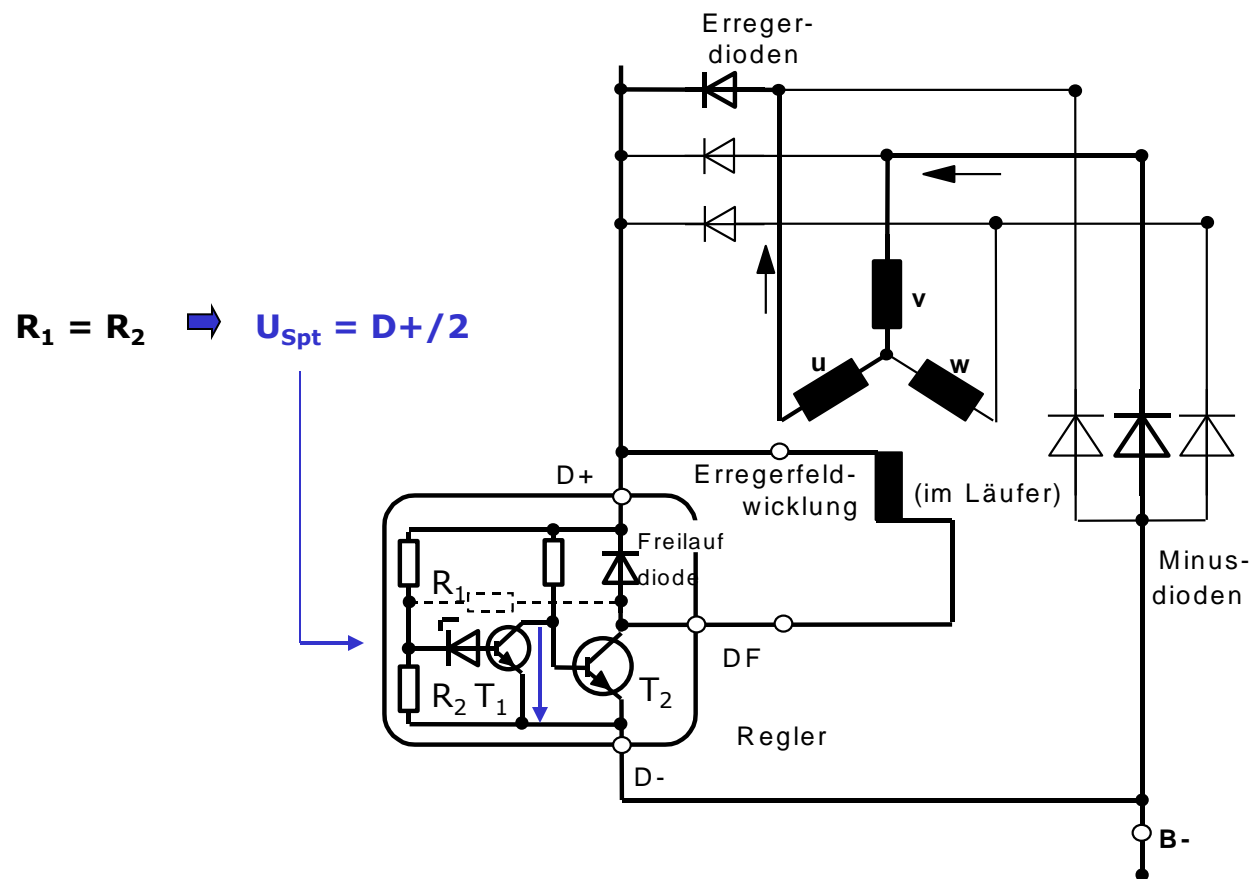
$$R_1 = R_2 \Rightarrow U_{Spt} = D+/2$$

wenn Basisstrom T_1 ,
dann ist T_1 durchgesteuert,
und $U_{CE}(T_1) \approx 0,3 \text{ V}$

$$U_{CE}(T_1) = U_{BE}(T_2)$$

$\Rightarrow U_{BE}(T_2)$ zu
klein für
Basistrom T_2

$\Rightarrow T_2$ gesperrt



Spannungsregelung Prinzip elektronischer Regler

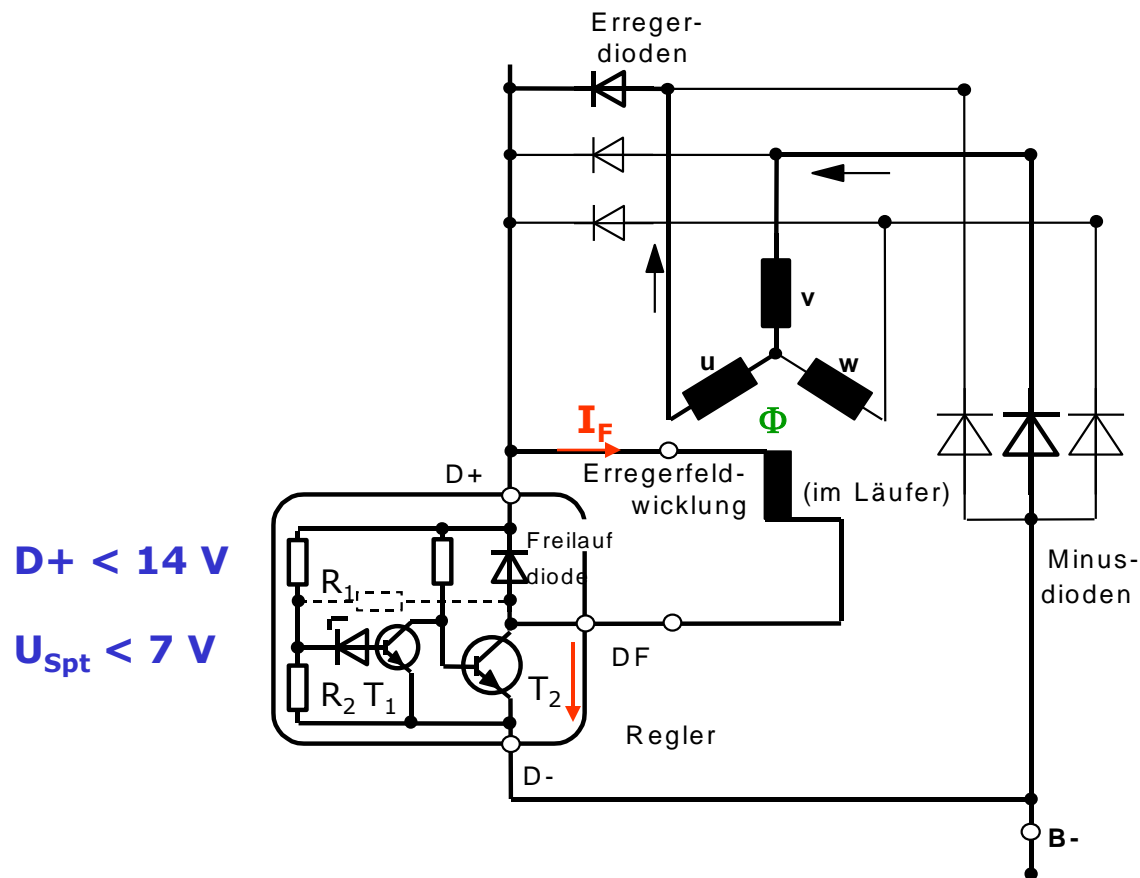
$$R_1 = R_2 \Rightarrow U_{Spt} = D+/2$$

wenn $U_{Spt} < 7 \text{ V}$, dann
kein Basisstrom T_1
und T_1 gesperrt

$$\Rightarrow U_{BE}(T_2) \geq 0,7 \text{ V}$$

Basistrom T_2

$\Rightarrow T_2$ durchgesteuert

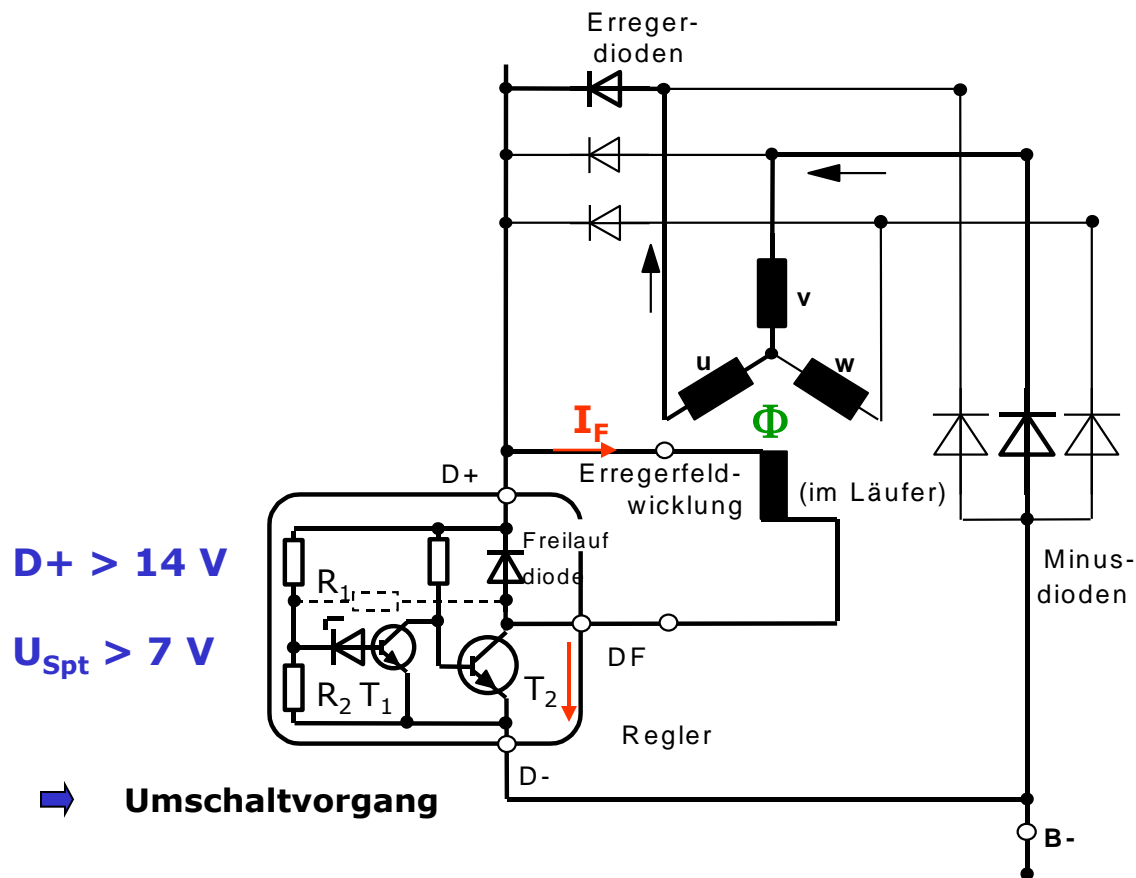


Spannungsregelung Prinzip elektronischer Regler

$D+ < 14\text{ V}$

$U_{Spt} < 7\text{ V}$

T_1 gesperrt \rightarrow T_2 durchgesteuert



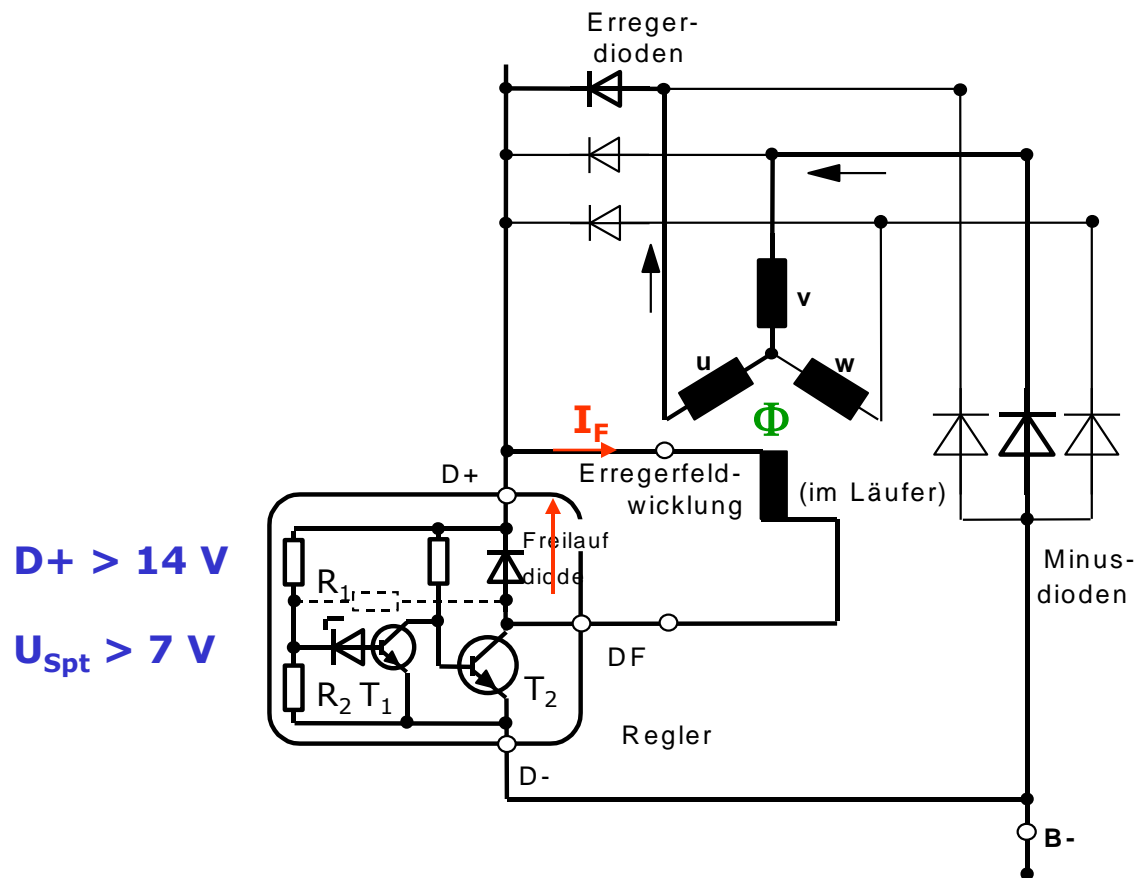
Spannungsregelung Prinzip elektronischer Regler

$D+ > 14 V$

$U_{Spt} > 7 V$

➔ Umschaltvorgang

T_1 gesperrt ➔ T_2 durchgesteuert

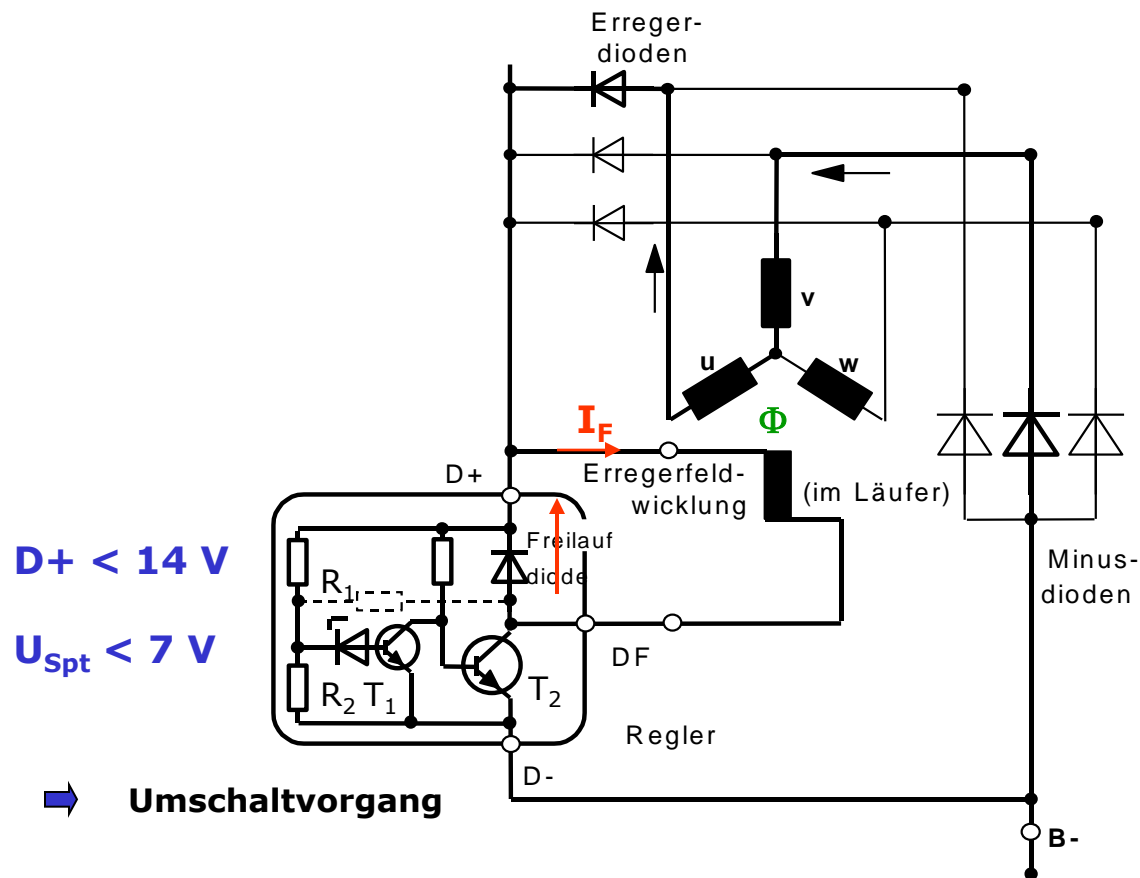


Spannungsregelung Prinzip elektronischer Regler

$D+ > 14 V$

$U_{Spt} > 7 V$

T_1 durchgesteuert \rightarrow T_2 gesperrt



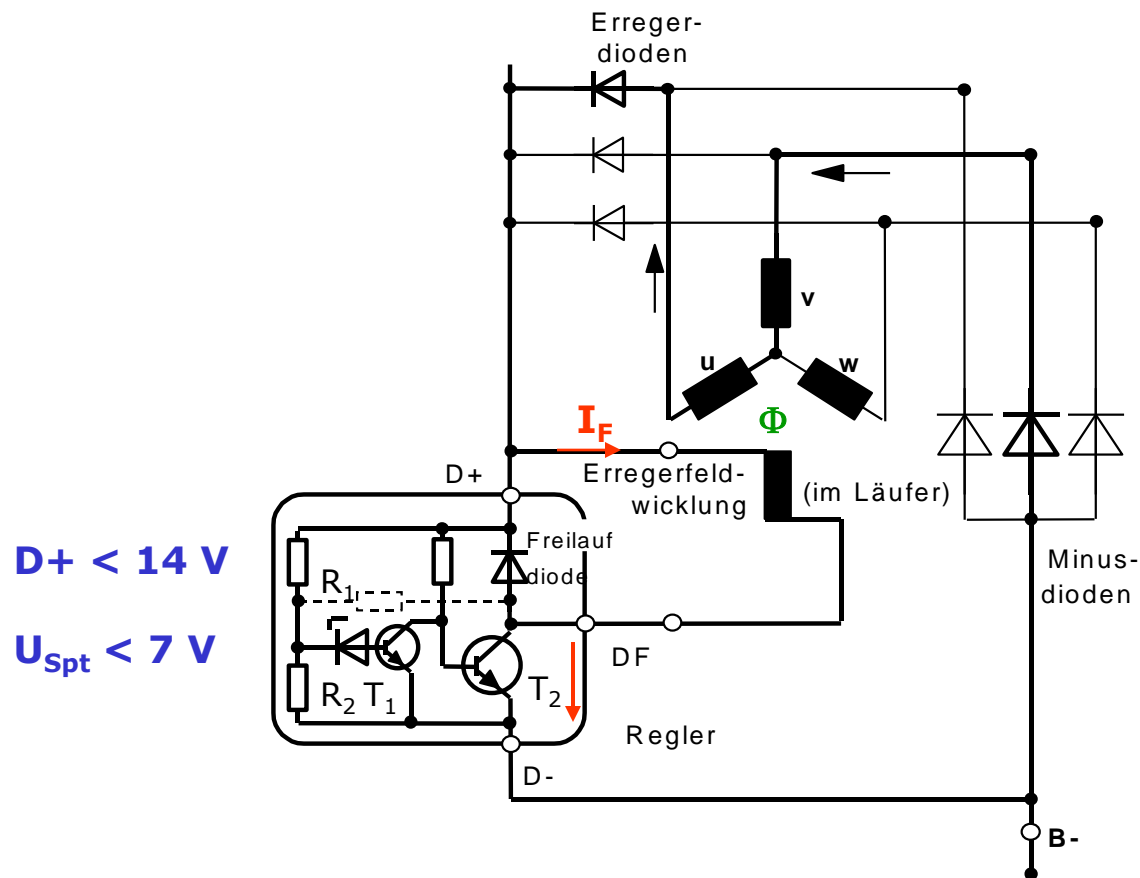
Spannungsregelung Prinzip elektronischer Regler

$D+ < 14 V$

$U_{Spt} < 7 V$

➔ Umschaltvorgang

T_1 durchgesteuert ➔ T_2 gesperrt

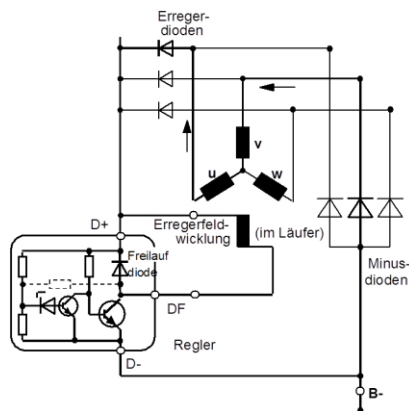


Spannungsregelung Prinzip elektronischer Regler

$D+ < 14\text{ V}$

$U_{Spt} < 7\text{ V}$

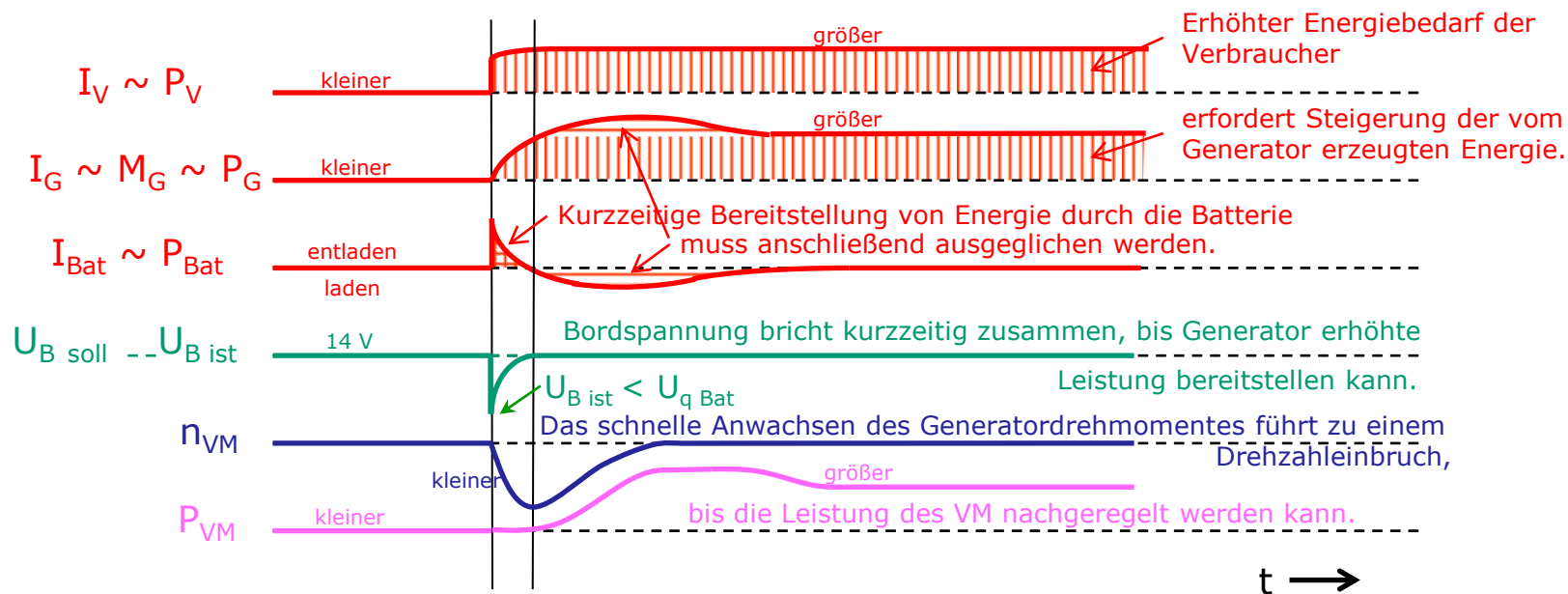
T_1 gesperrt \rightarrow T_2 durchgesteuert



Spannungsregelung Prinzip elektronischer Regler

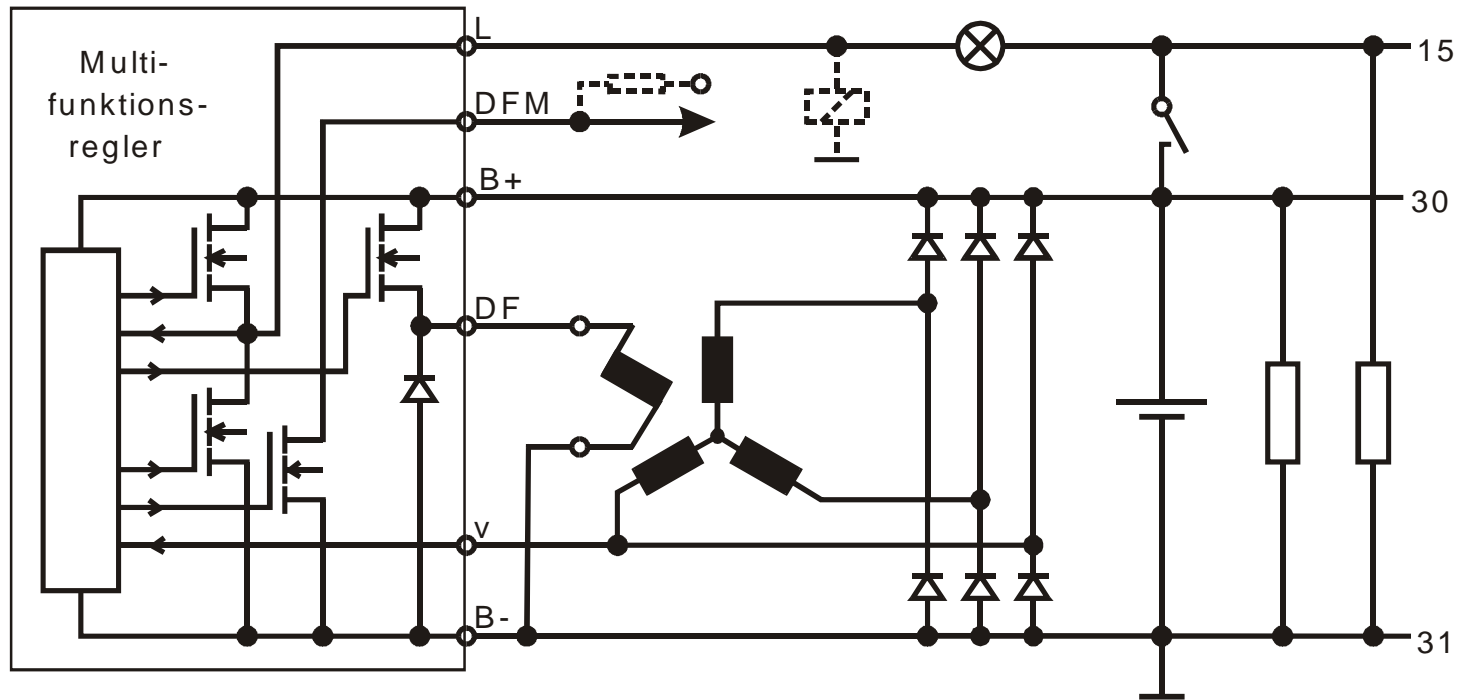
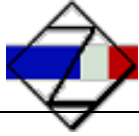
Zweipunktregelung ist eine starre
(nicht nachgiebige) Regelung.

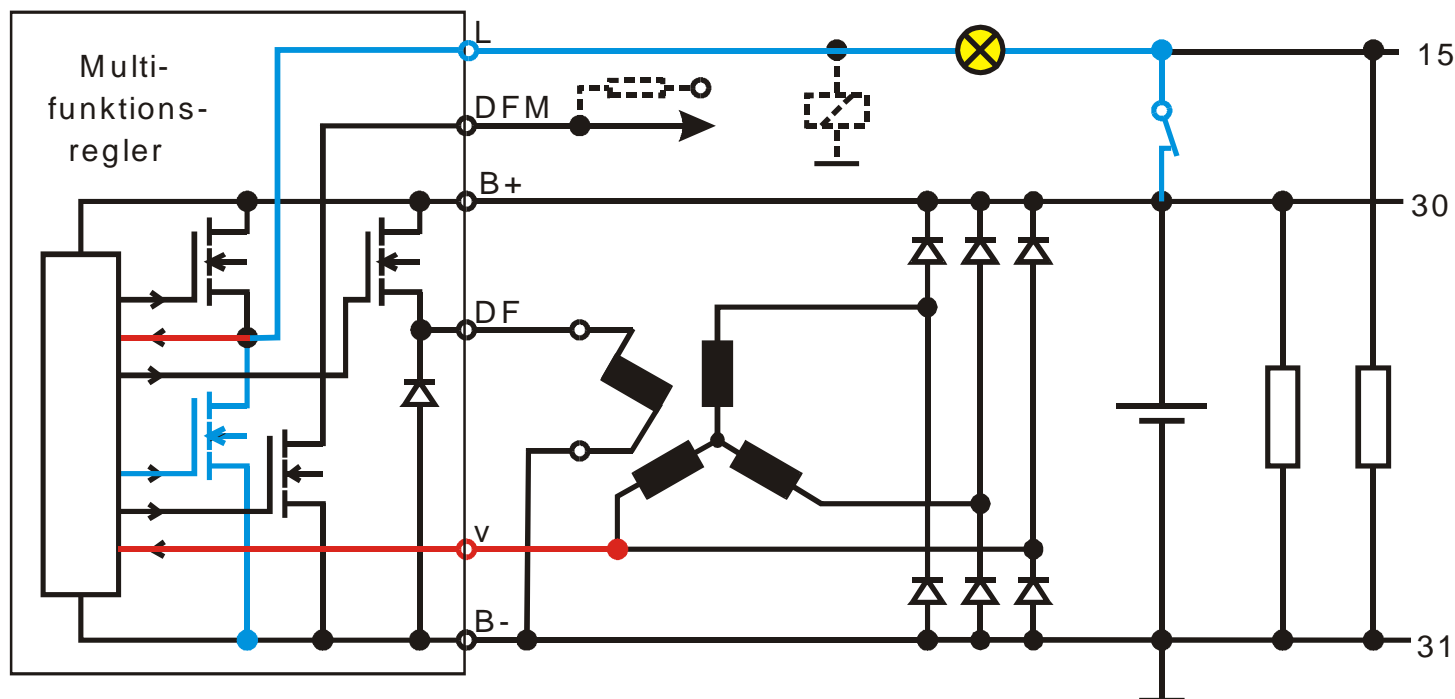
$$U_{B \text{ Soll}} = 14 \text{ V}$$



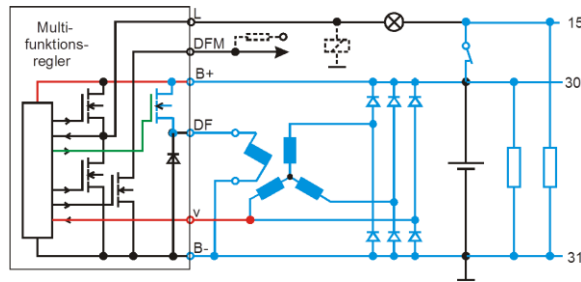
→ Motordrehzahl ist im Leerlauf erhöht, um „Abwürgen“ des VM zu vermeiden.

→ Drehzahleinbruch wird als unangenehm empfunden.





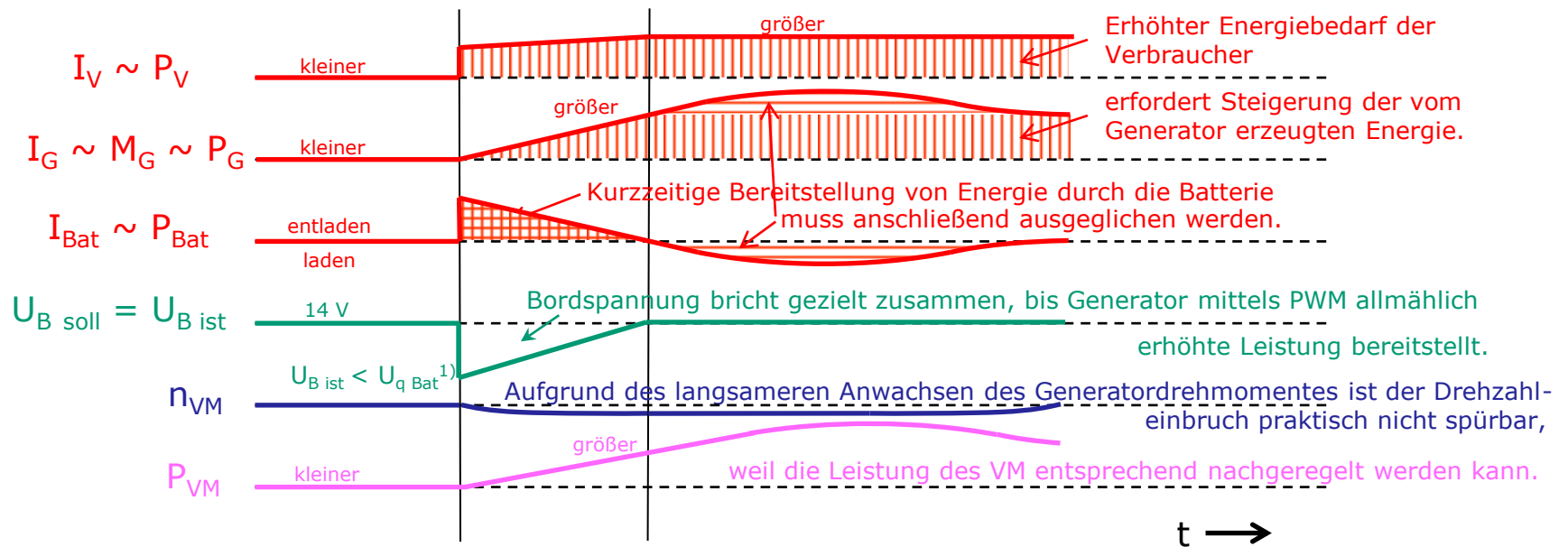
Zündschalter geschlossen → Batteriespannung liegt über Kontrolllampe am Anschluss L des Multifunktionsreglers an.
Liegt gleichzeitig ein Drehzahlsignal (Wechselspannung) der Phase v vor, wird die Kontrolllampe angesteuert.



Spannungsregelung Prinzip elektronischer Regler

Multifunktionsregler ermöglicht nachgiebige Regelung.

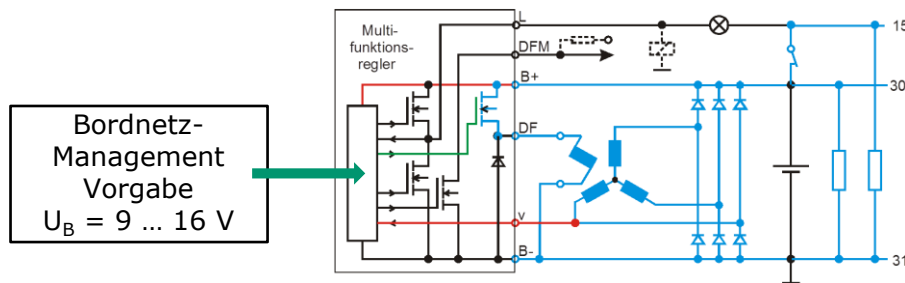
$U_{B \text{ Soll}} = 14 \text{ V}$ (jedoch kurzzeitig auch $< 14 \text{ V}$)



→ Motordrehzahl kann auf Mindestdrehzahl verringert werden.

→ Kraftstoffeinsparung und Komfortgewinn.

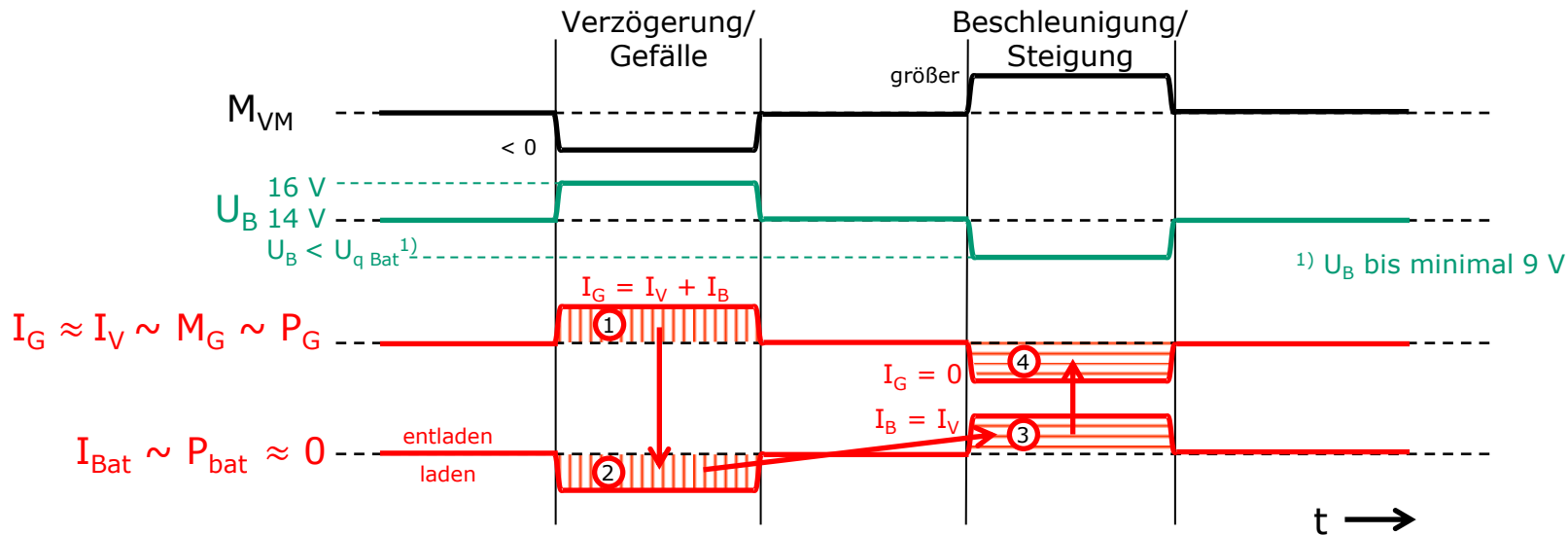
¹⁾ $U_{B \text{ ist}}$ bis minimal 9 V



variable Spannungsregelung auf Basis des VM-Drehmoments zur verbesserten Nutzung von Bremsenergie (Rekuperation)

Multifunktionsregler mit Spannungs-
vorgabe (incl. nachgiebiger Regelung)

$$U_{B \text{ Soll}} = 9 \dots 14 \dots 16 \text{ V}$$



- ① Zusätzliche Energieerzeugung durch Generator aus kinetischer Fahrzeugenergie
- ② wird zum Laden der Batterie verwendet.
- ③ Die aufgespeicherte Energie kann (vorzugsweise bei höherer Belastung des VM) an das Bordnetz abgegeben werden.
- ④ Geringere Energieerzeugung des Generators → Senkung Kraftstoffverbrauch.