

Leseprobe aus Kapitel 6 ‚Elektrische Maschinen‘ des Buchs

## ‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘

Im Kapitel 6 werden Gleichstrom, Allstrom- und Synchron-Motoren mit der Nenn-Leistung als freiem Parameter simuliert. Von besonderem Interesse sind die Last-Abhängigkeit der Drehzahl und die Verzögerung bei der Steuerung durch die Betriebs-Spannung.

Diese Leseprobe behandelt die Simulation des Gleichstrom-Motors mit und ohne Kommutator.

Weitere Informationen zum Buch finden Sie unter [strukturbildung-simulation.de](http://strukturbildung-simulation.de)

### 6.4.4 Simulation eines Gleichstrom-Motors

Motoren werden mit mechanischen und elektronischen Kommutatoren gebaut. Mechanische Kommutatoren erzeugen Spannungs-Verluste, elektronische nicht. Wir simulieren den Gleichstrom-Motor zunächst ohne, danach mit Kommutator-Verlusten. So erkennen wir den Leistungs-Verlust mechanischer Kommutatoren und können beurteilen, ob sich der Aufwand für elektronische Kommutatoren lohnt. Dabei ist zu bedenken, dass mechanische Kommutatoren verschleifen, elektronische nicht.

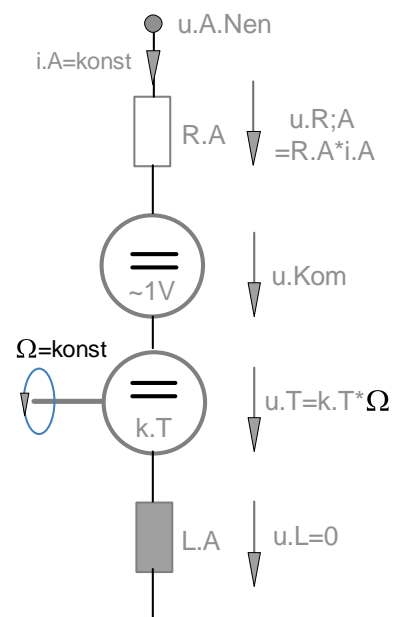
Kommutator-Verluste betragen einige V, annähernd unabhängig vom Anker-Strom (der Übergangswiderstand des Kommutators wird mit steigendem Anker-Strom geringer).

Die Kommutator-Verluste sind vernachlässigbar,

1. wenn  $u.Nen \gg u.Kom$
2. bei der Drehzahl-Steuerung durch Pulsbreiten-Modulation
3. bei Motoren mit elektronischem Kommutator.

Von der Vernachlässigbarkeit der Kommutator-Spannung soll bei der ersten Simulation des Gleichstrom-Motors ausgegangen werden. Dabei werden sich Unterschiede zu den Hersteller-Angaben ergeben (z.B. beim Wirkungsgrad).

**Abb. 6-116 Ersatz-Schaltung eines Motors mit Kommutator-Verlusten**



Anschließend werden wir den Motor mit Kommutator-Verlusten simulieren. Durch die Einstellung der Kommutator-Spannung (die nicht direkt messbar ist), wird der simulierte Wirkungsgrad mit der Hersteller-Angabe in Übereinstimmung gebracht. Dadurch kann die Kommutator-Spannung indirekt bestimmt werden

## Simulation des Gleichstrom-Motors ohne die Kommutator-Verluste

Die zugehörige Struktur finden Sie umseitig. Vorab zeigen wir die damit berechneten Messwerte und die verwendeten Parameter:

Parameter		Leerlauf: M.Last=0		Nenn-Last 49mNm	
R.A/Ohm	0,9	u.T/V	11,669	u.T/V	9,9674
A.Fe/cm <sup>2</sup>	14	theta/A	36,754	theta/A	225,84
B.Mag/T	0,18	M.A/mNm	9,262	M.A/mNm	56,912
phi/mVs	0,252	M.R;int/mNms	9,2613	M.R;int/mNms	7,9107
k.M*Vs	32,961	Omega*s	463,06	Omega*s	395,53
k.T/mVs	25,2	M.Last/mNm	0	M.Last/mNm	49
eta.err	0,83062	P.me/W	0	P.me/W	19,381
u.A/V	12	P.el/W	4,4104	P.el/W	27,101
N	100	i.A/A	0,36753	i.A/A	2,2584
c.R;int/mNms	0,02				

Abb. 6-117 Die simulierten Messwerte zum Gleichstrom-Motor ‚Elefant‘ ohne die Kommutator-Verluste: Simulation und Messung (Abb. 6-101 ) stimmen nur ungefähr überein.

## Die Struktur des Gleichstrom-Motors ohne Kommutator-Verluste

Die zu klärenden Fragen:

- Der Permanent-Magnet erzeugt den magnetischen Fluss. Gesucht wird dessen Flussdichte B.Mag.
- Zur Berechnung des Motors wird die Windungszahl N der Anker-Spule benötigt. Sie muss so eingestellt werden, dass die simulierten Werte mit den gemessenen übereinstimmt.

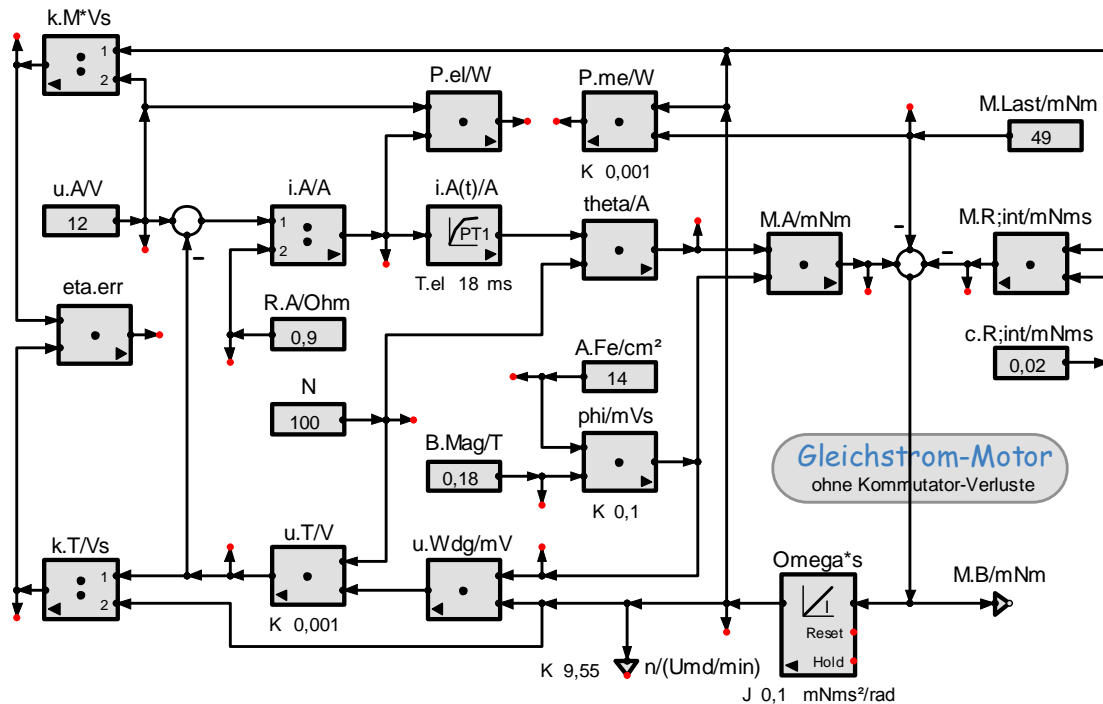


Abb. 6-118 Die Struktur zur Simulation eines Gleichstrom-Motors mit Permanent-Magnet berechnet u.a den Wirkungsgrad (Zahlenwerte: ‚Elefant‘). Der Vergleich mit dem gemessenen Wirkungsgrad belegt den durch die Nicht-Berücksichtigung der Kommutator-Verluste gemachten Fehler.

## Erläuterungen zur Struktur des Gleichstrom-Motors ohne Kommutator-Verluste

Die verwendeten Zahlenwerte beschreiben den Modellbau-Motor ‚Elefant‘.

1. Im mittleren Zweig werden der Anker-Strom und das Antriebs-Moment berechnet. Je nach Belastung ergibt sich daraus die Drehzahl  $\Omega$ .
2. Je kleiner  $\phi$ , desto größer muss  $\Omega$  werden, damit  $u.T=k.T \cdot \Omega \approx u.A$  wird. Dem Thema ‚Drehzahl-Erhöhung durch Feld-Schwächung‘ widmen wir uns im folgenden Abschnitt, der den Feldstrom-gesteuerten Motor behandelt.
3. In der Mitte der Struktur wird der magnetische Fluss  $\phi=B.Mag \cdot A.Fe$  berechnet. Der Eisen-Querschnitt  $A.Fe$  muss aus dem Querschnitt des Motors abgeschätzt werden. Die Flussdichte  $B.Mag$  des Dauer-Magneten wird so eingestellt, dass das Antriebs-Moment mit dem gemessenen Nenn-Moment übereinstimmt.
4. Zur Berechnung der Durchflutung  $\Theta$  und der Tacho= $N \cdot i.A$  und der Tacho-Konstanten  $k.T=N \cdot \phi$  wird die Windungszahl  $N$  des Ankers benötigt. Sie wurde so eingestellt, dass der Motor sein angegebenes Nenn-Moment erreicht.
5. Der mit diesen Werten errechnete Wirkungsgrad (83%) ist höher als der gemessene (66%). Ursache ist der Kommutator-Verlust. Der Fehler wird bei der anschließenden Simulation behoben. Der Unterschied beider Wirkungsgrade zeigt die Verbesserung, die sich ergeben würde, wenn der Motor mit einem elektronischen (Verlust-freien) Kommutator ausgestattet würde.

### Zahlenwerte für den Modellbau-Motor ‚Elefant‘:

- ➔ mit dem Massenträgheits-Moment  $J=87 \mu Nms^2$  (aus Abb. 6-91)
- ➔ mit der Tacho-Konstanten  $k.T=25mVs=25mNm/A$
- ➔ mit der Leerlauf-Drehzahl  $\Omega.0=420rad/s$
- ➔ mit der Nenn-Drehzahl  $\Omega.Nen=368rad/s$
- ➔ mit dem Nenn-Moment  $M.Nen=49mNm$
- ➔ mit dem Leerlauf-Strom  $i.0=0,34A \rightarrow M.0=k.T \cdot i.0=8.5mNm$

Zur dominierenden Motor-Zeitkonstante:

Wie oben gezeigt, besitzen Motoren eine mechanische und eine elektrische Verzögerung. Die mechanische Verzögerung  $T.me=J/c.R$  ist im Leerlauf ( $c.R=c.R;int$ ) maximal und bei Nenn-Last ( $c.R=c.R;ext$ ) minimal.

- Leerlauf:  $c.R;int=M.0/\Omega.0=20 \mu Nms \rightarrow T.me;max=4,4s$
- Nenn-Last:  $c.R;ext=M.Nen/\Omega.Nen=133 \mu Nms \rightarrow T.me;min=0.65s$

Die elektrische Verzögerung  $T.el=L.A/R.A$  wird 20ms (Zahlenwerte aus Abb. 6-101):

- ➔ mit der Anker-Induktivität  $L.A=18mH$  und
- ➔ dem Anker-Widerstand  $R.A=0,9\Omega$ .

$T.el$  ist klein gegen die mechanische Zeitkonstante  $T.me$ . Deshalb ist der Motor im Wesentlichen eine Verzögerung 1.Ordnung mit der mechanischen Verzögerung  $T.me$ .

Wozu die elektrische Zeitkonstante gebraucht wird, werden wir am Beispiel des Pulsbreiten-Modulators zeigen, mit dem die Motor-Drehzahl verlustarm gesteuert werden kann.

## Der Einschalt-Vorgang ohne Last (Leerlauf)

Der Einschalt-Vorgang ist der einfachste und schnellste Test eines Systems. Er zeigt, dass es sich steuern lässt und mit welcher Verzögerung es reagiert.

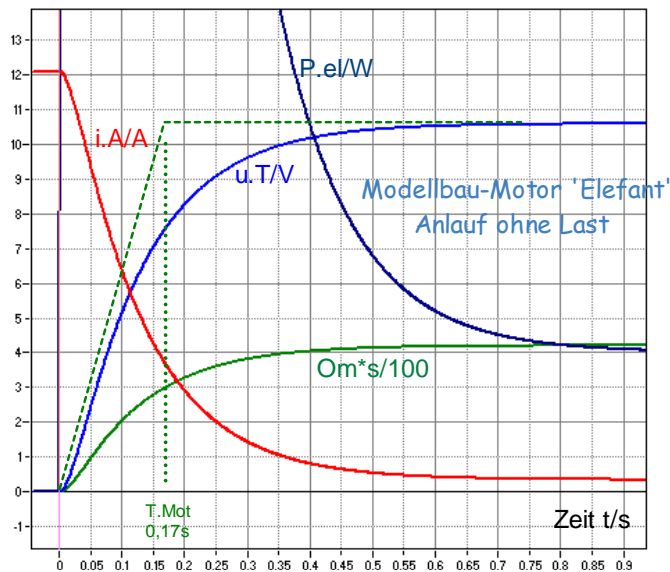


Abb. 6-119 Der Einschalt-Vorgang zeigt die Verzögerung, mit der sich die Drehzahl durch die Anker-Spannung einstellen lässt (hier T.Mot=170ms).

Die Zeitkonstante T ist das Maß für die Verzögerung. Man erhält sie aus dem Schnittpunkt der Anfangs-Tangente mit der Asymptote an den Endwert.

## Die Belastungs-Kennlinie

Wie erwartet, sinkt die Drehzahl des Motors mit steigender Belastung der Welle.

Die simulierte Belastungs-Konstante:

Mit  $\Delta\Omega = \Delta\Omega = \Omega \cdot 0 - \Omega \cdot N_{en} = 90 \text{ rad/s}$  und  $M.L = 50 \text{ mNm}$  wird  $k.L = -\Delta\Omega / \Delta M.L = 1,8 / \text{mNm}$ .

Die aus den Nenn-Daten errechnete Belastungs-Konstante:

Wie oben gezeigt, bestimmt der Anker-Widerstand R.A die Belastungs-Konstante:

$$k.L = -\Delta\Omega / \Delta M.Last = R.A / k.T^2$$

Zahlenwerte:  $R.A = 0,9\Omega$ ;  $k.T = 25 \text{ mVs}$  ->  $k.L = 1,4 (\text{rad/s}) / \text{mNm}$

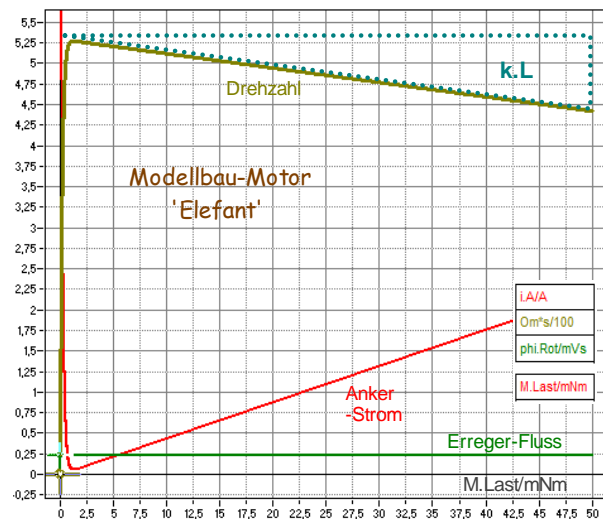


Abb. 6-120 die Belastungs-Kennlinien eines Gleichstrom-Motors mit Permanent-Magnet

## Die Spannungssteuer-Kennlinie

Gezeigt wird die Steuerbarkeit der Drehzahl durch die Anker-Spannung im Leerlauf:

Die Steigung der Kennlinie  $\Omega(u.A)$  ist die Motor-Konstante  $k.M = \Omega.Nen / u.Nen$

Aus der Simulation erhalten wir für  $u.A = 12V$  und  $\Omega.0 = 420 \text{ rad/s}$   
 $k.M = 35 / V\text{s}$

Aus den Nenn-Daten errechnen wir folgende Motor-Konstante:

mit  $\Omega.Nen = 368 \text{ rad/s}$  und  $u.Nen = 12V$  wird  
 $k.M \approx 31 / V\text{s}$

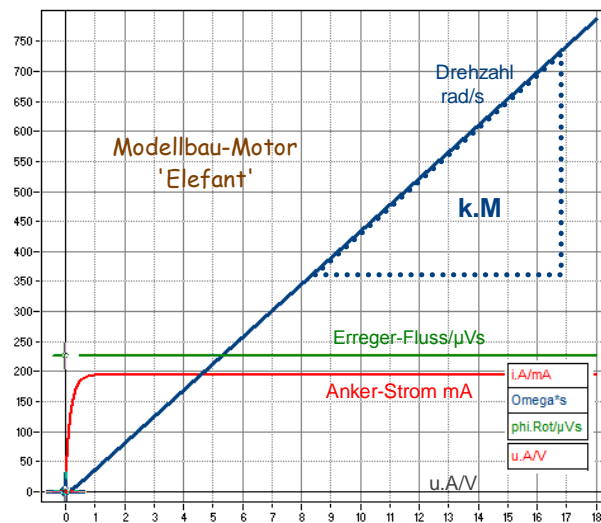


Abb. 6-121 Steuer-Kennlinie eines Gleichstrom-Motors mit Permanent-Magnet

Die Diskrepanz zwischen den simulierten und durch Messung ermittelten Werten kann durch Ungenauigkeiten der Simulations-Parameter erklärt werden.

## Der Gleichstrom-Motor mit Kommutator-Verlusten

Um bei Kommutator-Motoren die gemessenen Wirkungsgrade mit den simulierten in Übereinstimmung zu bringen, muss der Spannungsverlust über dem Kommutator berücksichtigt werden. Das tut die neben-stehende Struktur, indem die **Kommutator-Spannung  $u_{Kom}$**  von der Anker-Spannung abgezogen wird:

$$u_R; A = U_A - u_T - u_{Kom}$$

Kommutator-Spannungen  $u_{Kom}$  sind vom Anker-Strom  $i_A$  fast unabhängig, da ihr mittlerer Widerstand mit steigender Drehzahl immer kleiner wird.

Durch  $u_{Kom} = 1,1V$  für den Modellbau-Motor ‚Elefant‘ konnte der simulierte Wirkungsgrad mit dem gemessenen abgeglichen werden (65%).

Um diese Übereinstimmung zu erreichen, musste die aus den Nenn-daten errechnete Motor-Konstante

$$k_M = \Omega_{Nen} / u_{Nen}$$

noch mit einem Faktor 'korr' korrigiert werden:

$$k_M; korr = Korr * k_M$$

... mit dem Korrektur-Faktor

$$korr = (1 - u_{Kom} / u_T)$$

... mit der Tacho-Spannung  $u_T$  im Nenn-Betrieb. Der Grund dafür ist dem Autor bis dato nicht bekannt.

**Abb. 6-122** Die Struktur des Gleichstrom-Motors mit Kommutator-Verlusten ähnelt der ohne sie mit den beiden oben genannten Unterschieden:

1. der um die Kommutator-Spannung verminderten Ankerspannung und
2. um die um den Korrektur-Faktor verringerte Motor-Konstante

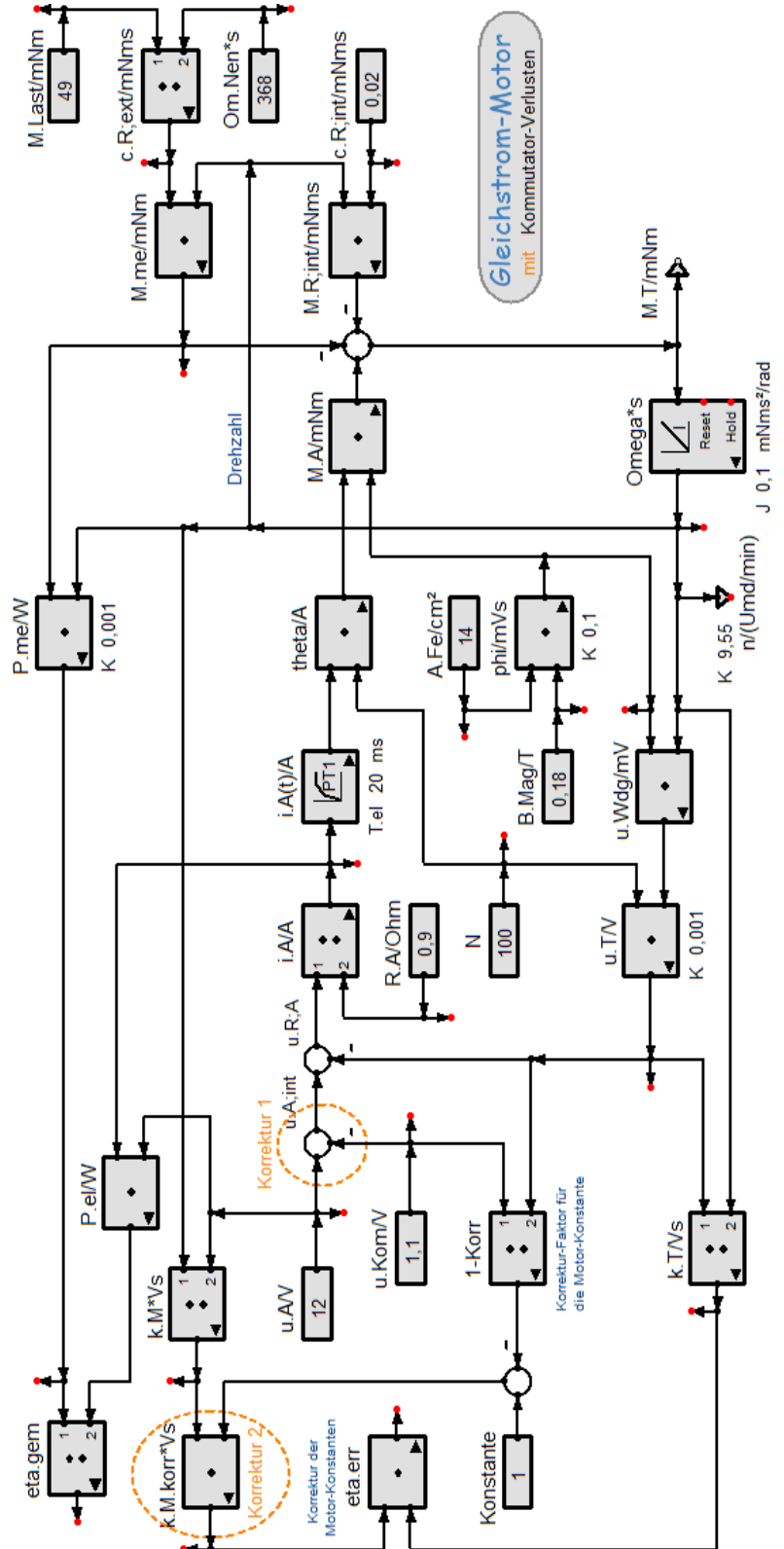


Abb. 6-122 Die Struktur des Gleichstrom-Motors mit Kommutator-Verlusten ähnelt der ohne sie mit den beiden oben genannten Unterschieden:

## Die simulierten Messwerte zum Gleichstrom-Motor mit Kommutator-Verlusten

Die folgende Tabelle zeigt die mit obiger Struktur erzeugten Messwerte im Leerlauf und bei Nenn-Last:

Parameter			
Om.Nen*s	368	Omega*s	355,4
eta.gem	0,64887	eta.err	0,65467
u.Bü/V	1,1	u.A/V	12
R.A/Ohm	0,9	u.Kom/V	2,2
A.Fe/cm²	14	k.T/mVs	25,2
B.Mag/T	0,18	k.M*Vs	29,617
phi/mVs	0,252	P.me/W	16,818
c.R;int/mNms	0,02	i.A/A	2,1599
c.R;ext/mNms	0,13315	k.M.korr*Vs	25,979
N	100	M.me/mNm	47,322

Modellbau-Motor 'Elefant'			
Leerlauf		Nenn-Last	
u.T/V	10,599	u.T/V	8,9561
n/(Umd/min)	4016,8	n/(Umd/min)	3394,1
M.Last/mNm	0	M.Last/mNm	49
P.me/W	0	P.me/W	16,818
i.A/A	0,33396	i.A/A	2,1599
M.me/mNm	0	M.me/mNm	47,322
Omega*s	420,61	Omega*s	355,4

Abb. 6-123 Mit obiger Struktur berechnete Messwerte und die zugehörigen Motor-Parameter: Simulation und Messung – insbesondere die Wirkungsgrade - stimmen gut überein.

### Zum Korrektur-Faktor des Wirkungsgrades mit Kommutator

Durch die Kommutator-Verluste verringert sich der Wirkungsgrad eines Motors. Durch ihre Berechnung können wir zeigen, wie groß der Einfluss ist. Danach kann der Anwender entscheiden, ob sich der höhere Preis eines Motors mit elektronischer Kommutierung bezahlt macht. Zu bedenken ist dabei auch, dass Kommutatoren verschleifen, Elektronik nicht.

Zur Berechnung des Wirkungsgrades wurde in Abb. 6-122 eine Struktur angegeben, bei der sich die Kommutator-Spannung  $u.Kom$  einstellen lässt. Durch die passende Einstellung von  $u.Kom$  kann der simulierte Wirkungsgrad an den gemessenen (Hersteller-Angabe, Abb. 6-101) angepasst werden. Dadurch wird indirekt ermittelt, wie groß die Kommutator-Spannung – die keine messbare Größe ist – sein muss.

Zur Berechnung des Wirkungsgrades  $\eta = k.M;korr \cdot k.T$  ist eine korrigierte Motor-Konstante  $K.M;korr$  und die Tacho-Konstante  $k.T$  zu berechnen. Zur Berechnung der korrigierten Motor-Konstanten wird ein Korrektur-Faktor benötigt, der umso größer wird, je größer die Kommutator-Spannung  $u.Kom$  gegen die Tacho-Spannung  $u.T;Nen$  im Nenn-Betrieb ist:

$$korr = 1 - u.Kom/u.T;Nen$$

Mit dieser Korrektur erhält man die gemessene Motor-Konstante

$$k.M;korr = k.M * korr \quad - \quad \text{mit } k.M = \Omega.Nen/u.Nen$$

Der errechnete Wirkungsgrad

$$\eta.err = k.T * k.M * (1 - u.Kom/u.T)$$

stimmt mit dem gemessenen genau überein. Zahlenwerte dazu finden Sie in obiger Tabelle.



### 6.4.4.1 Drehzahl-Steuerung von Gleichstrom-Motoren

Zur Variation der Drehzahl von Allstrom-Motoren muss entweder die Anker-Spannung oder der Anker-Strom gesteuert werden. Zu zeigen ist, dass

- durch Spannungs-Steuerung die Drehzahl stabilisiert werden kann (harter Betrieb)
- durch Strom-Steuerung das Drehmoment stabilisiert wird (weicher Betrieb).

Welche der beiden Betriebsarten gewählt wird, bestimmt die Anwendung.

Damit die Drehzahl-Steuerung verlustarm erfolgt, benötigt man oszillierende Schalter mit einstellbarem Tast-Verhältnis. Dies sind die Alternativen:

1. Gleichstrom-Betrieb:  
**Pulsbreiten-Modulation** der Anker-Spannung.

2. Wechselstrom-Betrieb:  
**Phasenanschnitt-Steuerung** der Anker-Spannung.

Wir besprechen sie unter 6.5.3 bei der Behandlung des Universal-Motors.

Zu klären sind die Eigenschaften, Vor- und Nachteile dieser Methoden bezüglich ihrer Anwendungen. Diese Punkte können hier nur kurzgefaßt behandelt werden. Ausführlich behandelt werden sie im Kapitel 7 Elektronik.

#### 1. Chopper-Steuerung mittels Pulsbreiten-Modulator

Durch die Steuer-Spannung des Pulsbreiten-Modulators (PWM) wird die mittlere Einschalt-Dauer der Anker-Spannung eingestellt. Wenn die Frequenz des PWM hoch genug ist, mittelt die Trägheit des Motors die Drehzahl.

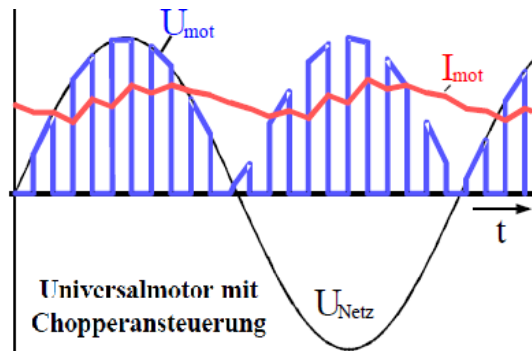


Abb. 6-124 Mittelung der gepulsten Anker-Spannung

**Die Vorteile** der Chopper-Steuerung:

- geringer Stromripple,
- weniger hörbares Geräusch,
- höherer Wirkungsgrad.

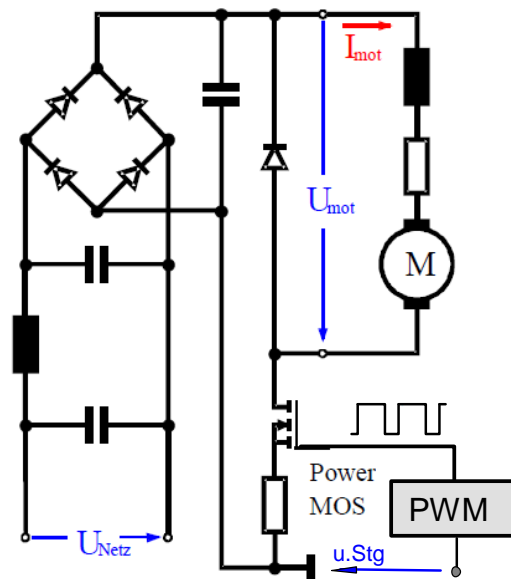


Abb. 6-125 Betrieb eines Gleichstrom-Motors an Wechsel-Spannung: Die Gleichrichtung ermöglicht die Pulsbreiten-Modulation der Motor-Spannung.

**Die Nachteile** der Chopper-Steuerung:

- Schaltfrequenz 20 kHz,
- HF-Filterung erforderlich.

Gegenüber der im Abschnitt ‚Allstrom-Motoren‘ erläuterten Phasenanschnitt-Steuerung im Wechselstrom-Betrieb steigt durch die Chopper-Steuerung der Wirkungsgrad. Dadurch kann der Motor kleiner dimensioniert werden, die Lebensdauer der Kollektoren nimmt zu und der Netzstrom und die Oberschwingungen (Funk-Störungen) sinken.



### Simulation der Drehzahl-Steuerung durch Pulsbreiten-Modulation

Pulsbreiten-Modulatoren (PWM=pulse-width-modulator) sind Rechteck-Oszillatoren, deren Tast-Verhältnis (relative Einschalt-Dauer, duty-cycle) von 0 bis 100% durch eine Steuer-Spannung eingestellt werden kann. Durch Pulsbreiten-modulierte Anker-Spannungen lässt sich die Drehzahl eines Motors verlustarm steuern, denn der dazu erforderliche Schalter arbeitet verlustarm.

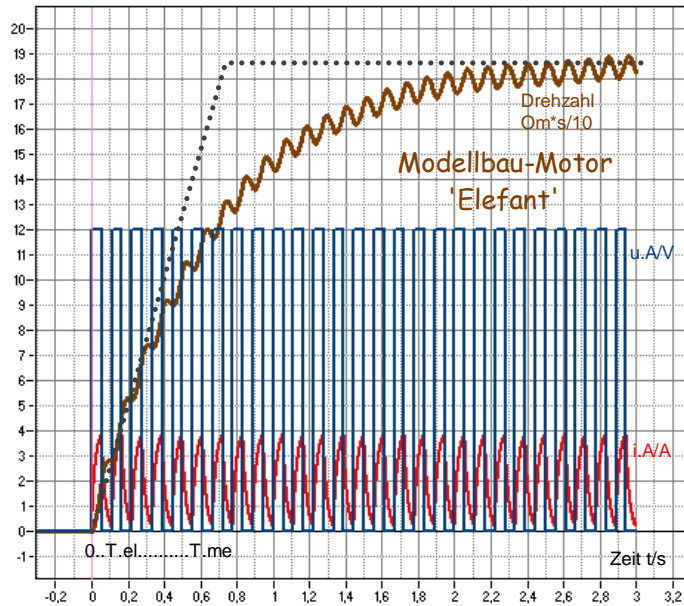


Abb. 6-126 Drehzahl-Steuerung mittels Pulsbreiten-Modulator

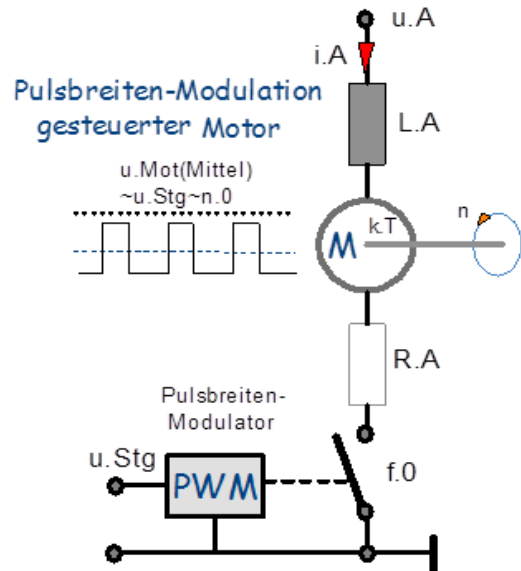


Abb. 6-127 Die Pulsbreiten-Modulation benötigt außer dem Modulator PWM einen elektronischen Leistungs-Schalter.

Die **Frequenz f.0** des PWM-Oszillators ist ein freier Parameter. Sie soll

- einerseits **groß gegen 1/T.me** (den Kehrwert der mechanischen Zeitkonstante) gewählt werden, sodass die Trägheit des Motors die Ankerspannung mittelt und
- andererseits **klein gegen 1/T.el** (den Kehrwert der elektrischen Zeitkonstante) sein, damit der Ankerstrom nicht zu klein wird.

Der beste Kompromiss zur Erfüllung beider Forderungen ist das geometrische Mittel aus der mechanischen und der elektrischen Zeitkonstante:

$$\text{Gl. 6-41 PWM-Oszillator } f.0 = 1/\sqrt{T.me * T.el}$$

Zahlenwerte für den Modellbau-Motor ‚Elefant‘: T.me=650ms; T.el=20ms -> f.0≈9Hz

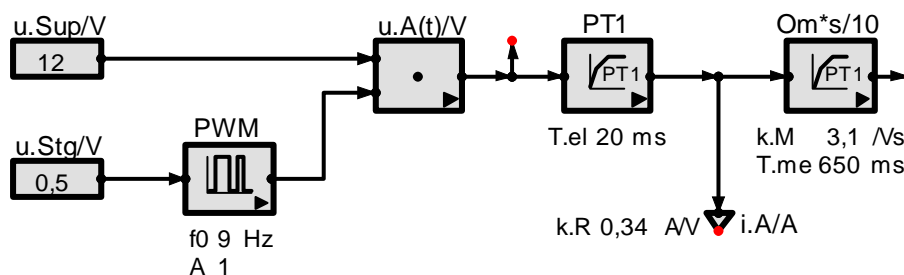


Abb. 6-128 Zur Pulsbreiten-Modulation wird die Nenn-Spannung des Motors mit der Rechteck-Schwingung des PWM-Oszillators multipliziert. Die zugehörige Simulation zeigt die obige Abbildung.

Die Realisierung von Pulsbreiten-Modulatoren finden Sie im Kapitel 8 ‚Elektronik‘.