∫ervoantriebstechnik.de

Verluste der PMSM

Die Verluste der **p**ermanent**m**agnet-erregten **S**ynchron**m**aschine **PMSM** und das Drehzahl-Drehmoment-Diagramm

Revision V02.3

Roland Fetzner

© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Einstieg

Frage:

Wie verändert sich die S1 100% ED Kennlinie im Drehzahl-Drehmoment-Diagramm bei einer zulässigen Übertemperatur von 100 -> 60 -> 30 Kelvin?

© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Agenda:

1. Grundlagen:

1.1 Energiebilanz **G**leichstrom**m**aschine **GM**

1.2 Energiebilanz **p**ermanent**m**agneterregte **S**ynchron**m**aschine **PMSM**

1.3 Einphasiges Ersatzschaltbild

1.4 Leistungsdreieck

2. Thermisches Modell: 1- Körper-Modell

2.1 Verluste + Reibung + Wärme

2.2 Kategorien: konstante und drehzahlabhängige Reibung

2.3 (Um-)Magnetisierungsverluste oder Hystereseverluste?

2.4 Magnetisierungsverluste MV und REMANENZ-SCHWEIF

2.5 Wirbelstromverluste WSV

2.6 Exkurs Ableitungsregel

2.7 Wellendichtring

2.8 Cogging

© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Agenda:

2.9 Austrudelversuch 14,5 Nm Motor

2.10 Austrudelversuch 1,2 Nm Motor

2.11 Leerlaufstrom-Messung 1,2 Nm Motor

2.12 Drehzahl-Drehmoment-Diagramm:

- Kennlinien
- Verluste
- Sättigung
- Zeigerdiagramm
- Abgabeleistung
- Konstruktion Maximalmoment
- Konstruktion 100K – 60K – 30K S1 100% ED Kennlinie
- Konstruktion S1 100% ED Kennlinie (n) über Drehzahl

3. Thermisches Modell: 3- Körper-Modell

3.1 S1-(100K)-Kennlinie im 3-Körper-Modell

3.2 Vorteile des 3-Körper-Modells

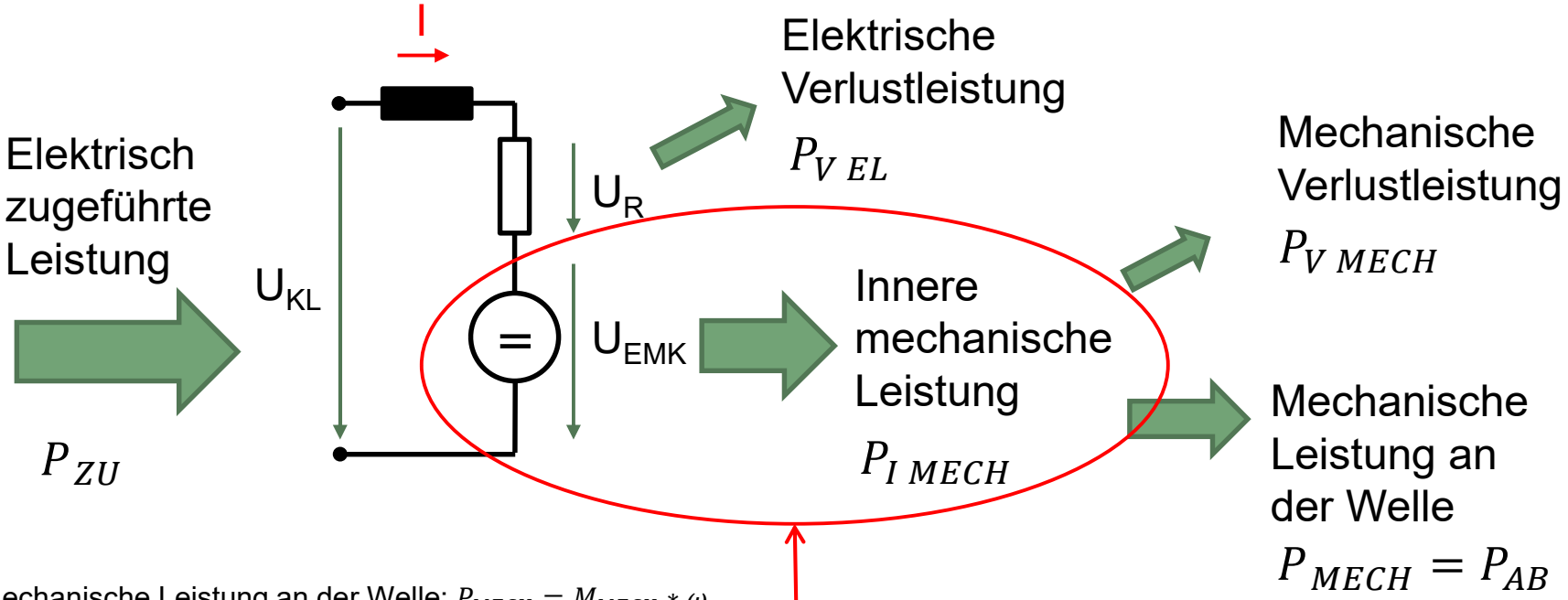
3.2 Nachteile des 3-Körper-Modells

4. Fragen und Antworten

© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Gleichstrommaschine GM

Leistungsbilanz einer Gleichstrommaschine: (ohne elektrische Erregung zB: PMGM)



Mechanische Leistung an der Welle: $P_{MECH} = M_{MECH} * \omega$

Innere Leistung: $P_{I\ MECH} = M_I * \omega$ (inneres Moment) $= KT * I * \omega$ $= U_{EMK} * I$

Mechanische Verluste sind Reibungsverluste der Lager, Bürstenreibung, Lüfter-Verluste bei eigenbelüfteten Motoren, Luftreibung innerhalb des Motorgehäuses / Verwirbelungen, Eisenverluste.

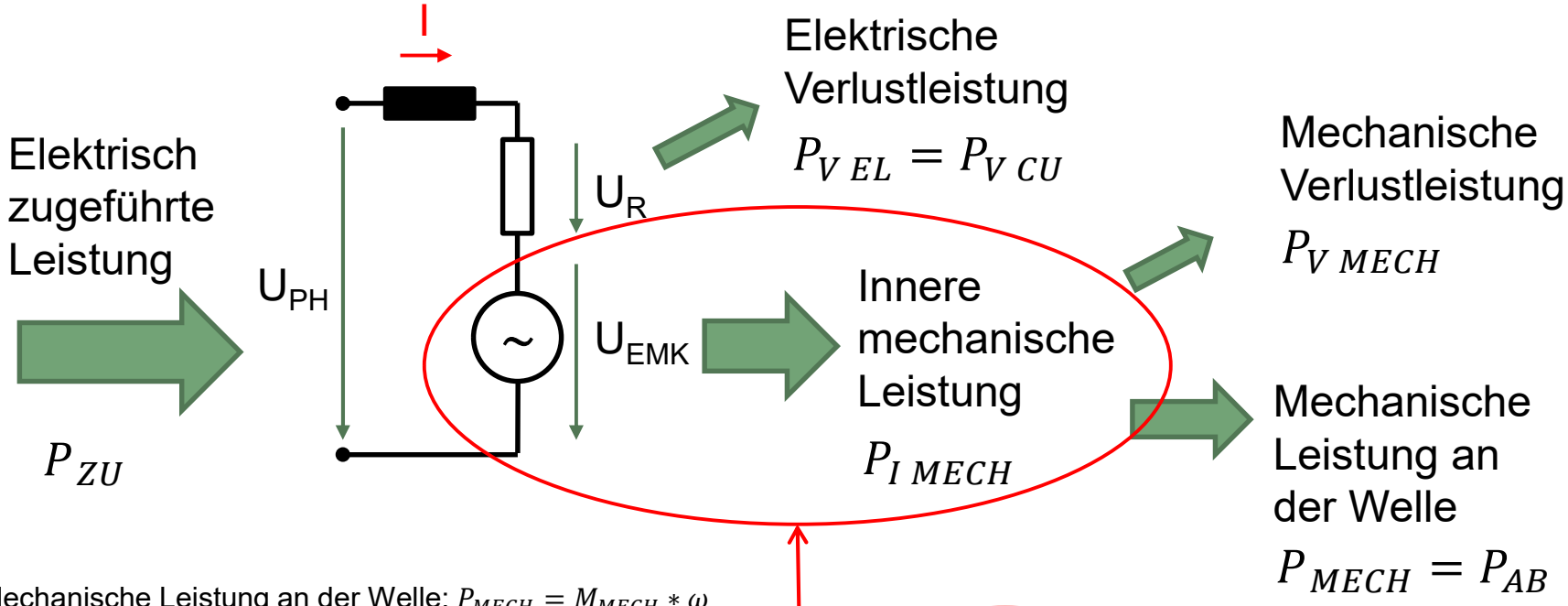
Elektrische Verluste sind Kupferverluste der Wicklung: $P_{V\ CU} = I^2 * R$

verlustfreie Maschine

© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

PMSM

Leistungsbilanz einer **p**ermanent**m**agneterregten **S**ynchron**m**aschine PMSM:



Mechanische Leistung an der Welle: $P_{MECH} = M_{MECH} * \omega$

Innere Leistung: $P_{I\,MECH} = M_I * \omega$ (inneres Moment) $= KT_I * I * \omega$ $= 3 * U_{EMK\,PH} * I$

Mechanische Verluste sind Eisenverluste (Magnetisierungsverluste & Wirbelstromverluste), Reibungsverluste am Wellendichtring, Reibungsverluste der Lager, Luftreibung innerhalb des Motorgehäuses / Verwirbelungen.

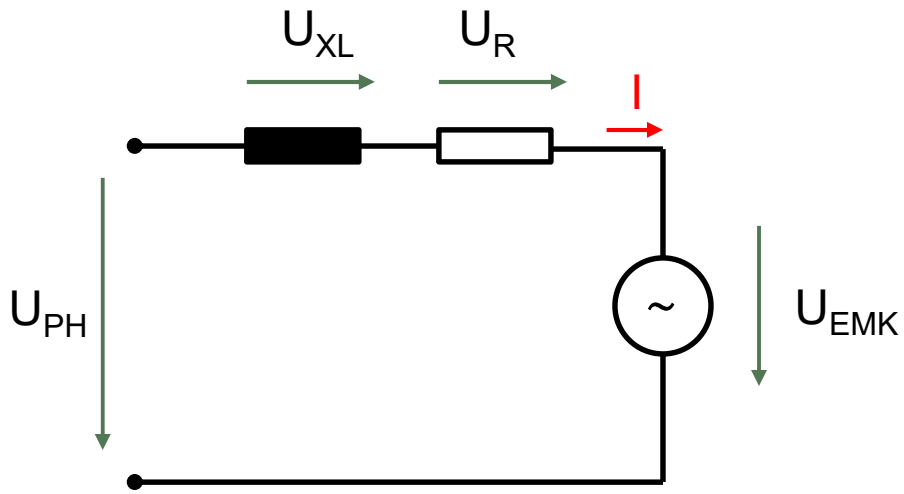
Elektrische Verluste sind Kupferverluste der Wicklung: $P_{V\,CU} = 3 * I^2 * R$

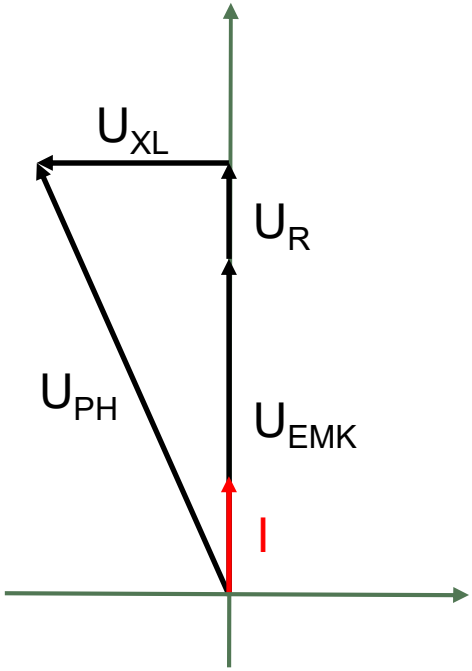
verlustfreie Maschine

© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Einphasige Ersatzschaltbild

Das einphasige Ersatzschaltbild der PMSM in Vektorregelung:



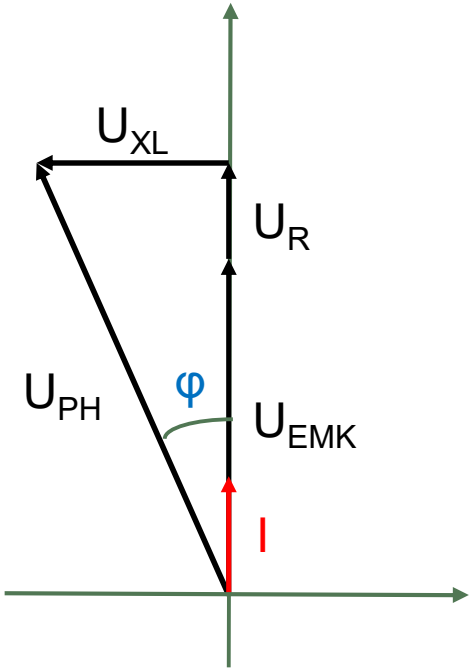


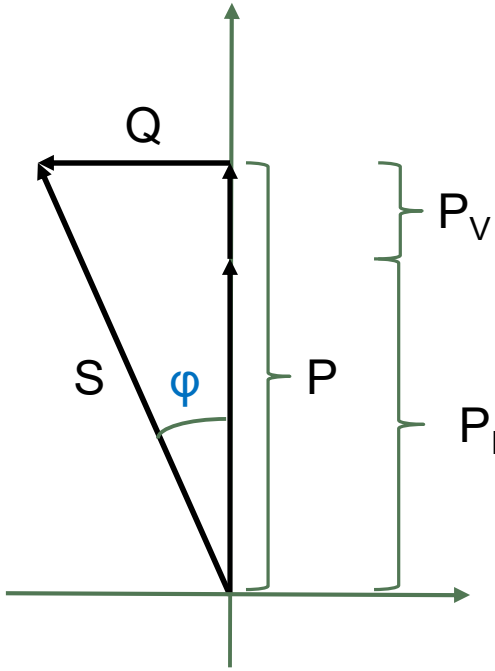
Hinweis: Grundschwingung ohne Oberwellen

© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Leistungsdreieck

Das Leistungs-Dreieck (einphasig):





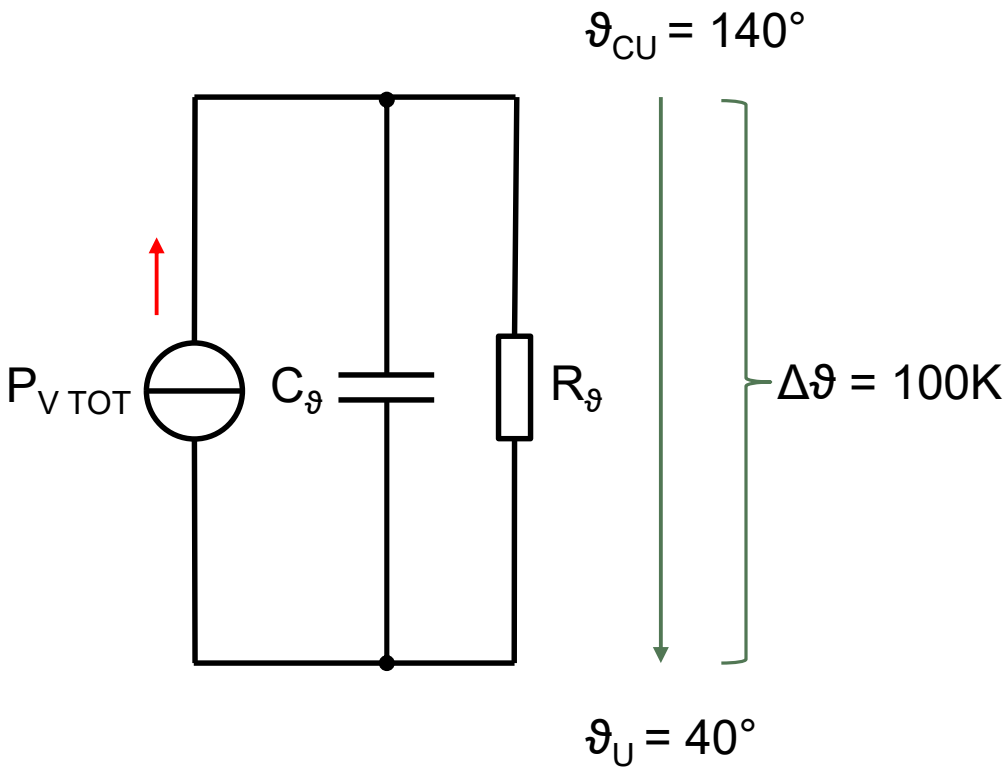
$P_{V\ CU}$

$P_{I\ (=Innen)} = \underbrace{P_{MECH}}_{P_{AB}} + P_{V\ MECH}$

© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Thermisches Modell

Folgende Folien legen das vereinfachte 1-Körper-Modell (1-BODY-MODEL) zugrunde:



Temperatur-Abfall:

$$\Delta\vartheta = P_V * R_\vartheta \qquad \left[W * \frac{K}{W} = K\right]$$

Thermische Zeitkonstante:

$$T_\vartheta = \tau = R_\vartheta * C_\vartheta \qquad \left[\frac{K}{W} * \frac{Ws}{K} = s\right]$$

Wärmekapazität:

$$C_\vartheta = m * c \; \left[kg * \frac{Ws}{kg*K}\right]$$

c = spez. Wärmekapazität

© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Verluste + Reibmoment + Wärme

Verluste	Reibmoment	Wärme
Kupferverluste	kein	Wicklungsdraht, ohmsche Verluste
Lagerverluste	Lagerreibung	Lager
Magnetisierungsverluste / Hystereseverluste	Bremsmoment Remanenzschweif [1]	Eisengefüge
Wirbelstromverluste	Feld der Wirbelströme wirkt Ursache (Rotation) entgegen = Gegenmoment	Blech, ohmsche Verluste
Ventilationsverluste	Reibung der Verwirbelung	Luft
Verluste am Wellendichtring	Reibmoment am Wellendichtring	Welle und Dichtung

[1] Theorie Remanenzschweif von Roland Fetzner

© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Kategorie:

Die mechanischen Verluste werden in zwei Kategorien unterteilt:

a) Verluste die mit der Drehzahl linear bzw. proportional steigen dh. die Reibmomente sind über die Drehzahl konstant:

$$P_{V\,REIB}(\omega) = M_{REIB} * \omega \qquad M_{REIB} = konstant\ über\ n$$

Hierzu gehören:

- (Um)- Magnetisierungsverluste
- Verluste am Wellendichtring
- Verluste der Lager

b) Verluste die mit der Drehzahl über-proportional steigen dh. die Reibmomente steigen mit der Drehzahl:

$$P_{V\,REIB}(\omega) = M_{REIB}(\omega) * \omega \qquad M_{REIB}(n) = f(n)$$

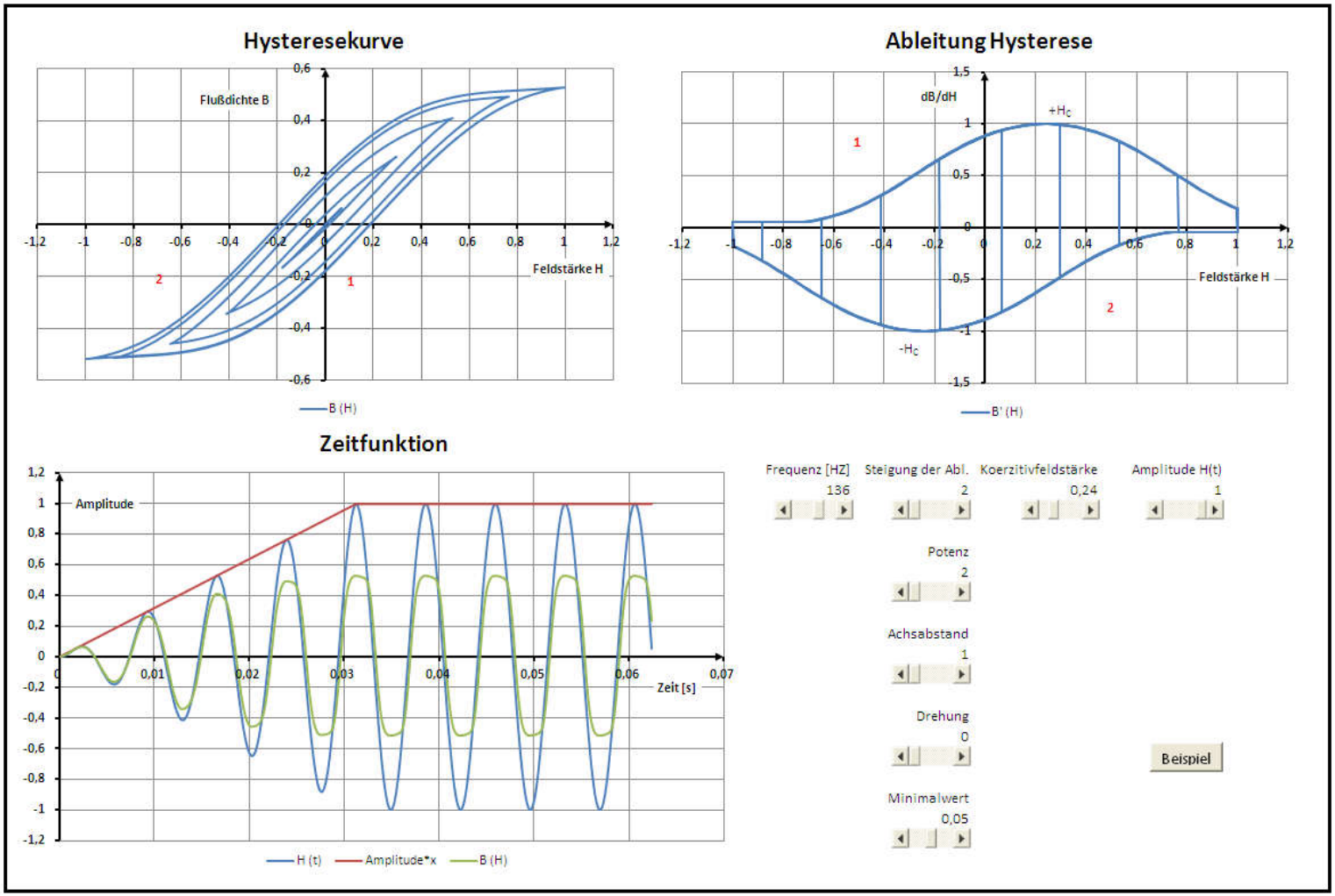
Hierzu gehören:

- Wirbelstromverluste (dominant)
- Geringe Anteile drehzahlabhängiger Reibung aus Lager/Wellendichtring/Ventilation (vernachlässigbar)

© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Magnetisierungsverluste MV

Warum „(Um-)Magnetisierungsverluste“ und nicht „Hystereseverluste“?



© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Magnetisierungsverluste MV

Dreht der Rotor einer **P**ermanent-**M**agnet-Erregten **S**ynchron-**M**aschine **PMSM**, wird das Ständereisen durch das magnetische Feld der Magnete ummagnetisiert. Es entstehen Ummagnetisierungsverluste. Diese entstehen unabhängig davon, ob ein momentbildender Querstrom in der Ständerwicklung fließt oder nicht !!! [1] Die Amplitude des momentbildenden Stroms beeinflusst die Magnetisierungsverluste nicht. ($I < 1/2\ I_{MAX}$)

Die Magnetisierungsverluste sind linear steigend mit der Drehzahl, weil das Eisen mit der Polpaarzahl pp * n innerhalb eines Zeitabschnitts ummagnetisiert wird.

Leitet man die linear steigenden Verluste über die Drehzahl ab (dP_{MV} / dn), so erhält man ein Bremsmoment aus den Ummagnetisierungsverlusten, das über die Drehzahl konstant ist.[2]

[1] Die Ergebnisse aus den Messungen zu den Magnetisierungsverlusten dienen hauptsächlich zur korrekten Berechnung der S1-Kennlinien bei 100% ED. Hier ist der Querstrom zwangsläufig $I_q < I_0$

[2] Theorie Remanenzschweif von Roland Fetzner

© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Magnetisierungsverluste MV

Dieses Bremsmoment wird durch den REMANENZ-SCHWEIF im Ständereisen erzeugt.

Jedes Polmaximum des Rotors z.B. Nordpol hinterlässt im Statoreisen einen Schweif Restmagnetisierung Südpol. Dieser Schweif zieht das voraus-eilende Polmaximum an und es entsteht ein - der Drehrichtung entgegengesetztes - Bremsmoment. [1]

Da der Winkel zwischen Polmaximum und Schweif unabhängig von der Drehzahl ist, ist das Bremsmoment der Ummagnetisierungsverluste drehzahlunabhängig.[1]

[1] Theorie Remanenzschweif von Roland Fetzner

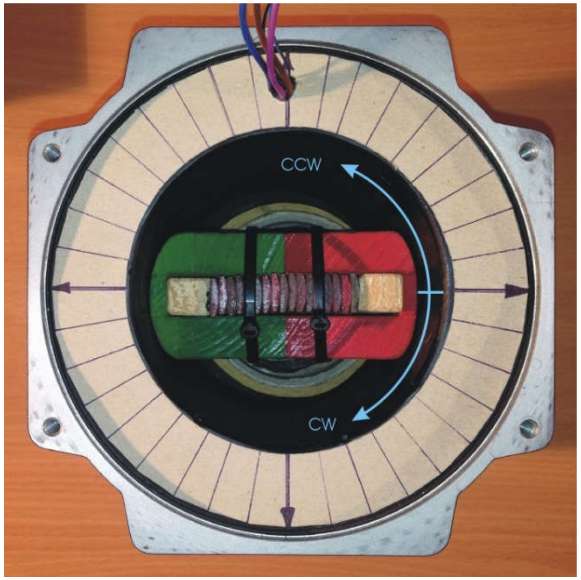
© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

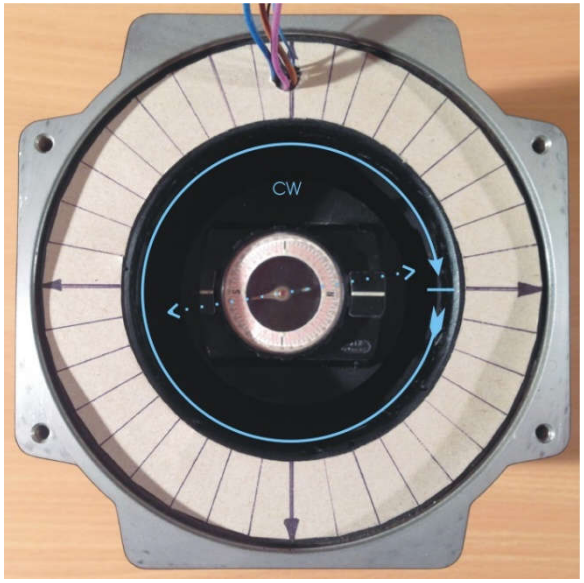
Magnetisierungsverluste MV

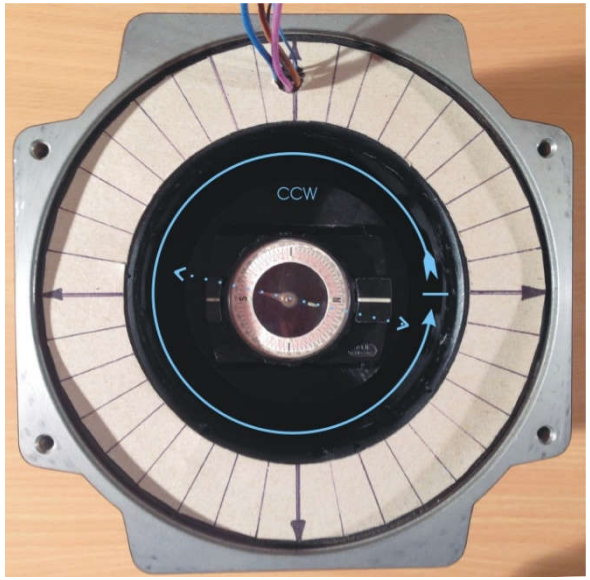
Taucht man einen zwei-poligen Rotor mit Permanentmagneten in ein Ständerblechpacket ein, so richtet sich das magnetische Feld im Eisen auf die Erregung aus.

Dreht man den Rotor um 360° und entnimmt dann den Magneten, verbleibt im Ständereisen eine Restmagnetisierung dessen Ausrichtung der Drehrichtung hinterher-hinkt /-schleppt.

Der REMANENZ-SCHWEIF übt auf den Rotor ein Bremsmoment aus.[1]







© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Wirbelstromverluste WSV

Rotieren die Läufer-Magnete, so werden im Ständereisen Wirbelströme induziert und es entstehen Wirbelstromverluste. Auch hier nimmt der momentbildende Strom keinen Einfluss. [1] ($I < 1/2\ I_{MAX}$)

Die Wirbelstrom-Verluste steigen mit der Drehzahl $n^{1,6}$ bis n^2 - wie man aus der Fachliteratur zu diesem Thema entnehmen kann.

Leitet man die mit der Potenz $n^{1,6}$ bis n^2 wachsenden Wirbelstrom-Verluste über die Drehzahl ab (dP_{WSV} / dn), so erhält man das Bremsmoment der Wirbelstromverluste die mit der Drehzahl $n^{0,6}$ bis n^1 eingehen. Dieses Bremsmoment erklärt sich, weil die Wirbelströme wiederum ein magnetisches Feld erzeugen, das der Rotation (der Ursache) entgegenwirkt.

[1] Die Ergebnisse aus den Messungen zu den Wirbelstromverlusten dienen hauptsächlich zur korrekten Berechnung der S1-Kennlinien bei 100% ED. Hier ist der Querstrom zwangsläufig $I_q < I_0$

© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Exkurs 1 Mathematik

Ableitungsregeln (Potenzregel):

$$f(x) = x^n \quad \rightarrow \quad f'(x) = n * x^{n-1}$$

Beispiel Reibung und Magnetisierungsverluste:

$$P_{V\,REIB}(\omega) = M_{REIB} * \omega^1 \quad \rightarrow \quad P_{V\,REIB}{}'(\omega) = M_{REIB} * 1 * \omega^0 \quad = M_{REIB}$$

$$P_{V\,MV}(\omega) \quad = M_{MV} \quad * \omega^1 \quad \rightarrow \quad P_{V\,MV}{}'(\omega) \quad = M_{MV} \quad * 1 * \omega^0 \quad = M_{MV}$$

Beispiel Wirbelstromverluste:

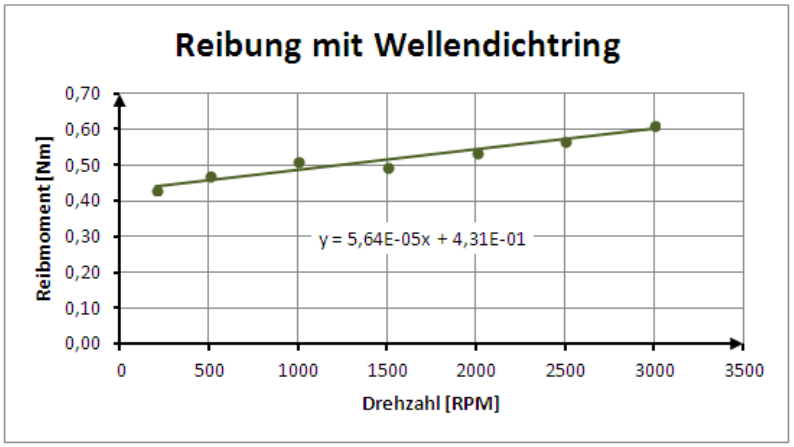
$$P_{V\,WSV}(\omega) = K_{WSV} * \omega^2 \quad \rightarrow \quad P_{V\,WSV}{}'(\omega) = K_{WSV} * 2 \quad * \omega^1$$

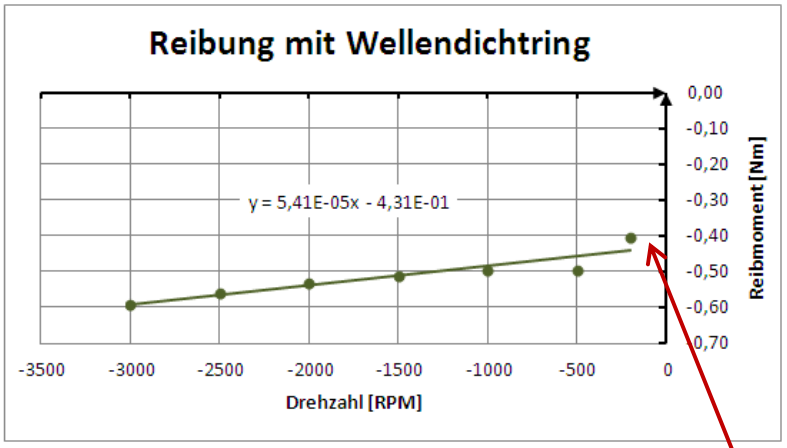
$$P_{V\,WSV}(\omega) = K_{WSV} * \omega^{1,6} \quad \rightarrow \quad P_{V\,WSV}{}'(\omega) = K_{WSV} * 1{,}6 * \omega^{0,6}$$

© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Wellendichtring

Die mechanischen Verluste (= Gesamtverluste - Kupferverluste) lassen sich auf dem Prüfstand durch Drehmoment-Messung bestimmen. Eine Antriebsmaschine treibt den Prüfling (mit offenen Klemmen) an der Welle an und man ermittelt das Gegenmoment das der Prüfling ausübt.





Jetzt zerlegt man in konstante und drehzahlabhängige Reibung:

Die konstante Reibung ist 0,431 Nm.

Groß wegen Wellendichtring

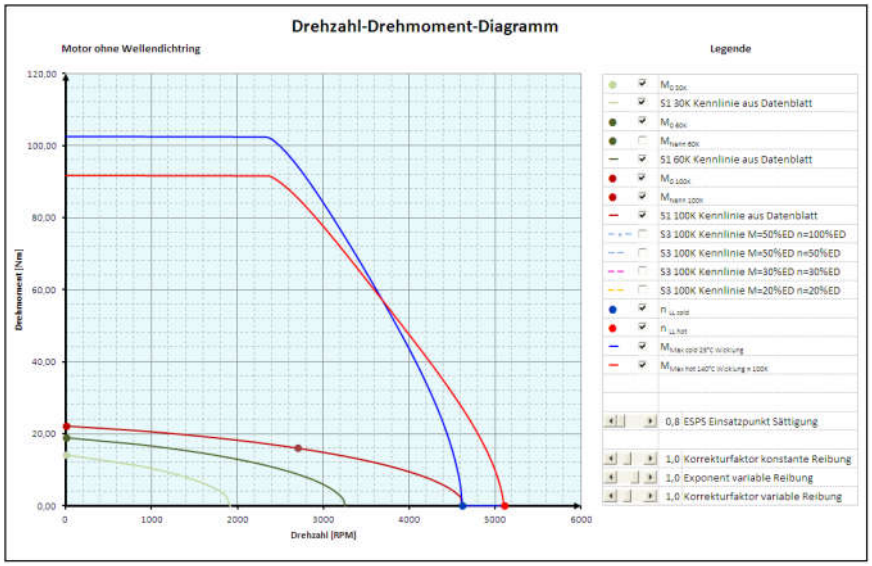
Die drehzahlabhängige Reibung ist ~0,055 Nm / kRPM.

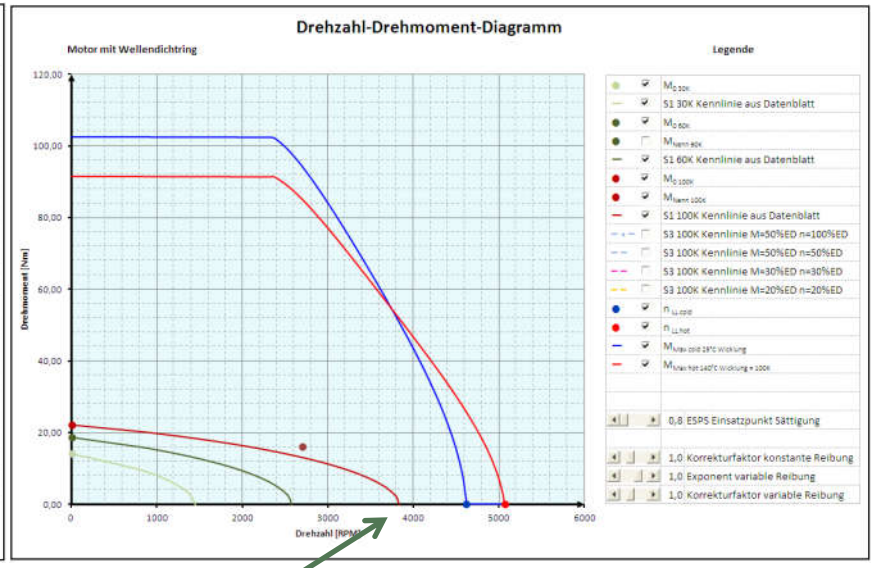
$$P_{V\,MECH}(3000RPM) = 0{,}6Nm * 2\pi * \frac{3000}{60s} = 188W \;\; \sim 73\% \; (P_{V\,TOT} = 258W)$$

© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Wellendichtring

Einfluss auf die S1 100K Kennlinie im Drehzahl-Drehmoment-Diagramm:





Berechnung der Drehzahl, bei der die mechanischen Verluste $P_{V\,TOT}$ erreichen:

$$P_{V\,TOT} = \left(\frac{0{,}055Nm}{kRPM} * n + 0{,}431Nm\right) * 2\pi * n$$ -> quadratische Gleichung

Ergebnis : $n = 3837\ RPM$

© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Cogging

Die Messung der Bremsmomente ist gerade bei kleinen Drehzahlen schwierig, weil das Cogging-Moment die Messung überlagert. Die Amplitude des Cogging ist in ähnlicher Größenordnung (meist sogar etwas größer) als die Reibung.

$$\int_{0°}^{360°} M_{Cogging} = 0 \qquad \text{aber} \qquad M_{Cogging\,Eff} > 0$$

Wird das Bremsmoment mit einer Drehmoment-Meßdose gemessen, so ist zwingend eine FFT (über M und n) erforderlich damit der Gleichanteil extrahiert werden kann.

Wird der Prüfling mit einer Antriebsmaschine in Drehzahlregelung angetrieben, kann der gemessene Effektivstrom der Antriebsmaschine (abzüglich Leerlaufstrom ohne Prüfling) nicht zur Ermittlung der Reibmomente dienen, weil der Effektivwert des Coggings die Messung verfälscht.

© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Austrudelversuch

Austrudelversuch:

Den typischen Brems-Moment-Verlauf der Wirbelstromverluste und der Ummagnetisierungsverluste kann man auch leicht mit dem Austrudelversuch nachweisen.

TIP: Der Austrudelversuch sollte mit 100K Wicklungstemperatur gemacht werden, damit

- sich im Eisen (Blechpacket) Nenn-Temperatur einstellt. (Der ohmsche Widerstand der Bleche ist temperaturabhängig und damit enthalten auch die Wirbelstromverluste den Temperatur-Koeffizient von Eisen.)
- der temperaturabhängige Fluss der Magnete die Nenn-Magnetisierung erzeugt.

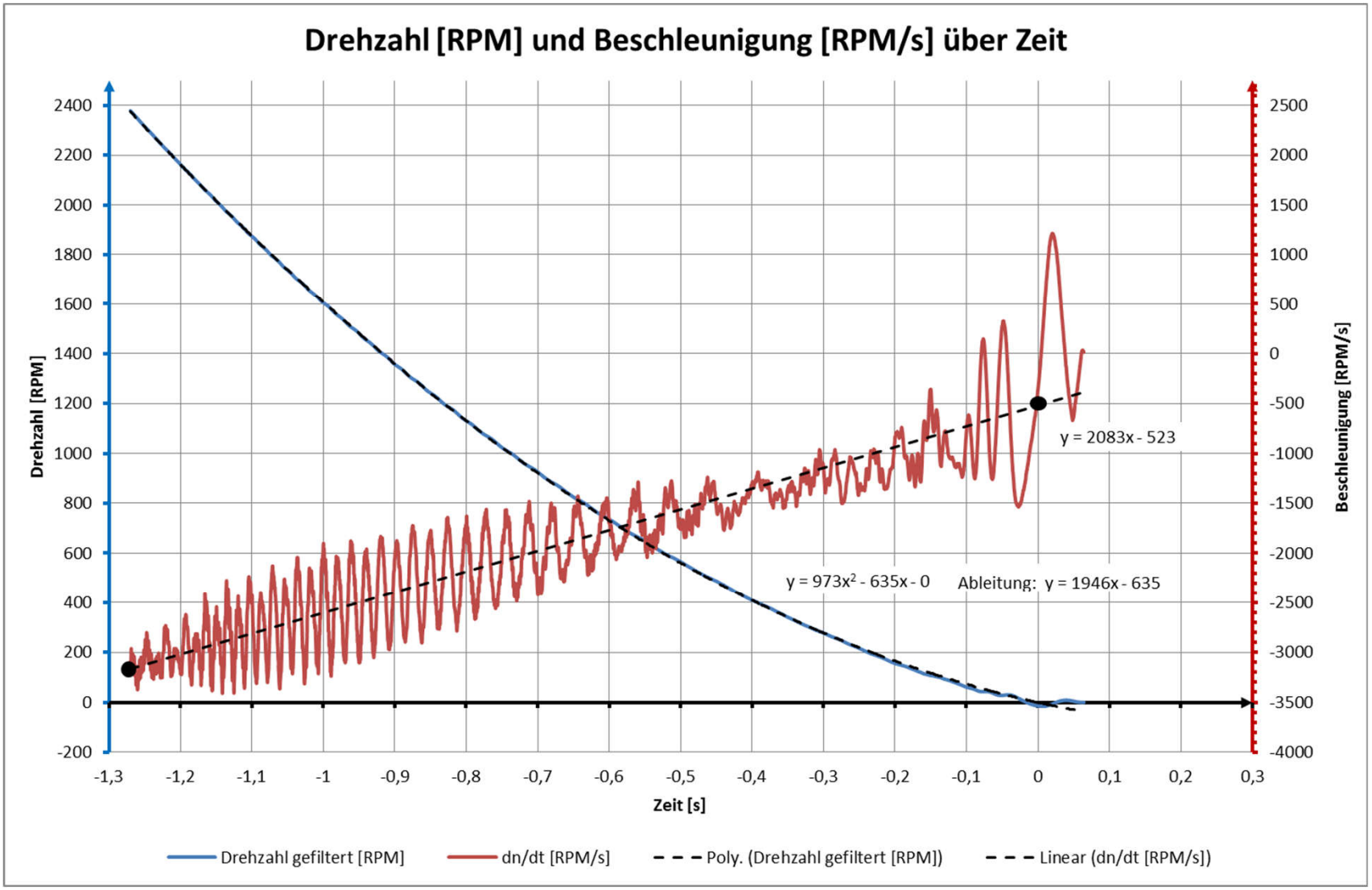
© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Austrudelversuch

In der Betriebsart "Drehzahlregelung" stellt man eine möglichst hohe Drehzahl ein und deaktiviert den Servoverstärker. Während der Motor austrudelt wird die Position über der Zeit gemessen und in EXCEL exportiert. Dann berechnet man die erforderlichen Größen und stellt diese in Abhängigkeit der Drehzahl dar. Das Trägheitsmoment des Motors muss (möglichst genau) bekannt sein.

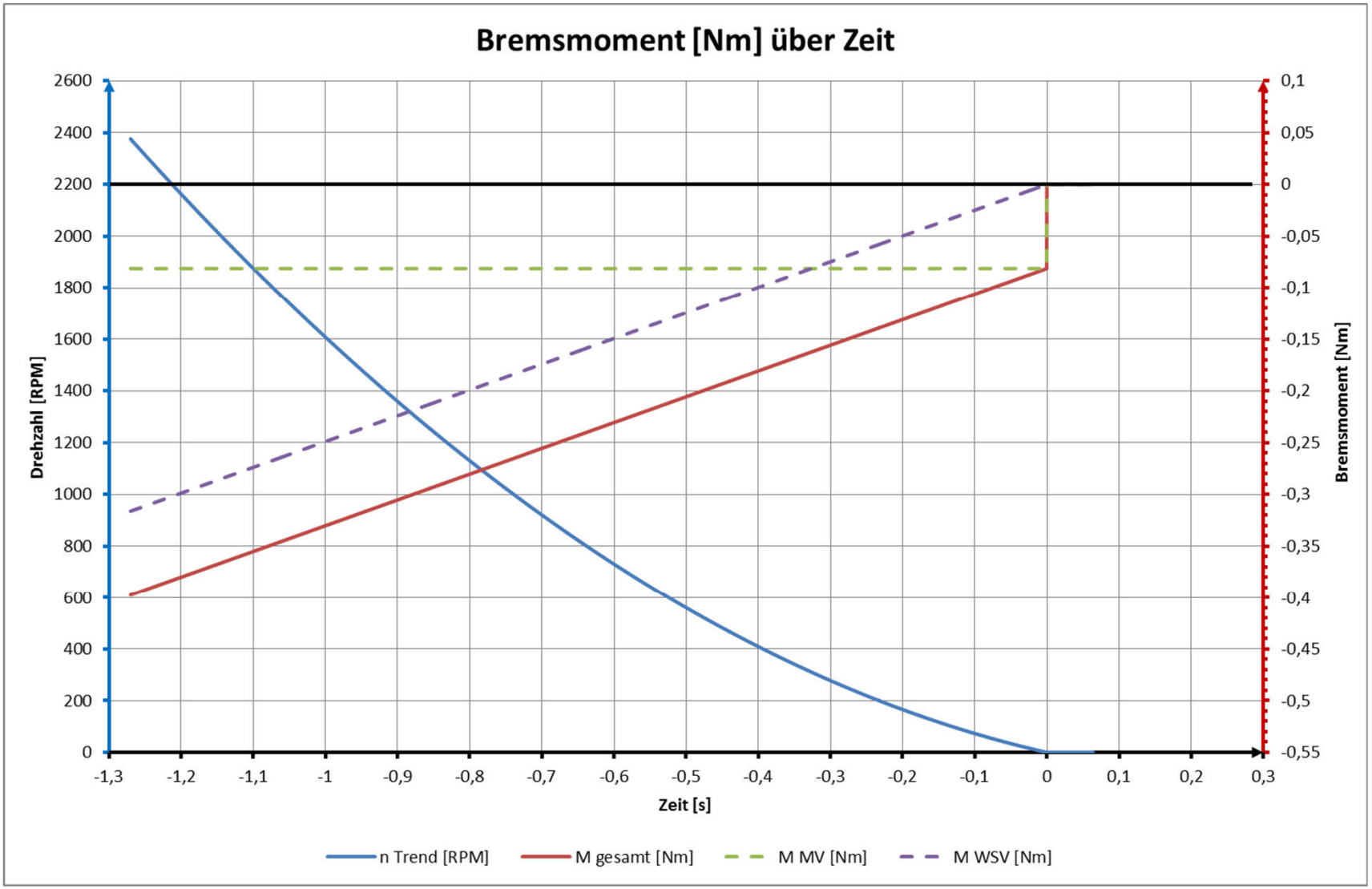
© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Austrudelversuch 14,5 Nm Motor



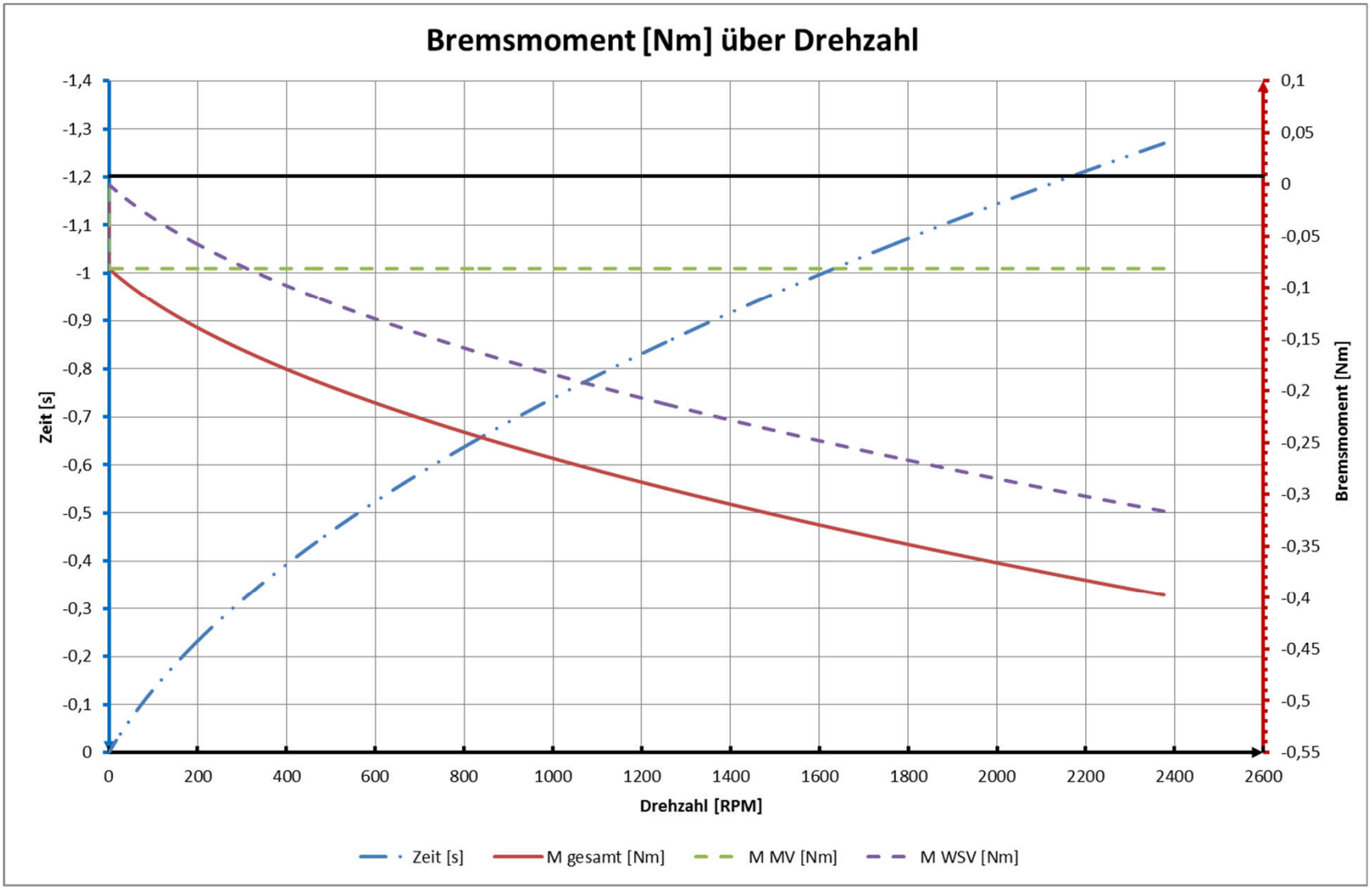
© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Austrudelversuch 14,5 Nm Motor



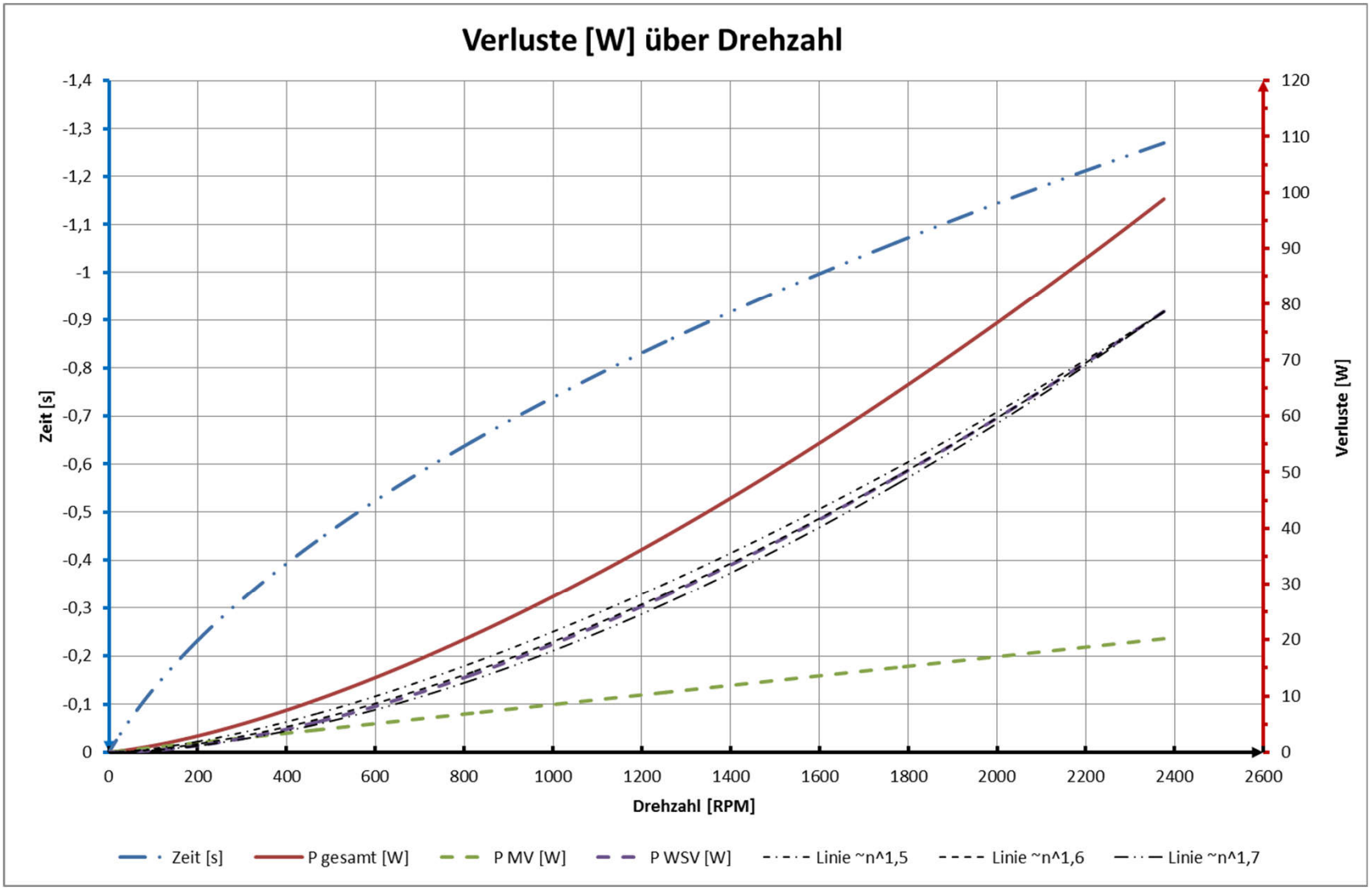
© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Austrudelversuch 14,5 Nm Motor



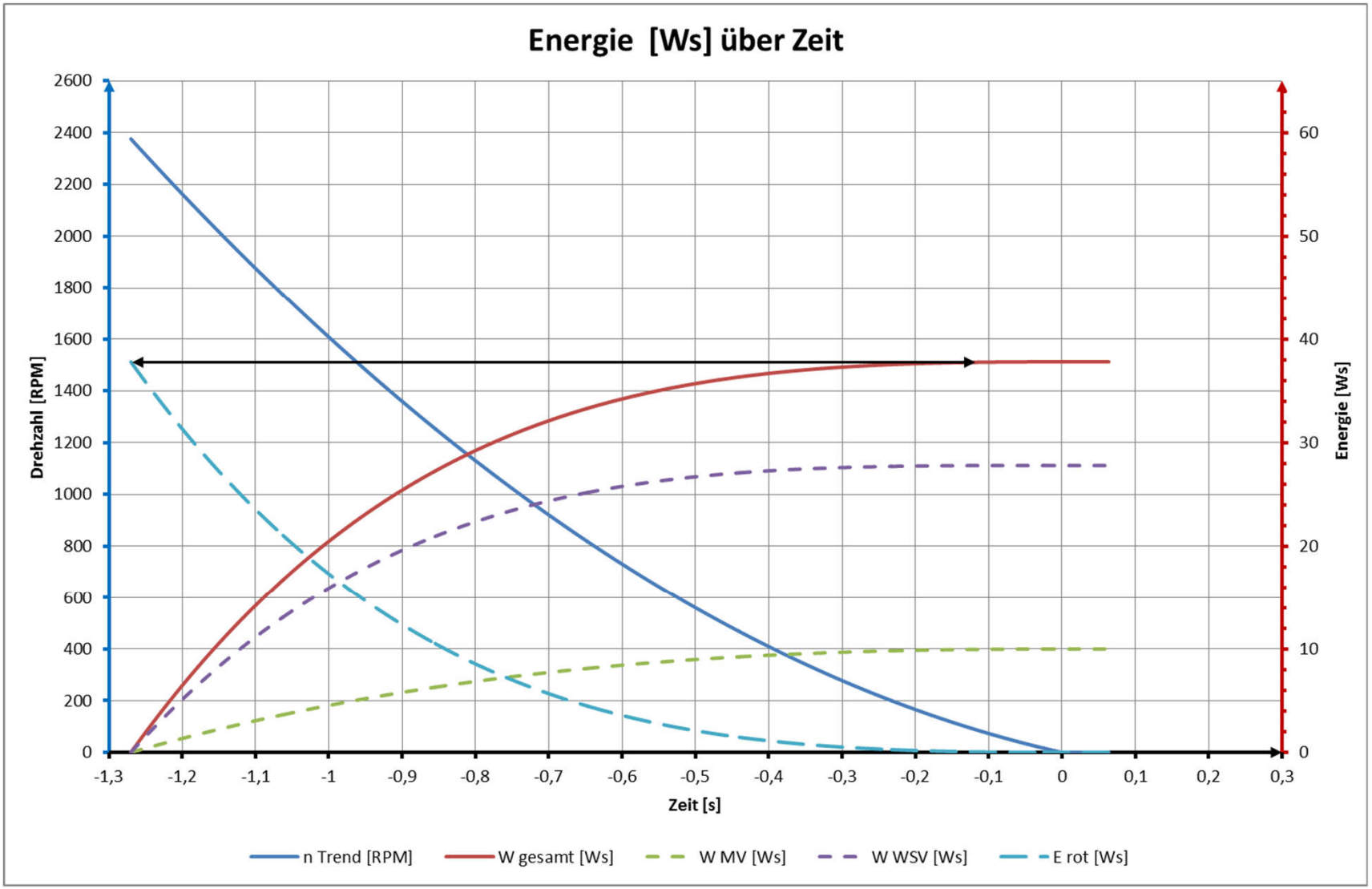
© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Austrudelversuch 14,5 Nm Motor



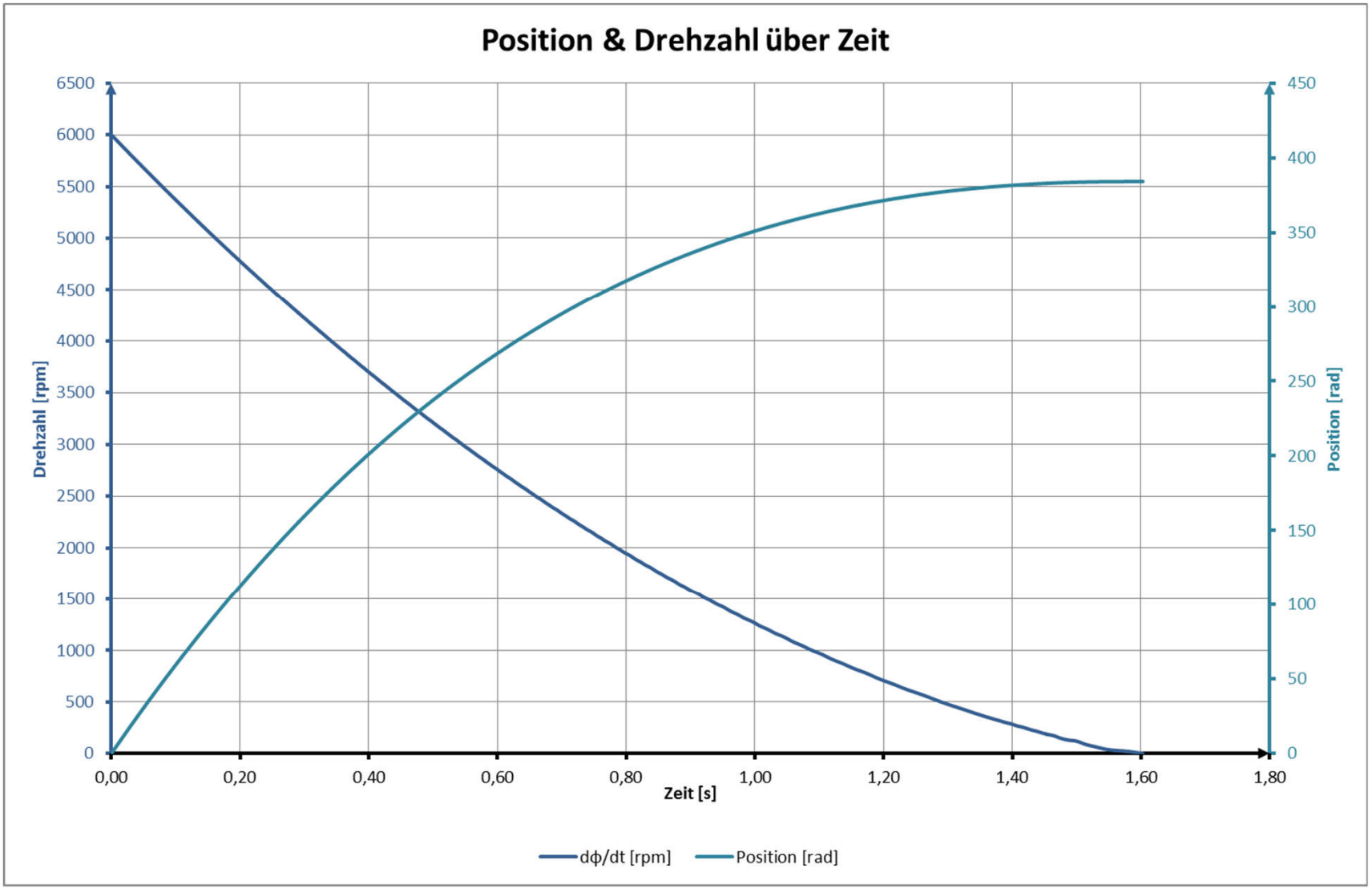
© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Austrudelversuch 14,5 Nm Motor



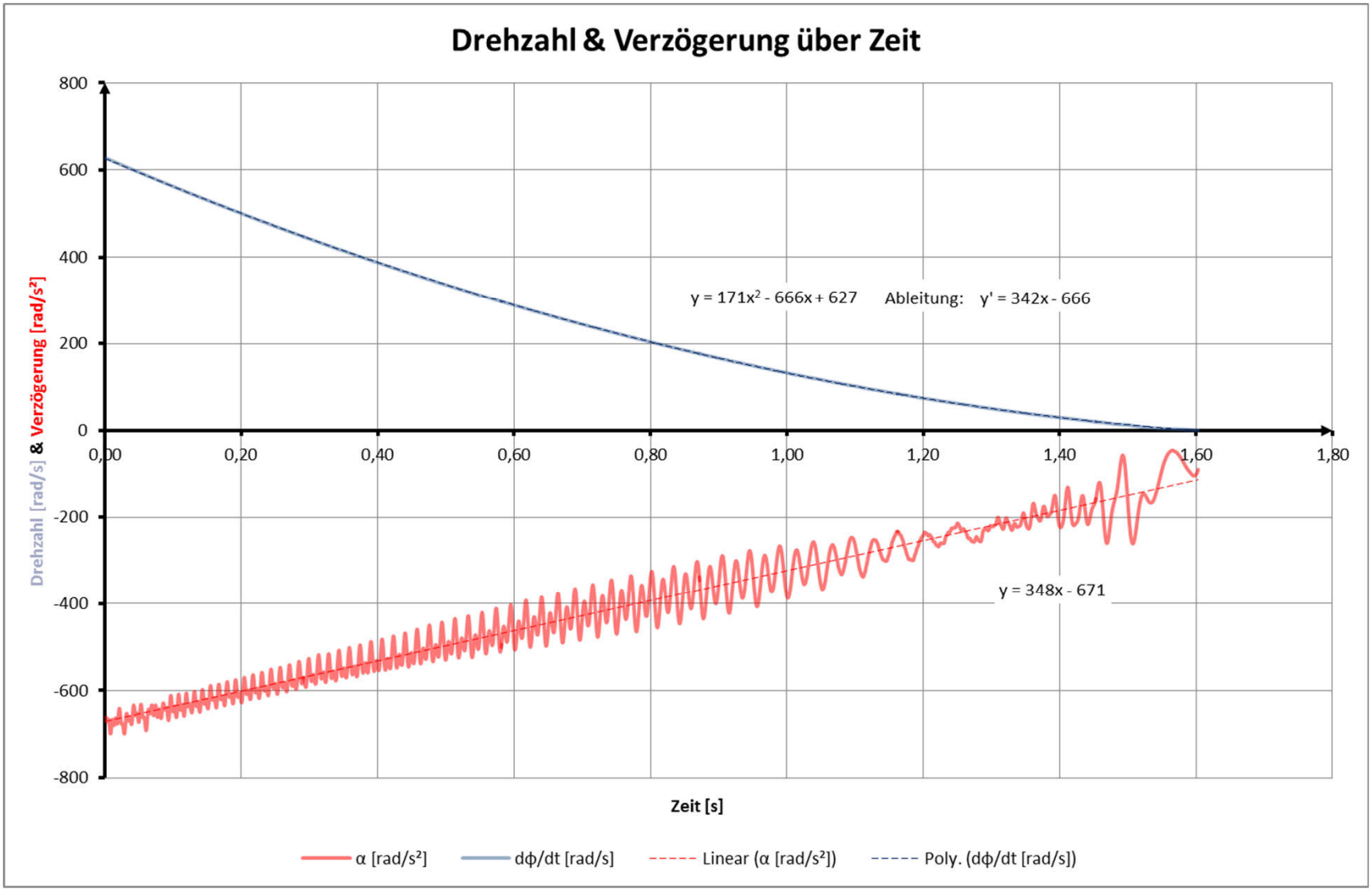
© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Austrudelversuch 1,2 Nm Motor



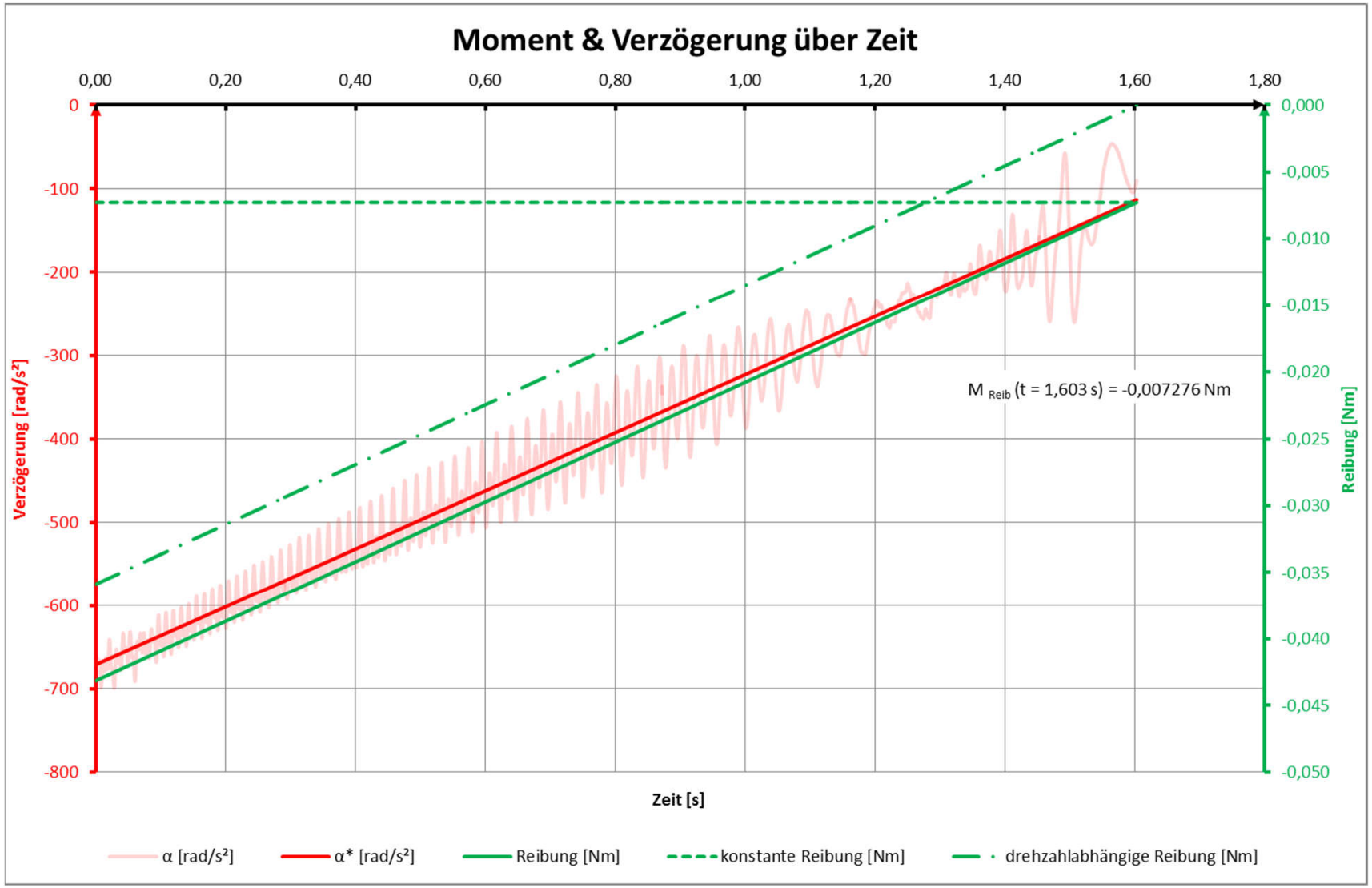
© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Austrudelversuch 1,2 Nm Motor



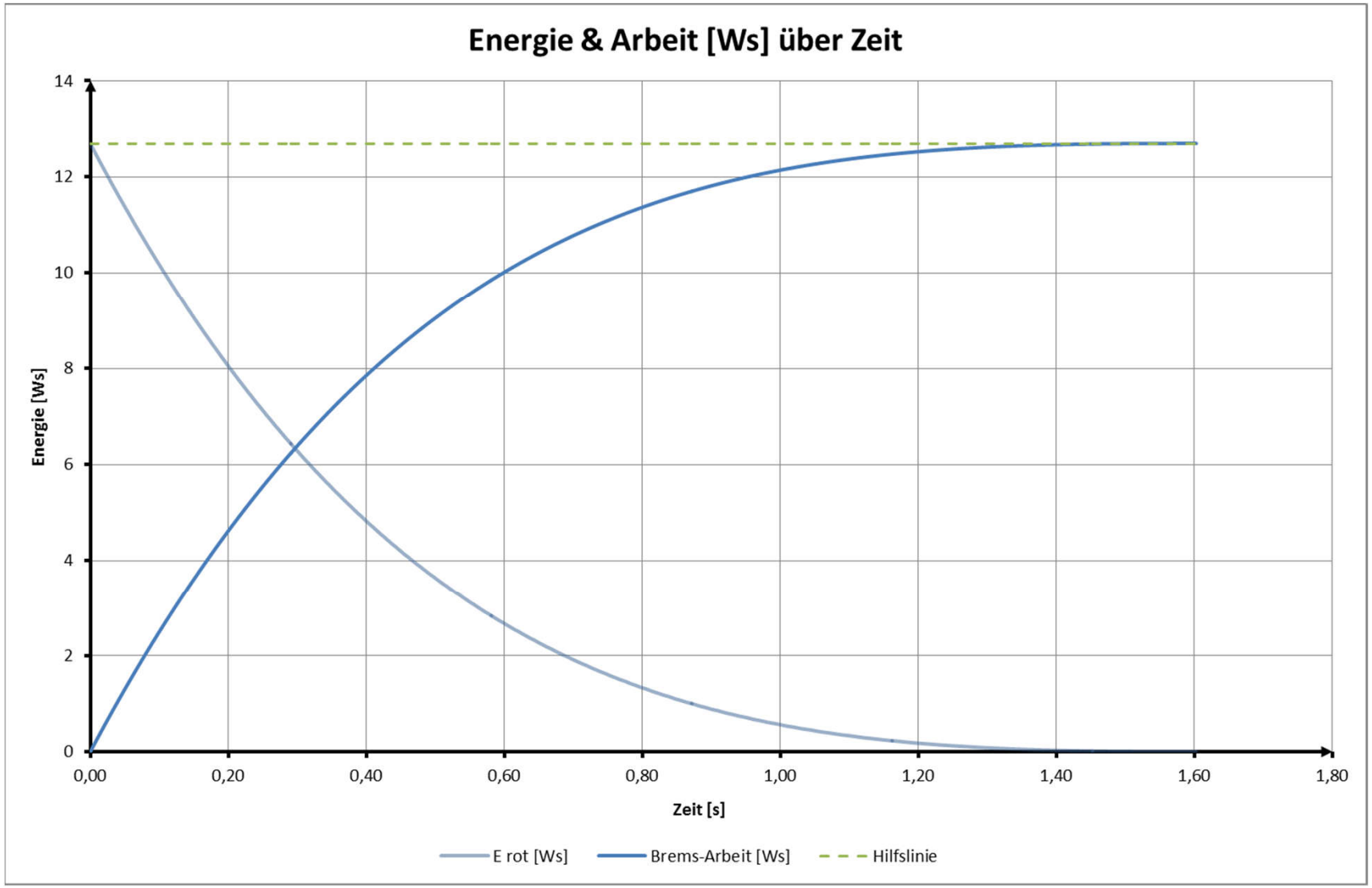
© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Austrudelversuch 1,2 Nm Motor



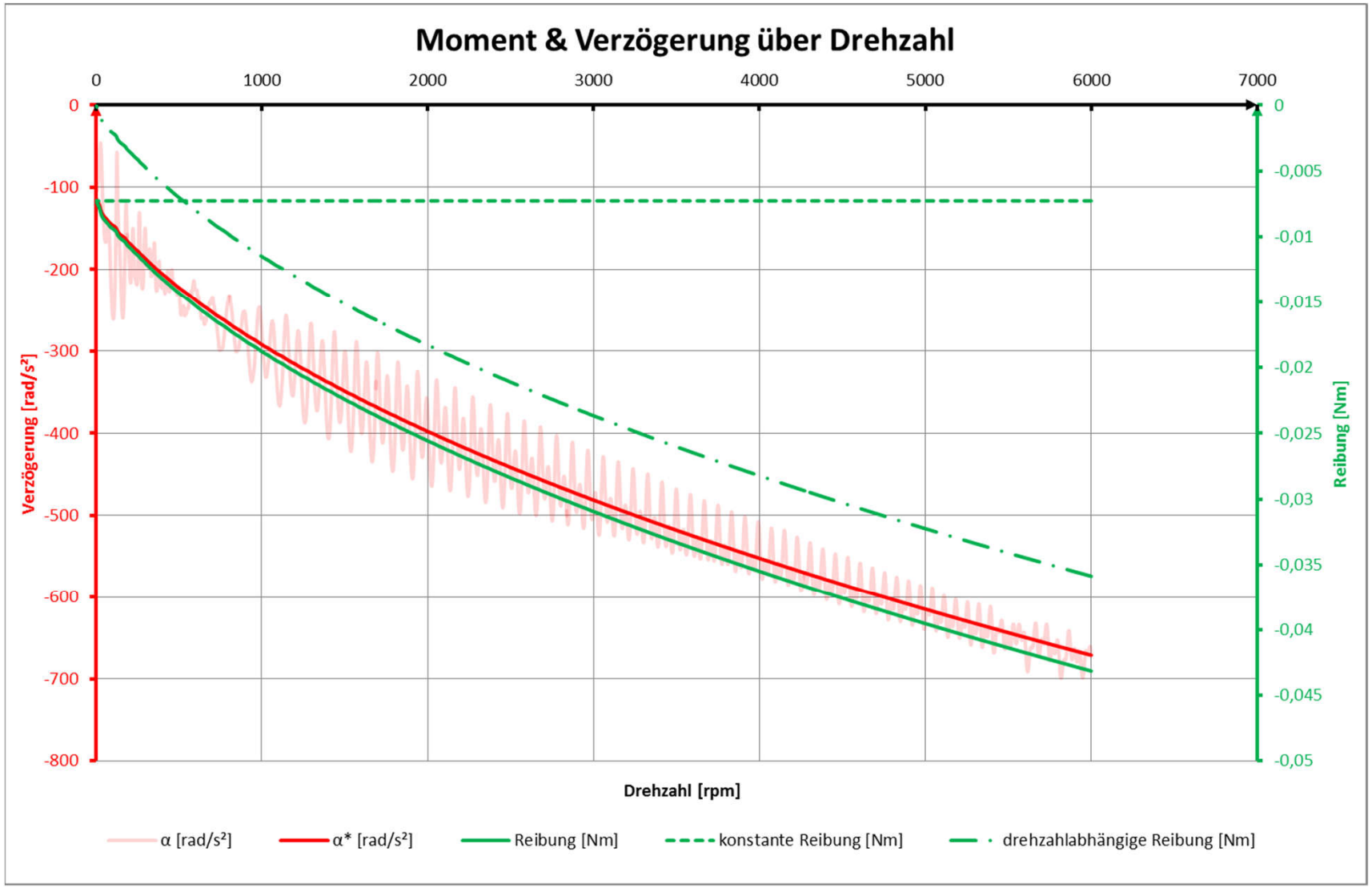
© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Austrudelversuch 1,2 Nm Motor



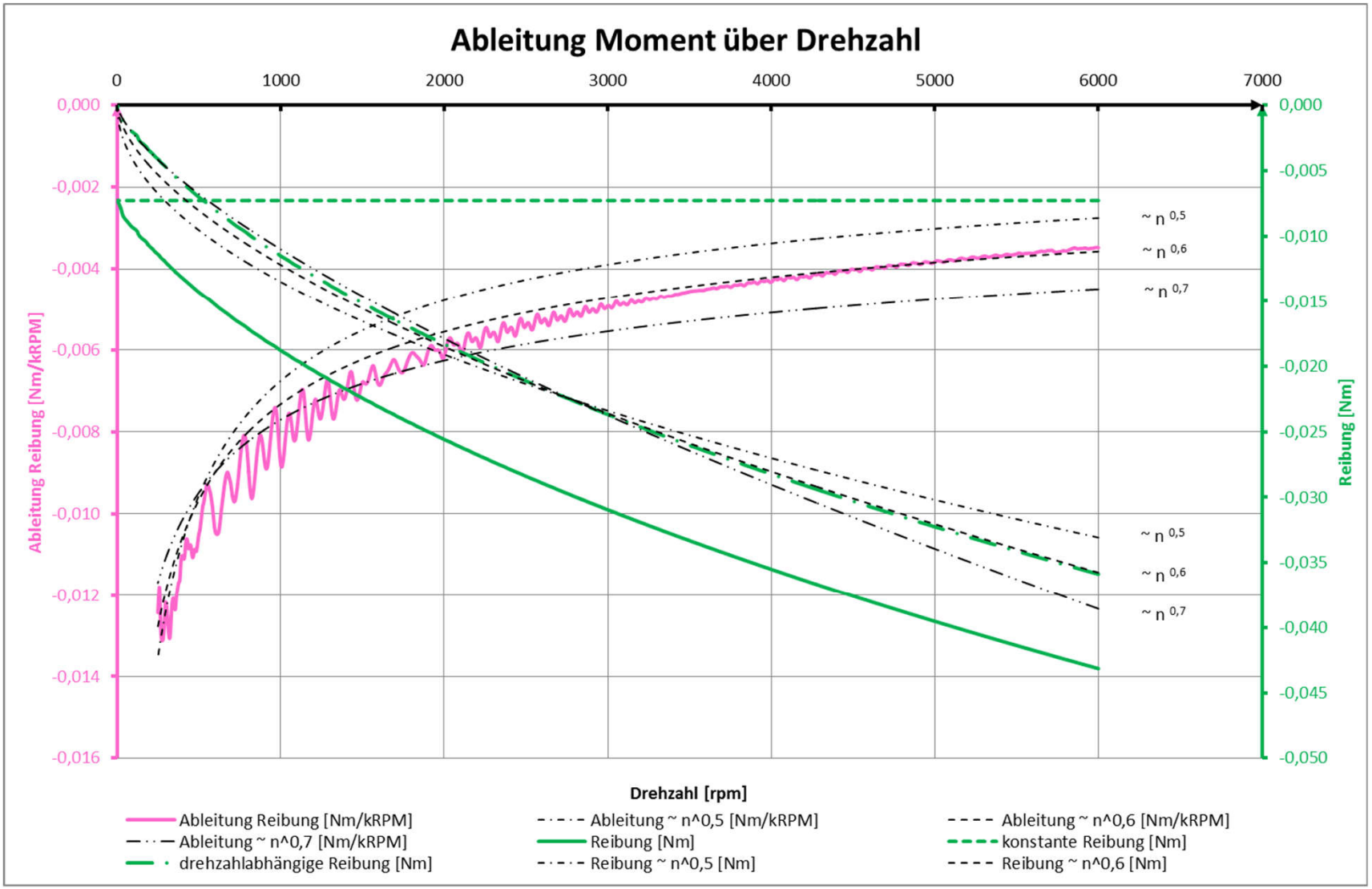
© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Austrudelversuch 1,2 Nm Motor



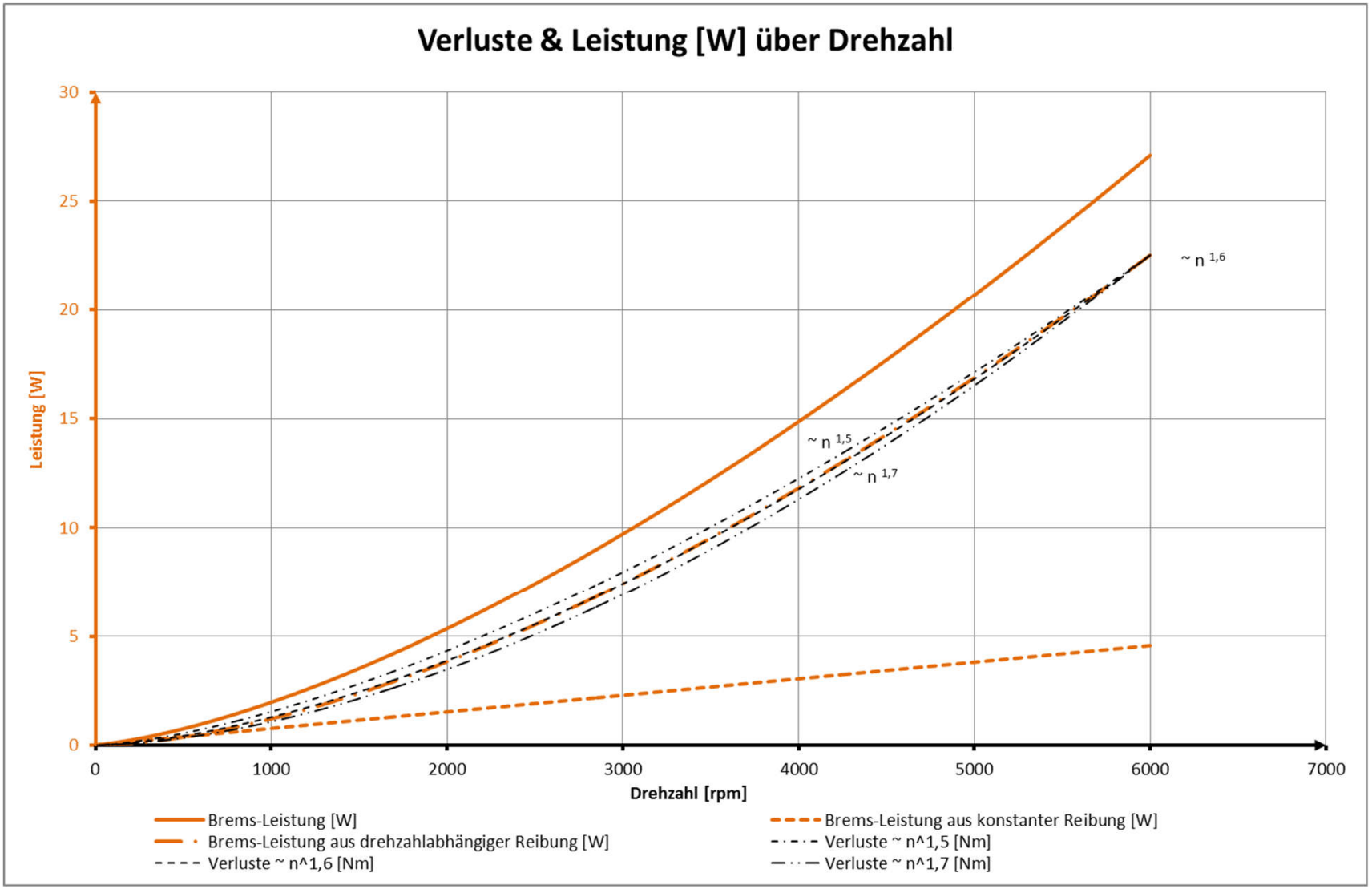
© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Austrudelversuch 1,2 Nm Motor



© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Austrudelversuch 1,2 Nm Motor



© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Stromgrenze 1,2 Nm Motor

Messung des Leerlaufstroms:

Ist das Trägheitsmoment des Motors nicht bekannt, kann die Messung des Leerlaufstroms durchgeführt werden.

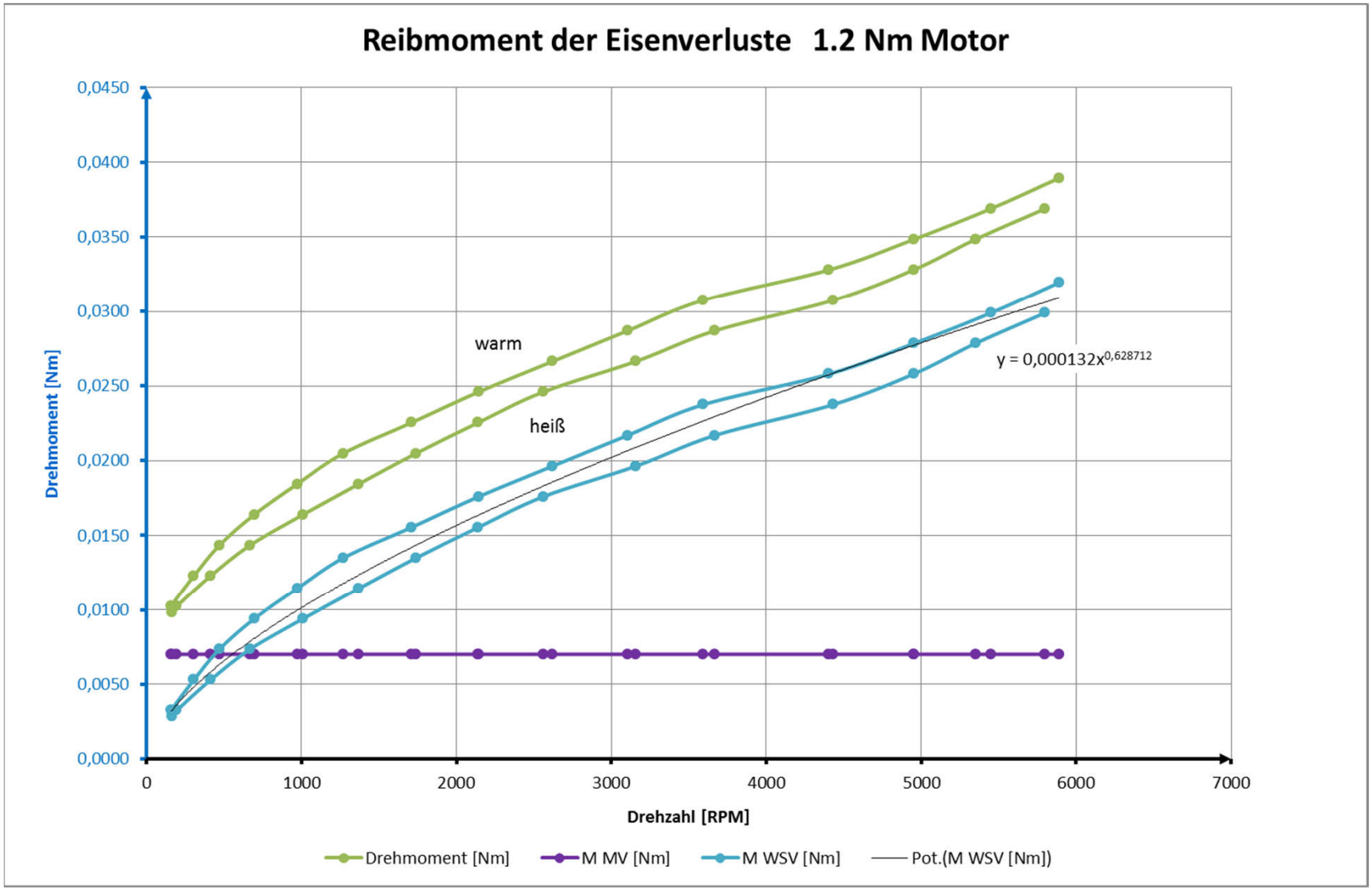
Zunächst heizt man den Motor auf ca. 100K Wicklungstemperatur auf. Dann stellt man in der Betriebsart "Drehzahlregelung" eine möglichst hohe Soll-Drehzahl ein und ermittelt den Leerlaufstrom.

Danach stellt man über die Maximalstrom-Begrenzung einen Maximalstrom unterhalb des gemessenen Leerlaufstroms ein.

Jetzt stellt sich eine Drehzahl ein, bei der Gleichgewicht zwischen Beschleunigungsmoment und Reibmoment herrscht. Diesen Vorgang wiederholt man bei verschiedenen Stromgrenzen und ermittelt die sich einstellende Drehzahl.

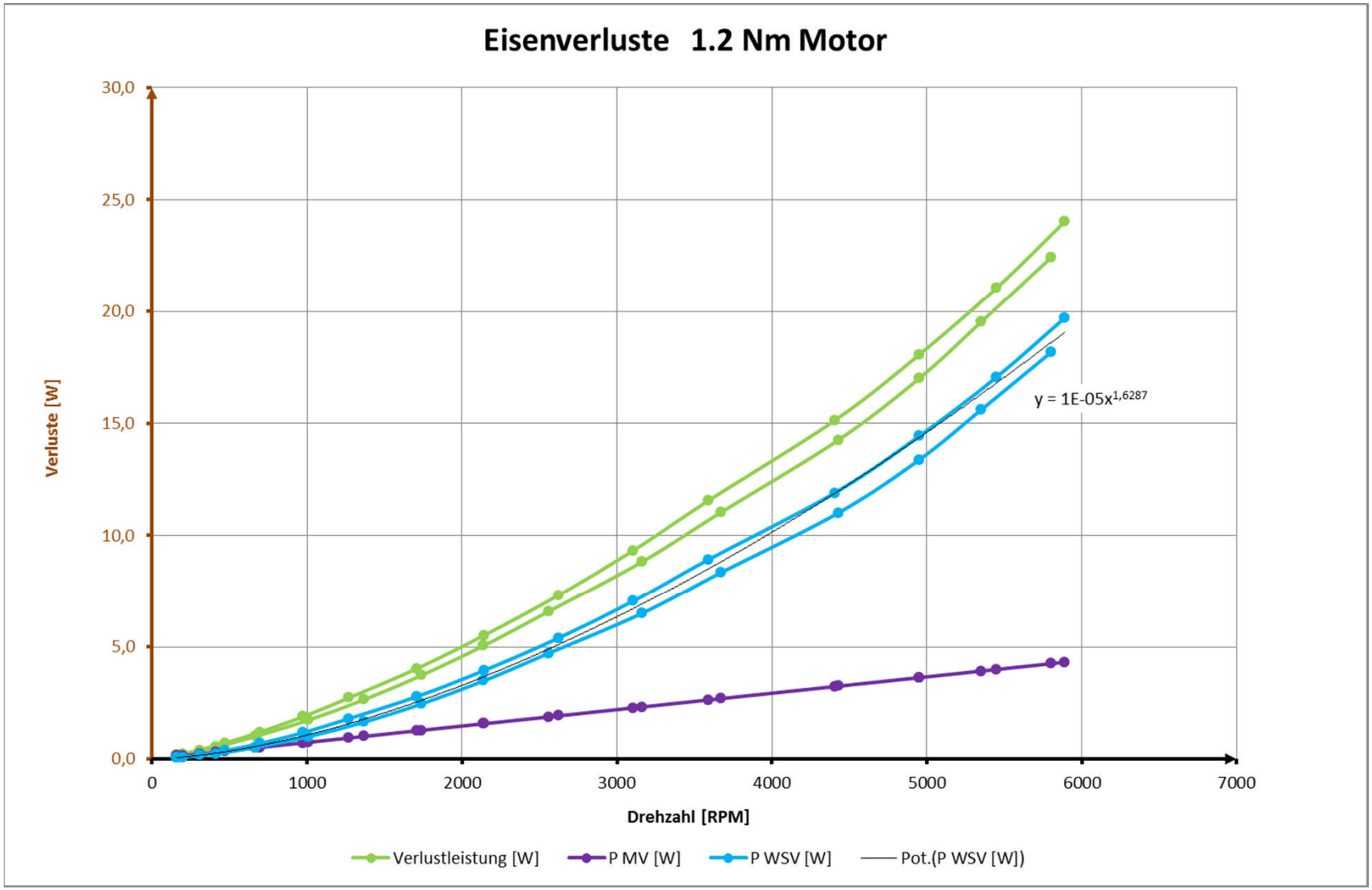
© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Stromgrenze 1,2 Nm Motor



© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Stromgrenze 1,2 Nm Motor



© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Drehzahl-Drehmoment-Diagramm

Das Drehzahl-Drehmoment-Diagramm beinhaltet die wichtigsten Kennlinien der **p**ermanent**m**agneterregten **S**ynchron**m**aschine **PMSM**. Diese Kennlinien sind:

S1- Kennlinie bei **100K** Übertemperatur

- 40°C Umgebungstemperatur
- 140°C Wicklungstemperatur (100K)
- S1 - 100% ED für das Drehmoment
- S1 - 100% ED in der Drehzahl
- schneidet den Punkt M_o 100K (Stillstandsmoment bei 100K)
- schneidet den 100K-Nennpunkt M_{Nenn} bei n_{Nenn}
- die Steigung ist geprägt durch Verluste die mit der Drehzahl n linear steigen (im Wesentlichen Ummagnetisierungsverluste, aber auch Lagerreibungsverluste)
- die Steigung ist geprägt durch Verluste die mit der Drehzahl $n^{1,6}$ bis n^2 wachsen (zum Großteil Wirbelstromverluste im Blechpacket)

© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Drehzahl-Drehmoment-Diagramm

S1- Kennlinie bei **60K** Übertemperatur

- 40°C Umgebungstemperatur
- 100°C Wicklungstemperatur (60K)
- S1 - 100% ED für das Drehmoment
- S1 - 100% ED in der Drehzahl
- schneidet den Punkt M_o 60K (Stillstandsmoment bei 60K)

S3- Kennlinie bei **50% ED** für das **Drehmoment** und **100% ED** in der **Drehzahl** (zB. Werkzeugmaschinen Fräs-Spindel)

- 40°C Umgebungstemperatur
- 140°C Wicklungstemperatur (100K)
- S3 - 50% ED für das Drehmoment
- S3 - 100% ED in der Drehzahl
- endet bei der gleichen thermischen Maximal-Drehzahl wie S1- Kennlinie

© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Drehzahl-Drehmoment-Diagramm

S3- Kennlinie bei **50% ED** für das **Drehmoment** und **50% ED** in der **Drehzahl**

- 40°C Umgebungstemperatur
- 140°C Wicklungstemperatur (100K)
- S3 - 50% ED für das Drehmoment
- S3 - 50% ED in der Drehzahl

S3- Kennlinie bei **30% ED** für das **Drehmoment** und **30% ED** in der **Drehzahl**

- 40°C Umgebungstemperatur
- 140°C Wicklungstemperatur (100K)
- S3 - 30% ED für das Drehmoment
- S3 - 30% ED in der Drehzahl

© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Drehzahl-Drehmoment-Diagramm

Maximalmoment

- begrenzt den Nutzungsbereich für kurzzeitige Überlastmomente z.B. während der Beschleunigung
- berücksichtigt das Sättigungsverhalten M max bei I max

EMK- Kennlinie

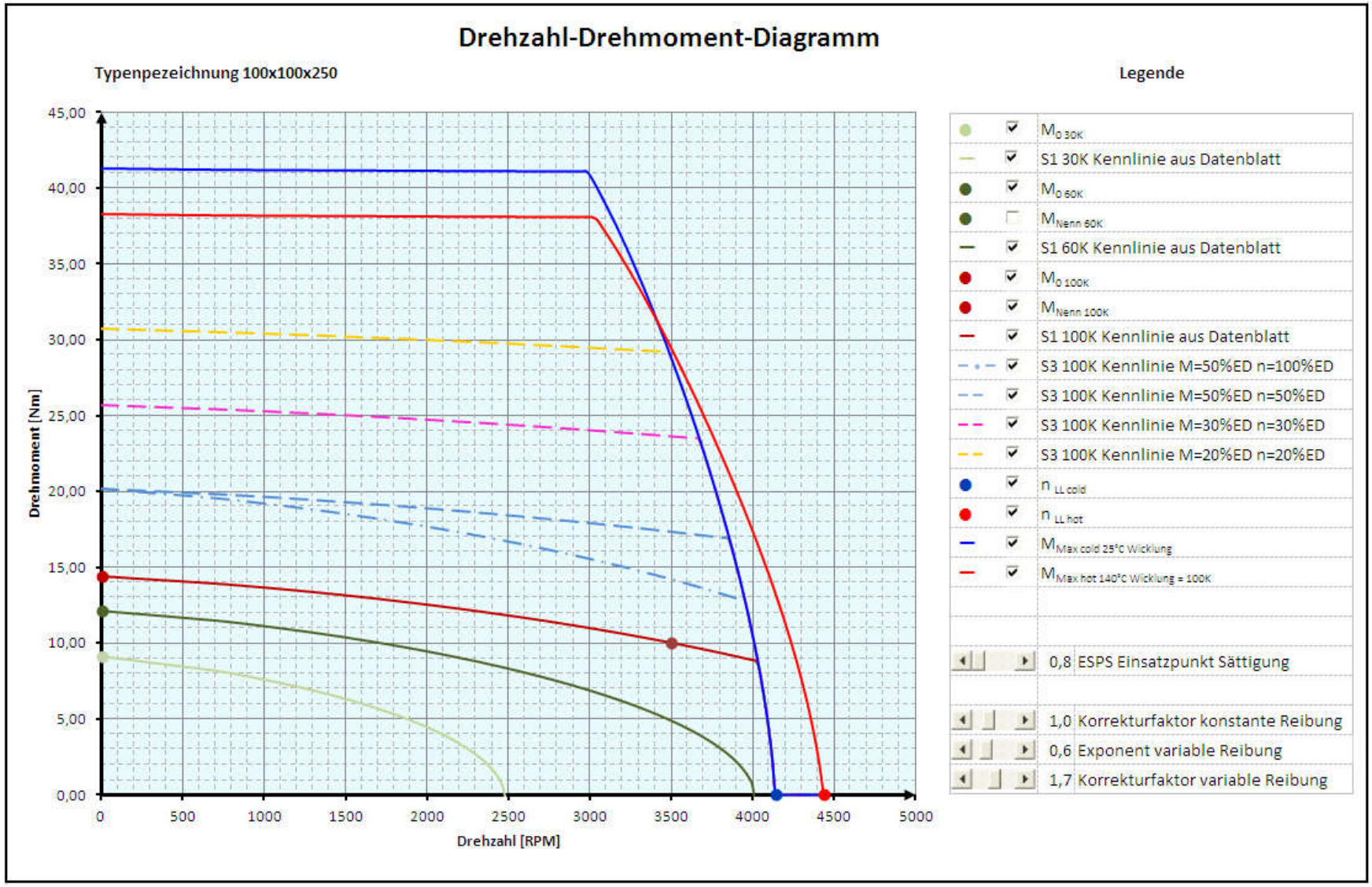
- begrenzt den Nutzungsbereich für kurzzeitige Überlastmomente bei hohen Drehzahlen
- berücksichtigt Zwischenkreisspannung, induzierte EMK in der Motorwicklung, Spannungsabfall über dem ohmschen Widerstand und der Induktivität
- berücksichtigt das Sättigungsverhalten

Wirkungsgrad

- gibt bei jeden Betriebspunkt innerhalb den Nutzungsbereichs den Wirkungsgrad an

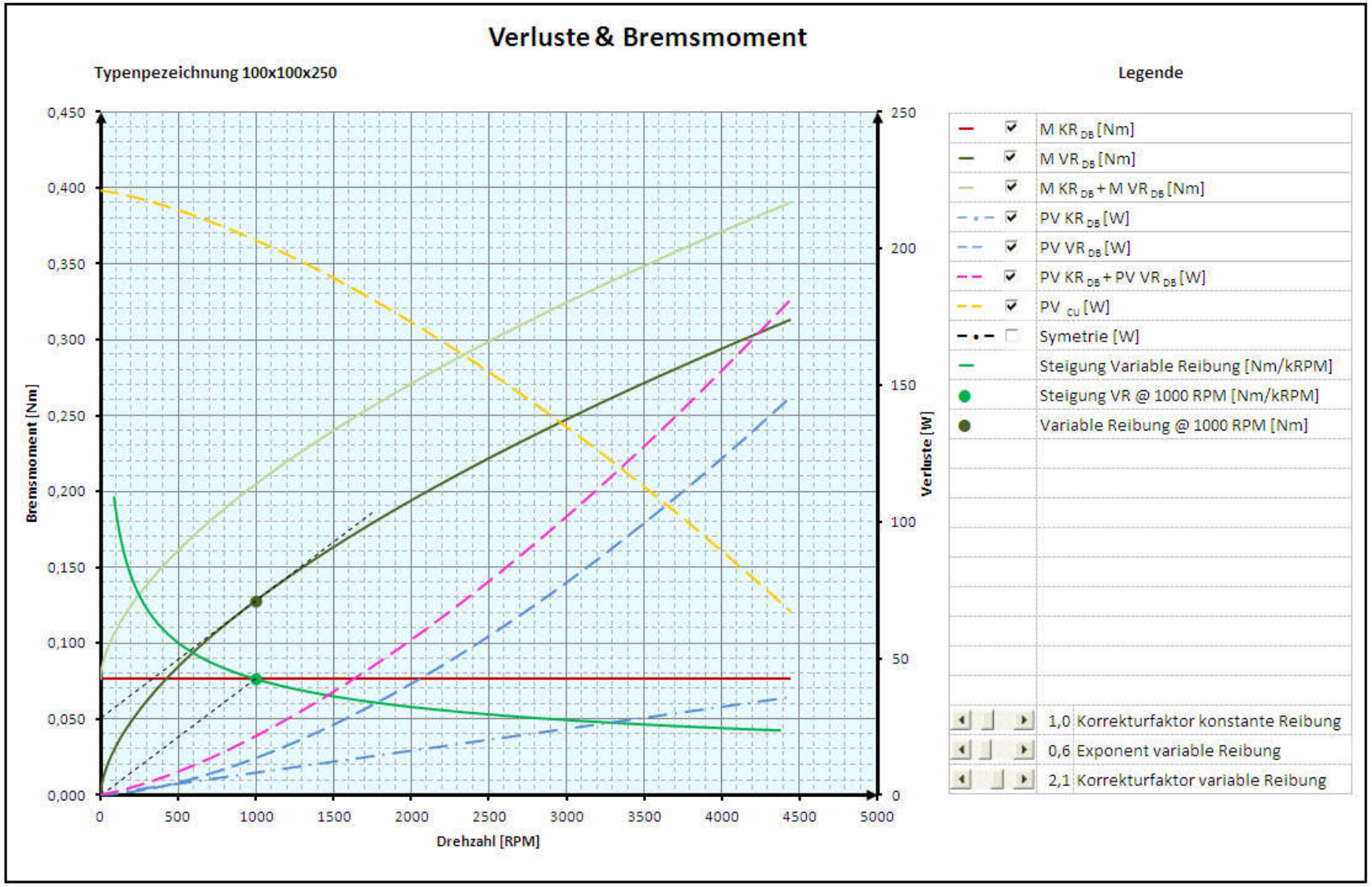
© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Drehzahl-Drehmoment-Diagramm



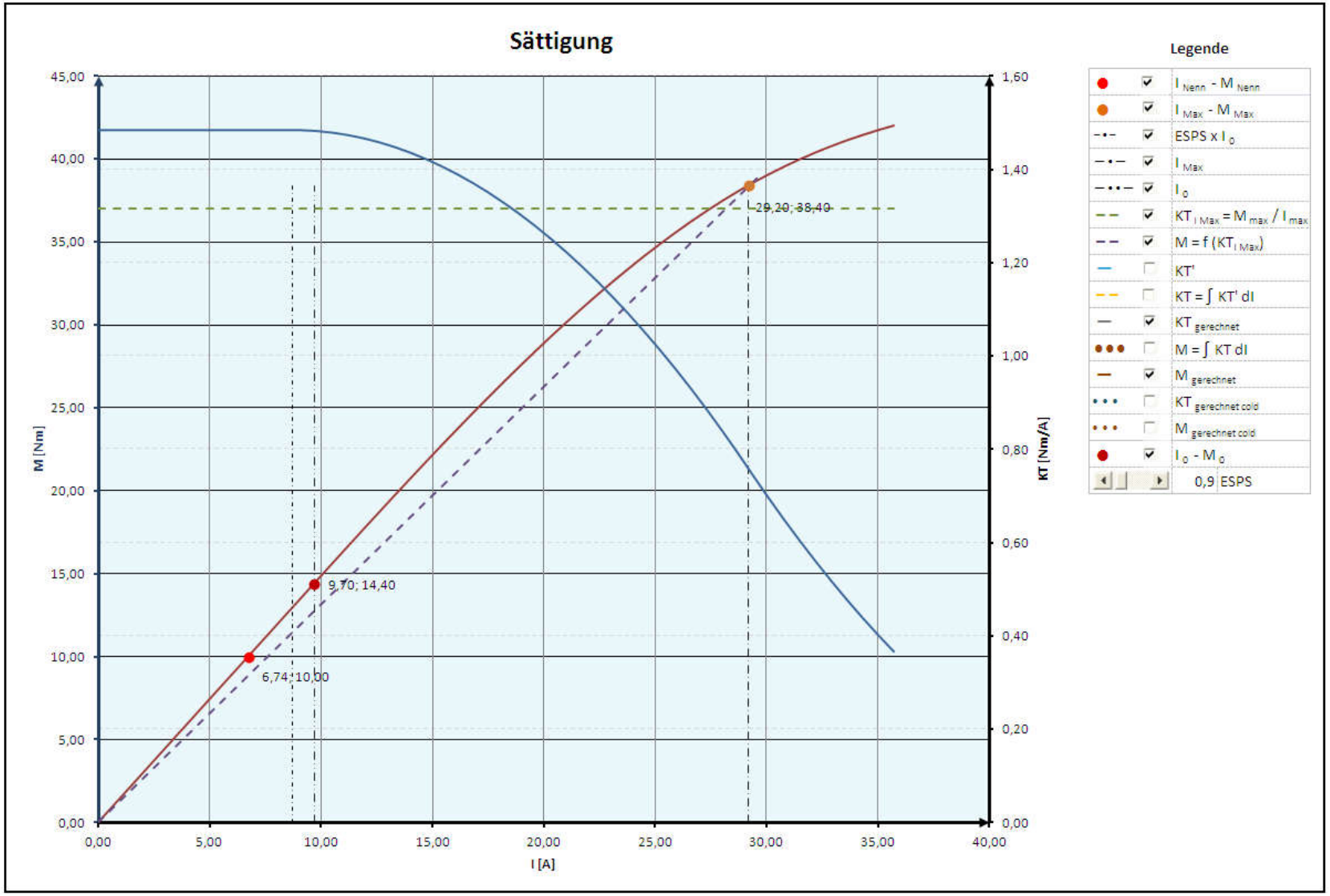
© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Drehzahl-Drehmoment-Diagramm



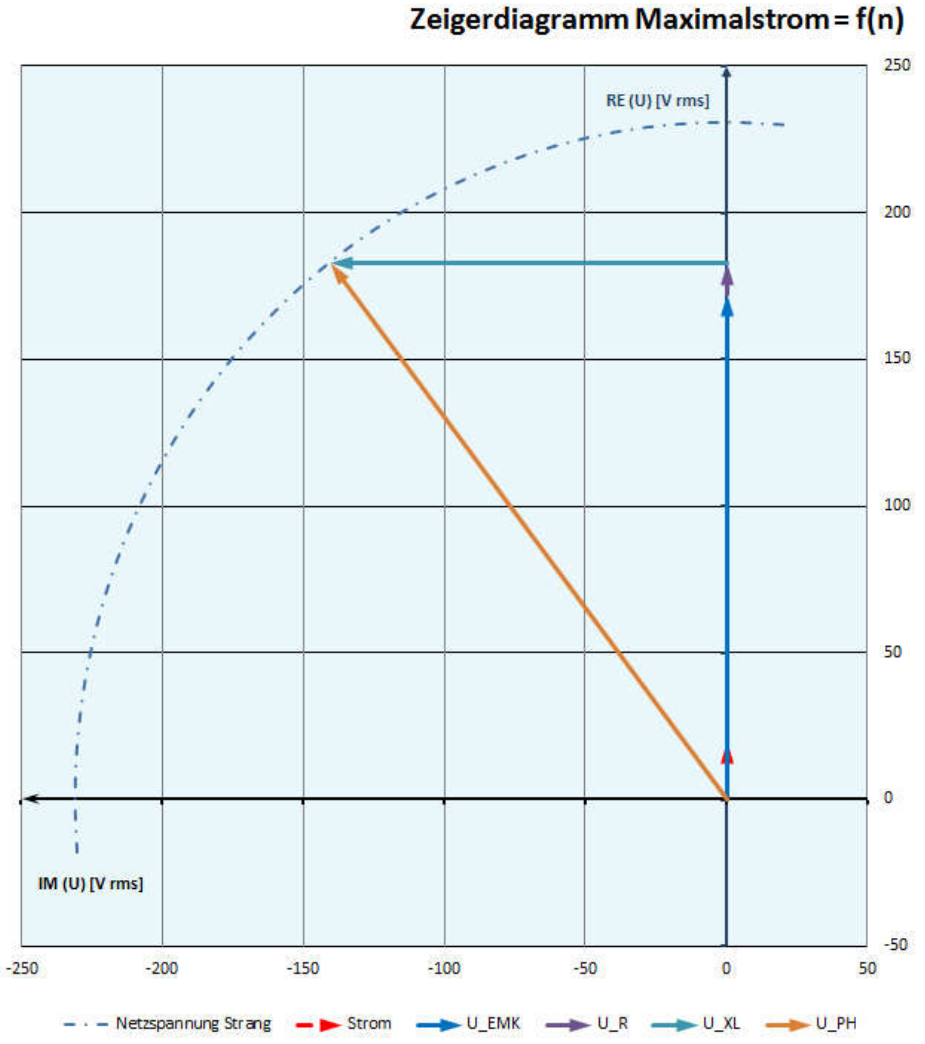
© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Drehzahl-Drehmoment-Diagramm



© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

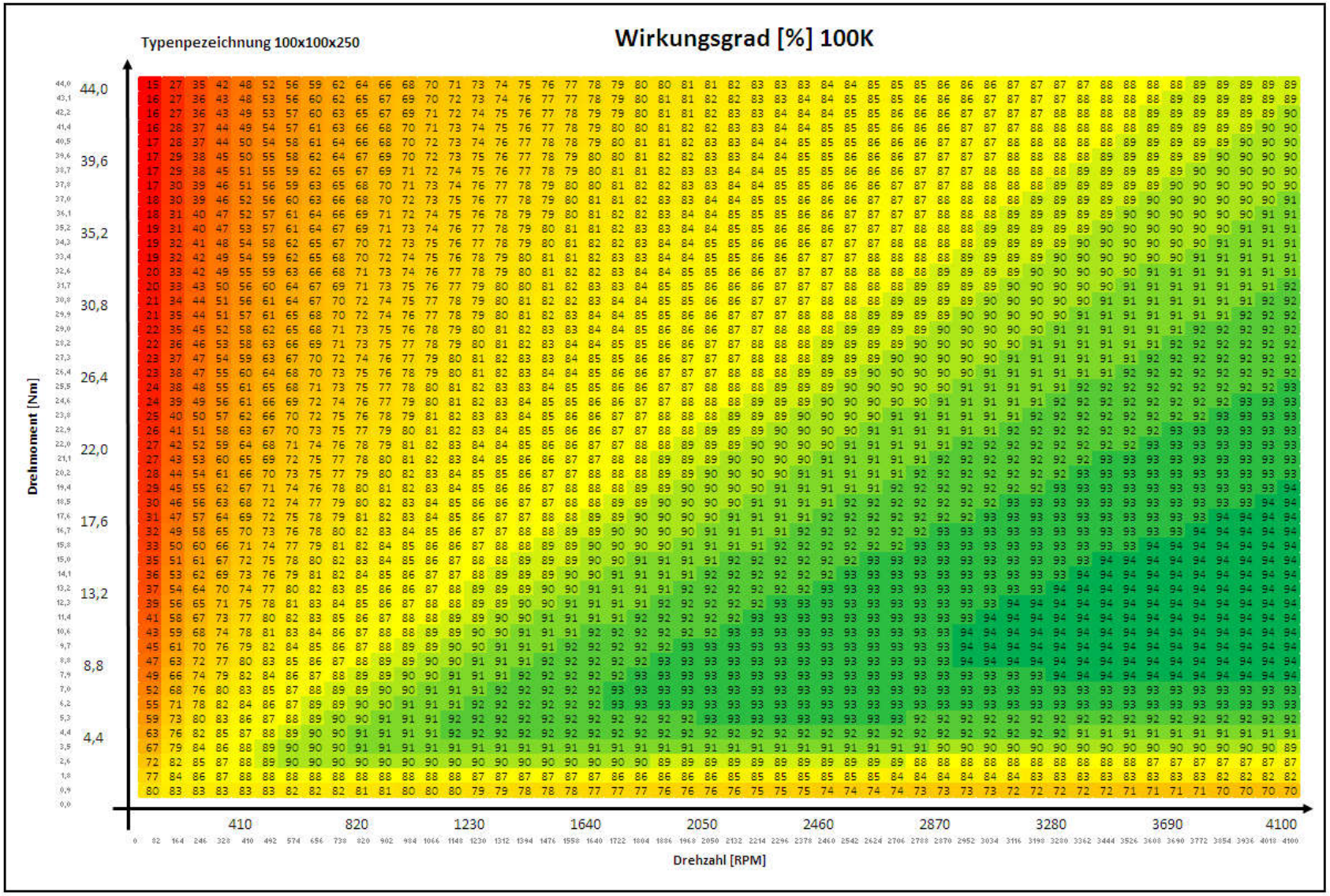
Drehzahl-Drehmoment-Diagramm



Drehzahl:	5001	RPM
Max. Strom	19,93	A
Max. Drehmoment	19,02	Nm
U_R	11	V RMS
U_EMK	172	V RMS
U_XL	141	V RMS

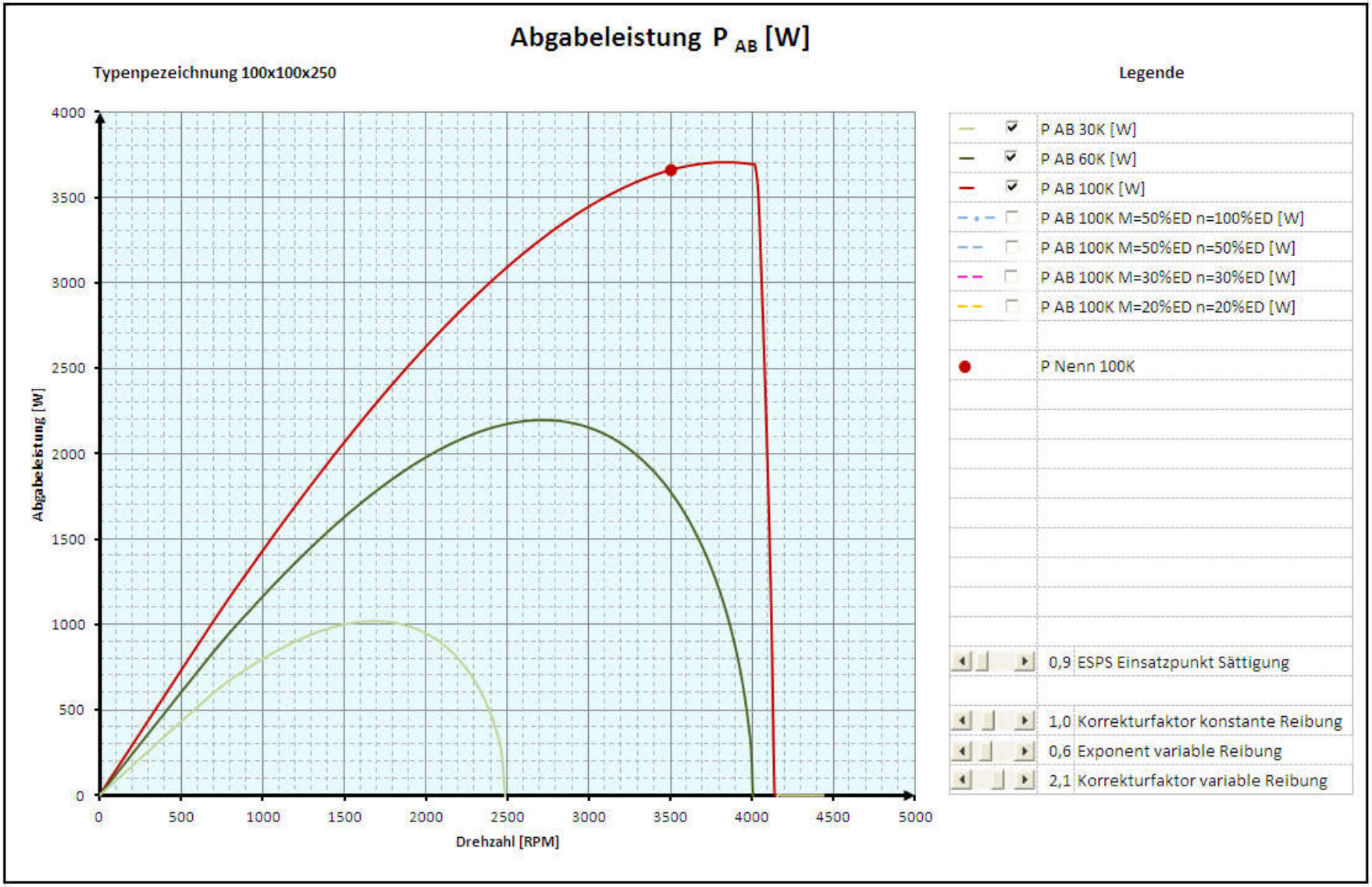
© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Drehzahl-Drehmoment-Diagramm



© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Drehzahl-Drehmoment-Diagramm

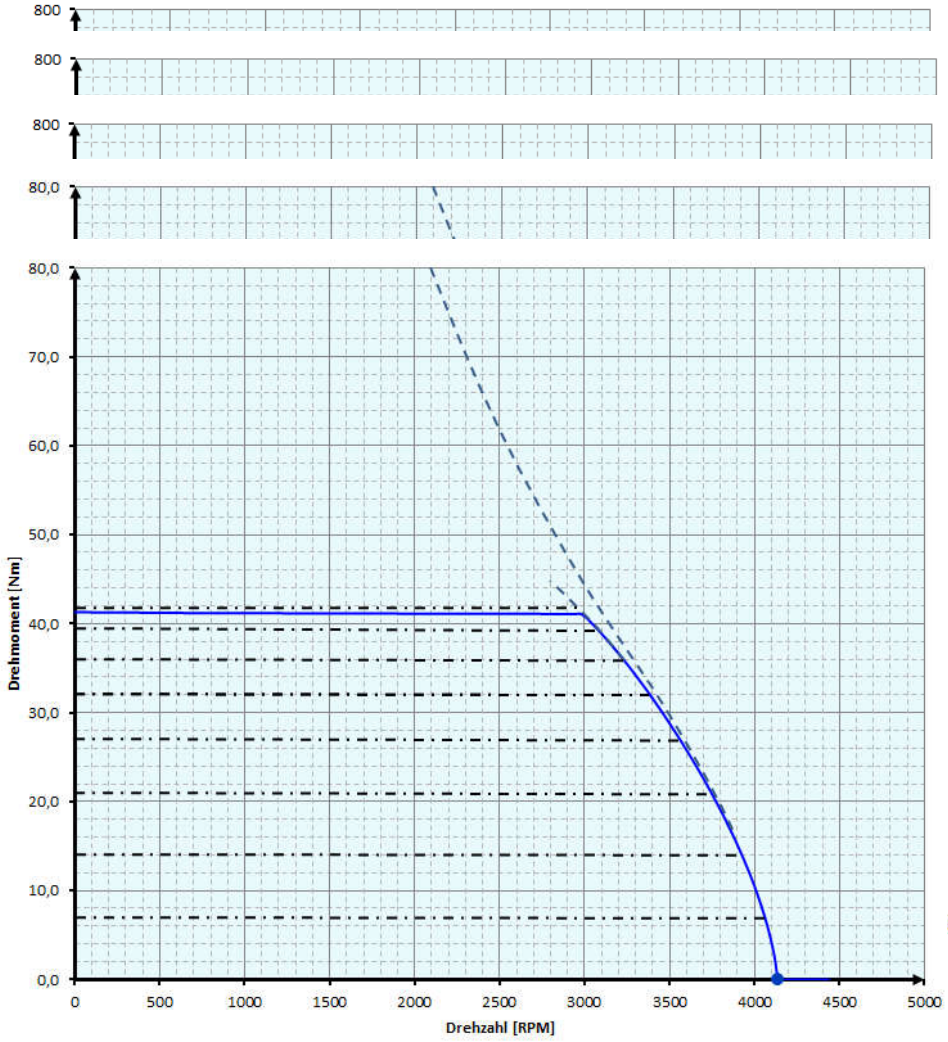


© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Drehzahl-Drehmoment-Diagramm

Konstruktion Maximalmoment:

- Leerlaufdrehzahl aus Netzspannung und KE
- Strom bei n=0 über R ohne XL
- Strom mit R und XL
- Sättigung
- Begrenzung Maximalstrom



© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Drehzahl-Drehmoment-Diagramm

Konstruktion der S1 Kennlinie bei 100K, 60K, 30K:

1) Aus I_0 *(100K)* wird $P_{V\,TOT}$ *(100K)* ermittelt:

$P_{V\,TOT}(100K) = 3 * I_0\ (100K)^2 * R_{HOT}(100K)$ in [W]

2) Der thermische Widerstand wird benötigt um die totale Verlustleistung bei 60K und 30K zu bestimmen:

$R_\vartheta = \frac{100K}{P_{V\,TOT}(100K)}$ in [K/W]

$P_{V\,TOT}(60K) = \frac{60K}{R_\vartheta}$ in [W]

3) Dann kann das Stillstandsmoment bei 60K berechnet werden:

$I_0\ (60K) = \sqrt{\frac{P_{V\,TOT}(60K)}{3 * R_{HOT}(60K)}}$ in [A]

$M_0(60K) = I_0(60K) * KT(60K)$ in [Nm]

© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Drehzahl-Drehmoment-Diagramm

4) Von $P_{V\,TOT}(100K)$ zieht man die mechanischen Verluste ab und erhält:

$P_{V\,CU}(n) = P_{V\,TOT}(100K) - P_{V\,MECH}(n)$ in [W]

5) Dann kann Strom und M_I (inneres Moment) bei 100K berechnet werden:

$I_{100K}(n) = \sqrt{\frac{P_{V\,CU}(n)}{3*R_{HOT}(100K)}}$ in [A]

temperaturabhängig

$M_{I\,100K}(n) = I_{100K}(n) * KT_I(100K)$ in [Nm] wobei

$KT_I(100K) = \frac{M_o(100K)+M_{V\,Mech}(n\cong 50RPM)}{I_o(100K)}$ (weil Messung nicht bei Stillstand)

6) Nicht vergessen: Mechanische Verlustmomente abziehen:

$M_{100K}(n) = M_{I\,100K}(n) - M_{V\,MECH}(n)$ in [Nm]

© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Drehzahl-Drehmoment-Diagramm

7) Eine Probe über die Leistung zeigt, ob richtig gerechnet wurde:

$$P_{AB}(n) = P_{MECH}(n)$$

$$3 * U_{EMK\ PH}(n) * I_{100K}(n) - P_{V\ MECH}(n) = M_{100K}(n) * 2\pi n$$

$$P_{AUF}(n) = P_{MECH}(n) + P_V(n)$$

$$3 * U_{EMK\ PH}(n) * I_{100K}(n) + P_{CU}(n) = M_{100K}(n) * 2\pi n + P_V(n)$$

$$P_I(n) = P_{MECH}(n) + P_{V\ MECH}(n)$$

$$3 * U_{EMK\ PH}(n) * I_{100K}(n) = M_{100K}(n) * 2\pi n + P_{V\ MECH}(n)$$

wobei:

temperaturabhängig

$$U_{EMK\ PH}(n) = KE_{ph}(100K) * n$$

© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Drehzahl-Drehmoment-Diagramm

8) Die Schritte lassen sich auch in einer Formel zusammenfassen [2]:

$$M_{S1\ 100K}(\omega) = \frac{KT_{innen\ hot}}{\sqrt{3 * R_{hot\ ph}}} * \left[\sqrt{\frac{100K}{R_{\vartheta\ Motor}} - K_{dv} * \omega^2 - T_f * \omega}\right] - K_{dv} * \omega - T_f$$

$M_{S1\ 100K}(\omega) = S1\ Kennlinie\ 100\%ED\ bei\ 100K\ \text{Übertemperatur}\ [Nm]$

$KT_{innen\ hot} = innere\ Drehmomentkonstante\ \left[\frac{Nm}{A}\right] = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} * KE_{ph-ph\ hot}\ [Vs]$

$R_{hot\ ph} = Wicklungswiderstand\ einer\ Phase\ [\Omega]$

$R_{\vartheta\ Motor} = thermischer\ Widerstand\ [K/W]$

$K_{dv} = Viscous\ Damping\ [Nm * s]$

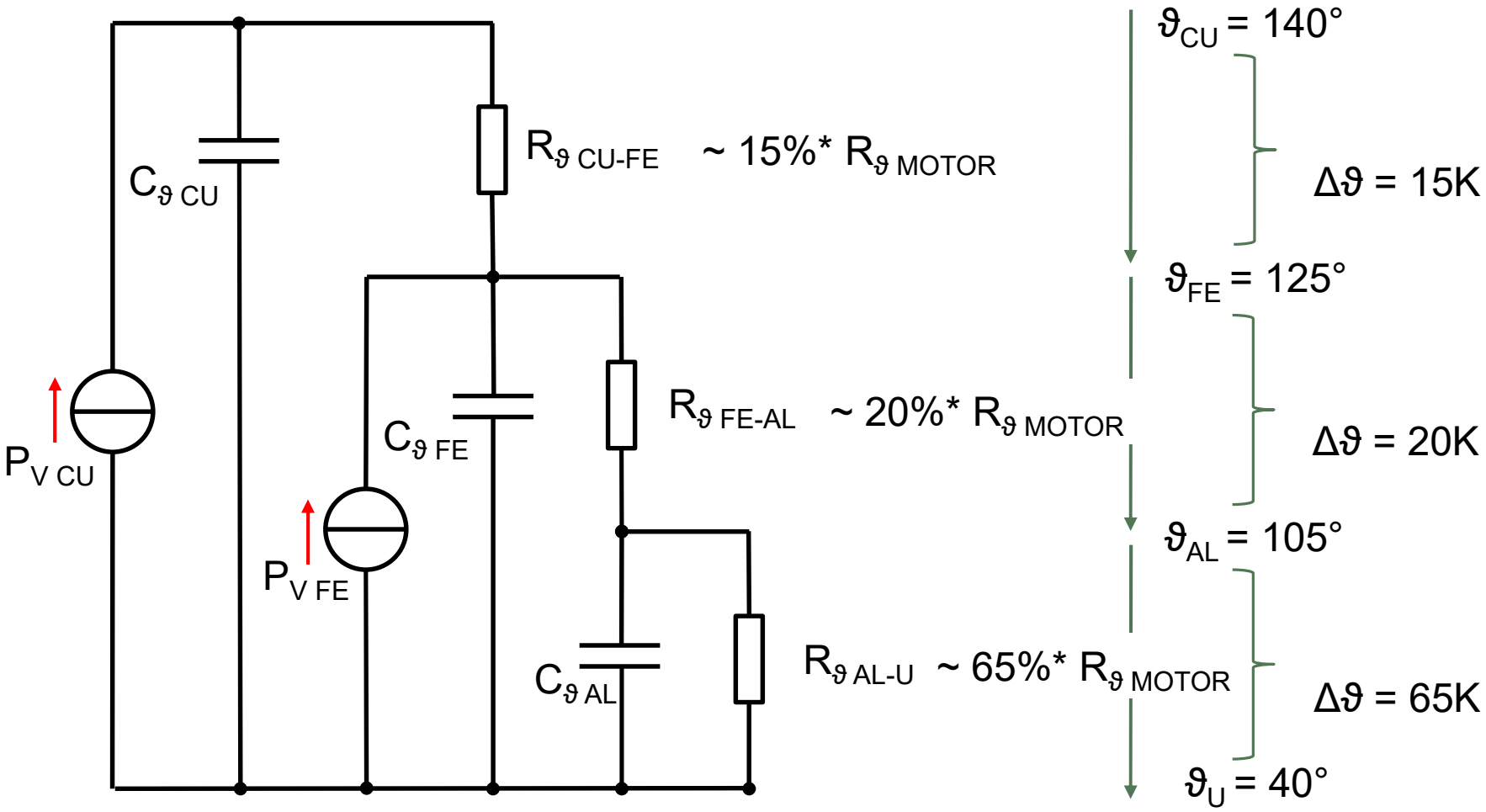
$T_f = Static\ Friction\ [Nm]$

[2] nach [1] Richard Welch Jr. für drehzahlabhängige Reibung ~ Viscous Damping * n; dh. drehzahlabhängige Verluste ~ n²

© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Thermisches Modell

Folgende Folien legen ein 3-Körper-Modell (3-BODY-MODEL) zugrunde:



© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

3-Körper-Modell (3-BODY-MODEL)

Legt man ein 3-Körper-Modell zugrunde ändern sich die Zusammenhänge grundlegend:

- Die Eisenverluste werden über die thermischen Widerstände

  $R_{\vartheta\ FE\text{-}AL} + R_{\vartheta\ AL\text{-}U}$ abgeführt.

- Die Kupferverluste müssen den thermischen Gesamtwiderstand

  $R_{\vartheta\ Motor} = R_{\vartheta\ CU\text{-}FE} + R_{\vartheta\ FE\text{-}AL} + R_{\vartheta\ AL\text{-}U}$ überwinden.

- Für die Darstellung der S1-(100K)-Kennlinie im 1-Körper-Modell müssen die Kupferverluste in gleicher Höhe reduziert werden wie die Eisenverluste mit der Drehzahl steigen.

  Beim 3-Körper-Modell hingegen kann, wegen des geringeren thermischen Widerstands für die Eisenverluste, eine höhere totale Verlustleistung zugelassen werden kann.

© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

3-Körper-Modell (3-BODY-MODEL)

S1-(100K)-Kennlinie im 3-Körper-Modell:

$$M_{S1\,100K}(\omega) = \frac{KT_{innen\,hot}}{\sqrt{3 * R_{hot\,ph}}} * \left[\sqrt{\frac{100K - \left(K_{dv} * \omega^2 + T_f * \omega\right) * \left(R_{\vartheta\,FE-AL} + R_{\vartheta\,AL-U}\right)}{R_{\vartheta\,Motor}}}\right] - K_{dv} * \omega - T_f$$

$M_{S1\,100K}(\omega) = S1\ Kennlinie\ 100\%ED\ bei\ 100K\ \text{Übertemperatur}\ [Nm]$

$KT_{innen\,hot} = innere\ Drehmomentkonstante\ 100K\ \left[\frac{Nm}{A}\right] = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} * KE_{ph-ph\,hot}\ [Vs]$

$R_{hot\,ph} = Wicklungswiderstand\ einer\ Phase\ [\Omega]$

$R_{\vartheta\,Motor} = thermischer\ Widerstand\ [K/W] = R_{\vartheta\,CU-U} = R_{\vartheta\,CU-FE} + R_{\vartheta\,FE-AL} + R_{\vartheta\,AL-U}$

$R_{\vartheta\,CU-FE} = thermischer\ Widerstand\ CU - FE\ [K/W]$

$R_{\vartheta\,FE-AL} = thermischer\ Widerstand\ FE - AL\ [K/W]$

$R_{\vartheta\,AL-U} = thermischer\ Widerstand\ AL - Umgebung\ [K/W]$

$K_{dv} = Viscous\ Damping\ [Nm * s]$

$T_f = Static\ Friction\ [Nm]$

2) für drehzahlabhängige Reibung ~ Viscous Damping * n; dh. drehzahlabhängige Verluste ~ n²

© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

3-Körper-Modell (3-BODY-MODEL)

Vorteil des 3-BODY-MODEL:

Legt man ein 3-Körper-Modell zugrunde liegt die S1-Kennlinie über dem Ergebnis aus dem 1-Körper-Modell.

Stellt man die Abgabeleistung über der Drehzahl dar, wird der Unterschied sehr deutlich.

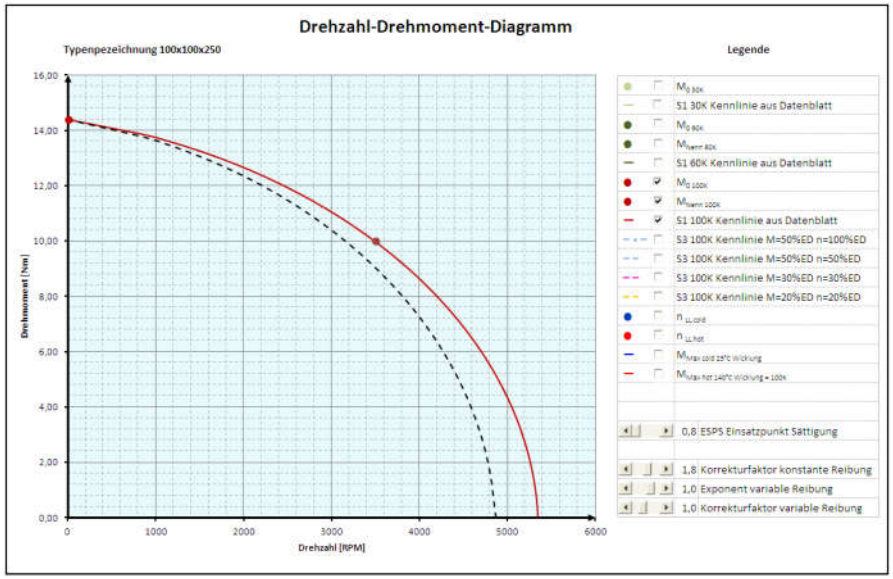
© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

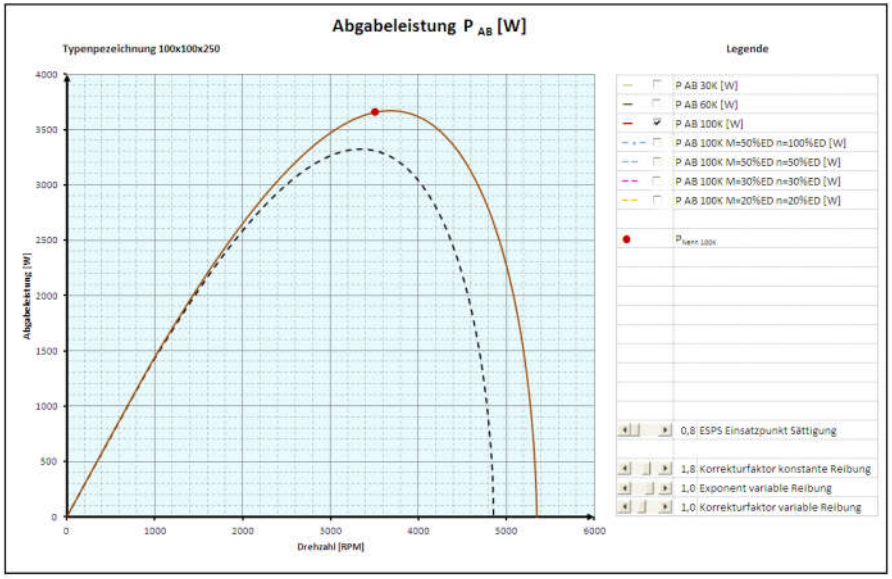
3-Körper-Modell (3-BODY-MODEL)

Vorteil des 3-BODY-MODEL:

Unterschied der Ergebnisse in den bekannten Darstellungen

$R_{\vartheta\ CU\text{-}FE} = 15\%\ R_{\vartheta\ Motor}$





1-Körper-Modell - - - -

3-Körper-Modell ——

© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

3-Körper-Modell (3-BODY-MODEL)

Vorteil des 3-BODY-MODEL:

Das 3-Körper-Model bildet die tatsächliche Wärmeentwicklung innerhalb des Motors besser ab.

Das betrifft insbesondere den Einfluss des Wellendichtrings:

Während beim 1-Körper-Modell der Einfluss der Verluste am Wellendichtring unrealistisch hoch ist, weil die Kupferverluste in gleichem Maß reduziert werden müssen wie die Verluste am Wellendichtring mit der Drehzahl steigen, führt das 3-Körper-Modell diese Wärme über die thermischen Widerstände $R_{\vartheta\ FE\text{-}AL}$ + $R_{\vartheta\ AL\text{-}U}$ ab, und lediglich die Temperatur-Senke für die Kupferverluste steigt auf höheres Niveau.

Messungen auf dem Prüfstand bestätigen die Ergebnisse.

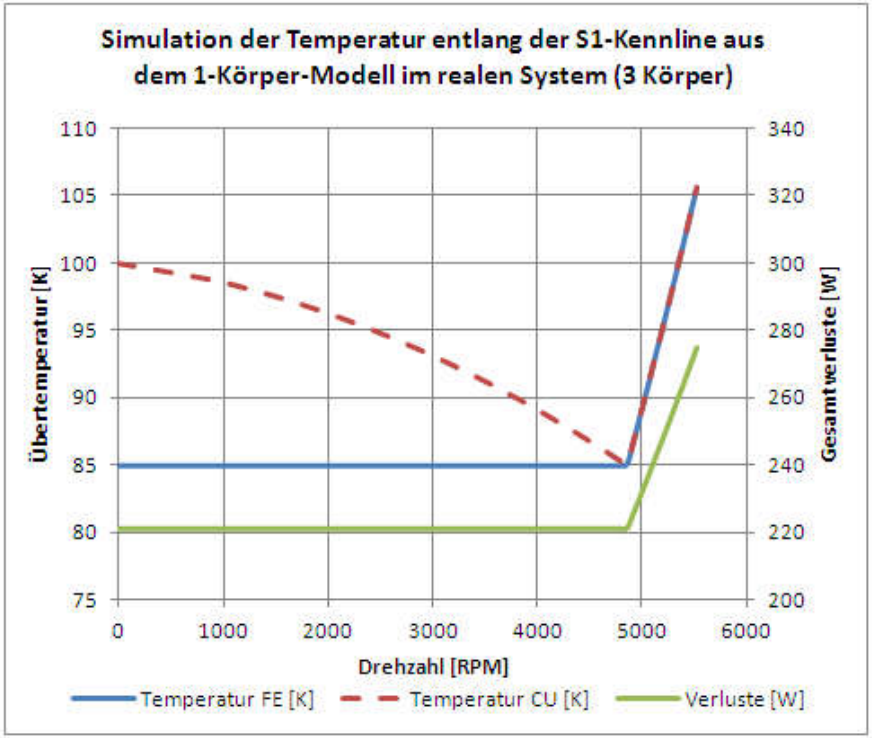
© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

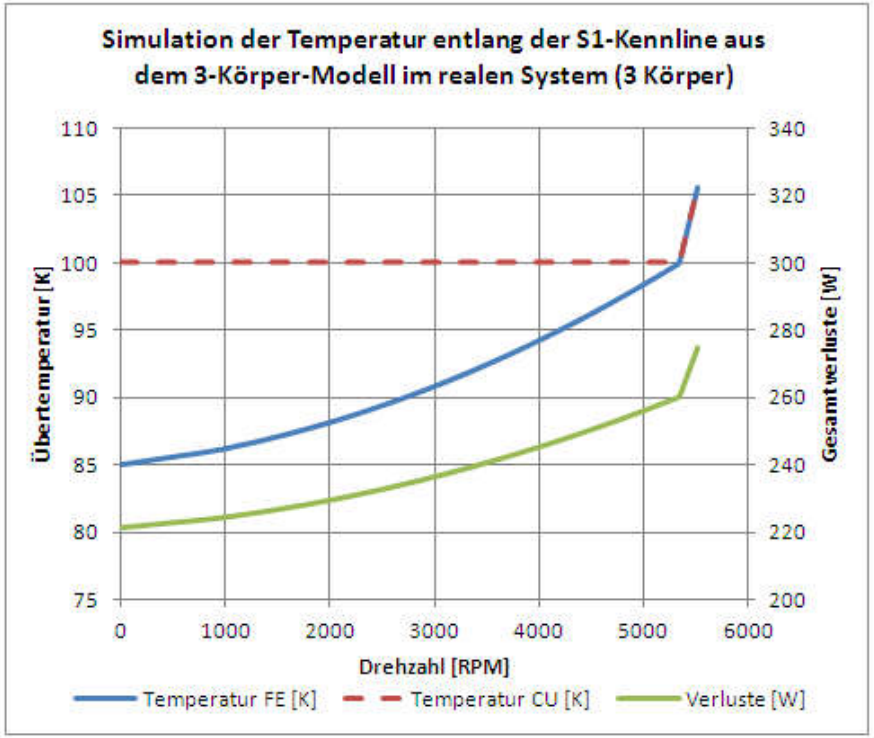
3-Körper-Modell (3-BODY-MODEL)

Nachteil des 3-BODY-MODEL:

Beim 1-Körper-Modell bleibt die Übertemperatur des Eisens konstant, während die Kupferverluste abnehmen.

Beim 3-Körper-Modell bleibt die Übertemperatur der Wicklung (100K) konstant, während die Temperatur der Bleche zunimmt.





© 2017. SERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

3-Körper-Modell (3-BODY-MODEL)

Nachteil des 3-BODY-MODEL:

Die Wicklungstemperatur bleibt zwar bis zur thermischen Grenzdrehzahl konstant 100 Kelvin, ABER das Blechpaket und das Aluminium-Gehäuse werden deutlich heißer (ca.15K).

Haltebremsen und Feedback-Systeme sind oft nur bis 115°C zugelassen.

Bei 40°C Umgebungstemperatur liegt die Temperatur im Einbauraum dieser Komponenten eventuell höher. Es ist daher immer zu prüfen, ob die Ergebnisse des 3-Körper-Modells für die Leistungsangaben auf dem Typenschild zulässig sind.

Katalogangaben und die Leistungsangaben auf dem Typenschild sollten sich nicht durch hinzufügen einer Option wie Haltebremse oder digitales Feedback-System verändern.

Wer zur Berechnung der S1-Kennlinien das 1-Körper-Modell zugrundelegt, hat hier mehr Reserven.

© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Fragen und Antworten

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !!!

oder

Fragen ?

© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.

Literatur-Verweise

[1] Richard Welch Jr. - Consulting Engineer
Why the Exlar T-LAM™ Servo Motors have Become the New Standard of Comparison for Maximum Torque Density and Power Efficiency

© 2017. ∫ERVOANTRIEBSTECHNIK.DE Alle Rechte vorbehalten.