

MotCalc V8.3 BLDC-Motor Grundlagen

1 Formelzeichen

U_k ... Eingangsspannung Drehzahlsteller [V]

R_{IM} ...Innenwiderstand Motor [Ohm]

$R_d = R_{IM} * 1.5$; Eingangswiderstand am Drehzahlsteller, stets größer als R_{IM}

I ...Motorstrom [A]

I_o ...Leerlaufstrom [A]

KV ...Drehzahl-Spannungskonstante [rpm/V]

K_T ... Drehmomentkonstante [Nm/A]

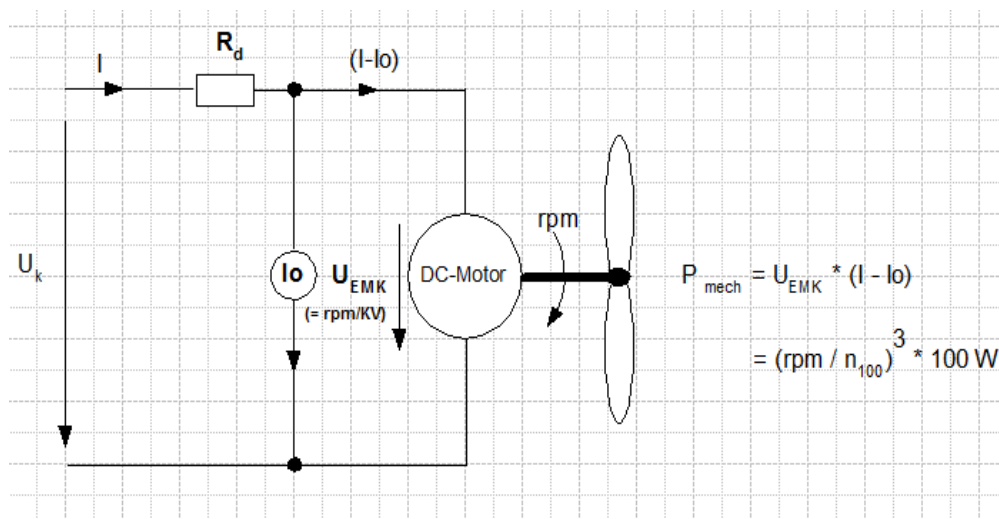
rpm...Motordrehzahl [revolutions per minute]

rpm0... Leerlaufdrehzahl [revolutions per minute]

P_{mech} ... Abgabeleistung an der Motorwelle [W]

n_{100} ... Propellerdrehzahl [rpm] bei 100 W Eingangsleistung

2 Mathematisches Modell eines permanenterregten Gleichstrommotors



Das Ersatzschaltbild gilt für den bürstenlosen Gleichstrommotor (BLDC) als auch für den Bürstenmotor.

Ein Gleichstrommotor kann mit den Widerstand R_d , dem Leerlaufstrom I_o sowie dem KV hinreichend genau im eingeschwungenen Zustand berechnet werden.

Der Leerlaufstrom ist eine Funktion der Lagerreibung, Lüfter (falls Vorhanden) und der Eisenverluste. Die Reibungsverluste sind konstant und unabhängig von der Drehzahl. Da der Motorstrom proportional zum Drehmoment ist, ist der durch das Reibungsmoment erzeugte Leerlaufstrom auch konstant.

Die Eisenverluste bestehen aus den Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverlusten (vgl. Wirbelstrombremse). Die verursachten Ströme erzeugen wiederum ein Magnetfeld im Stator, welches den Rotor abbremst. Diese Verluste sind Drehzahlabhängig und steigen mit der Drehzahl. Im Leerlauf sind die Eisenverluste folglich am höchsten. Mit steigender Belastung sinkt die Drehzahl, die Eisenverluste nehmen etwas ab.

$$I_0(\text{rpm}) = I_0 + K_L \cdot \text{rpm}$$

Der Einfluss des drehzahlabhängigen Leerlaufstromes ist für die Berechnung jedoch sehr gering, daher wird mit einem konstanten Leerlaufstrom gerechnet. Zudem ist die Konstante K_L nicht bekannt, sie kann nur Messtechnisch ermittelt werden.

Bürstenbehafteten DC-Motoren besitzen wegen der Reibung der Kohlebürsten ein nahezu von der Drehzahl unabhängigen Leerlaufstrom. Hier überwiegt das Reibmoment. Insbesondere gilt das für Bürstenmotoren mit Sinterlager. Bei den BLCD-Motoren überwiegen die Eisenverluste, die Lagerreibung in den Kugellagern ist gering.

Der Leerlaufstrom besteht also aus einem konstanten Anteil und einem drehzahlabhängigen Anteil. Meist wird nur der Leerlaufstrom vom Hersteller angegeben, die Spannung ist oft nicht bekannt. Bei Angabe der Spannung kann der Motorstrom für eine andere Spannung wie folgt Näherungsweise berechnet werden. Die Berechnung beruht auf Messungen an einigen Motoren und ist daher eine empirische Formel.

$$I_{0(\text{neu})} = I_0 \cdot (U_{(\text{neu})}/U)^{3/4}$$

Beispiel: Leerlaufstrom 1.2 A @ 8.4 Volt

Leerlaufstrom beim Betrieb an 11.1 Volt (3S LiPo nominell)

$$I_0 = 1.2 \text{ A} \cdot (11.1/8.4)^{0.75}, \text{ der Leerlaufstrom beträgt jetzt ca. } 1.5 \text{ A.}$$

Bestimmungsgleichungen zur Berechnung der Drehzahl:

$$(1) \quad I \cdot R_d + U_{\text{EMK}} - U_k = 0$$

$$(2) \quad P_{\text{mech}} = U_{\text{EMK}} \cdot (I - I_0) \text{ oder}$$

$$(3) \quad P_{\text{mech}} = 100 \cdot (\text{rpm}/n_{100})^3, \text{ Eingangsleistung vom Propeller}$$

$$(4) \quad U_{\text{EMK}} = \text{rpm}/KV$$

Gleichungssystem mit den Unbekannten rpm und I:

$$(5) \quad \text{rpm}/KV \cdot (I - I_0) = 100 \cdot (\text{rpm}/n_{100})^3$$

$$(6) \quad I \cdot R_d + \text{rpm}/KV - U_k = 0$$

Lösungen:

$$\text{rpm} = \frac{n_{100}^{3/2} \cdot \left(\sqrt{(-400 \cdot I_0 \cdot KV^3 \cdot R_d^2 + 400 \cdot KV^3 \cdot R_d \cdot U_k + n_{100}^3)} - n_{100}^{3/2} \right)}{200 \cdot KV^2 \cdot R_d}$$

$$I = - \frac{n_{100}^{3/2} \cdot \sqrt{(-400 \cdot I_0 \cdot KV^3 \cdot R_d^2 + 400 \cdot KV^3 \cdot R_d \cdot U_k + n_{100}^3)} - 200 \cdot KV^3 \cdot R_d \cdot U_k - n_{100}^3}{200 \cdot KV^2 \cdot R_d}$$

3 Grundlegende Formeln

Drehmomentkonstante:

$$K_T = (1 / K_V) * (30 / \pi) \text{ [Nm/A]}$$

Abgabeleistung an der Motorwelle:

$$\text{rpm} = (U_k - R_D * I) * K_V$$

$$\text{Winkelgeschwindigkeit} = \text{rpm} * \pi / 30 \text{ [rad/s]}$$

$$\text{Drehmoment} = (I - I_o) * K_T$$

$$P_{\text{mech}} = \text{Winkelgeschwindigkeit} * \text{Drehmoment}$$

oder

$$I_{\text{stall}} = U_k / R_D$$

$$P_{\text{out}} = (I - I_o) * (I_{\text{stall}} - I) * R_D$$

Maximaler Wirkungsgrad:

$$\eta_{\text{max}} = (1 - \sqrt{I_o / I_{\text{stall}}})^2$$

Wirkungsgrad:

$$\eta = 1 + I_o / I_{\text{stall}} - I / I_{\text{stall}} - I_o / I$$

Motorstrom bei maximalem Wirkungsgrad (η_{max}):

$$I(\eta_{\text{max}}) = \sqrt{I_{\text{stall}} * I_o}$$

Motor Innenwiderstand als Funktion der Temperatur:

$$R_{IM}(t) = R_{IM}(t_o) (1 + \alpha_{to} * (t - t_o))$$

$$t_o = 20^\circ\text{C}$$

$$\alpha_{to} = 3.9 * 10^{-3} \text{ [1/K]}$$

$$R_{IM}(90^\circ\text{C}) = R_{IM}(20^\circ\text{C}) * 1.27$$

4 Reglereinfluss

Der Regereinfluss bei BLDC-Motoren auf die Motordrehzahl kann im Bereich mehrerer Prozentpunkte liegen. Die Aufnahmleistung beim Propeller steigt mit der 3. Potenz der Drehzahl. Somit sind Differenzen in der Leistungsaufnahme von bis zu 25 % möglich. Gründe sind liegen im Timing, der Hardware und dem Verhalten der Kommutierungssoftware.

Ich hab vor einiger Zeit an einem Kira 600-24 das KV sowie den Leerlaufstrom mit 3 verschiedenen Drehzahlstellern gemessen. Die Messung erfolgte jeweils mit konstantem Advanced Timing, Einstellung 0° beziehungsweise Timing low.

Der Leerlaufstrom lag im Bereich 3.5 A – 5 A (4S LiPo, 15 Volt).
Das KV lag bei 2445 rpm/V – 2600 rpm/V, nominell 2400 rpm/V.

Die max. Abweichung vom Nennwert liegt bei 8.3 %.

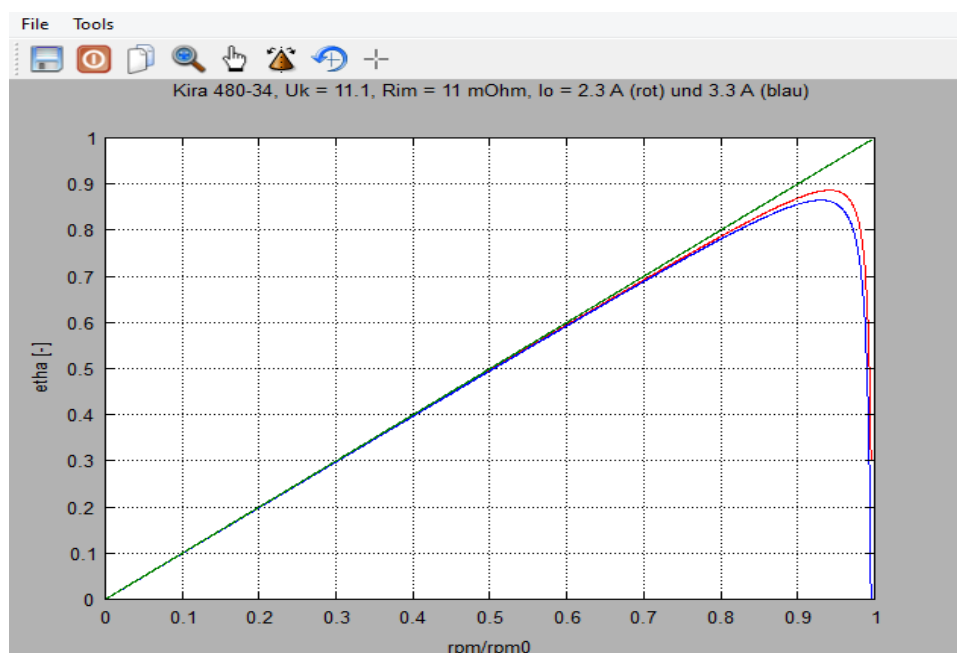
Siehe dazu auch Reglereinfluss: <http://www.powerditto.de/theoriestartseite.html>

5 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad vom Antrieb ist ein Produkt vom Motorwirkungsgrad und dem Wirkungsgrad vom Drehzahlsteller. Der Antriebswirkungsgrad kann daher immer nur zusammen mit dem Drehzahlsteller gesehen werden. Der selbe Motor an verschiedenen Drehzahlstellern wird immer verschiedene Wirkungsgrade besitzen.

Der Wirkungsgrad vom Motor wird maßgeblich vom Innenwiderstand R_{IM} bestimmt. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Motorwicklung sinkt der Wirkungsgrad mit zunehmender Temperatur. Daher sollt man für gute Kühlung sorgen.

Der Wirkungsgrad vom Antrieb in einem Arbeitspunkt kann nie höher sein als das Verhältnis der Leerlaufdrehzahl zu Lastdrehzahl. Der Abstand zur Diagonalen im folgenden Graph ist eine Funktion vom Leerlaufstrom.



Berechnung vom Wirkungsgrad am Beispiel eines Torcster Brushless Red L4255/5-630.

Herstellerangabe: APC 17x8E 4s (14,57 V) 60,74 A 6781 rpm

$\text{rpm}_0 = 14.57 \text{ V} \cdot 630 \text{ rpm/V}$

$\text{eta_max} = 6781 \text{ rpm} / 9179 \text{ rpm}$

Der Wirkungsgrad in dem Arbeitspunkt liegt bei max. 74%. Der Leerlaufstrom spielt hier keine große Rolle, er ist verglichen mit dem Motorstrom vernachlässigbar. Daher kann man einen Wirkungsgrad von 74% annehmen.

6 Motor Exemplarstreuungen

Die Motoren unterliegen einer Exemplarstreuung welche in einem Toleranzniveau von einigen Prozent liegen.

Angaben von der Firma Maxon (Präzisionsantriebe) als Richtwert für höherwertige Motoren:

Leerlaufstrom +/- 50 %

Leerlaufdrehzahl +/- 10 %

Die Ursache sind die Toleranzen in den Magnetkennwerten (+/- 8 %), Wicklungswiderstand (+/- 7 %) sowie der Lagerreibung.

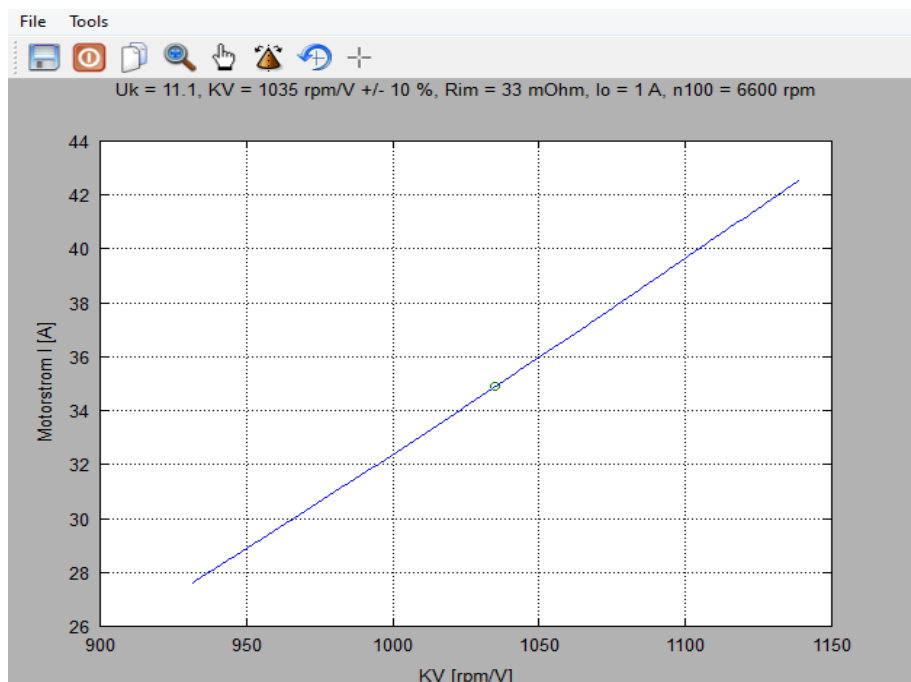
Bei sehr preiswerten Antrieben aus Fernost können meiner Erfahrung nach, die Exemplarstreuungen deutlich höher ausfallen. Abweichungen vom KV (Leerlaufdrehzahl) können durchaus im Bereich von 20 % - 25 % liegen.

7 Einfluss der Parameter auf die Berechnung im MatCalc

Die Parameter KV und n100 kommen in der Formel für die Drehzahl als auch in der Formel für den Motorstrom mit der 3 Potenz vor. Daher ist das Ergebnis der Berechnung stark von der Genauigkeit dieser Kennwerte abhängig. Der Einfluss vom Regler als auch die Motor Exemplarstreuungen können daher zu einer großen Abweichung der real gemessenen Werte verglichen mit der Berechnung führen. Die Abweichungen der gemessenen zu den berechneten Werten können sich daher durchaus auf +/- 25 % beim Strom und 10 % bei der Drehzahl belaufen. Im Worst Case können sogar noch größere Abweichungen auftreten.

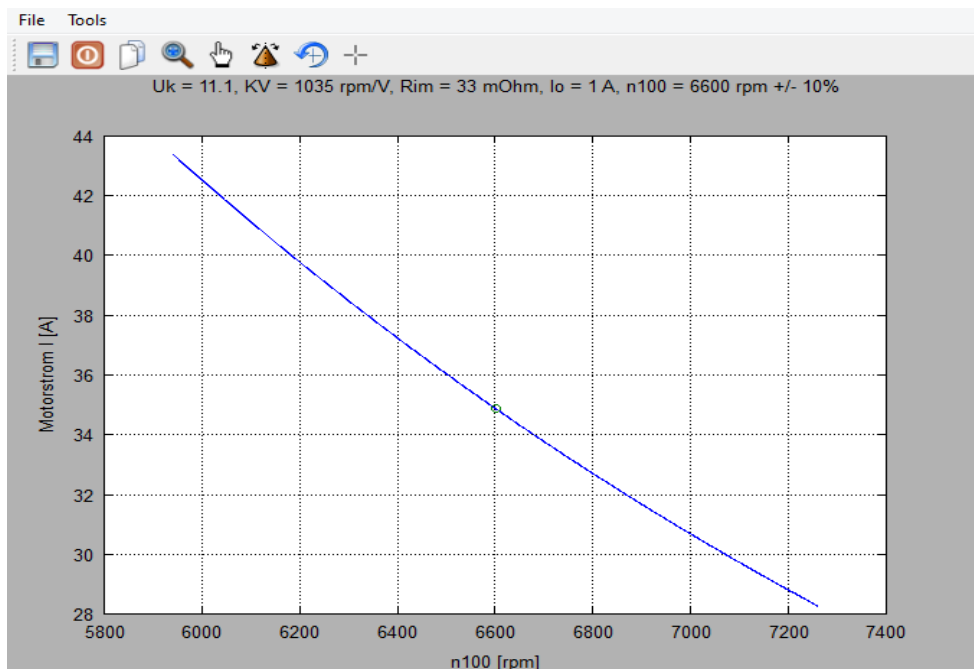
Bei den Propellern ist das n100 oft nicht bekannt, es kann nur durch Messungen bestimmt werden. Einzig der Hersteller der APC Luftschrauben hat die Propellerkennwerte n100, Cp usw. veröffentlicht. Bei Aeronaut gab es vor vielen Jahren mal Diagramme und eine Excel-Datei mit n100-Werten als Download.

Im folgenden Beispiel wird der Einfluss vom KV mit einer Toleranz von $\pm 10\%$ für einen AXI 2814/16 Cyclone dargestellt. Als Last wird eine ACC 10x8 M42 Klappluftschaube angenommen.



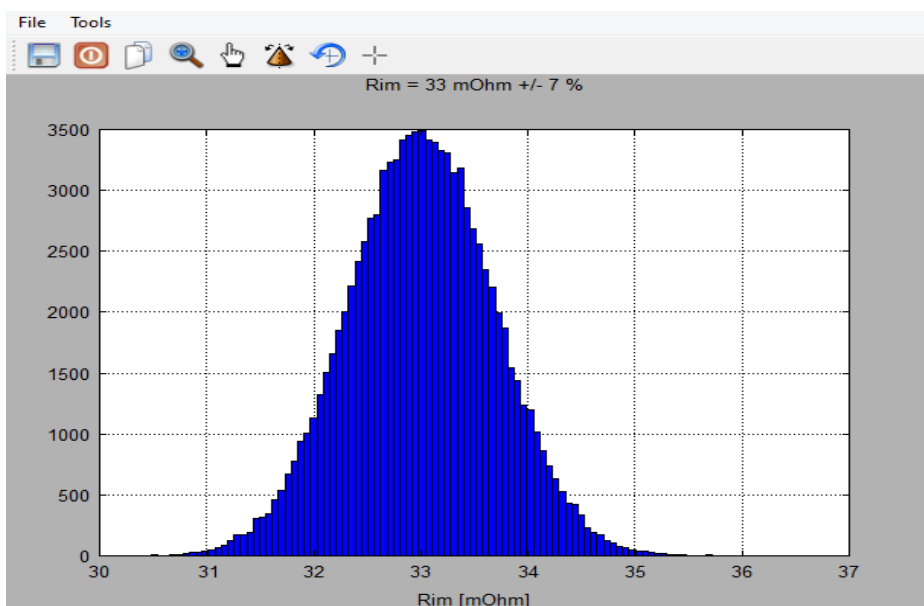
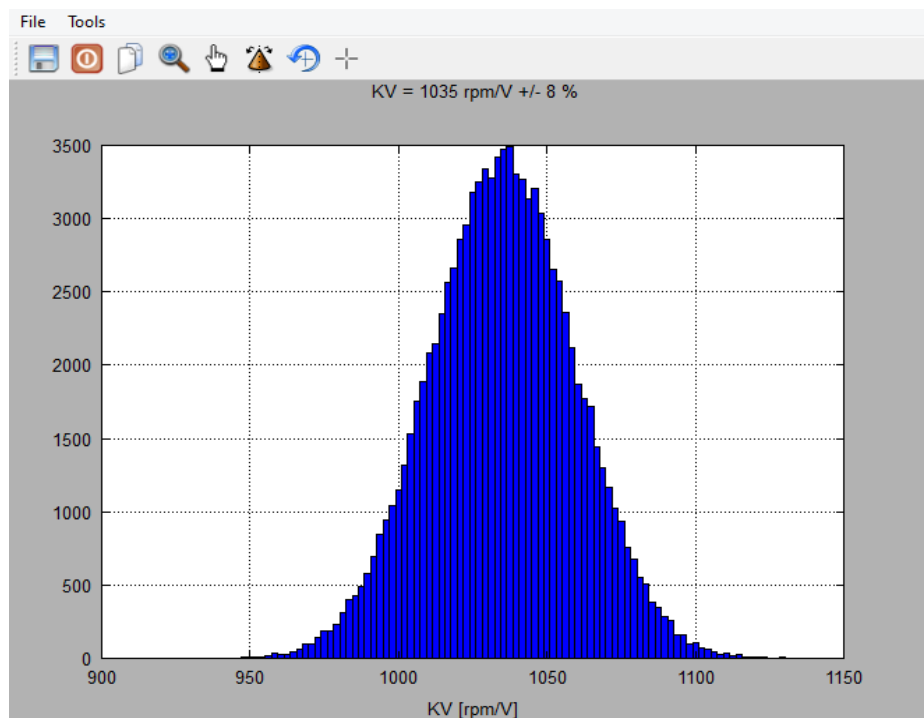
Die Abweichung beim Motorstrom beträgt ca. $\pm 22\%$. In der Praxis kann ein quadratischer Zusammenhang zwischen der Toleranz im KV und dem Motorstrom angenommen werden.

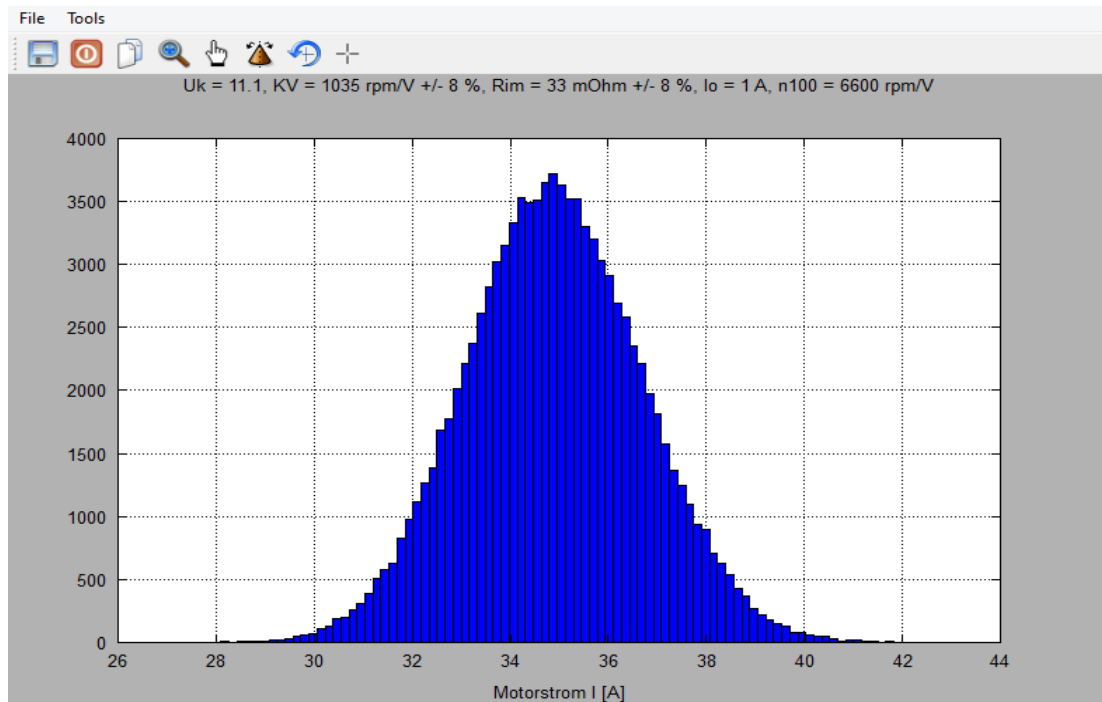
Jetzt wird der Einfluss der Toleranz im n100 von $\pm 10\%$ am selben Setup dargestellt.



Auch hier liegt der Einfluss der Toleranz vom n100 in der gleichen Größenordnung wie beim KV.

Im folgenden sind eine angenommene Normalverteilung vom KV und dem Motorinnenwiderstand sowie das Ergebnis (Monte Carlo Simulation) auf den Motorstrom dargestellt. Berechnet wurde die Normalverteilungen jeweils für 100.000 Werte.





Fazit:

Die Abweichungen zwischen Berechnung und Messung können aufgrund der Produkttoleranzen vom Motor im Worst Case einen Wert von $\pm 25 \%$ bei der Aufnahmeleistung bzw. dem Motorstrom erreichen. Typisch liegen die Abweichungen in einem Bereich von $\pm 11 \%$.

Nimmt man noch den Einfluss vom Regler und die Genauigkeit vom n100 hinzu, dann können die Abweichungen zwischen der Berechnung und der Messung die 25 % Marke noch in seltenen Fällen überschreiten.

Damit muss man leben. Daher gilt nach wie vor, ein Berechnungsprogramm wie mein MotCalc ersetzt keine Messung.

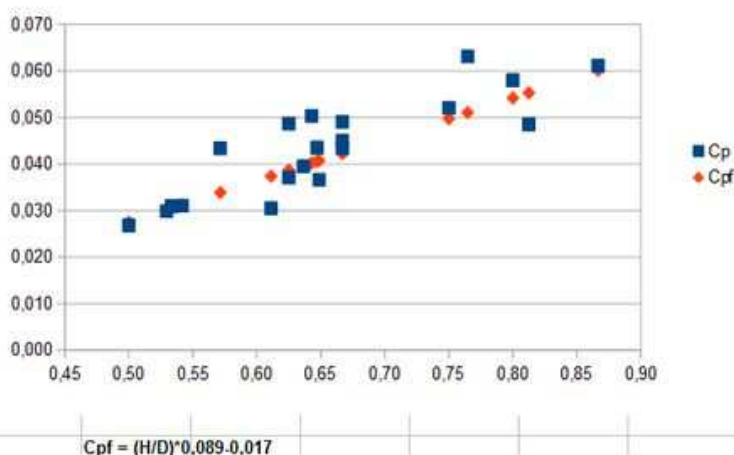
Anhang Propeller n100-Werte

A1 Aeronaut Cam Carbon (ACC)

			Gemessene N-100 Werte (=Drehzahl bei 100 W)														
			Mittelstück 42 mm					Mittelstück 47 mm					Mittelstück 52 mm				
			-5°	-2,5°	0°	+2,5°	+5°	-5°	-2,5°	0°	+2,5°	+5°	-5°	-2,5°	0°	+2,5°	+5°
CAM-Carbon	20,0 x 12,5 cm	8,0x 5,0"	11200	10700	10150	9450	9000	10750	10270	9750	9070	8640	10190	9740	9230	8600	8190
CAM-Carbon	23,0 x 12,5 cm	9,0x 5,0"	9900	9400	8800	8400	7900	9540	9060	8480	8100	7620	9138	8680	8120	7750	7290
CAM-Carbon	24,0 x 12,5 cm	9,5x 5,0"	9000	8550	8100	7550	7100	8680	8250	7810	7290	6850	8370	7950	7520	7020	6600
CAM-Carbon	25,5 x 15,0 cm	10,0x 6,0"	8800	8400	7850	7200	6650	8510	8123	7590	6962	6430	8184	7810	7320	6696	6184
CAM-Carbon	25,5 x 20,0 cm	10,0x 8,0"	7350	7000	6600	6000	5550	7100	6760	6330	5800	5360	6860	6530	6100	5600	5180
CAM-Carbon	28,0 x 18,0 cm	11,0x 7,0"	7250	6850	6400	5900	5450	7030	6640	6210	5720	5270	6820	6440	5960	5550	5120
CAM-Carbon	28,0 x 20,0 cm	11,0x 8,0"	6650	6450	6150	5500	5000	6450	6256	5960	5330	4850	6244	6056	5775	5165	4695
CAM-Carbon	30,5 x 16,5 cm	12,0x 6,5"	6890	6390	6000	5680	5430	6700	6210	5830	5520	5280	6500	6030	5660	5360	5120
CAM-Carbon	30,5 x 20,0 cm	12,0x 8,0"	5750	5550	5300	4900	4600	5590	5390	5150	4760	4470	5420	5230	5000	4620	4340
CAM-Carbon	30,5 x 23,0 cm	12,0x 9,0"	5700	5450	5050	4800	4450	5535	5290	4910	4660	4321	5375	5140	4760	4526	4196
CAM-Carbon	32,0 x 19,0 cm	12,5x 7,5"	5950	5750	5200	4900	4550	5790	5595	5060	4768	4430	5623	5434	4910	4630	4230
CAM-Carbon	33,0 x 20,0 cm	13,0x 8,0"	5700	5400	5150	4800	4450	5550	5260	5010	4670	4330	5390	5110	4880	4540	4210
CAM-Carbon	33,0 x 28,0 cm	13,0x11,0"	4850	4600	4400	3950	3650	4720	4480	4280	3850	3550	4590	4350	4170	3740	3450
CAM-Carbon	35,5 x 20,0 cm	14,0x 8,0"	4600	4400	4150	3900	3550	4490	4290	4050	3810	3460	4370	4180	3940	3710	3372
CAM-Carbon	35,5 x 23,0 cm	14,0x 9,0"	4400	4200	3950	3700	3350	4300	4100	3850	3600	3250	4150	4000	3750	3500	3150
CAM-Carbon	35,5 x 25,5 cm	14,0x10,0"	4170	3940	3750	3590	3450	4070	3840	3660	3500	3370	3960	3740	3560	3410	3280
CAM-Carbon	38,0 x 20,0 cm	15,0x8,0"	4950	4625	4140	3840	3550	4865	4545	4069	3774	3489	4781	4468	3999	3710	3429
CAM-Carbon	38,0 x 25,5 cm	15,0x10,0"	4150	4000	3700	3400	3170	4078	3931	3636	3341	3115	4009	3864	3574	3284	3062
CAM-Carbon	38,0 x 33,0 cm	15,0x13,0"	3800	3600	3300	3050	2850	3720	3520	3230	2980	2790	3620	3430	3150	2910	2720
CAM-Carbon	40,5 x 20,0 cm	16,0x8,0"	4560	4250	3900	3650	3350	4478	4173	3830	3584	3290	4405	4105	3767	3526	3236
CAM-Carbon	40,5 x 25,5 cm	16,0x10,0"	3960	3710	3500	3330	3190	3880	3640	3420	3260	3130	3790	3550	3350	3180	3050
CAM-Carbon	40,5 x 33,0 cm	16,0x13,0"	3550	3400	3200	2900	2650	3480	3330	3130	2840	2600	3400	3250	3060	2770	2530
CAM-Carbon	43,0 x 23,0 cm	17,0x 9,0"	3900	3700	3400	3250	3070	3820	3630	3330	3180	3010	3740	3550	3260	3120	2950
CAM-Carbon	43,0 x 28,0 cm	17,0x11,0"	3400	3180	3000	2860	2730	3330	3120	2940	2800	2670	3260	3050	2880	2740	2620
CAM-Carbon	43,0 x 33,0 cm	17,0x13,0"	2940	2790	2650	2540	2440	2880	2730	2600	2490	2390	2820	2680	2540	2440	2340
CAM-Carbon	45,5 x 28,0 cm	18,0x11,0"	3400	3250	3070	2800	2600	3342	3195	3018	2752	2556	3203	3061	2960	2637	2450
CAM-Carbon	47,0 x 30,5 cm	18,5x12,0"	3000	2900	2760	2430	2250	2958	2859	2721	2396	2218	2919	2822	2685	2364	2189

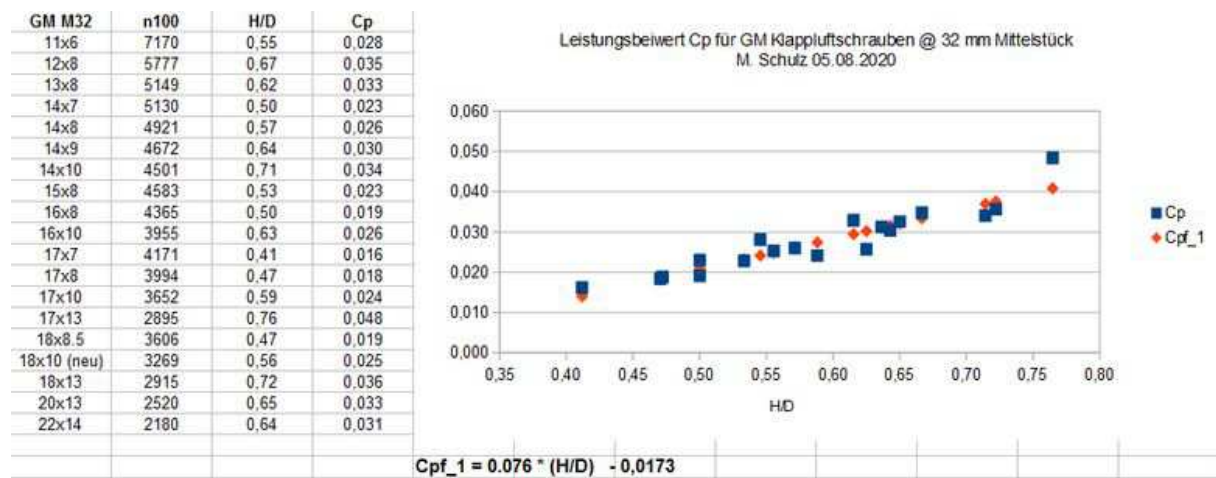
ACC M42	n100	H/D	Cp
8x5	10150	0,63	0,049
10x8	6600	0,80	0,058
11x7	6400	0,64	0,040
12x6,5	6000	0,54	0,031
12x8	5300	0,67	0,045
12x9	5050	0,75	0,052
13x8	5150	0,67	0,049
14x8	4150	0,57	0,043
14x9	3950	0,64	0,050
15x8	4140	0,53	0,031
15x10	3700	0,67	0,043
15x13	3300	0,87	0,061
16x8	3900	0,50	0,027
16x10	3500	0,63	0,037
16x13	3200	0,81	0,049
17x9	3400	0,53	0,030
17x11	3000	0,65	0,044
17x13	2650	0,76	0,063
18x11	3070	0,61	0,031
18,5x12	2760	0,65	0,037

Leistungsbeiwert Cp für ACC Klappflugschrauben @ 42 mm Mittelstück
M. Schulz 24.07.2020



A2 GM Klappflurtschrauben

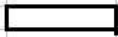
Die Werte der GM Klappflurtschrauben basieren auf Messwerten der A. Reisenauer Home Page, sowie aus eigenen Messwerten. Die Scale Klappflurtschrauben sind nicht enthalten.



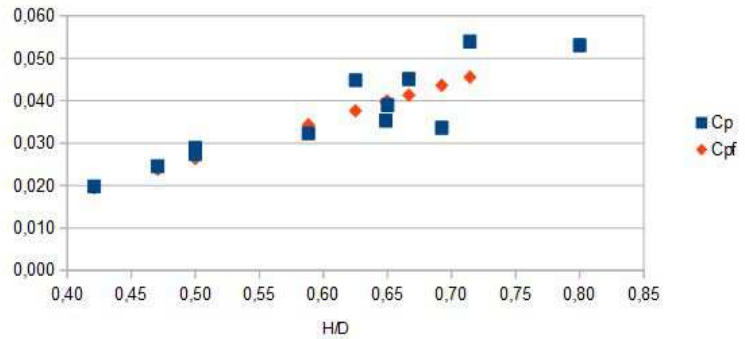
A3 RFM Klappluftschrauben

Die Werte der GM Klappluftschrauben basieren auf Messwerten der A. Reisenauer Home Page. Die RF S-Typen sind nicht enthalten.

RF M42	n100	H/D	Cp
10x8	6798	0,80	0,053
12x6	6251	0,50	0,027
12x8	5297	0,67	0,045
13x9	5112	0,69	0,034
14x10	3859	0,71	0,054
16x8	3806	0,50	0,029
16x10	3286	0,63	0,045
17x8	3629	0,47	0,025
17x10	3312	0,59	0,032
18.5x12	2793	0,65	0,035
19x8	3239	0,42	0,020
20x13	2374	0,65	0,039



Leistungsbeiwert Cp für RF Klappluftschrauben @ 42 mm Mittelstück
M. Schulz



$$Cpf = (H/D)^{0,089-0,018}$$