

Vergleich eines
SLS-42-220
mit einem
blockkommutierenden Regler
mittels Leistungsmessung
auf der DC-Eingangsseite

(C) IBZ 09.02.2007

www.SinusLeistungsSteller.de

info@SinusLeistungsSteller.de

1. Einführung

Die bestehenden Vorteile des SinusLeistungsStellers (SLS) sollen im Folgenden meßtechnisch belegt werden.

Hierzu wurden diverse Größen im DC-Eingangskreis sowohl eines SLS-42-220 als auch eines Vertreters der im Modellbau üblichen Regler/Steller (nennen wir ihn hier "XY-Regler") aufgenommen. Um einen späteren Vergleich dieser Meßwert zu ermöglichen wurde soweit möglich auf Einhaltung von identischen Meßbedingungen geachtet. Beide Regler wurden an einem PREDATOR 30/8 der Firma Plettenberg betrieben, der einen 32x12"-Carbonpropeller der Firma Fuchs im Standschubversuch antrieb.

Beide Meßreihen wurden innerhalb einer Stunde aufgenommen, um gleiche Verhältnisse bzgl. Temperatur und Luftdruck zu gewährleisten. Als erstes wurde der XY-Regler vermessen, im Anschluß daran der SLS-42-220.

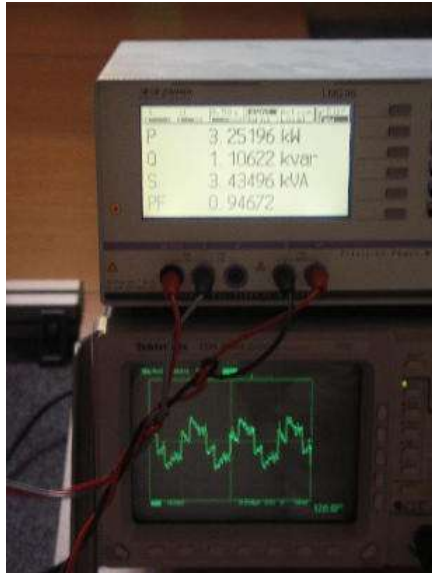
2. Versuchsaufbau und - durchführung

Der zu vermessende Regler wurde AC-seitig mit dem Motor verbunden. Eine Motorphase wurde mit einem Stromwandler bestückt - zur bloßen Darstellung der Stromform auf einem Oszilloskop.

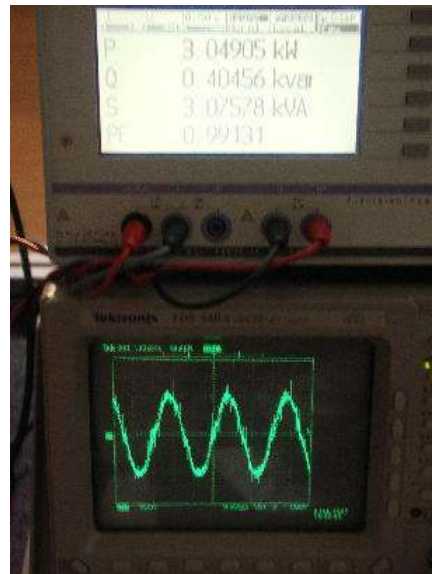
Auf der DC-Seite wurden die vom Konstanter kommenden Zuleitungen (ca. 2m, 25mm², verdreht) mit einer Kondensatorbatterie (2x4700µF/100V, Schraub-ELKOs) kompensiert und gepuffert. An diese Kondensatorbatterie wurde der Regler mit kurzen Leitungen (6mm², ca. 10cm) angeschlossen. In der Masseleitung dieser kurzen Verbindung wurde ein Shunt (500µOhm, 1%, 12W) eingeschleift. Das hier abgegriffene Stromsignal wurde mittels eines Meßverstärker vorverstärkt und dem Leistungsmeßgerät zugeführt. Die DC-Eingangsspannung wurde direkt an der Kondensatorbatterie abgegriffen und dem LMG95 zugeführt.

Während des Versuchs wurde sowohl die Temperatur des Reglers (Thermokamera) als auch die Temperatur des Motors (Thermoelement in einer Motorwicklung) überwacht.

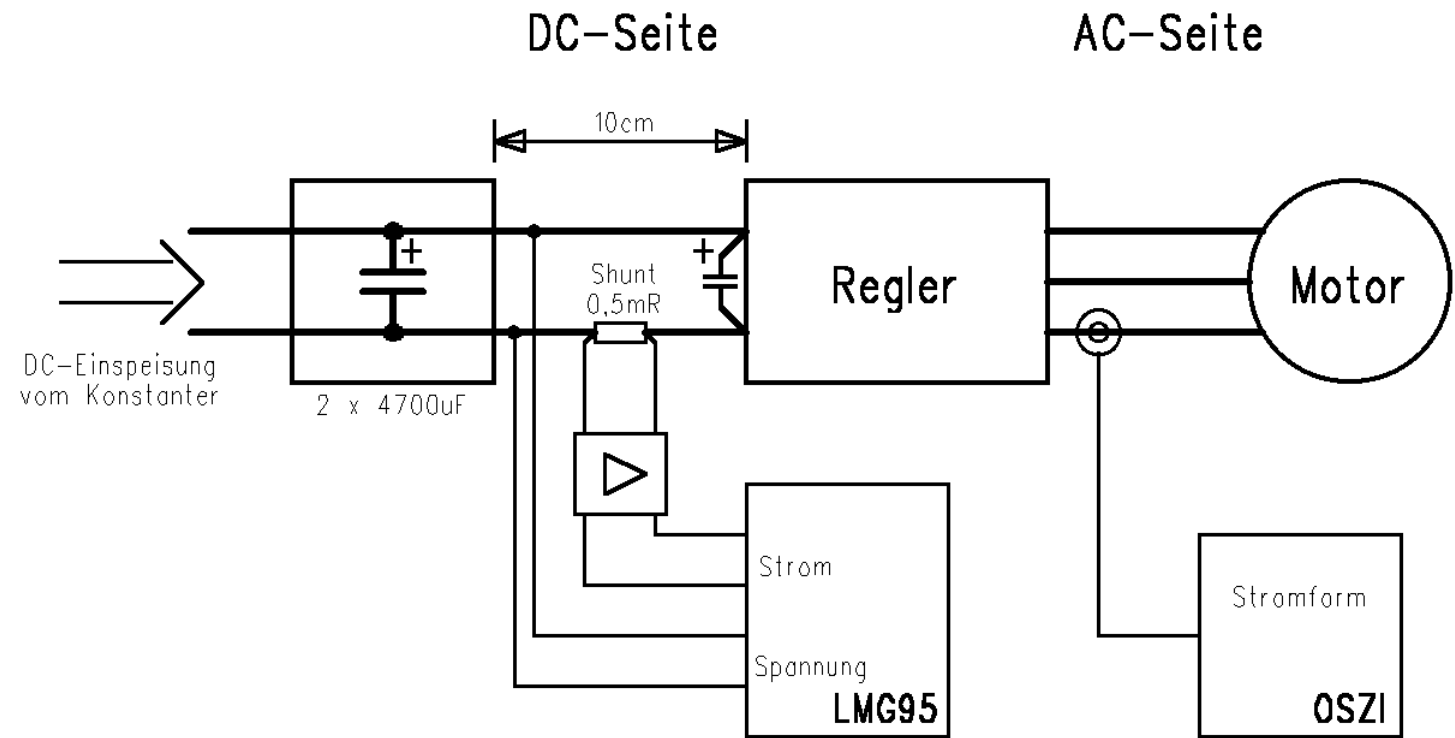
Nach Erreichen der gewünschten Drehzahl wurden die Meßwerte (nach Erreichen stabiler Werte) nacheinander vom LMG95 abgelesen und in eine Tabelle übertragen. Bis alle Werte eines Meßpunkts notiert waren, lief der Antrieb ca. 1 Minute mit der jeweiligen Drehzahl. Für die Aufnahme einer kompletten Meßreihe beider Reglers wurden jeweils ca. 15 Minuten benötigt.



XY-Regler@100%,30V_{dc}, 1cm=100A



SLS @ 100%, 30V_{dc}, 1cm=50A



3. Meßgrößen

Alle Meßgrößen wurden mit einem Leistungsmeßgerät (LMG95 der Firma Zimmer) ermittelt. Das LMG95 kann alle Größen unabhängig von der tatsächlichen Kurvenform ermitteln - ist also nicht auf die Messung von sinusförmigen Größen beschränkt. Die Eingangssignale für Strom und Spannung werden gleichzeitig mit ca. 100kHz und einer Auflösung von 16Bit abgetastet. Es lassen sich hiermit also noch Oberwellen bis zu einer Grenzfrequenz von 50kHz erfassen.

Im Einzelnen wurden folgende Meßwerte über die Drehzahl aufgezeichnet:

3.1. DC-Eingangsspannung

Die Eingangsspannung wurde sowohl als **arithmetischer Mittelwert** (U_{mean} bzw. U_{dc}) als auch als **Effektivwert** (U_{trms}) gemessen. Am Konstanter wurde die Ausgangsspannung bei jedem Meßpunkt so nachgeregelt, daß sich an der Kondensatorbatterie eine Spannung von 37,0V einstellte und damit die Spannungsabfälle auf der Zuleitung ausgeglichen wurden.

$$U_{dc} = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T u(t) dt$$

$$U_{trms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T u(t)^2 dt}$$

Bei der Messung zeigten sich keine Unterschiede zwischen U_{mean} und U_{trms} - die Kondensatorbatterie zeigte hier also ausreichende Wirkung (Glätten der Betriebsspannung).

3.2. DC-Eingangsstrom

Der Eingangsstrom wurde ebenfalls sowohl als **arithmetischer Mittelwert** (I_{mean} bzw. I_{dc}) als auch als **Effektivwert** (I_{trms}) gemessen.

$$I_{dc} = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T i(t) dt$$

$$I_{trms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T i(t)^2 dt}$$

Bei der Messung zeigten sich durchaus Unterschiede zwischen I_{mean} und I_{trms} - daraus kann geschlossen werden, daß kein "glatter" Gleichstrom aus der Versorgung gezogen wird, sondern dem DC-Strom ein AC-Strom in Form von Oberwellen überlagert ist.

3.3. Wirk-, Blind- und Scheinleistung

Aus den Strom- und Spannungssignalen kann das LMG95 Wirk- (P), Blind- (Q) und Scheinleistung (S) errechnen.

$$S = U_{trms} * I_{trms}$$

$$P = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T u(t)i(t)dt$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Eine hohe **Blindleistung** läßt direkt auf großen Oberwellenanteil schließen. Für weiterführende Berechnungen (z.B. Wirkungsgrad) wird die **Wirkleistung** benötigt. Mit der **Scheinleistung** kann auf die Belastung der Spannungsquelle und der Zuleitungen geschlossen werden.

Die **Wirkleistung** kann als Realteil, die **Blindleistung** als Imaginärteil der in der komplexen Ebene dargestellten **Scheinleistung** aufgefaßt werden. Ihre Beträge sind über die Formel $S^2 = P^2 + Q^2$ miteinander verknüpft - unabhängig von der Signalform!

3.4. Leistungsfaktor

Mit dem Leistungsfaktor (Lambda) wird das Verhältnis von Wirk- zu Scheinleistung ausgedrückt.

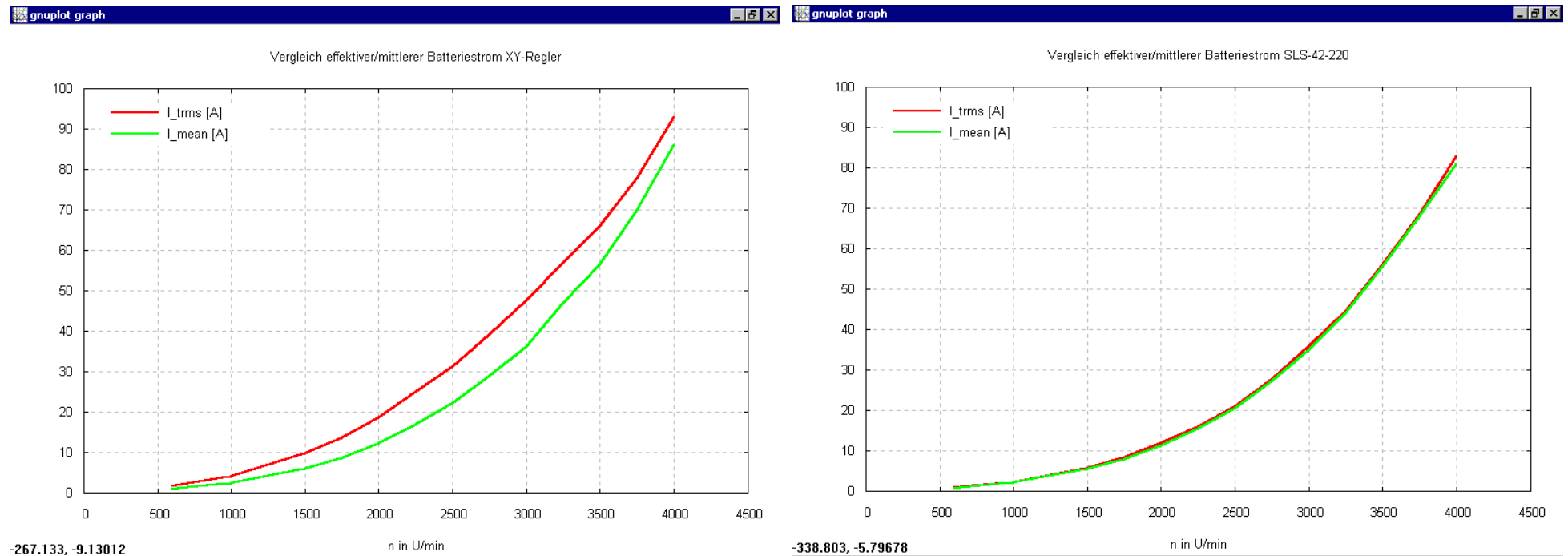
$$\lambda = \frac{|P|}{S}$$

Der Leistungsfaktor erlaubt eine direkte Beurteilung der "Güte der Leistungsentnahme" aus der Quelle. Je näher dieser Wert an einen Idealwert von 1.0 heranreicht, je gleichmäßiger und somit verlustärmer wird Energie aus einer Quelle entnommen.

4. Ergebnisse in graphischer Form

(alle Meßwerte können den Wertetabellen im Anhang entnommen werden)

4.1. Eingangsstrom

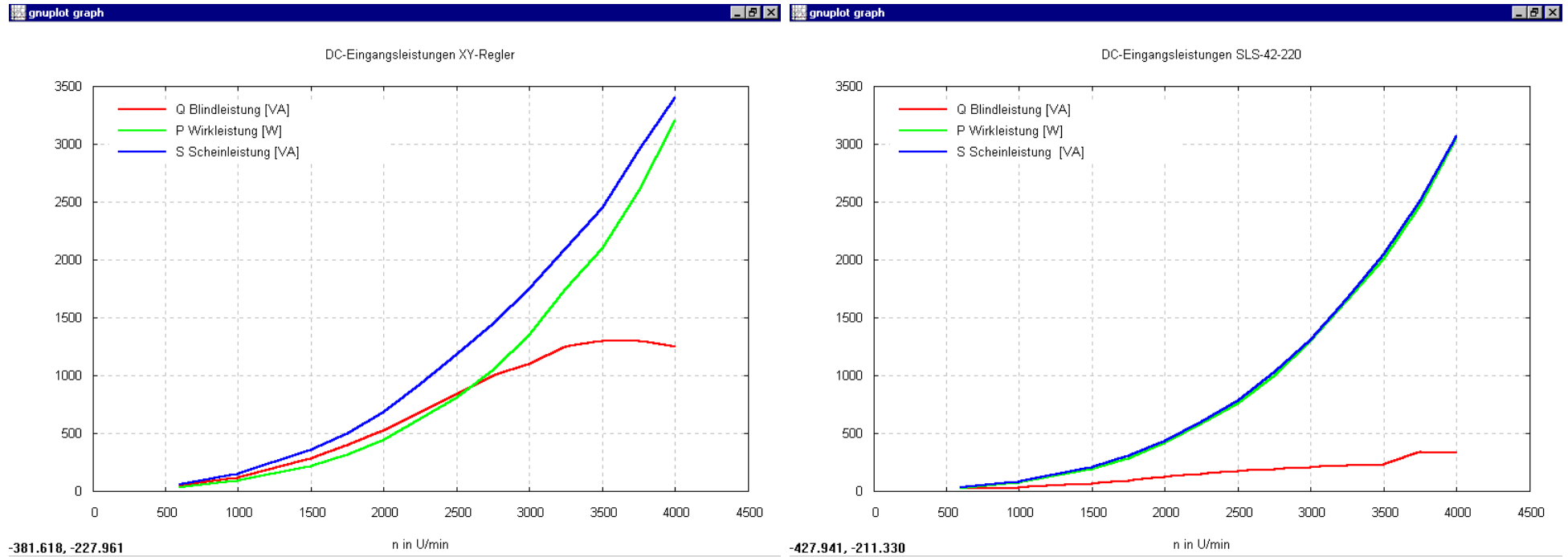


Beim **XY-Regler** zeigt sich ein starker Unterschied zwischen I_{mean} und I_{trms} . => hoher Oberwellenanteil!

Beim **SLS** (rechts) verlaufen beide Werte fast deckungsgleich => glatter DC-Strom über den gesamten Drehzahlbereich!

Versuche, den effektiven Batteriestrom beim XY-Regler mit einfachen Meßgeräten zu bestimmen, würde sicherlich zu erheblichen Meßfehlern und Fehleinschätzungen führen! Oft wird der Batteriestrom mit einem Shunt gemessen und der Spannungsabfall mit massiven RC-Kombinationen geglättet... **eine solche Schaltung kann nur I_{mean} erfassen. Oberwellen und evtl. Blindanteile werden hiermit nicht berücksichtigt!**

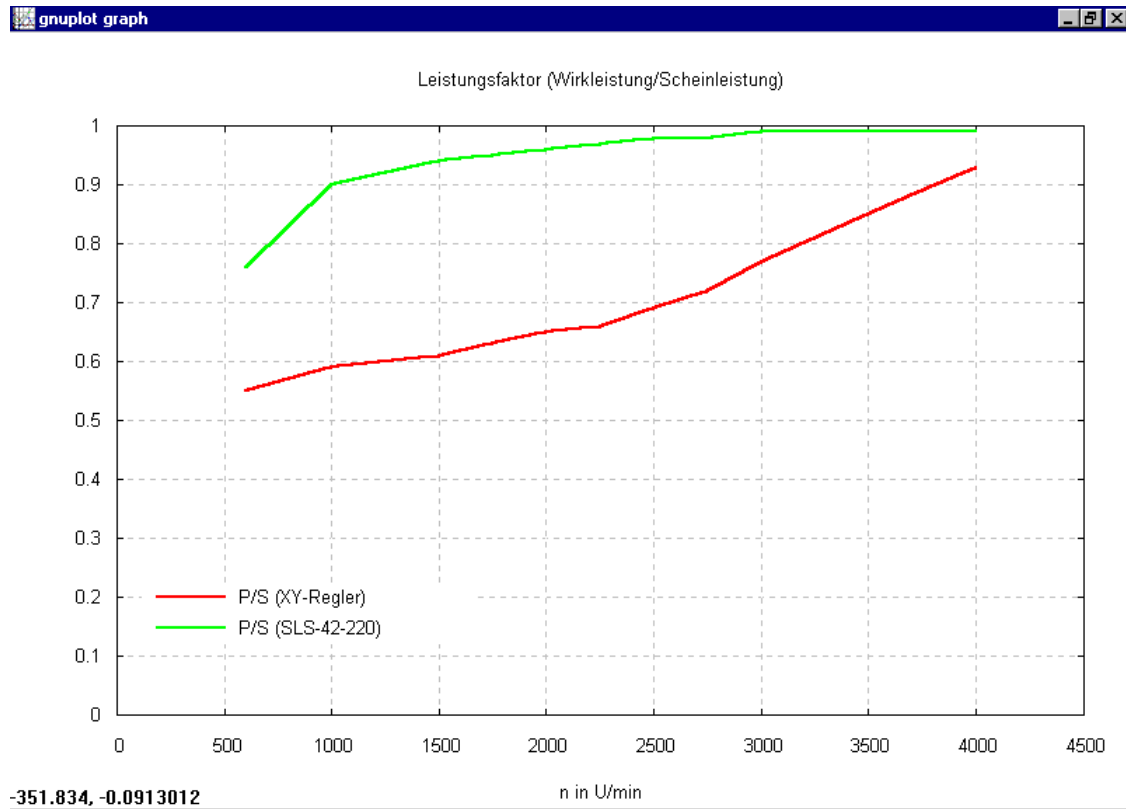
4.2. Eingangsleistungen im Überblick



Wieder zeigt sich beim **XY-Regler** ein hoher Oberwellenanteil! Zu erkennen an den hohen Blindleistungswerten und der von der Wirkleistung deutlich abweichenden Scheinleistung.

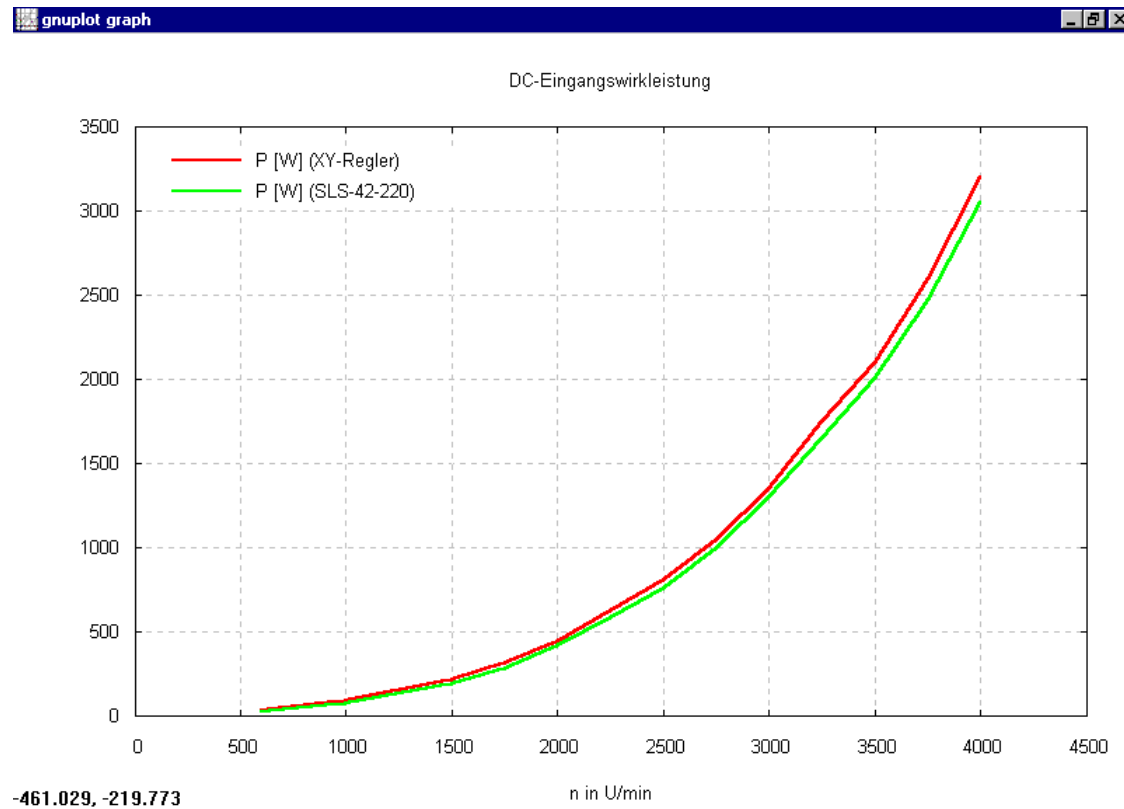
Beim **SLS** (rechts) kann nur geringe Blindleistung gemessen werden. Fast deckungsgleiche Kurven für Wirk- und Scheinleistung!

4.3. Leistungsfaktor



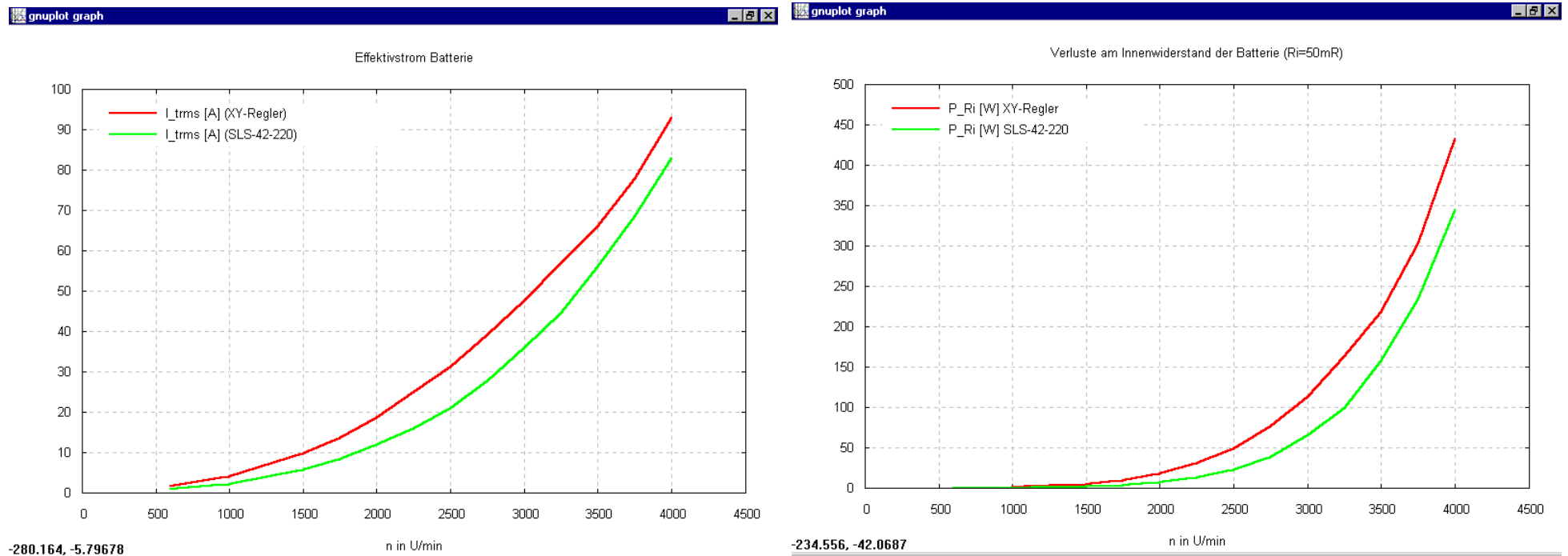
Bei direktem Vergleich der Leistungsfaktoren von **XY-Regler** und **SLS** wird der Unterschied und die Überlegenheit des SLS am deutlichsten: der SLS hält fast über den gesamten Drehzahlbereich einen Leistungsfaktor von > 0.9 , während der XY-Regler diesen Wert erst bei sehr hohen Drehzahlen knapp erreichen kann.

4.4. Eingangs-Wirkleistungen im direkten Vergleich



Stellt man die aufgenommene Wirkleistung von **XY-Regler** und **SLS** in einem gemeinsamen Diagramm dar, kann man auf einen ca. **4-5% besseren Gesamtwirkungsgrad** (Regler+Motor) des SLS schließen. ... jeweils gleiche Drehzahl mit weniger Eingangsleistung! ... mit dem vermessenen Antrieb bei 4.000 U/min immerhin **150W** weniger!

4.5. Effektivströme im direkten Vergleich und Auswirkungen auf die Batterieverluste/-erwärmung



Einen weiteren positiven Effekt zeigt der SLS, wenn man die Verluste am Innenwiderstand der Batterie mit in die Betrachtung einbezieht. Für die Verluste am Innenwiderstand (=Erwärmung der Batterie!) ist der Effektivstrom I_{trms} maßgeblich. Die Effektivströme beider Regler sind im linken Bild dargestellt. Nimmt man für einen 10S4P-LIPO-Akku einen Innenwiderstand von 50mOhm(*) an, so kann man die Verluste mit $P=I^2R$ berechnen (rechtes Bild). Beim SLS können bei dieser Annahme weitere **ca. 90W** Verluste vermieden werden, die Eigenerwärmung des Akkus deutlich reduziert und der Gesamtwirkungsgrad (Regler+Motor+Batterie) **um ca. 7-8% verbessert** werden!

(*) die angenommenen 50mOhm sind sehr optimistisch und gelten sicherlich nur bei vollem Akku. Bei zunehmender Entladung und Erwärmung der Zellen erhöht sich ihr R_i bekanntlich und die Verluste nehmen weiter zu! ... ein Grund, bei teilentladenen LIPOs den Strom zu reduzieren; alles andere würde Einbußen der möglichen Ladezyklen oder gar den Totalverlust der Zellen zur Folge haben!

5. Fazit

Unter Einbeziehung des oben beschriebenen Zusatzeffekts auf die Reduzierung der Batterieverluste und die damit verbundene Verbesserung des Wirkungsgrads um relativ **7-8%** übertrifft unsere Erwartungen und bestärkt uns, den eingeschlagenen Weg weiter zu verfolgen.

Indirekt läßt sich der verbesserte Wirkungsgrad des Motors alleine anhand der gemessenen geringeren Temperatur belegen: Mit XY-Regler erwärmte sich der Motor auf **75°C** - mit SLS nur auf **70°C**.

Bisher kann auf den Gesamtwirkungsgrad nur indirekt durch Vergleichsmessung geschlossen werden. Um den Wirkungsgrad des Reglers direkt als Absolutwert messen zu können, ist auch eine Leistungsmessung auf der AC-Seite unumgänglich. Diese setzt jedoch eine erhebliche verbesserte Meßtechnik voraus, da die AC-Motorspannung bedingt durch die Puls-Weiten-Modulation sehr hohe Frequenzanteile enthält und als Effektivwert bestimmt werden muß. Die vorhandene Meßtechnik reicht für eine solche Messung (noch) nicht aus.

Aber nicht nur die Verbesserung des Wirkungsgrads eines Antriebs kann als Argument für den SLS ins Feld geführt werden. Auch die Schonung der eingesetzten Akkus und die zu erwartende Erhöhung der Ladezyklen sprechen für den SLS.

Selbstverständlich wird der SLS nur für anspruchsvolle Anwendungen mit Antrieben entsprechend hoher Leistung zum Einsatz kommen, bei denen der erheblich höhere Schaltungsaufwand des SLS gerechtfertigt erscheint. Unter Kosten-Nutzen Betrachtungen wird der blockkommutierende Regler/Steller bei einfacheren Antrieben weiterhin seine Berechtigung haben.

Anhang:

- Wertetabelle der Messung mit SLS-42-220
- Wertetabelle der Messung mit XY-Regler

SLS-42-220 (mit PREDATOR + 32" Carbon-Propeller)

(1x1000µF Eingangs-ELKO, 24xD²Pack MOSFETs, 25,8kHz PWM-Frequenz)

<i>n[U/min]</i>	<i>U_{mean} [V]</i>	<i>I_{mean} [A]</i>	<i>U_{trms} [V]</i>	<i>I_{trms} [A]</i>	<i>P [W]</i>	<i>Q [VA]</i>	<i>S [VA]</i>	<i>P/S</i>
600	37.0	0.72	37.0	0.942	26.7	22.5	34.9	0.76
1000	37.0	2.0	37.0	2.18	73.0	33.5	82.5	0.90
1500	37.0	5.38	37.0	5.75	193.0	66.5	203.0	0.94
1750	37.0	7.77	37.0	8.2	285.0	94.0	310.0	0.95
2000	37.0	11.2	37.0	11.8	415.0	120.0	430.0	0.96
2250	37.0	15.5	37.0	16.0	580.0	148.0	600.0	0.97
2500	37.0	20.5	37.0	21.0	760.0	175.0	785.0	0.98
2750	37.0	27.0	37.0	27.5	1000.0	190.0	1030.0	0.98
3000	37.0	35.0	37.0	36.0	1300.0	205.0	1310.0	0.99
3250	37.0	44.0	37.0	44.5	1650.0	220.0	1670.0	0.99
3500	37.0	55.5	37.0	56.0	2010.0	233.0	2050.0	0.99
3750	37.0	68.0	37.0	68.5	2480.0	340.0	2520.0	0.99
4000	37.0	81.0	37.0	83.0	3050.0	330.0	3070.0	0.99

am Ende der Meßreihe:

T(Regler) = 42°C (direkt an einem MOSFET der Endstufe gemessen)

T(Motor) = 70°C (in einer Wicklung gemessen)

"XY-Regler" (mit PREDATOR + 32" Carbon-Propeller)

(5x220 μ F=1100 μ F Eingangs-ELKOs; 30xD²PACK-MOSFETs; hartes Timing)

<i>n[U/min]</i>	<i>Umean [V]</i>	<i>Imean [A]</i>	<i>Utrms [V]</i>	<i>Itrms [A]</i>	<i>P [W]</i>	<i>Q [VA]</i>	<i>S [VA]</i>	<i>P/S</i>
600	37.0	0.80	37.0	1.50	30.5	46.5	55.5	0.55
1000	37.0	2.33	37.0	3.92	85.9	116.8	145.5	0.59
1500	37.0	5.95	37.0	9.65	218.0	283.0	357.0	0.61
1750	37.0	8.55	37.0	13.5	315.0	395.0	500.0	0.63
2000	37.0	12.10	37.0	18.5	440.0	525.0	685.0	0.65
2250	37.0	16.90	37.0	25.0	625.0	680.0	920.0	0.66
2500	37.0	22.0	37.0	31.2	810.0	840.0	1180.0	0.69
2750	37.0	28.7	37.0	39.0	1050.0	1000.0	1450.0	0.72
3000	37.0	36.2	37.0	47.5	1350.0	1100.0	1750.0	0.77
3250	37.0	47.0	37.0	57.0	1750.0	1250.0	2100.0	0.81
3500	37.0	56.5	37.0	66.0	2100.0	1300.0	2450.0	0.85
3750	37.0	70.0	37.0	78.0	2600.0	1300.0	2950.0	0.89
4000	37.0	86.0	37.0	93.0	3200.0	1250.0	3400.0	0.93

am Ende der Meßreihe:

T(Regler) = 61°C (höchste Temperatur wurde an den ELKOs gemessen)

T(Motor) = 75°C (in einer Wicklung gemessen)