

Strom- und Leistungsmessung **auf der DC-Seite von** **Umrichtern**

Bedeutung der Meßgrößen

Mittelwert, Effektivwert

sowie

Wirk-, Blind- und Scheinleistung

(C) IBZ 28.01.2013

www.SinusLeistungsSteller.de

info@SinusLeistungsSteller.de

1. Einleitung

Moderne bürstenlose E-Motoren werden mit getakteten Umrichtern ("Reglern") gesteuert, die ihrerseits aus einem Gleichspannungs-Zwischenkreis versorgt werden. Diese Gleichspannung kann mit einem Netzteil aus dem Versorgungsnetz z.V. gestellt werden oder (z.B. für mobile Anwendungen) auch direkt aus einem Akku bezogen werden.

Für die Beurteilung eines solchen Reglers und einem evtl. Vergleich mit anderen Reglern müssen zunächst reglertypische und vergleichbare Meßwerte ermittelt werden. Diese können meßtechnisch am einfachsten auf der Gleichspannungsseite des Reglers gewonnen werden. Durch die getaktete Natur dieser Regler gibt es hier jedoch einige Punkte zu beachten, auf welche dieses Papier hinweisen möchte.

Zunächst werden die Möglichkeiten zur Messung des Eingangsstroms erläutert. Die unterschiedliche Bedeutung und Aussagekraft von **Mittelwert-** und **Effektivwertmessung** werden aufgezeigt und an Beispielen verdeutlicht.

Ferner wird auf die Leistungsmessung eingegangen. Dabei wird zwischen **Wirk-, Blind- und Scheinleistung** unterschieden. Auf dieser Basis werden Unterscheidungsmerkmale zwischen blockkommutierten und sinuskommutierten Reglern sowohl bei für den Vollastfall als auch für Teillast erläutert.

Schließlich wird auch noch der **Leistungsfaktor Lambda** eingeführt und erklärt.

So weit möglich, wird dabei auf eine komplizierte mathematische Herangehensweise verzichtet, um einen Einstieg in diese Thematik zu erleichtern.

2. Strommessung

2.1. Definition von Mittelwert und Effektivwert:

Der **Mittelwert (I_{dc})** eines Stroms ergibt sich aus:

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

In der Praxis kann **I_{dc}** mit einem Shunt und nachgeschaltetem Tiefpaßfilter mit relativ geringem Schaltungsaufwand gemessen werden. Aus dem Stromsignal wird im Prinzip nur der Gleichanteil extrahiert und als Meßwert weiterverarbeitet.

Der **Effektivwert (I_{rms})** errechnet sich wie folgt:

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

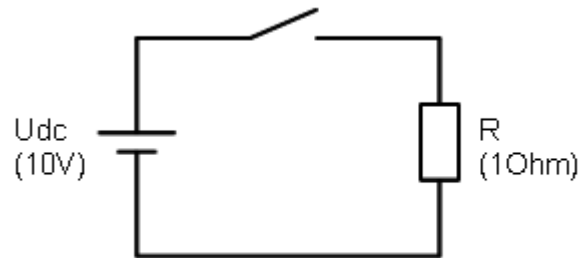
(“trms” steht hier für “true-root-mean-square”)

Die Bestimmung von **I_{rms}** stellt erheblich höhere Ansprüche an die Auswerteelektronik, da die aktuelle Stromform zunächst quadriert, dann gefiltert und schließlich auch noch die Wurzel aus diesem gefilterten Wert gezogen werden muß.

Viele erhältliche Effektivwert-Meßgeräte sind für die Messung von Strömen (und Spannungen) im Versorgungsnetz (50Hz/60Hz) konzipiert und legen zur weiteren Vereinfachung der Auswertung ein näherungsweise sinusförmiges Signal zugrunde. Häufig wird hierbei nur von **rms**-Messung gesprochen. Für die Messung an Brushlessreglern und Umrichtern sind sie nur eingeschränkt verwendbar, da insbesondere höhere Frequenzanteile nicht mehr korrekt berücksichtigt werden. Für eine genaue Bestimmung von trms-Signalen ist also spezielle Meßtechnik notwendig, die mit möglichst hoher Abtastrate die zu messenden Signale möglichst gleichzeitig abtastet und diesen Datenstrom der Auswertung und weiteren Berechnung zuführt. Bei unseren Messungen kommt deshalb ein hochpräzises [LMG95](#) der [ZES Zimmer GmbH](#) zum Einsatz.

2.2. Anwendung auf ein einfaches Beispiel

Betrachten wir zunächst folgenden einfachen Stromkreis, wobei wir alle Komponenten zur Vereinfachung als ideal ansehen wollen:



Der Widerstand R wird über einen Schalter an eine Quelle angeschlossen.

Ist der Schalter dauerhaft geschlossen, fließt ein Gleichstrom von $10V/10\Omega=10A$ und der Widerstand setzt eine Leistung von konstant $10V*10A=100W$ in Wärme um.

Wird der Schalter periodisch geschlossen und geöffnet, fließt in der eingeschalteten Zeit ebenfalls 10A, die **Momentanleistung** beträgt auch hier 100W. In der AUS-Zeit fließt kein Strom und es wird auch keine Leistung in Wärme umgesetzt.



Gehen wir jetzt davon aus, der Schalter ist periodisch je 50% EIN und dann 50% der Zeit AUS, dann wird im Widerstand eine **mittlere Leistung** von nur 50W umgesetzt. Also nur die Hälfte, da der Schalter auch nur die Hälfte der Zeit eingeschaltet ist. (Die Schaltfrequenz spielt in diesem ideal gedachten Beispiel keine Rolle.) Auch der mittlere Strom I_{dc} wird auf 5A halbiert. Aus der Quelle wird im Mittel also $5A*10V=50W$ entnommen – die Welt des Elektronikers ist bis hierhin also in bester Ordnung ...

.... ein Problem entsteht jedoch, wenn wir jetzt über den gerechneten (und auch real meßbaren!) **mittleren Strom** von **$I_{dc} = 5A$** auf die im Widerstand R umgesetzte Leistung schließen wollen:

Nach $P = I^2 \cdot R$ erhalten wir $P = 5A \cdot 5A \cdot 10\Omega = 25W$

Wir wissen aber bereits aus obigen Überlegungen, daß tatsächlich 50W umgesetzt und diese auch tatsächlich aus der Quelle entnommen werden!

...wo liegt der Fehler???

Werfen wir zunächst noch einen Blick darauf, wie dieses Vorgehen bei anderen EIN/AUS-Verhältnissen aussehen würde:

Tastverhältnis EIN/AUS	mittlerer Strom Idc	tatsächliche Leistung P = Udc * Idc	$P' = Idc^2 * R$	P/P'
1	10A	100W	100W	1
0,9	9A	90W	81W	1,11
0,8	8A	80W	64W	1,25
0,7	7A	70W	49W	1,42
0,6	6A	60W	36W	1,67
0,5	5A	50W	25W	2
0,4	4A	40W	16W	2,5
0,3	3A	30W	9W	3,33
0,2	2A	20W	4W	5
0,1	1A	10W	1W	10

Selbst bei einem großen Tastverhältnis von 90% ist der Fehler in unserem Beispiel schon größer als 10%!
Je kleiner das Tastverhältnis wird, je dramatischer wird die Abweichung...

Nehmen wir jetzt den **Effektivstrom I_{rms}** in unsere Überlegungen mit auf.

Die unhandliche Integralformel (2) können wir für das betrachtete Rechtecksignal dieses Beispiels in eine einfachere Form bringen:

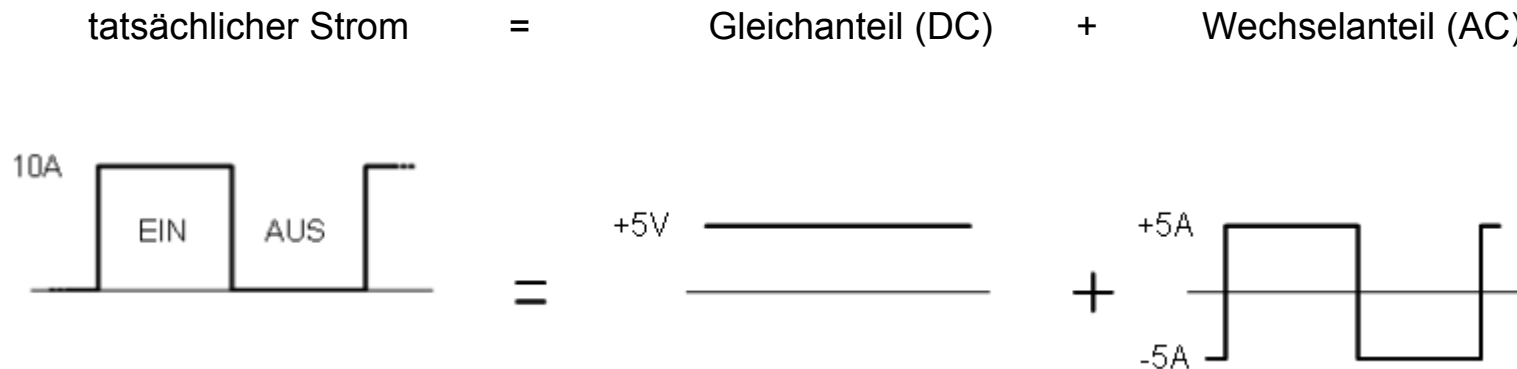
$$I_{rms} = \sqrt{T_v * (10A)^2} \quad T_v \text{ steht hierbei für das Tastverhältnis EIN/AUS}$$

Tastverhältnis	mittlerer Strom	tatsächliche Leistung	effektiver Strom		
T_v	I_{dc}	$P = U_{dc} * I_{dc}$	I_{rms}	$P'' = I_{rms}^2 * R$	P/P''
1	10A	100W	10A	100W	1
0,9	9A	90W	9,48A	90W	1
0,8	8A	80W	8,94A	80W	1
0,7	7A	70W	8,37A	70W	1
0,6	6A	60W	7,75A	60W	1
0,5	5A	50W	7,07A	50W	1
0,4	4A	40W	6,32A	40W	1
0,3	3A	30W	5,48A	30W	1
0,2	2A	20W	4,47A	20W	1
0,1	1A	10W	3,16A	10W	1

Rechnet man also mit dem **Effektivstrom** die Leistung im Widerstand aus, so ergeben sich die korrekten Werte! Die aus der Quelle entnommen Leistung stimmt für alle Tastverhältnisse mit der im Widerstand in Wärme umgesetzten Leistung überein. **Mit dem Effektivstrom geht die Rechnung auf, der Widerspruch verschwindet!**

2.3. Aufteilung in Stromkomponenten

Stellen wir uns das Stromsignal aus dem Beispiel als eine Addition von 2 Signalen vor, einem Gleichanteil von konstant +5A und einem reinen Wechselanteil von +/-5A ...



Wir erkennen, daß der Gleichanteil genau dem oben schon verwendeten **mittleren Strom I_{dc}** entspricht. Diese Komponente stellt den eigentlich für die Anwendung (Heizung) "gewünschten" Teil des Stromes dar, deshalb kann man ihn auch als **Wirkstrom** bezeichnen. Der Wechselanteil hingegen ist "unerwünscht" und produziert nur zusätzliche Verluste, weshalb man ihn auch als **Blindstrom** bezeichnen kann. Man kann sich den Blindstrom gedanklich zwischen Akku und Last hin und her pendelnd vorstellen, ohne die gewünschte Wirkung an der Last - jedoch mit unerwünschten Verlusten auf seinem Hin- und Rückweg!

In getakteten Systemen ist dieser Wechselanteil vom Prinzip her leider nicht völlig vermeidbar. **Jedoch läßt sich auf seine Größe sehr wohl Einfluß nehmen!** Ein sinuskommutierter Regler erzeugt z.B. weniger Blindstrom (und somit auch weniger Verluste) als ein blockkommutierter Regler (siehe hierzu: www.sinusleistungssteller.de/P01.pdf)

2.4. Was hat dieses vereinfachte Beispiel mit dem Betrieb eines Brushlessmotors zu tun?

Ein System aus Regler und Brushlessmotor ist keine rein ohmsche Last wie im Beispiel gezeigt. Ferner haben wir es beim Akkustrom auch nicht mit einem idealen Rechtecksignal zu tun. Trotzdem können wir die Erkenntnisse aus diesem einfachen Beispiel qualitativ auf ein reales Antriebssystem übertragen.

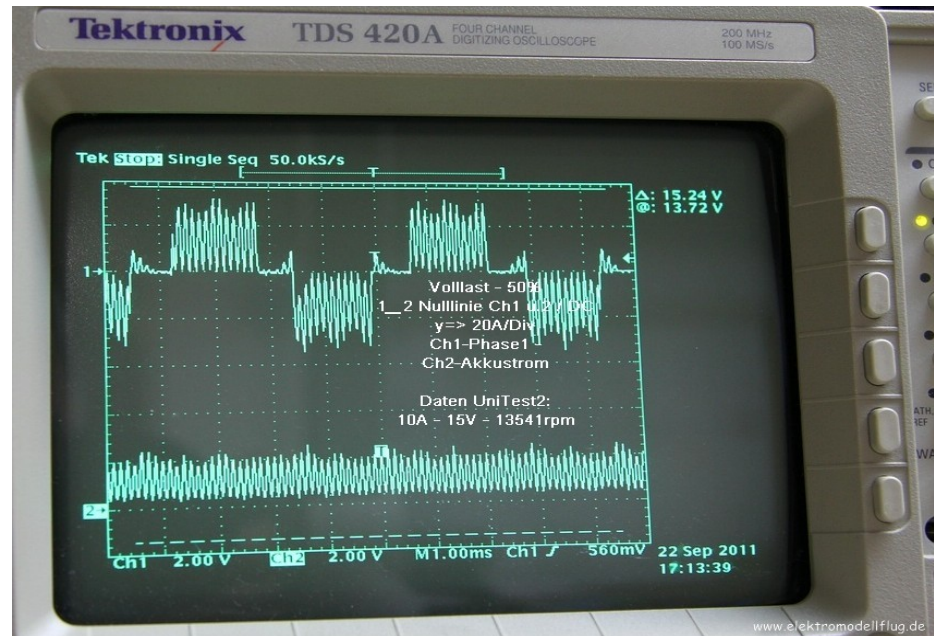
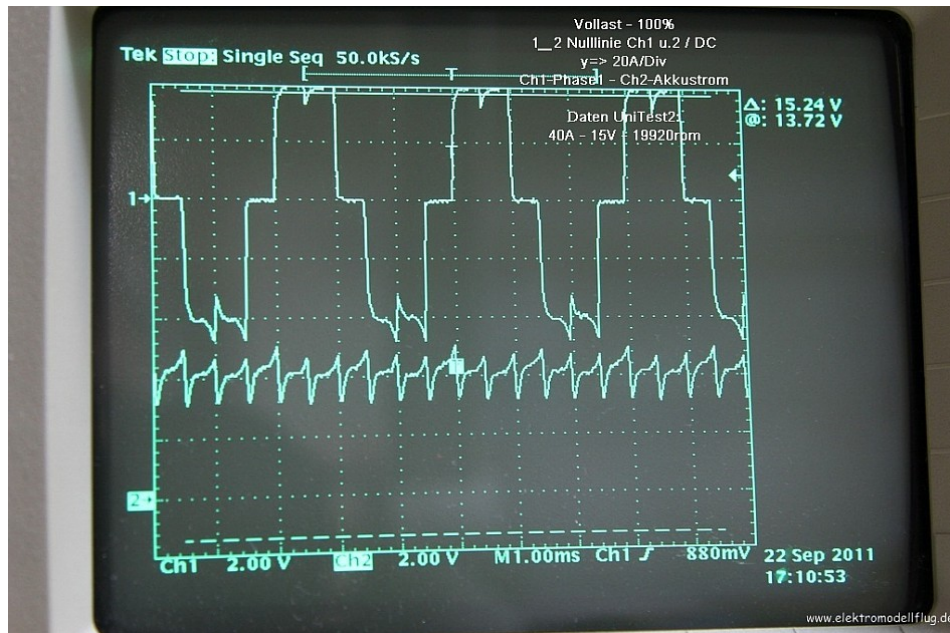
So gilt die Aussage, daß die Verluste in ohmschen Anteilen des Stromkreises **nicht über den Mittelwert I_{dc}** sondern nur über den **Effektivwert I_{rms}** korrekt berechnet werden können. ... und ohmsche Anteile finden sich bei einem Antriebssystem zuhauf:

- Innenwiderstand des Akkus
- Zuleitungen und Steckverbindungen zwischen Akku und Regler
- ESR der Zwischenkreis-ELKOs
- Leiterbahnen im Leistungszweig des Reglers
- R_{dson} der beteiligten MOSFETs
- Zuleitungen und Steckverbindungen zwischen Regler und Motor
- Innenwiderstand des Motors

Versuche, mittels des einfach zu messenden **Mittelwert I_{dc}** auf die Verluste in diesen ohmschen Anteilen zu schließen kann (näherungsweise) nur bei voller Durchsteuerung zu brauchbaren Ergebnissen führen, da nur bei voller Aussteuerung der Mittelwert näherungsweise gleich dem Effektivwert ist. Für die gleichen Betrachtungen **in Teillast wird zwingend der Effektivwert benötigt**. Sonst werden die Verluste zu gering angesetzt und der ermittelte Wirkungsgrad fällt zu hoch aus. Es kommt also real weniger am Propeller an, als gerechnet wurde.

Dagegen eignet sich der **Mittelwert I_{dc}** (auch in Teillast!) sehr gut dazu, die aus dem Akku entnommene Wirkleistung zu messen. Daraus kann eine sehr genau arbeitende Messung der aus dem Akku entnommenen Energie abgeleitet werden, so wie es in vielen erhältlichen Akku-Meßmodulen realisiert ist. Jedoch ist mit diesen **I_{dc} -Meßwerten** keine Aussage möglich, welcher Anteil dieser Energie am Propeller ankommt und wieviel im System "hängen" bleibt.

2.5. Beispielmessungen mit einem blockkommutierten Regler bei Voll- und Teillast



Volllast ($T_v = 1$)

Motorphasenstrom (oben) +/- 50A(peak)

Akkustrom (unten) $I_{dc} = +40A$

überlagert ca. +/-10Aac (6-fache Feldfrequenz)

Teillast ($T_v = \text{ca. } 0,7$)

Motorphasenstrom (oben) +/-30A(peak)

Akkustrom (unten) $I_{dc} = +12A$ (nach UniTest2 = +10A)

überlagert ca. +/-9Aac (PWM- und 6-fache Feldfrequenz)

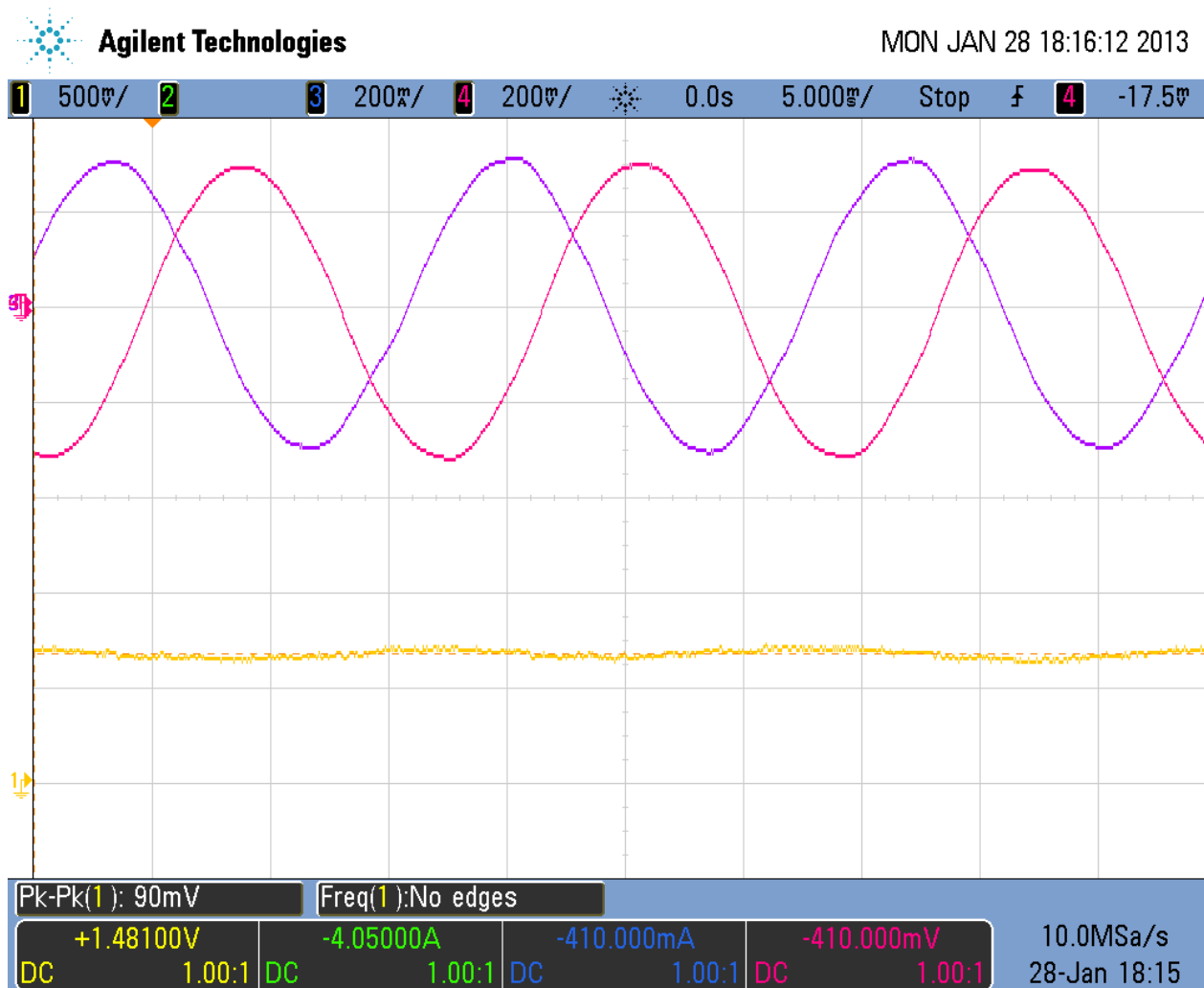
Beide Messungen mit zusätzlich 68.000 μ F(!) auf der DC-Seite; trotzdem kann der Akkustrom nur wenig geglättet werden. Der Strom wird in Teillast fast vollständig in scharfen, kurzen Pulsen mit der PWM-Frequenz aus dem Akku entnommen.

Auch bei Volllast ist dem Gleichstrom noch ein erheblicher AC-Anteil überlagert, der bereits hier zu einem höheren I_{trms} führt.

(nach Messungen von Gerd Giese, www.elektromodellflug.de – Bilder mit freundlicher Genehmigung durch Gerd Giese)

2.6. Beispielmessungen mit einem SinusLeistungsSteller

(Volllast und Teillast unterscheiden sich hier nur in der Höhe der Ströme, nicht in deren Form)



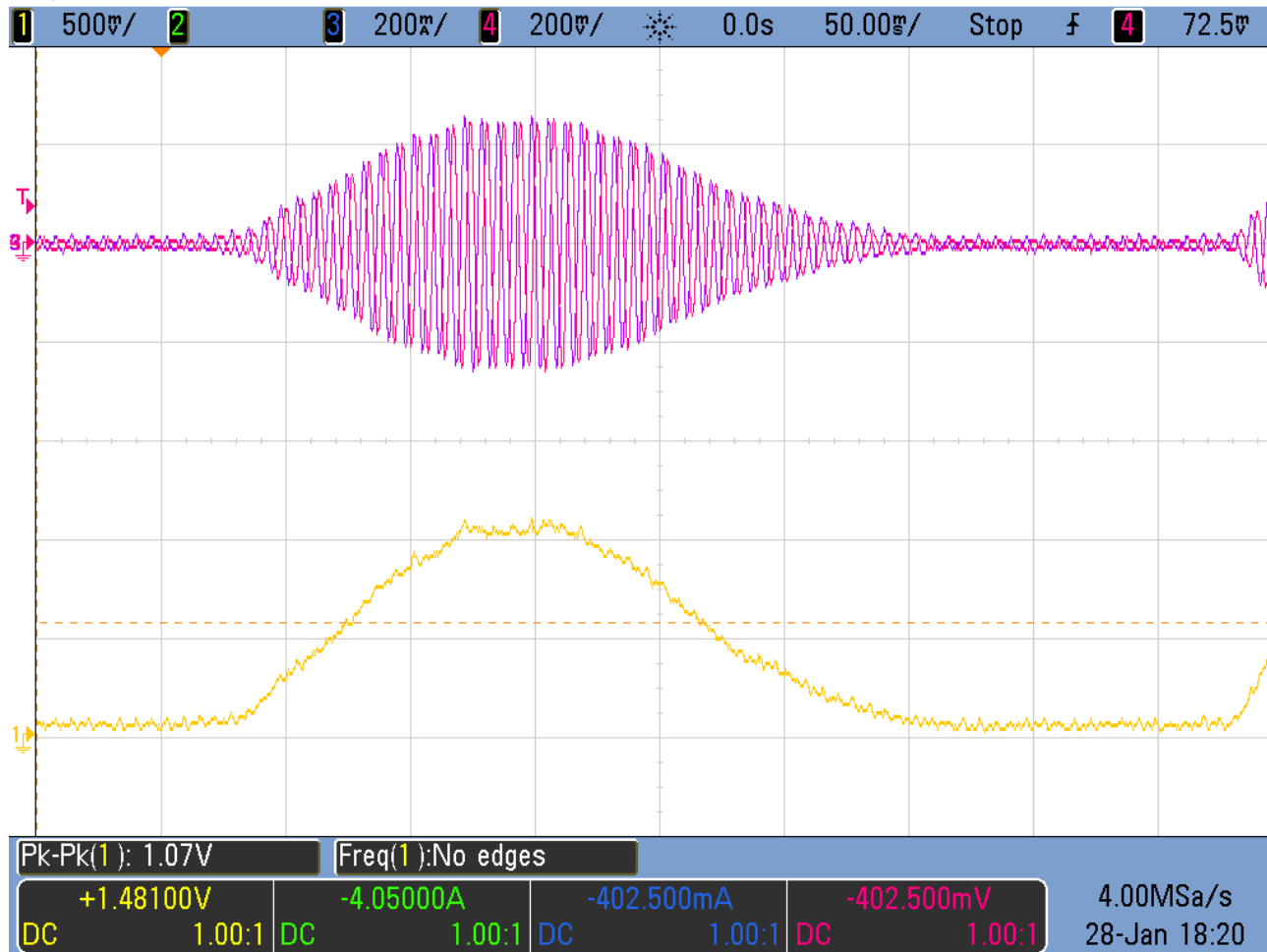
Im Vergleich dazu ein von Hand gebremster, drehzahl geregelter Motor bei 18% Teillast-Drehzahl (270rpm bei 14 Polpaaren) an einem kleinen cSLS-60-70 mit nur 900 μ F Eingangs-ELKO.

Die beiden in der oberen Hälfte dargestellte Phasenströme werden im Maßstab 20A/DIV abgebildet.

Der Akkustrom (unten) beträgt bei einem Maßstab von 5A/DIV ca. 6,5A und ist nur durch einen sehr geringen Wechselanteil in einfacher Feldfrequenz überlagert.

Mit $U_{dc}=32V$ werden ca. 210W (in Handwärme!) umgesetzt.

Ein über der Hörschwelle liegende PWM-Frequenz von 24,4kHz ermöglicht einen absolut ruhigen Motorlauf ohne das übliche "elektronische Pfeifen und Quitschen"...



... auch bei Lastsprüngen durch kurzzeitiges stärkeres Bremsen mit der Hand reagiert die Drehzahlregelung sofort. Dem drohenden Drehzahl-einbruch wird durch Erhöhung des Drehmoments bzw. des Phasenstroms entgegengewirkt und die Drehzahl wird auf Solldrehzahl (hier 600rpm) gehalten...

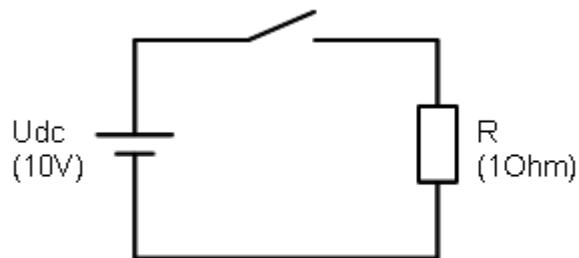
oben: 2 der 3 Phasenströme
unten: Akkustrom (peak 11A)

(beides im gleichen Maßstab wie im ersten Bild)

3. Leistungsmessung

3.1. Wirk-, Blind- und Scheinleistung

Die üblicherweise nur mit Wechselstromsystemen in Verbindung gebrachten Größen von **Wirk-, Blind- und Scheinleistung** können auch auf getaktete Gleichstromsysteme (selbst ohne jegliche induktive oder kapazitive Bauteile) erfolgreich angewendet werden:



Gehen wir dazu zurück zu unserem stark vereinfachten Beispiel vom Anfang dieses Papiers. Alle Bauteile sollen wieder als ideale Bauteile betrachtet werden.

Die im Widerstand umgesetzte Leistung sowie **Idc** und **Itrms** haben wir weiter oben schon in Abhängigkeit von T_v berechnet und können sie direkt in unsere Tabelle auf der nächsten Seite übernehmen.

Da die Leistung in einem rein ohmschen Bauteil R in Wärme umgesetzt wird, können wir sicher sein, daß es sich um reine Wirkleistung handelt. Außerdem können wir sicher sein, daß an keiner anderen Stelle dieses Stromkreis zusätzliche Wirkleistung umgesetzt wird, da nur ideale Bauteile verwendet werden.

Die Scheinleistung berechnet sich allgemein aus dem Produkt von Effektivstrom und Effektivspannung. Bei einer Gleichspannung ist $U_{dc} = U_{trms}$, die Effektivspannung kann also zu 10V angenommen werden.

$$\text{somit: } S = 10V \cdot I_{trms}$$

Bei nun bekannter Schein- und Wirkleistung kann über folgende Formel auf die noch fehlende Blindleistung Q geschlossen werden:

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

Ergänzen wir die Tabelle mit den gerechneten Werten für Wirk-, Blind- und Scheinleistung ergibt sich folgendes Bild:

Tastverhältnis Tv	Idc	Itrms	Wirkleistung $P = U_{dc} * I_{dc}$	Scheinleistung $S = U_{dc} * I_{trms}$	Blindleistung $(Q = \sqrt{S^2 - P^2})$	Leistungsfaktor Lambda
1	10A	10A	100W	100VA	0,0var	1
0,9	9A	9,48A	90W	94,8VA	29,9var	0,95
0,8	8A	8,94A	80W	89,4VA	39,9var	0,89
0,7	7A	8,37A	70W	83,7VA	45,9var	0,83
0,6	6A	7,75A	60W	77,5VA	49,1var	0,77
0,5	5A	7,07A	50W	70,7VA	50,0var	0,71
0,4	4A	6,32A	40W	63,2VA	49,9var	0,63
0,3	3A	5,48A	30W	54,8VA	45,9var	0,55
0,2	2A	4,47A	20W	44,7VA	39,9var	0,45
0,1	1A	3,16A	10W	31,6VA	29,9var	0,32

(um den Unterschied von Schein- und Blindleistung gegenüber der Wirkleistung deutlich hervorzuheben, werden hier die üblichen Einheiten VA für Scheinleistungen und var für Blindleistungen verwendet)

3.2. Leistungsfaktor Lambda

Mit der Einführung des **Leistungsfaktors Lambda** wird es ermöglicht, den Grad der “AC-Verseuchung” eines Gleichstromsystems unabhängig von den darin auftretenden Frequenzen bzw. Form der AC-Überlagerung **in nur einer Zahl** auszudrücken:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\text{Wirkleistung}}{\text{Scheinleistung}}$$

Je näher dieser Leistungsfaktor am idealen Wert 1 liegt, je weniger unerwünschte Wechselanteile sind vorhanden bzw. werden erzeugt.

Damit ist es nun sehr einfach möglich, zwei Systeme hinsichtlich ihres Oberwellen-Anteils zu vergleichen.

Im weiter oben bereits erwähnten Vergleich eines SinusLeistungsStellers mit einem blockkommutierter Regler www.sinusleistungssteller.de/P01.pdf werden abschließend beide Reglertypen anhand dieses Leistungsfaktors bei gleichen Arbeitspunkten verglichen.

... übrigens:

Sehr oft trifft man diesen Leistungsfaktor (engl. *power factor*) neuerdings auch bei z.B. (Schalt-)Netzteilen für den Anschluß ans Versorgungsnetz an. Hier in Form eines **PFC** (power factor corrector). Damit können Oberwellen, welche gleichbedeutend mit Blindleistung (also unerwünschten Energieverlusten) sind, im Übertragungsnetz vermieden werden. Eine PFC-Schaltung regelt dabei den Leistungsfaktor entsprechend obiger Definition möglichst nahe an die 1 heran.