

# White Paper: Optimale Spannungsauslegung von mobilen Systemen

## Einleitung

### Bekannte Zusammenhänge:

- + Höhere Spannungen ermöglichen die gleiche Leistung mit geringerem Strom und damit geringeren Kupferquerschnitten bei Kabeln und Steckverbindern. Dieser Zusammenhang ist linear und stetig.
- + Höhere Spannungen bedürfen aber auch verstärkter Maßnahmen zur Isolation sowie Luft- und Kriechstrecken. Dieser Zusammenhang ist wissenschaftlich gesehen stetig, in der technischen Umsetzung hinsichtlich Normen und Vorschriften aber in Klassen untergliedert.

**Erkenntnis:** Für eine ökonomisch optimierte Auslegung wählt man zunächst die technisch sinnvolle Spannungs-klasse und legt dann nahe der oberen Grenze aus. Dies bedarf in der praktischen Umsetzung einiger Überlegungen, die in diesem WhitePaper kurz beleuchtet werden sollen.

## 1. Einige Grundlagen

- 1.1 Wirkleistung, Scheinleistung  $\cos\phi$
- 1.2 Drehfelderzeugung für Motoren mit Wechselrichtern
- 1.3 Spannungserzeugung im Wechselrichter mit PWM

## 2. Konkrete Auslegung der Spannungen

# 1 Einige Grundlagen

## 1.1 Wirkleistung, Scheinleistung CosPhi

Die elektrische Wirkleistung zum Beispiel von Antrieben ist das Produkt aus Spannung, Strom und dem Cosinus des Winkels zwischen Spannung und Strom, dem so genannten CosPhi. Bei ohmschen Widerständen ist der CosPhi = 1. Bei idealen Induktivitäten oder Kondensatoren ist der CosPhi = 0. Die Anteile der Leistung in welcher Spannung und Strom genau 90 Grad versetzt verlaufen, nennt man Blindleistung. Eine Mischung aus beiden ist dann die Scheinleistung.

Bei elektrischen Antrieben, also E-Motoren liegen wir irgendwo zwischen ohmschem und induktivem Verhalten. Der wirksame CosPhi von E-Motoren ist bedingt durch deren elektromagnetische Konstruktion und kann auch durch die Umrichter beeinflusst werden. Typische Werte reichen von 0,75 bis 0,9.

**Erkenntnis:** Wichtig für die Auslegung von Leitungen und Umrichtern ist die Kenntnis des realen CosPhi des angetriebenen E-Motors. Erzeugt und übertragen werden muss die höhere Scheinleistung und nicht nur die Wirkleistung des Motors.

**Wirkungsgrad:** Der CosPhi des Motors gibt nur den Anteil der Wirkleistung wieder. Diese setzt sich aber aus der mechanischen Leistung und der thermischen Leistung zusammen (Reibung und elektrische Wärmeleistung verschiedener Quellen im Motor).

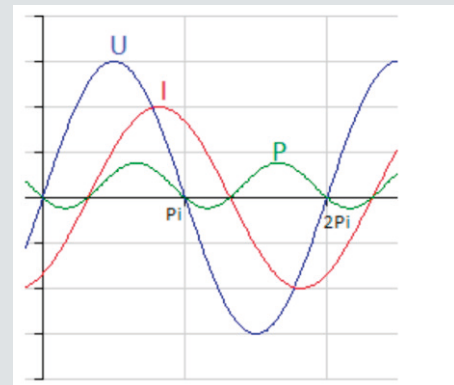
**Zusammenhang:**

**Mechanische Leistung = Scheinleistung \* CosPhi \* Wirkungsgrad**

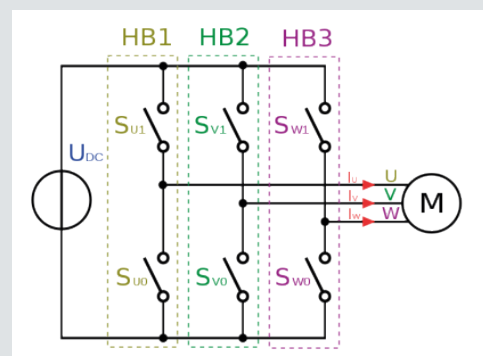
Scheinleistung ist die elektrische Leistung an den Motorklemmen bzw. am Umrichterausgang.

## 1.2 Drehfelderzeugung für Motoren mit Wechselrichtern

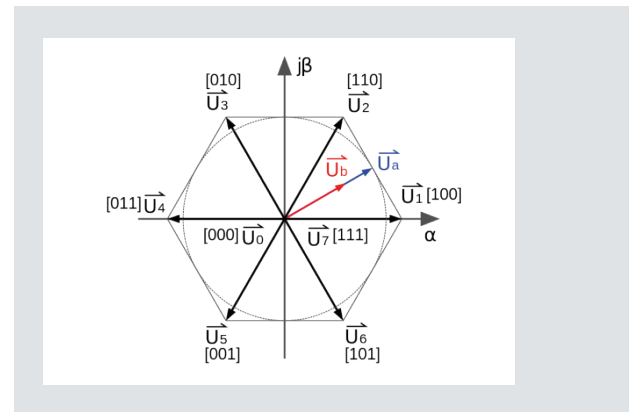
Drehfelder für die Drehbewegung von E-Motoren lassen sich mechanisch durch Bürsten erzeugen oder in erster Näherung verschleißfrei bürstenlos durch ein elektrisches Drehfeld mittels Wechselrichtern. Die größte Verbreitung haben 3-phasige Drehfelder. Für 3-phasige Drehfelder haben wiederum die größte Verbreitung Wechselrichter mit sechs „Schaltern“ (hier meist IGBT).



Dargestellt ist ein relativ „schlechter“ cosPhi im Bereich von 0,7. Man sieht, dass die Scheinleistung P auch negative Werte annehmen kann.

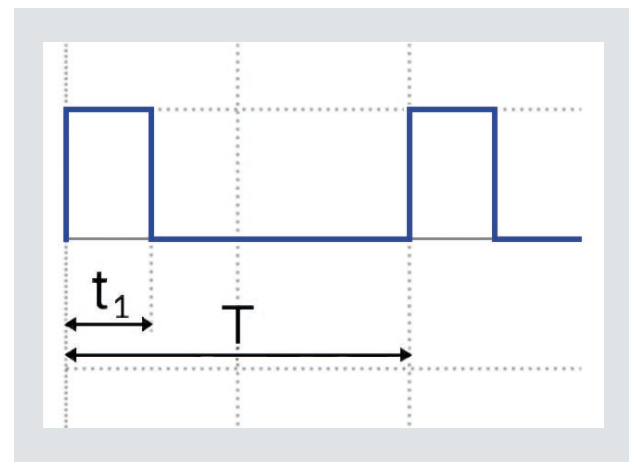


Die Schalter SU1 und SU0 zum Beispiel können die Phase U wahlweise auf das obere Spannungsniveau UDC setzen oder auf das untere mit 0V. In der Schalterstellung [100] zeigt die Spannung demnach in Richtung von +U1, also waagrecht nach rechts. Schaltet man nur digital durch, so ergibt sich eine Drehbewegung in sechs Schritten oder Blöcken. Man spricht hier auch von Block-Kommutierung.

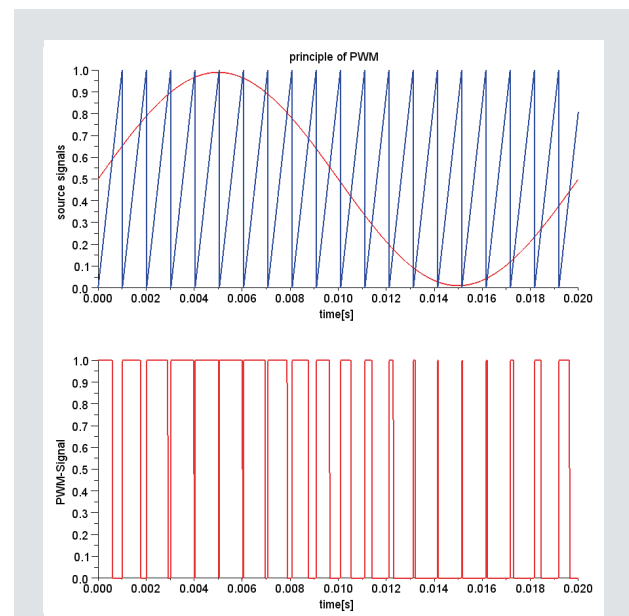


### 1.3 Spannungserzeugung im Wechselrichter mit PWM

Nutzt man die vorhandene Induktivität der Motorenwicklungen aus, so kann man die „Schalter“ des Wechselrichters auch mit einer angemessen hohen Frequenz takten. Man spricht hier auch von Modulation. Blicken wir wieder auf die Schalter SU1 und SU0, hier im Zusammenspiel.



Die Spannung an Klemme U ist UDC, wenn Schalter SU1 ein ist und gleichzeitig SU0 aus ist. Die Spannung ist null, wenn SU1 aus ist und gleichzeitig SU0 ein ist. Im Bild ist 25 Prozent ein und 75 Prozent aus. Im zeitlichen Mittel wäre die wirksame Spannung an Klemme U als 25 Prozent von UDC. Man spricht bei diesem Verfahren von einer Puls-Weiten-Modulation.



**Anwendung:** Ein solches PWM-Verfahren auf alle drei Phasen angewandt, ergibt ein 3-phasiges Drehfeld mit nahezu sinusförmigem Verlauf der gemittelten Spannung an den Motorklemmen. Man spricht dann von Sinus-Kommutierung.

**Maximale Ausgangsspannung an Wechselrichtern:** Schaltet man den oberen und den unteren Schalter gleichzeitig auf „ein“, dann fließen zerstörerische Kurzschluss-Ströme. Dies muss also verhindert werden. Durch Schaltzeiten und Schaltverläufe haben Wechselrichter daher eine sogenannte Verriegelungszeit, in der zwischen zwei Schalt-Zuständen beide Schalter auf „aus“ sind. Diese Zeit „verliert“ man dann natürlich für die Erzeugung der Spannung an der Motorklemme. Ebenso muss man die Verluste abziehen, welche in den Schaltern selbst abfallen.

Blau dargestellt ist ein Timer für den Takt als Sägezahn. Der getaktete Spannungsverlauf in rot (unteres Bild) ergibt dann als gemittelten Wert die geglättete rote Kurve (oberes Bild) mit einem etwa sinusförmigem Spannungsverlauf.

### ARADEx-Vorteil: Höhere mögliche Ausgangsspannung

Die maximale Ausgangsspannung bei sonst gleicher DC-Spannung zum Beispiel einer Batterie oder eines DC-Kreises, ist bei Wechselrichtern der Typen VECTODRIVE und der mobilen Umrichter VECTOPOWER höher als marktüblich, weil die technisch erforderlichen Verriegelungszeiten durch FPGA-Technik und selbst entwickelte Treiberstufen deutlich kürzer gehalten werden können.

Bei 750VDC und 4kHz PWM-Takt liegt dieser Vorsprung bei etwa 10-15 Volt.

**Bei 750VDC und 8kHz PWM-Takt liegt dieser Vorsprung bei etwa 20-30 Volt.**

(Vergleich von einer Verriegelungszeit von 1,6µs statt marktüblich 4µs.)

## 2 Konkrete Auslegung der Spannungen

Klar ist: In allen Betriebspunkten eines E-Motors muss gewährleistet sein, dass der Wechselrichter mindestens auch die Spannung stellen kann, die der Motor an seinen Klemmen braucht. Die Spannung des E-Motors an einem bestimmten Betriebspunkt von Drehmoment und Drehzahl kann durch die Auslegung der Wicklung festgelegt werden. Eine Auslegung bei gleicher Drehzahl auf höhere Klemmenspannungen erzeugt das gleiche Drehmoment mit entsprechend geringeren Phasenströmen.

**Spannungsauslegung des Motors:** Bei einer volatilen DC Zwischenkreisspannung muss der Motor auf die niedrigste vorkommende DC-Spannung ausgelegt werden. Im Betrieb dann an höheren DC-Spannungen regelt dies der Wechselrichter durch geringere Aussteuerung. Dabei sinkt aber dessen Wirkungsgrad und es steigt der Ripplestrom im Motor.

**Auslegung von Wechselrichter, Leitungen und Klemmen:** Diese Komponenten müssen sowohl auf die höchste vorkommende DC-Spannung ausgelegt werden als auch auf den maximalen Strom welcher sich durch die vorherige Motorauslegung ergibt.

**Erhöhung der DC-Zwischenkreisspannung:** Erhöht man nur die DC-Zwischenkreisspannung, ohne auch die Motorwicklung entsprechend anzupassen, so sinkt sogar die verfügbare Motorleistung bei gleichem Wechselrichter. Beispiel eines Traktionsmotors an einem VECTOPOWER Traktionswechselrichter: Wahlweiser Betrieb an 600VDC oder 750VDC. Motorwicklung unterschiedlich ausgeführt:

UZK	P Motor1 (410 VAC) rel.	P Motor2 (512 VAC) rel.
600 VDC	100%	Keine Funktion
750 VDC	91,7%	114,5%

Setzt man DC-Spannung und Motorklemmenspannung hoch, aber so kann der gleiche Wechselrichter etwa 14,5 Prozent höhere Leistungen abgeben. Setzt man die DC-Spannung hoch aber belässt den Motor bei der niedrigeren Spannung, so verliert man sogar über 8 Prozent Leistung des Wechselrichters. (Ursache sind höhere Schaltverluste bei höherer DC-Spannung).

**Erkenntnis:** Die Auslegung der Motorwicklungen so festzulegen, dass bei maximaler Drehzahl die Klemmenspannung nahe der Auslegungsgrenze des DC-Zwischenkreises liegt, ist die effizienteste Auslegung bezüglich Motor, Wechselrichter, Klemmen und Gesamtkosten.

## Schwankungen im DC-Zwischenkreis

Bei volatilen DC-Spannungen im Zwischenkreis muss der Motor auf die niedrigste Spannung und Wechselrichter, Leitungen, Klemmen auf die entsprechenden Ströme und die höchsten auftretenden Spannungen ausgelegt werden. Je größer die Schwankungsbreite der Spannung im DC-Zwischenkreis angenommen werden muss, desto höher muss die Überdimensionierung der Komponenten erfolgen.

**Erkenntnis:** Eine Volatilität in der DC-Zwischenkreisspannung erfordert entsprechende Überdimensionierungen in Wechselrichtern, Leitungen und Klemmen und reduziert die Wirkungsgrade. → Einsatz von stabilisierten DC-Zwischenkreisen zum Beispiel durch VP5000 DC200. → siehe hierzu separates WhitePaper.

