



NEAR-ZERO-VOLTAGE SWITCHING IN RECHENZENTREN

SCHLEIFENBAUER - LIVING FOR THE POWER TO DELIVER



SCHLEIFENBAUER PRODUCTS BV • www.schleifenbauer.eu • info@schleifenbauer.eu

EINFÜHRUNG

Die Menge an Daten und Elektronik steigt immer weiter, weshalb auch der Strombedarf und das Bedürfnis nach einer professionellen Stromverteilung immer größer werden. Eine solche Stromverteilung kann mit dem Einsatz von PDU (*Power Distribution Units*) erzielt werden. Die Stromverteilung kann (beispielsweise in Rechenzentren) mit einer zusätzlichen Funktion ausgestattet werden, indem die PDU mit schaltbaren Ausgängen ausgerüstet werden. Dies ermöglicht unter anderem die Festlegung der Einschaltreihenfolge der angeschlossenen Geräte per Fernzugriff, das Eingreifen bei Spitzenbelastungen oder das Rebooten von IT-Geräten.

Im vorliegenden Whitepaper werden die negativen Folgen des Schaltens der elektrischen Verbraucher beschrieben und wird erläutert, wie diesen Folgen durch die Nutzung von *Near-Zero-Voltage Switching-Techniken* entgegengewirkt werden kann.

NEGATIVE FOLGEN DES SCHALTENS ELEKTRISCHER VERBRAUCHER

EINSCHALTVERHALTEN

Zum Schalten der Verbrauchsgeräte durch PDUs werden im Allgemeinen elektromechanische bistabile Relais verwendet. Ein elektromechanisches Relais hat den Vorteil, dass der Kontaktwiderstand niedriger ist als der Leitungswiderstand eines Relais, das auf der Grundlage eines Halbleiters schaltet. Dadurch sind die Schaltverluste geringer. Ein bistabiles Relais hat den Vorteil, dass es nur beim Umschalten Energie verbraucht, während ein herkömmliches Relais kontinuierlich Energie verbraucht. Ein elektromechanisches bistabiles Relais ist daher die energieeffizienteste Wahl.

Fast alle geschalteten Geräte haben elektronische Schaltnetzteile. Diese Schaltnetzteile enthalten große Pufferkondensatoren und Filter, die u. a. aus Spulen und Kondensatoren bestehen. Die Filter müssen die *elektromagnetische Verträglichkeit* (EMV) verschiedener Geräte gewährleisten. EMV bedeutet, dass es möglich sein muss, verschiedene technische Produkte und Anlagen in Kombination miteinander einzusetzen, wobei ein Gerät eine begrenzte Störung verursachen darf, aber selbst für ein bestimmtes Maß an Störung durch ein anderes Gerät immun, also störresistent, sein muss. Beim Einschalten eines Geräts können die Pufferkondensatoren und Filter ein unerwünschtes Einschaltverhalten verursachen.

SPEZIFIKATION DES EINSCHALTSTROMS

Kondensatoren können hohe Einschaltströme verursachen, da sie beim Einschalten von Geräten aufgeladen werden. Die Aufladung dauert zwar nur kurz, aber während der Aufladung fließt ein Strom.

Hersteller von Netzteilen und Adaptern geben im Allgemeinen an, wie hoch der Einschaltstrom ist, der als *Maximum Inrush Current* (*maximaler Einschaltstrom*) spezifiziert ist. Bei dem Adapter in unserem nachstehenden Beispiel ist der Einschaltstrom - bei einem sog. Kaltstart - als 70 A bei 264 V spezifiziert. Wie gesagt, entsteht der hohe Einschaltstrom durch Kondensatoren. Manchmal wird versucht, den Einschaltstrom durch einen Widerstand mit einem negativen Temperaturkoeffizienten, einem sog. NTC, zu begrenzen. Wenn dieser NTC kalt ist, hat er einen relativ hohen Widerstand (meistens von ca. 5 Ω); auf diese Weise wird der Einschaltstrom begrenzt. Weil der NTC sich durch den während des Betriebs fließenden Strom erwärmt, wird der Widerstand geringer. Beim Einschalten eines erwärmten Netzteils, das über einen solchen NTC verfügt, ist der Einschaltstrom höher als bei einem kalten Netzteil. Die Spezifikation des Herstellers bezieht sich auf den Strom, der vor dem Aufladen des Pufferkondensators fließt. Diese Aufladung erfolgt in der ersten Hälfte des Netzspannungszyklus. Diese Spezifikation ist wichtig zur Bestimmung der Anzahl Verbraucher, die an eine Gruppe angeschlossen werden können, um den Wert und die Eigenschaften der zu verwendenden Sicherung ermitteln zu können. Ein Aspekt, der oft unbeachtet bleibt, ist jedoch die Tatsache, dass vor dem NTC ein zusätzlicher EMV-Filter angebracht wird, der ebenfalls Kondensatoren enthält.



Diese Kondensatoren liegen direkt, ohne strombegrenzendes Element, am Netz an. Zwar ist die Kapazität dieser Kondensatoren in Vergleich zu den Pufferkondensatoren relativ gering, aber dennoch verursachen gerade diese Kondensatoren die im nachstehenden Beispiel gemessenen hohen Spitzenströme. Und auch wenn die Stromimpulsdauer nur lediglich 0,5 – 1 ms beträgt, führt genau dieser Stromimpuls zu Funkenbildung im Relais und zu Netzverschmutzung, wie weiter unten in diesem Dokument dargelegt wird. Wegen der sehr kurzen Impulsdauer ist es nicht nötig, dies bei der Bestimmung der Sicherungen und Verdrahtung zu berücksichtigen.

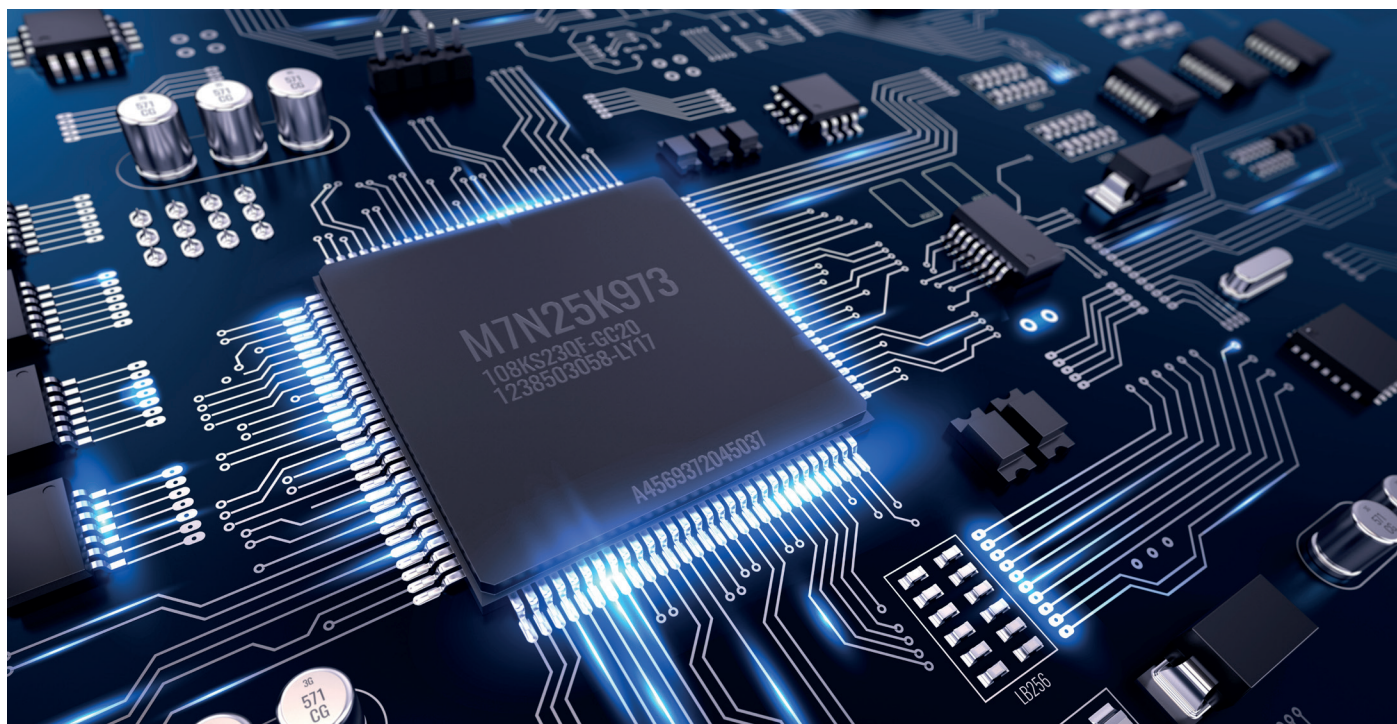
Der Aufladestrom, der dann fließt, ist umso höher, je höher die Spannung beim Einschalten ist. Wie allgemein bekannt, ist die Netzspannung eine sinusförmige Wechselspannung. Wird die Netzspannung bei der Spitze der Sinuskurve eingeschaltet, ist die Spannung am höchsten und wird somit auch der Strom hoch sein. Die Dauer des Stromimpulses wird dann allerdings kürzer. Die hohen Einschaltströme können sich nicht nur auf lange Sicht sehr negativ auf das Schaltrelais in der PDU auswirken, sondern verursachen auch eine Netzverschmutzung. Dies beeinträchtigt die *Power Quality* und kann zu Störungen an anderen Geräten führen. Unter *Power Quality* wird im Allgemeinen die gesamte Qualität der Netzspannung verstanden. Dies steht in direktem Zusammenhang mit dem EMV-Verhalten. Ein verbessertes Einschaltverhalten führt demnach zu einer besseren *Power Quality* und einem verbesserten EMV-Verhalten.

EINSCHALTEFFEKTE

Kondensatoren sind, wie gesagt, häufig die Ursache hoher Einschaltströme. Beim Einschalten an der Spitze der Sinuskurve ist die Spannung und somit auch der Einschaltstrom am höchsten. Beim Einschalten im Nulldurchgang der Sinuskurve ist die Spannung und somit auch der Einschaltstrom am niedrigsten. In Schaltnetzteilen sind Kondensatoren im Allgemeinen die wichtigste Ursache hoher Einschaltströme.

AUSSCHALTEFFEKTE

Auch beim Ausschalten eines Verbrauchers können unerwünschte Effekte auftreten. Das Ausschalten eines Verbrauchers kann aufgrund der in den Filtern vorhandenen Spulen zu Spannungsspitzen auf dem Netz führen. Wenn ein Strom durch eine Spule fließt, wird in dieser Spule Energie gespeichert. Bei einer plötzlichen Unterbrechung des Stroms muss diese Energie aus der Spule abgeleitet werden. Die Spannung an der Spule wird dabei so hoch ansteigen, bis durch Funkenbildung irgendwo ein Strom fließen kann, und zwar so lange, bis die gesamte Energie aus der Spule abgeflossen ist. Die dadurch entstehenden Spannungsspitzen können sehr hoch sein. Weil der Ausschalteffekt in den genannten Beispielen weit weniger gravierend ist als der Einschalteffekt, beschränken wir uns auf die obige Erläuterung.



MESSUNGEN VON EINSCHALTSTRÖMEN

Um die Einschaltströme im Verhältnis zum normalen Verbrauchsstrom eines Gerätes zu untersuchen, wurden Messungen an einem Laptop-Adapter von 65 W und einem Wasserkocher von 2.200 W durchgeführt. Selbstverständlich hat der Wasserkocher einen um ein Vielfaches höheren normalen Verbrauchsstrom als der Adapter, denn schließlich hat der Wasserkocher eine viel höhere Leistung. Aus der folgenden Formel ergibt sich der fließende Verbrauchsstrom: $I = \frac{P}{U}$. Dabei ist I der Strom in *Ampere*, P die Leistung in *Watt* und U die Spannung in *Volt* angegeben. Der Strom, der sich aus der Formel ergibt, ist der *RMS*-Strom. Dies ist der Effektivstrom. Zur Verdeutlichung: Bei einem sinusförmigen Strom von 1 A RMS beträgt der Spitzenwert $I_{top} = I_{rms} \times \sqrt{2}$.

Bei einem RMS-Strom von 1 A beträgt der Spitzenwert 1,41 A. Der Wirkungsgrad des Adapters liegt bei ca. 85 %. Das bedeutet, dass mehr Leistung zugeführt werden muss, um die 65 W nutzen zu können. Bei einem Wirkungsgrad von 85 % beträgt die Eingangsleistung etwa 77 W.

Aus der Formel ergibt sich für den Adapter ein Verbrauchsstrom von $I = \frac{P}{U} = \frac{77}{230} = 0,334 A$
 Der Spitzenstrom ist dann $I_{top} = I_{rms} \times \sqrt{2} = 0,334 \times \sqrt{2} = 0,472 A$

Für den Wasserkocher gilt ein Strom von: $I = \frac{P}{U} = \frac{2200}{230} = 9,56 A$
 Der Spitzenstrom ist dann $I_{top} = I_{rms} \times \sqrt{2} = 9,56 \times \sqrt{2} = 13,52 A$

Der Einfachheit halber sind diese Werte in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

	Laptop-Adapter	Wasserkocher
Leistung (W)	77*	2200
Netzspannung (V)	230	230
Verbrauchsstrom (A)	0,33	9,56
Berechneter Spitzenstrom (A)	0,47	13,52

* Siehe die Erläuterung zum Wirkungsgrad.

Die Leistung des Wasserkochers ist etwa 28 Mal höher als die Leistung des Laptop-Adapters. Derselbe Faktor findet sich im Verhältnis der Spitzenströme. Da der Wasserkocher aus einem großen Heizelement besteht und keine Spulen und Kondensatoren enthält, ergeben sich bei der Messung der Einschaltströme keine Auswirkungen auf das Heizelement. Die nachstehenden Messungen verdeutlichen den Effekt von Bauteilen wie Spulen und Kondensatoren.

MESSUNGEN EINSCHALTSTROM LAPTOP-ADAPTER

Wie hoch die Einschaltströme sein können, zeigen die nachstehenden, mit einem Oszilloskop gemachten Abbildungen. Mit einem Oszilloskop ist es möglich, die Spannung im Moment des Einschaltens eines Verbrauchers zu messen. Auch der Strom, der zu diesem Zeitpunkt fließt, kann hiermit gemessen werden. Auf der vertikalen Achse der Abbildungen stehen Spannungen und Ströme. Auf der horizontalen Achse steht die Zeit in Millisekunden pro Achsensegment (ms/div) oder Mikrosekunde pro Achsensegment (µs/div). Div ist die Abkürzung von division und bedeutet in diesem Zusammenhang Achsensegment. Ein Achsensegment ist in 10 kleine Teile unterteilt. Das gelbe Signal gibt die Spannung wieder. Hier ist die Achseneinteilung V/div. Das blaue Signal zeigt den Strom. In diesem Fall ist die Achseneinteilung 50 A/div.

Die nachstehenden Abbildungen wurden an dem Laptop-Adapter von 19 V, 65 W gemessen, der am Spitzenwert der Sinuskurve bei 230 V Netzspannung eingeschaltet wird. Siehe *Abbildung 1*. Die gelbe Linie liegt zum Einschaltzeitpunkt bei ca. 3/5 eines Achsensegments. Ein Achsensegment ist 500 V, d. h. dass die Spannung zu diesem Zeitpunkt ca. 300 V beträgt. Bei einem 230-V-Netz ist der Spitzenwert theoretisch 325 V. Der Einschaltzeitpunkt liegt somit nahe an der Spitze der Sinuskurve. In dem Moment, in dem die Spannung eingeschaltet wird, erscheint auf der blauen Linie eine Spitze. Diese Spitze umfasst drei Achsensegmente, sodass die Stromspitze in dieser Messung 150 A hoch ist.

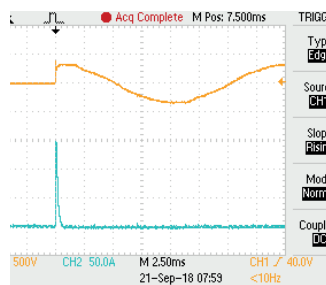


Abbildung 1

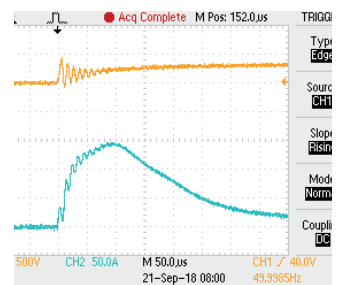


Abbildung 2

In der *Abbildung 1* ist die Zeitbasis 2,5 ms/div. *Abbildung 2* ist vergrößert, hier ist die Zeitbasis 50 µs/div. Die Abbildung zeigt deutlich, dass die Zunahme von Strom und Spannung nicht in einer fließenden Bewegung, sondern sehr stoßweise erfolgt. Dies wird als Oszillation bezeichnet. Die englische Bezeichnung ist ringing. Diese Oszillation kann eine Netzverschmutzung in Form unerwünschter Störungen im Netz verursachen.



FOLGEN HOHER SCHALTSTRÖME

MESSUNGEN EINSCHALTSTROM WASSERKOCHER

Dass der Einschaltstrom des oben getesteten Adapters von nur 65 W so hoch ist, mag überraschend sein. Der Effektivstrom des Adapters ist 0,33 A. Wäre der Strom sinusförmig, dann wäre der Spitzenstrom in normalem Betriebszustand 0,47 A (siehe die Tabelle auf der vorherigen Seite). Man erwartet dann keinen Einschaltstrom von 150 A, also mehr als 450 Mal höher als der Effektivstrom im Dauerbetrieb. Um dieses Ergebnis besser beurteilen zu können, wurden auch Messungen an einem Wasserkocher durchgeführt. In einem Rechenzentrum wird man nicht schnell einen Wasserkocher vorfinden, aber es geht um das Prinzip. Der getestete Wasserkocher hat eine Leistung von 2.200 W, also fast das 29-Fache der (aufgenommenen) Leistung des Adapters. Aus den nachstehenden Angaben wird deutlich, dass die Einschaltströme bei einem solchen relativ schweren Gerät sehr viel geringer sind als die Einschaltströme bei dem Adapter. Bei dem Wasserkocher mit mehr als 2 kW wurden die gleichen Messungen durchgeführt wie bei dem Adapter.

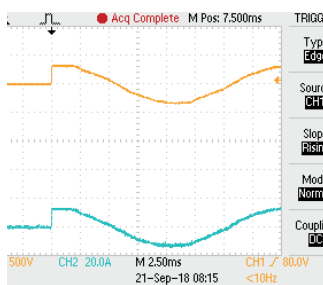


Abbildung 3

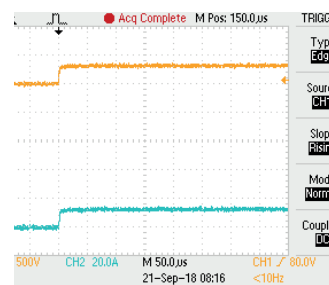


Abbildung 4

Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen die Ströme des Wasserkochers. Abbildung 3 zeigt in Blau wieder den Strom: lediglich 13 A. Abbildung 4 zeigt dies ebenfalls in vergrößerter Darstellung. Im Gegensatz zum Test mit dem Adapter sind hier überhaupt keine Oszillation und Netzverschmutzung zu sehen. In beiden Fällen erfolgte das Einschalten beim Spitzenwert der Sinuskurve. Dies zeigt deutlich, dass der Einschaltstrom bei dem viel schwereren Wasserkocher um ein Vielfaches geringer ist als bei dem Adapter mit der geringen Leistung von nur 65 W.

Oben wurde bereits gesagt, dass hohe Schaltspitzen negative Folgen haben können. Aus den Messungen des Laptop-Adapters ergibt sich, dass es durch Oszillationen zu Netzverschmutzung kommen kann. Außerdem können die hohen Stromspitzen einen Spannungsabfall im Netz verursachen, denn durch die kurzen, aber hohen Stromspitzen kann die Netzspannung auch für kurze Zeit sinken, weil das Netz auch eine bestimmte Impedanz hat. Ein Spannungsabfall kann seinerseits wieder andere Effekte haben, beispielsweise Oszillation. Netzverschmutzung kann also eine nicht zu unterschätzende Folge sein. Ein anderer Aspekt ist die Überlastung von Bauteilen. Ein elektrischer Verbraucher enthält verschiedene Bauteile, durch die der gesamte Eingangsstrom fließt, zum Beispiel Kabel, Konnektoren, Platinen, Eingänge, Sicherungen, Netzfilter, Spulen und manchmal auch Gleichrichterdioden. Für alle diese Bauteile bedeuten die hohen Einschaltströme zusätzlichen „Stress“, der zu beschleunigter Alterung und somit kürzerer Lebensdauer führen kann.

Ein dritter Aspekt, der nicht unterschätzt werden sollte, ist der Einfluss auf die Kontakte des Relais, die zum Schalten des Verbrauchers benutzt werden. Der Schaltimpuls mag zwar sehr kurz sein, praktische Tests haben aber gezeigt, dass die hohen Schaltströme sehr negative Folgen für das Relais haben können. So kann es vorkommen, dass Kontakte einbrennen und gewissermaßen zusammengeschweißt werden. Versuche haben gezeigt, dass Relaiskontakte in einigen Fällen nach nur zehnmaligem Einschalten eines 65-W-Adapters aneinander festgeklebt waren.

Die möglichen Folgen hoher Einschaltströme werden nachfolgend zusammengefasst.

Mögliche Folgen hoher Einschaltströme:

- Schlechteres EMV-Verhalten
- Überlastung von Bauteilen und dadurch schnelle Alterung der elektrischen Verbraucher
- Risiko, dass Schaltrelais einbrennen



NEAR-ZERO-VOLTAGE SWITCHING (n-ZVS)

Es ist deutlich, dass es ein großer Vorteil ist, wenn hohe Schaltströme vermieden werden können. Die Vermeidung hoher Schaltströme führt zu geringerer Netzverschmutzung und dadurch zu verbessertem EMV-Verhalten und einer besseren Power Quality, senkt das Risiko einer beschleunigten Alterung des Verbrauchers und führt last but not least zu geringerem Verschleiß des Schaltrelais und erhöht dadurch die Zuverlässigkeit der PDU. Wie oben bereits dargelegt, ist der Einschaltstrom bei dieser Art elektronischer Speisungen wie dem Adapter am höchsten, wenn die Spannung am höchsten ist. Es ist ein logischer Gedanke, zum Zeitpunkt der minimalen Spannung einzuschalten. Das ist der Fall im Nulldurchgang der Wechselspannung. Durch kontinuierliche Messung der Netzspannung kann der Moment des Nulldurchgangs festgestellt werden. Durch die Nutzung von intelligenter Hardware und Software, wobei u. a. die Einschaltverzögerung des elektromechanischen Relais eliminiert wird, ist es möglich, reproduzierbar und mit einer Genauigkeit von 1 ms im Nulldurchgang zu schalten. Diese Technik heißt: **Near-Zero-Voltage Switching** (n-ZVS). Die Bezeichnung leitet sich von einer vergleichbaren Technik ab, die in Schaltteilen verwendet wird.

Der Effekt des Schaltens rund um den Nulldurchgang mittels *Near-Zero-Voltage Switching* wird nachstehend dargestellt. Die Messung wurde an demselben Laptop-Adapter von 65 W durchgeführt, mit dem Unterschied, dass der Adapter jetzt im Bereich des Nulldurchgangs eingeschaltet wird. Unten stehen die Abbildungen. *Abbildung 5* zeigt den Einschalteffekt beim Einschalten im Nulldurchgang.

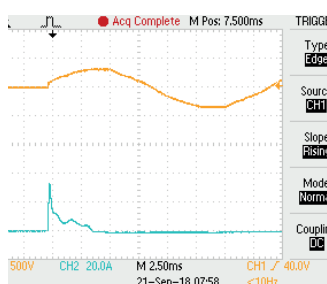


Abbildung 5

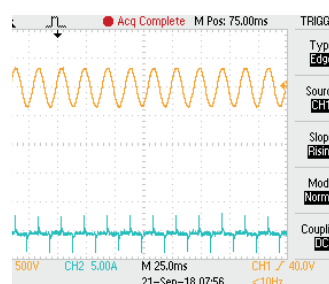


Abbildung 6

Abbildung 5 zeigt, dass das Einschalten einen Sekundenbruchteil nach dem Nulldurchgang erfolgt. Der Strom beträgt jetzt ungefähr 35 A - ein großer Unterschied zu den 150 A in der früheren Messung. **Bitte beachten Sie, dass die Achseneinteilungen hier gegenüber den vorigen Messungen angepasst wurden: links 20 A/div und rechts 5 A/div.** *Abbildung 6* zeigt den Strom und die Spannung beim Dauerbetrieb des Adapters bei der vollständigen Belastung von 65 W. Die Spitzenströme bei normalem, vollständig belastetem Betrieb sind etwa 3 A. Der Effektivwert des Stroms in *Abbildung 8* entspricht dem berechneten Wert von 0,33 A aus der Tabelle auf Seite 4. Der Vorteil von *Near-Zero-Voltage-Switching* ist aus diesen Messungen deutlich erkennbar. Der zuvor gemessene Einschaltstrom von 150 A ist jetzt auf 35 A gesenkt worden.

Der Vollständigkeit halber sind nachstehend in *Abbildung 7* die Spannung und der Strom beim Einschalten des Wasserkochers im Nulldurchgang angegeben. *Abbildung 7* zeigt, dass keine Einschaltspitze auftritt. Bei zunehmender Spannung steigt der Strom, wie auch zu erwarten war. *Abbildung 8* zeigt die Situation beim Dauerbetrieb des 2.200-W-Wasserkochers.

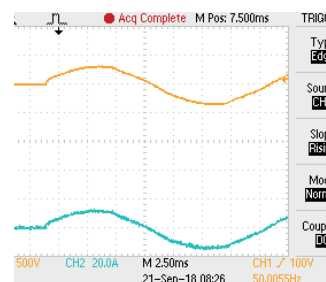


Abbildung 7

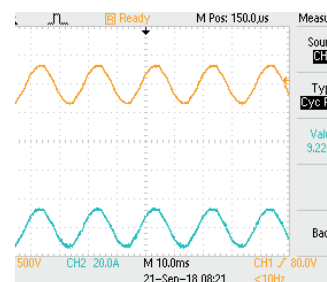


Abbildung 8

Abbildung 8 zeigt den gemessenen Effektivstrom von 9,22 A im Dauerbetrieb. Bei 230 V führt dies zu 2.120 W, also in etwa dem auf dem Typenschild genannten Wert.



ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Whitepaper werden die nachteiligen Auswirkungen erörtert von Schaltgeräten in einem Rechenzentrum. Dann werden die negativen Folgen des Schaltens elektrischer Geräte in einem Rechenzentrum dargelegt. Anhand von Beispielen wird der Begriff Einschaltstrom verdeutlicht und wird erklärt, welche schädlichen Folgen hohe Einschaltströme haben können.

Anschließend wird auf den EMV-Aspekt und den Einfluss auf die Lebensdauer und Zuverlässigkeit sowohl der Stromverteilereinheit (PDU) als auch der angeschlossenen Verbrauchsgereäte eingegangen. Auch wird dargelegt, wie diesen negativen Effekten entgegengewirkt werden kann. Es wird erklärt, was passiert, wenn ein mit der Netzspannung verbundenes elektrisches Gerät eingeschaltet wird und welchen Effekt es hat, wenn das Einschalten im Nulldurchgang oder im Gegenteil an der Sinusspitze erfolgt. Es wird erklärt, was passiert, wenn ein elektrisches Gerät im Nulldurchgang der Netzspannung eingeschaltet wird. Die hierfür verwendete Technik *Near-Zero-Voltage Switching* wird genauer beschrieben.

SCHLUSSFOLGERUNG

Das Einschaltverhalten elektronischer Netzteile hat oft unerwartete und unerwünschte Effekte. Einschaltströme sind zwar kurz, aber oft viel höher als erwartet und auch oft viel höher, als die Angaben eines Herstellers vermuten lassen. Durch intelligentes Einschalten können diese hohen Einschaltströme erheblich begrenzt werden. Das Einschalten im Nulldurchgang kann viele Vorteile mit sich bringen. Es verringert das Risiko eines Ausfalls der Schaltrelais oder angeschlossener Geräte und kann auch zu weniger Netzverschmutzung, einem besseren EMV-Verhalten und einer damit zusammenhängenden besseren Power Quality führen. N-ZVS: *Near Zero Voltage Switching* ist die beste Technik, die dies ermöglicht.

*Dieses Whitepaper wurde von Wiel Drissen, in verfasst
Zusammenarbeit zwischen Schleifenbauer Products und Drisco
Electronics. Veröffentlichung: Juli 2019*

SCHLEIFENBAUER PRODUCTS

Schleifenbauer Products ist ein niederländischer Hersteller von intelligenten Energiezählern für Rechenzentren. Die Rack-PDUs werden nach Kundenspezifikationen in Den Bosch gebaut. Man kann die Konfigurations- und Produktionsprozesse mit Lego® vergleichen: Aus einer begrenzten Anzahl von Bausteinen kann eine unbegrenzte Anzahl von Endprodukten entstehen. Die Rack-PDUs von Schleifenbauer werden an die elektronische Infrastruktur Ihres Rechenzentrums angepasst und nicht die elektrische Infrastruktur an die Rack-PDU. Weitere Informationen finden Sie unter www.schleifenbauer.eu.



SCHLEIFENBAUER
LIVING FOR THE POWER TO DELIVER

DRISCO ELECTRONICS

Drisco Electronics aus Sevenum (Niederlande) ist auf die Entwicklung analoger, digitaler und Power-Elektronik spezialisiert. Drisco Electronics übernimmt das gesamte Projekt, von der Spezifikation bis hin zur Serienproduktion. Dazu gehört selbstverständlich auch der Kundendienst. Weitere Informationen finden Sie auf www.drisco.nl. www.drisco.nl

DRISCO ELECTRONICS
electronic development & engineering



