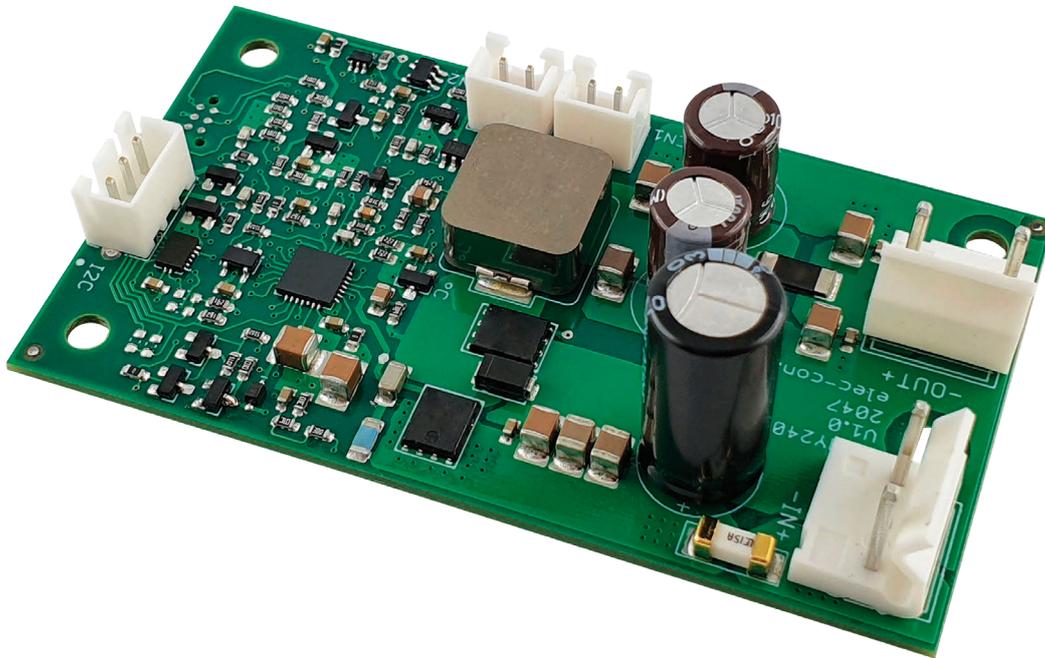


## Das Netzteil weiß (fast) alles

Neue Konzepte nutzen dieses Wissen, z. B. für sensorlose Zustandsüberwachung



Das digital parametrierbare Netzteil diPSU von Elec-Con ist 1:1 mit seinen analogen Vorgängern austauschbar; auch Ein- und Ausgänge befinden sich nahezu an den identischen Positionen. © Elec-Con, Michael Ruderer



Autoren:  
Markus Böhmisch, M.Sc.,  
Entwicklungsingenieur für digital  
konfigurierbare Regelungen  
und Andreas Federl, M.Sc.,  
wissenschaftlicher Mitarbeiter und  
Lehrbeauftragter  
Technische Hochschule  
Deggendorf

Elec-Con technology GmbH  
www.elec-con.com

Bislang wird das immanente Wissen der Stromversorgungen noch kaum genutzt, um Betriebsdaten zu ermitteln und zu analysieren. Dabei lassen sich daraus wertvolle Informationen über den Systemzustand gewinnen. Die Skala reicht von einfacher Verschleißerkennung über die Wartungsplanung bis hin zum Aufspüren von Eindringlingen in der IT. In diesem Artikel werden diese Möglichkeiten näher beleuchtet und die entsprechenden technischen Konzepte vorgestellt.

### Analoge Regelungstechnik

Grundsätzlich ist jede Stromversorgung ein Regler, dessen Eigenschaften in der Entwicklungsphase so ausgelegt werden, dass Störungen möglichst nicht bei der Last ankommen, egal ob Veränderungen der Eingangsgrößen (z. B. Spannungsschwankungen) die Ursache dafür sind, oder Sprünge in der Stromaufnahme der Last, z. B. wenn Zusatzfunktionen zu- oder abgeschaltet werden, etwa ein Lüfter oder eine Festplatte.

Diese Regler sind meist analog aufgebaut und die jeweiligen Eigenschaften werden hardwaremäßig eingestellt, z. B. mittels Kondensatoren und Widerständen. Die Auslegung ist in der Praxis immer ein Kompromiss, weil sich die Eigenschaften teilweise gegenseitig beeinflussen. Wer jetzt an einen klassischen PID-Regler denkt, liegt nicht grundlegend falsch. Dieses Design wird aber bei Stromversorgung kaum eingesetzt, da das Ermitteln der entsprechenden Koeffizienten recht mühsam ist. Meist wechselt man daher vom Zeit- in den Frequenzbereich und legt die Eigenschaften mittels des Frequenzkennlinienverfahrens aus.

Zentrales Stabilitätskriterium ist dabei die Phasenreserve ( $\phi_R$  in Bild 1). Um bei realen Schaltungen eine ausreichende Stabilität zu erreichen, sollte diese bei mindestens  $45^\circ$  liegen. Mit steigender Phasenreserve steigt zudem die Dämpfung beim Einschwingvorgang (Bild 1).

### Regelgeschwindigkeit

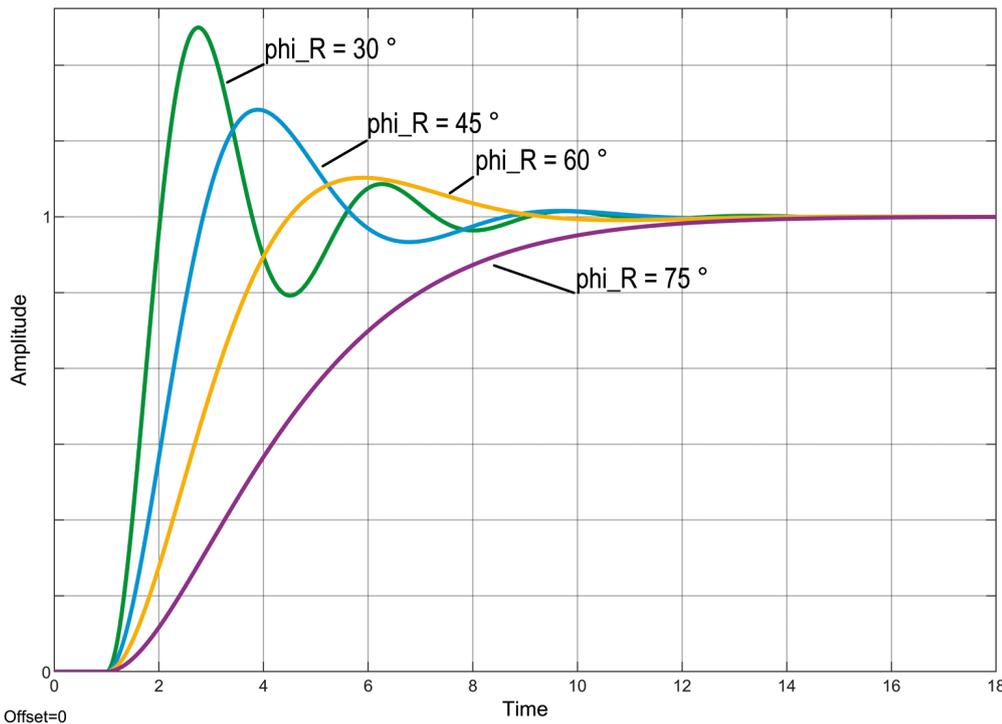
Ein zweites Design-Kriterium ist die Regelgeschwindigkeit, bzw. deren Kehrwert, die Durchtrittsfrequenz. Je höher die Regelgeschwindigkeit ist, desto geringer ist die anfängliche Spannungsänderung bei Lastsprüngen am Ausgang bzw. bei Spannungsschwankungen am Eingang.

In vielen Fällen ist die genaue Auslegung der Parameter unkritisch, und eine Stromversorgung „von der Stange“ erfüllt ihren Zweck. In Grenzbereichen aber, beispielsweise bei Lasten mit heftigen Sprüngen im Stromverbrauch, wie sie etwa bei 3D-Grafikkarten oder beim Rendern von Bildern vorkommen, kann der Regler in der Stromversorgung ins Schwingen kommen und ist (kurzzeitig) nicht mehr in der Lage, dem stark schwankenden Strombedarf zu folgen. Im System „ruckelt es“ – und es hängt von der Toleranz der Applikation ab, ob diese weiter läuft oder zum Absturz gebracht wird.

### Digitalisierung als Lösung?

Wenn es mit analoger Technik eng wird, steht schnell die Idee im Raum, die Herausforderung digital zu lösen. Doch auch hier kommt es auf die Details an, weil eine digitale Regelung weder zwingend schneller noch besser sein muss, als ihr analoges Pendant.

Grundsätzlich aber verschiebt sich die Optimierung eines digital parametrierbaren Reglers von der Hardware zur Software. Statt Widerständen und Kondensatoren werden Parameter und Algorithmen verändert. Das löst zumindest die „analogen“ Herausforderung der Toleranzen, Temperaturdrift und Alterung von Bauteilen. Für moderne Konzepte ist aber eines von grundlegender Bedeutung: Die Digitalisierung in der Stromversorgung führt dazu, dass dort Wissen über den tatsächlichen Stromverbrauch mit hoher zeitlicher Auflösung in digitalisierter Form vorhanden ist.



**Bild 1: Unterschiedliches Einschwingverhalten unterschiedlich ausgelegter Regler auf einen Sprung der Führungsgröße. In der grünen Kurve reagiert die Stromversorgung sehr schnell, schwingt aber kräftig über. In der violetten Kurve kommt es zu keinem Überschwingen; dafür dauert das Nachregeln relativ lange. © Elec-Con**

## Hybrid oder Volldigital

Die Aufgaben der Regelung übernimmt in modernen Stromversorgungskonzepten ein Mikrocontroller (Bild 2). Je nach Schaltungskonzept ergibt sich daraus eine digital konfigurierbare (analoge) Regelung („hybrid“) oder eine vollständig digitale Regelung. Doch auch bei volldigitalen Reglern hat so manche Schutzfunktion in Analogtechnik ihre Kostenvorteile, sprich: Digitaltechnik wird nur da eingesetzt, wo sie technische oder kommerzielle Vorteile mit sich bringt.

Ein Beispiel ist der Schutz gegen Kurzschlüsse, der sich mit einem analogen Komparator vergleichsweise einfach und zuverlässig umsetzen lässt. Die (weniger kritische) Abschaltung der Stromversorgung bei Unter- und Überspannungen hingegen lässt sich leichter auf der Software-Seite realisieren (Bild 3).

## Digital unterstützte analoge Leistungselektronik

Die Basistechnologie für hybride Regelungen (Bild 2) liefert beispielsweise Microchip mit seinem DEPA-

Konzept. DEPA steht für „Digitally Enhanced Power Analog“ – also etwa digital unterstützte analoge Leistungselektronik. Diese Mikrocontroller enthalten analoge Regelkreise, Referenzen, Verstärker und PWM-Generatoren, die sich digital konfigurieren, überwachen, messen und anpassen lassen.

## Core Independent and Analog Peripherals

Ein anderer interessanter Ansatz, ebenfalls von Microchip, sind die CIP-Mikrocontroller. CIP steht dabei für „Core Independent and Analog Peripherals“ – also etwa analoge sowie vom Rechenkern unabhängige Zusatzfunktionen. Bei diesem Konzept sind Funktionen im Mikrocontroller implementiert, welche keine ständige Interaktion mit dem Rechenkern benötigen. Typische Beispiele sind auch hier analoge Funktionen, sowie Sicherheits- und Überwachungsschaltungen.

Die „digital and intelligent Power Supply Unit“ diPSU von Elec-Con (Aufmacherbild) basiert auf diesen Mikrocontrollern, weshalb das Passauer Unternehmen seine Wandlerfamilie als „hybride Wandler mit

digital konfigurierbarer Regelung“ bezeichnet. Perspektivisch ist eine vollständig digitale Regelung auf dieser Basis ebenfalls möglich.

## Voltage- oder Current-Mode-Regelung

Bei Stromversorgungen – egal ob analog, hybrid oder volldigital – stellt sich grundsätzlich die Frage, ob auf Spannung (voltage mode) oder auf Strom (current mode) geregelt wird (Bild 4). Allerdings hat die

Current-Mode-Regelung bei Pol-Wandlern (siehe Kasten 1) ihre Vorteile, vor allem hinsichtlich der Regeleigenschaften und des Überstromschutzes.

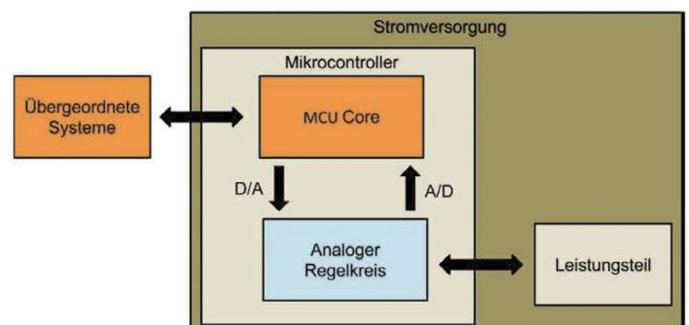
## Vorteile digitalisierter Konzepte

Digitale konfigurierbare bzw. rein digitale Regelungen sind – wie bereits erwähnt – weniger anfällig für Toleranzen, Alterung und Temperaturgang analoger Bauteile. Zudem folgt ein digitaler Regler nicht den analogen Gesetzmäßigkeiten und ermöglicht damit Auslegungen, die in analoger Schaltungstechnik schlicht nicht oder nur mit erheblichem Aufwand realisierbar sind.

Ein weiterer Vorteil dieser neuen Schaltungskonzepte sind die höheren Wirkungsgrade, die sich durchaus im Bereich zwischen 95 und 98 % bewegen, siehe Bild 5. Grund dafür sind vor allem der geringere Eigenverbrauch der Regelung sowie ein Betrieb näher am regelungstechnischen Optimum.

## Digital parametrierbare Regelung

Auch wenn sich die Eigenschaften der Regelung per Software einstellen und optimieren lassen, ist beim Auslegen digital parametrierbarer Stromversorgungen am Anfang der Entwicklungsphase genaues Wissen über das Verhalten und die Bedarfe der Last erforderlich. Daraus werden die Parameter für den Regelalgorithmus abgeleitet. Ein entsprechendes Konzept wurde auf dem Landshuter Symposium Elektronik und Systemintegration Anfang April 2022 vorgestellt [1].



**Bild 2: Schaltungskonzept einer hybriden Stromversorgung. Der Mikrocontroller beinhaltet sowohl den digitalen Part, als auch den analogen Regelkreis. © Elec-Con**

# Stromversorgung

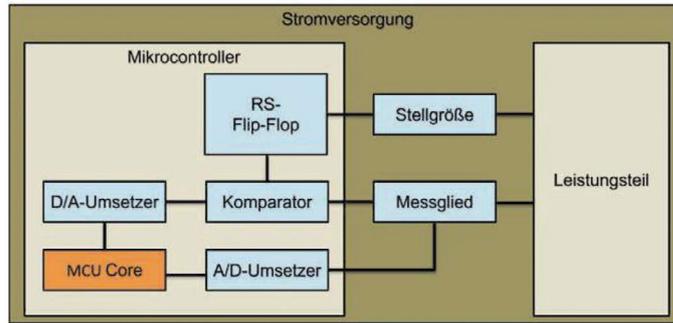
Diese digitale Parametrierung ist dabei nicht so zu verstehen, dass die Eigenschaften dynamisch zur Laufzeit verändert werden. Dies ist in aller Regel auch nicht erforderlich, weil sich die Systemeigenschaften nach der Entwicklungsphase in der Serie nicht mehr wesentlich verändern. Vielmehr geht es darum, die Regelung so auszugestalten, dass eine (anspruchsvolle) Last auch bei kritischen Systemzuständen optimal versorgt wird, und es nicht zum „Ruckeln“ oder gar zum Absturz kommt.

Die in der Entwicklungsphase ermittelten Parameter für bzw. die Anpassungen des Regelalgorithmus werden bei der Fertigung der Stromversorgung eingespielt und bleiben dann unverändert – es sei denn, durch einen späteren Systemupgrade sind fundamentale Änderungen in den Regeleigenschaften erforderlich. Diese können dann in aller Regel ohne Änderungen der Hardware der Stromversorgung durchgeführt werden.

## Daten im Herzen der Stromversorgung abgreifen

Ein weiterer großer Vorteil digitalisierter Regelungen ist, dass alle relevanten Daten wie Stromverbrauch, Ein- und Ausgangsspannung, Temperatur etc. bereits in digitaler Form vorliegen und damit das Netzteil sein Wissen über die Applikation jederzeit über Kommunikationsschnittstellen teilen kann.

Mit Hilfe dieser Daten lassen sich etwa sensorlose Zustandsüberwachungen realisieren. Dazu



**Bild 3: Möglichkeiten der Integration von Schutz- und Überwachungsfunktionen.** © Elec-Con

nutzen die Autoren beispielsweise eine einfache KI, um in dem von der Stromversorgung gelieferten Datenstrom bestimmte Muster zu erkennen – oder auch Anomalien, also ein nicht erwartetes Verhalten. Typische Beispiele dafür sind ein hoher Stromverbrauch eines Industrie-PC, der eigentlich im Standby sein sollte; oder ein schleichend ansteigender Strom durch Verschleiß (z. B. beim Lager eines Lüfters) – bzw. wegen eines sich langsam zusetzenden, ungenügend gewarteten Filters.

## Lebensdauer

Solange ein System noch in der Entwicklungsphase ist, lassen sich die Daten auch gut nutzen, um dessen Anfälligkeit Seitenkanalangriffe (siehe Kasten 2) zu untersuchen.

Ganz allgemein ist die Lebensdauer einer Stromversorgung stark von der Applikation abhängig und wird von der Umgebungstemperatur sowie dem Lastprofil

des Verbrauchers beeinflusst. Eine Stromversorgung mit digital konfigurierbarer Regelung und Betriebsdatenerfassung bietet die Möglichkeit, die statistische Restlebensdauer abzuschätzen und so das System vor ungeplanten Ausfällen zu schützen. Auf diese Weise lässt sich nicht nur der Zustand der Stromversorgung selbst, sondern auch der Zustand des angeschlossenen Verbrauchers erfassen.

## Strom-Zeit-Profil im Allgemeinen

Der Stromverbrauch einer Applikation über die Zeit liefert ein ziemlich ehrliches Abbild der Realität und ist praktisch nicht zu manipu-

lieren: Ein Microcontroller, der komplexe mathematische Operationen bei maximaler Taktfrequenz durchführt, hat einen anderen Stromverbrauch, als der gleiche Chip im NOP-Modus (siehe Kasten 2).

Die sensorlose Zustandsüberwachung läuft also auf eine Analyse des Strom-Zeit-Profiles mittels einer digitalisierten Stromversorgung hinaus. Je nach Aufgabenstellung erfolgt diese Analyse im Labor oder zur Laufzeit, mit hoher oder geringerer zeitlicher Auflösung. Soll z. B. eine Stromversorgung innerhalb von 10 Millisekunden auf einen Strombedarf der Applikation oder eine Störung reagieren, müssen die entsprechenden Daten mit mindestens 200 Hz Abtastrate erfasst werden; besser ist selbstredend eine höhere Abtastrate.

## Kaum manipulierbar

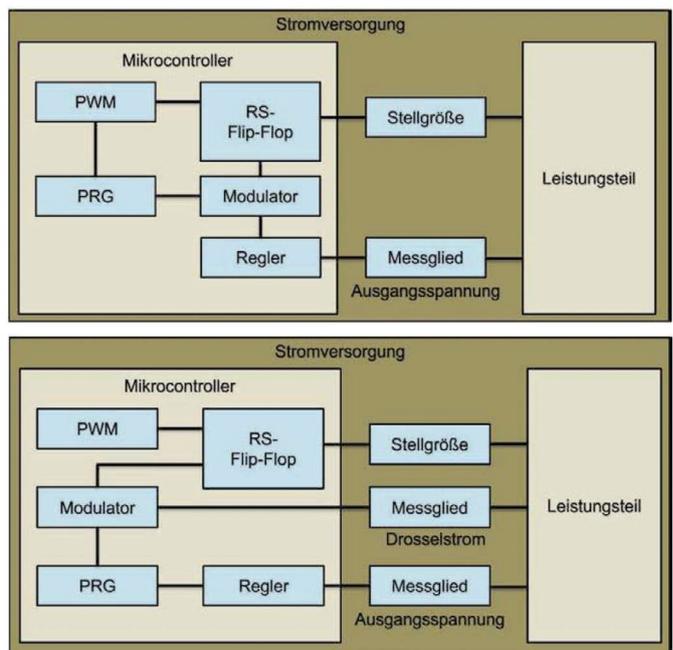
Im Gegensatz etwa zu einer Überwachungs-Software, die ein unerwünschter Eindringling temporär abschalten oder mit falschen Werten „füttern“ könnte, lässt sich ein Strom-Zeit-Profil kaum manipulieren. Wenn der IPC läuft, braucht er Strom. Wenn der Stromverbrauch eines Antriebs schleichend über die Zeit steigt, hat er ziemlich sicher ein Problem in einem Lager. Es macht

## PoL (Point of Load)

Die Stromversorgung direkt an der Last ist ein dezentrales Konzept aus dem Maschinen- und Anlagenbau. In aller Regel wird die Niederspannungsebene im Schaltschrank von einem oder mehreren leistungsfähigen Netzteilen zentral versorgt.

An dieser Spannungsebene hängen zahllose Sensoren, Aktoren, Schalter und Steuerungen, welche dieses Niederspannungsnetz in Summe so verschmutzen, dass komplexe Steuerungen, Industrie-Rechner oder andere anspruchsvolle Elektronik nicht immer gut damit zurecht kommt, oder deren eigene Stromversorgungen durch eine zu hohe Eingangsspannung oder das Herausfiltern von Oberwellen stark belastet bis überlastet werden.

Um dies zu vermeiden, setzt man schaltungstechnisch direkt vor diese Elektronik genau auf die Applikation abgestimmte DC/DC-Wandler, welche die richtige Spannungsebene für den Betrieb der Applikation einstellen sowie das lokale Netz stabilisieren und „säubern“.



**Bild 4: Vergleich der Schaltungskonzepte von Voltage-Mode- (oben) und Current-Mode-Regelung (unten).** Beim unteren Schaltungskonzept wird z. B. der tatsächliche Strom durch den Überträger mit einbezogen. © Elec-Con

## Seitenkanalanalyse

Mit einer Seitenkanalattacke (engl: side-channel-attack) bezeichnet man eine krypto-analytische Methode, welche darauf abzielt, die tatsächliche Implementierung eines Systems (z. B. Chipkarte, Hardware-Sicherheitsmodul oder auch Software) als Informationsquelle zu nutzen. Dazu wird nicht das verschlüsselte Verfahren selbst angegriffen, sondern eine bestimmte Umsetzung in Hardware. Im Unterschied zu „Viren“ sind andere Implementierungen des gleichen Verfahrens von diesem Angriff nicht betroffen.

Bei einer Seitenkanalattacke wird das Zielsystem dabei beobachtet, wie es bestimmte Algorithmen ausführt. Beispielsweise, in dem die Laufzeit des Algorithmus ausgewertet, der Energieverbrauch des Prozessors während der Berechnungen oder dessen elektromagnetische Abstrahlung gemessen werden. Diese Beobachtungsdaten werden dann mit dem verwendeten kryptographischen Schlüssel korreliert, um Muster zu erkennen.

Um solche Angriffe zu verhindern, ist eine Seitenkanalanalyse daher Bestandteil eines Penetrationstests und in der ISO/IEC 15408 zum internationalen Standard für die Prüfung und Bewertung der Sicherheitseigenschaften von IT-Produkten geworden.

Eine gängige Testmethode ist die Simple Power Analysis, bei welcher der Energieverbrauch eines Mikroprozessors während kryptographischer Berechnungen mit hoher zeitlicher Auflösung direkt am selbigen aufgezeichnet wird. Der Energieverbrauch (i.e. die Stromaufnahme) variiert, abhängig von den jeweils ausgeführten Mikroprozessorbefehlen. Damit gibt der Strom-Zeit-Verlauf Aufschluss über die ausgeführten Operationen.

lesen zu können. Wie immer in der Datenanalyse geht es auch hier darum, erst einmal genau zu klären, was das Ziel der Aktion ist, um die optimalen Systemeinstellungen zu finden.

Statt also Daten megabitweise in Dateien zu schreiben, ist es weit sinnvoller, sich z. B. auf das Erkennen von Anomalien zu konzentrieren. Denn solange das Strom-Zeit-Profil des IPCs, des Antriebs oder eines beliebigen anderen Geräts dem entspricht, was erwartet wird, braucht diese Daten nach der Entwicklungsphase eigentlich niemand.

## Seitenkanalanalyse einfach abhaken

In der Praxis muss bei Seitenkanalanalysen nach ISO/IEC 15408 (siehe Kasten 2) ein erheblicher Messaufwand betrieben werden, um an die entsprechenden Daten zu kommen, beispielsweise ein Erfassen des Stromverbrauchs direkt am Mikrocontroller mit hoher zeitlicher Auflösung. Bei einer digital parametrierbaren Stromversorgung

werden diese Messwerte prinzipbedingt in guter Qualität und hoher zeitlicher Auflösung erfasst und stehen über die Datenschnittstelle zur Verfügung.

Zugegeben, die Seitenkanalanalyse ist ein Test-Szenario, bei welchem über einen bestimmten Zeitraum im Labor, nicht aber dauernd im Betrieb gemessen wird. Die Seitenkanalanalyse zeigt aber sehr anschaulich, dass sich aus dem Strom-Zeit-Verlauf eines Geräts oder eines Systems sehr aussagekräftige Informationen über dessen aktuellen Zustand gewinnen lassen.

## Literatur

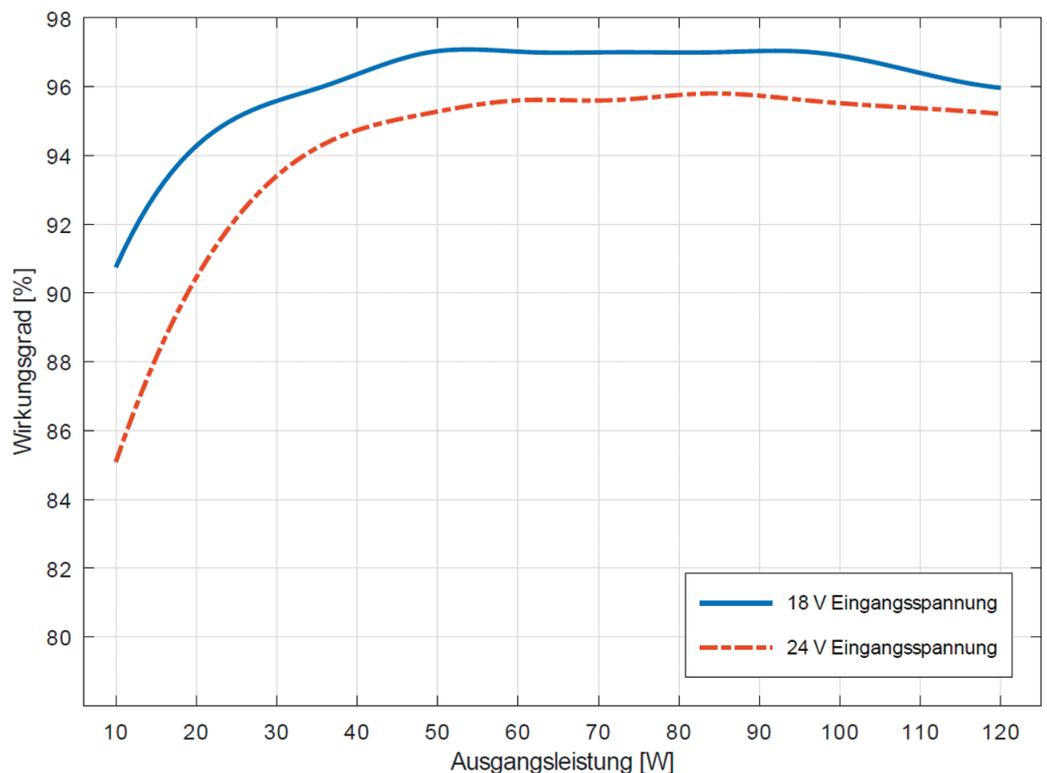
[1] Böhmsch M., Federl A., Sulzinger M., Bauernfeind D., Stromversorgungen mit digital konfigurierbarer Regelung für Embedded-Systeme; Anwendungen / Grundlagen / Ausblick. In: Ivanov A., Bicker M., Patzelt P. (Hrsg.) (2022), Tagungsband zum 3. Symposium Elektronik und Systemintegration, Landshut, ISBN 978-3-9818439-7-2 ◀

also aus rein technischen Gründen absolut Sinn, dem Strom-Zeit-Profil erheblich mehr Beachtung zu schenken.

## Ausblick: Sensorlose Zustandsüberwachung

Man kann das Strom-Zeit-Profil eines Verbrauchers als einen absolut typischen „Fingerabdruck“ eines bestimmten Systemzustands verstehen, welcher ziemlich manipulationssicher ist. Zudem kommt dieser „Fingerabdruck“ ohne externe Sensoren aus – man muss also nicht erst Aufnehmer und Auswertelektroniken an einem Lager befestigen, um dessen Verschleiß zu erkennen. Eine recht einfache KI-Auswertung des Stromverbrauchs sollte dafür ausreichen.

Dass eine Stromversorgung 400 Messwerte pro Sekunden liefern kann, ist ideal, um im Labor die Anfälligkeit eines Systems für Seitenkanalangriffe zu testen (siehe Kasten 2). Es macht aber überhaupt keinen Sinn, diese Messwerte ungesehen in eine Datei zu schreiben in der Hoffnung, später aus dem Datenberg irgendwelche Informationen heraus-



**Bild 5:** Bereits ab 35 W Teillast liegt der Wirkungsgrad von diPSU bei allen Eingangsspannungen über 95 %. Bei 18 V Versorgungsspannung liegt der Wirkungsgrad ab 40 W praktisch durchgängig um oder knapp über 97 %. © Elec-Con