

Application Note

Superkondensatoren – Ein Leitfadens für den Design-In Prozess



ANP077 // RENÉ KALBITZ / FRANK PUHANE

1 Abstrakt

Superkondensatoren (engl: Supercapacitors (SCs)) sind einfach zu handhabende Energiespeicher und in vielerlei Hinsicht mit Batterien vergleichbar. Sie können von jeder strombegrenzenden Energiequelle aufgeladen werden und elektrische Applikationen versorgen. [1,2,3] SCs benötigen, wie jedes andere Energiespeichersystem, eine bestimmte technische Struktur, damit die Energie gespeichert und bereitgestellt werden kann. In dieser Application Note wird dargestellt, wie der Superkondensator als einfacher Energiespeicher eingesetzt werden kann und wie sowohl die Lade- als auch die Entladezeit berechnet werden kann. Am Beispiel einer Schaltung, die das Laden des Superkondensators unter realen Bedingungen und den Betrieb beliebiger elektronischer Anwendungen ermöglicht, wird die Handhabung veranschaulicht.

2 Einleitung

Der Begriff Superkondensator (SC) ist weit verbreitet. Er ist jedoch ein mehrdeutiger Begriff, denn er bezeichnet eine ganze Familie von kapazitiven Energiespeichertechnologien. [1] Der korrekte technische Begriff für die SCs in unserem aktuellen Portfolio ist elektrischer Doppelschichtkondensator (EDLC). In dieser Application Note werden beide Begriffe synonym verwendet.

Wenn es um das Laden und Entladen geht, haben die SCs zwei Eigenschaften, die berücksichtigt werden müssen. Erstens hängt die Spannung der SCs im Gegensatz zu Batterien von ihrem Ladezustand ab. So steigt oder sinkt die Spannung am Bauteil, sobald der SC geladen oder entladen wird. In Hinblick auf den Entladevorgang ist diese Eigenschaft sicherlich unvorteilhaft, da elektronische Anwendungen eine konstante Arbeitsspannung benötigen.

Zweitens können SCs mit relativ hohen Strömen geladen werden, was zu einem quasi kurzgeschlossenen Zustand der Energieversorgung im Einschaltmoment führen kann. Im weiteren Verlauf diskutieren wir die korrekte Verwendung des SC unter zwei verschiedenen Betriebsarten: Konstantstrom- und Konstantspannungsladung.

Obwohl der Design-In-Prozess für SC sich von Fall zu Fall unterscheiden kann, ist der grundlegende Ablauf immer ähnlich:

- Berechnung der erforderlichen Energiekapazität auf Basis des zu erwartenden Energiebedarfs
- Bestimmung der erforderlichen Kapazität C gemäß der Spezifikation der Last, einschließlich des Wirkungsgrades des DC-DC-Wandlers und der niedrigsten Betriebs- und Ladespannung

- Ermittlung des Ladeschemas und Berechnung der entsprechenden Ladezeit. Im Falle einer Konstantspannungsladung wird der Schutzwiderstand gemäß der Spezifikation des Ladegerätes gewählt

Es ist nicht möglich, eine allgemeine Regel zu formulieren, die auf jede Situation angewendet werden kann, aber wir werden die wichtigsten Aspekte behandeln. Dazu werden zunächst einige theoretische Hintergründe erläutert, bevor auf das eigentliche Anwendungsbeispiel eingegangen wird.

3 Theoretischer Hintergrund

3.1. Energiespeicherkapazität

Eine wichtige Größe, die gleich zu Beginn des Designprozesses ermittelt werden muss, ist die Menge der benötigten Energie. Mit anderen Worten, wir müssen die Energiemenge $E = P \cdot t$ berechnen. Wobei P der Gesamtleistungsbedarf und t die gewünschte Betriebszeit ist. Im nächsten Schritt muss die Energie mit der Energiekapazität des SC in Relation gesetzt werden (sprich mit seiner eigentlichen Kapazität). Die Menge der nutzbaren elektrischen Energie E, die in einem SC mit der Kapazität C gespeichert ist, ist gegeben durch

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{Gl.1})$$

wobei V_1 die Ladespannung und V_2 die Abschaltspannung ist. Es ist zu beachten, dass V_1 nicht unbedingt die Nennspannung V_r ist, sondern die tatsächliche Zellenspannung des SC. Auch ohne konkrete Zahlen vermittelt die obige Gleichung einige wichtige Erkenntnisse. Ein SC, der nur bis zu $\frac{1}{2}$ seiner Nennspannung geladen wird, enthält nur ein Viertel seiner maximalen Energiekapazität. Um die Speicherkapazität voll auszunutzen, ist es daher wichtig sicherzustellen, dass der SC vollständig geladen ist. Im idealisierten Fall wird der SC bei $V_1 = V_r$ geladen und während des Betriebs vollständig auf $V_2 = 0 \text{ V}$ entladen.

Aufgrund dieser Spannungsabhängigkeit ist es wichtig, die Parameter des DC-DC-Wandlers in der zugehörigen Schaltung zu kennen. Sobald diese Parameter bekannt sind, kann die Kapazität des SC mit

$$C = \frac{2 \cdot E}{(V_1^2 - V_2^2)} \quad (\text{Gl.2})$$

berechnet werden.

Nun kann der SC entsprechend allen anderen Anforderungen wie der tatsächlichen Größe, der Nennspannung usw. aus dem Katalog ausgewählt werden. Ist die Kapazität und der Eigenwiderstand des SC bekannt, ist es möglich, die Lade- und Entladekennlinien zu berechnen.

3.2. Lademöglichkeiten

Theoretisch kann der SC entweder mit einer Konstantspannungsquelle oder mit einer Konstantstromquelle geladen werden. In der Praxis

Application Note

Superkondensatoren – Ein Leitfadens für den Design-In Prozess



besitzen alle Netzteile unabhängig von deren Art einen maximalen Ausgangsstrom. Wir können daher zwei Situationen unterscheiden:

- Das Netzteil kann sicher bei seinem maximalen Ausgangsstrom betrieben werden, wobei die Energieversorgung selbst einen sicheren Betrieb gewährleistet.
- Das Netzteil darf nicht mit seinem maximalen Nennstrom betrieben werden, ohne dass die Gefahr besteht, dass das Netzteil selbst oder der SC beschädigt wird, was eine Methode zur Strombegrenzung notwendig macht.

Im ersten Fall arbeitet das Netzteil unter Konstantstrombedingungen, wobei die obere Spannungsgrenze auf V_r festgelegt ist. Im zweiten Fall wird das Netzteil als Konstantspannungsquelle betrieben.

Das Design-In für den SC ist im ersten Fall relativ einfach, da nur der Konstantstrom und die Ausgangsspannung des Netzteils eingestellt werden müssen, um die Anforderungen des SC zu erfüllen. Wie diese Einstellung tatsächlich durchgeführt wird, hängt vom verwendeten Netzteil ab und wird daher in dieser Application Note nicht näher erläutert. Die Ladung unter Konstantstrombedingungen werden wir zu einem späteren Punkt behandeln.

Der Aufbau für die letztgenannte Variante mit konstanter Spannung soll im folgenden Kapitel beschrieben werden.

3.3. Laden mit konstanter Spannung (engl.: CVC, Constant Voltage Charging)

In Fällen, in denen die Stromversorgung kapazitive Lasten nicht bewältigen kann, ist es erforderlich den Strom durch einen Schutzwiderstand zu begrenzen.

Die Norm IEC 62391 empfiehlt die Verwendung eines Schutzwiderstandes mit $R_p = 1 \text{ k}\Omega$ in Reihe mit dem SC, wie in Abbildung 1 dargestellt. Eine Abweichung von dieser Norm zur Verbesserung der Ladezeit ist notwendig, wenn die Eigenschaften der Stromversorgung berücksichtigt werden. Im weiteren Verlauf dieser Application Note werden wir R_p auch als parasitären Widerstand bezeichnen, um alle "unerwünschten" Widerstände durch Kontakte und Kabel, die in Reihe mit dem SC geschaltet sind, zu erfassen.

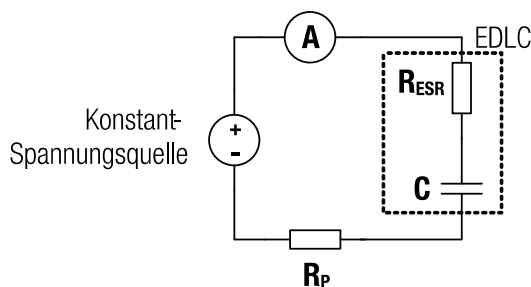


Abbildung 1: Typische Schaltung für das Laden von Kondensatoren mit einer konstanten Spannung

R_p kann auch zur Modellierung von seriellen parasitären Widerständen verwendet werden. Bei Verwendung einer Konstantstromquelle entfällt der Schutzwiderstand.

Bevor wir die Berechnung des Schutzwiderstandes behandeln, rekapitulieren wir kurz die Grundlagen der Spannungs-Zeit-Abhängigkeit (Ladekennlinie) des SC unter der Bedingung eines konstanten Widerstandes.

Wird ein entladener SC von einer idealen Spannungsquelle mit seiner Nennspannung V_r geladen, so wird der zeitabhängige Anstieg der Zellspannung $V(t)$ durch

$$V(t) = V_r \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{(R_{ESR} + R_p) \cdot C}} \right) \quad (\text{Gl. 3})$$

beschrieben.

Die entsprechende schematische Darstellung der Ladekennlinie, die in Abbildung 2 dargestellt ist, veranschaulicht den begrenzten exponentiellen Anstieg der Zellenspannung für R-C-Schaltungen. Die obere Grenze ist die Ladespannung, die in unserer Betrachtung gleich der Nennspannung V_r ist.

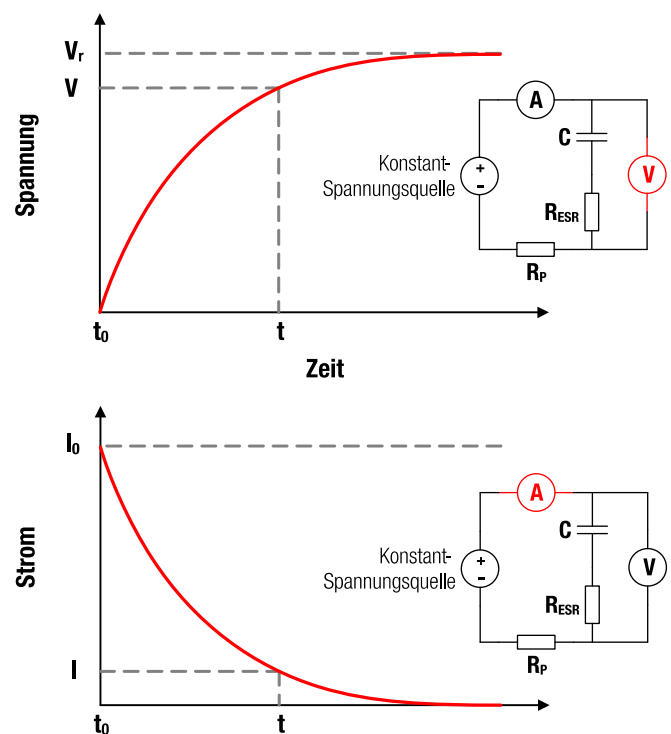


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Ladekennlinie für einen Kondensator bei konstanter Spannung

Application Note

Superkondensatoren – Ein Leitfadens für den Design-In Prozess



Der entsprechende Ladestrom, der ebenfalls in Abbildung 2 angegeben ist, wird mit

$$I(t) = \frac{V_r}{(R_{ESR} + R_p)} \cdot e^{-\frac{t}{(R_{ESR} + R_p) \cdot C}} \quad (Gl.4)$$

berechnet.

Die charakteristische R-C Zeit dieses Systems ist durch

$$\tau = (R_{ESR} + R_p) \cdot C \quad (Gl.5)$$

bestimmt.

Wenn der Kondensator eine Restspannung V_0 hat, kann die effektive Ladezeit mit

$$t_c = \tau \cdot \ln\left(\frac{V_r}{V_r - V_0}\right) = (R_{ESR} + R_p) \cdot C \cdot \ln\left(\frac{V_r}{V_r - V_0}\right) \quad (Gl.6)$$

berechnet werden.

Für einen zunächst leeren Kondensator kann die Ladezeit bis zum Erreichen von über 99 % der Ladespannung mit $t_c = 2 \cdot \tau = 2 \cdot \pi \cdot (R_{ESR} + R_p) \cdot C$ gut abgeschätzt werden. Man kann diese Annäherung natürlich nach Belieben ändern, aber die Verwendung von $2 \cdot \tau \approx -\ln(1 - 0,998...)$ hat den Vorteil, dass die Ladezeit t_c der Grenzfrequenz von dem R-C-Glied entspricht, die im Allgemeinen definiert ist als

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{t_c} \quad (Gl.7)$$

Da der ESR in der Regel in der Größenordnung von mΩ liegt, wird die R-C-Zeit leicht von R_p dominiert, der - je nach Fall - als parasitärer oder schützender Widerstand betrachtet werden kann. Somit kann der Ladestrom und damit die Ladezeit durch den Schutzwiderstand eingestellt/beeinflusst werden.

Für eine Schaltung mit R_p (Abbildung 2), kann der Ladestrom mit

$$I = \frac{V_r - V}{R_{ESR} + R_p} \quad (Gl.8)$$

berechnet werden.

Der Term $V_r - V$ ist die Spannungsdifferenz zwischen der Ladespannung der Quelle, in diesem Fall V_r , und der Spannung an den Klemmen des SC $V = V(t)$. Durch Umformung der Gleichung (Gl.8) nach R_p ergibt sich

$$R_p = \frac{V_r - V}{I} - R_{ESR} \quad (Gl.9)$$

Mit dieser Gleichung sind wir in der Lage, den minimal erforderlichen Schutzwiderstand zu bestimmen.

Der Strom I in den obigen Formeln kann als der maximal zulässige Strom angesehen werden. Er wird entweder durch die obere Stromgrenze des Netzteils oder den maximalen Nennstrom des SC (im Datenblatt

angegeben) bestimmt. Alle anderen Werte wie C , V_r sowie R_{ESR} sind im Datenblatt des SCs angegeben.

An dieser Stelle ist zu betonen, dass der SC nur theoretisch unter Kurzschlussbedingungen betrieben werden darf. Ein Betrieb des SC oberhalb des angegebenen maximalen Stromes führt zwar nicht zu einem sofortigen fatalen Ausfall, aber zu einer drastisch verringerten Lebensdauer.

Gleichung (Gl.8) veranschaulicht auch, dass der maximale Strom, mit dem ein SC geladen werden kann, von $V_r - V$ abhängt. Mit anderen Worten, ein Anstieg der Zellenspannung geht immer mit einer Abnahme des maximalen Ladestromes einher, während die Größe dieser Abnahme durch $1/(R_{ESR} + R_p)$ gegeben ist.

3.4. Laden mit konstantem Strom

(engl.: CCC, Constant Current Charging)

Wie bereits oben erwähnt, wird bei einer anderen Art des Ladens eine Konstantstromquelle I_c verwendet. Wir führen den Index c ein, um zu verdeutlichen, dass der Strom aktiv durch die Stromquelle konstant gehalten wird. Der praktische Vorteil der Verwendung eines Netzteils mit aktiver Stromregelung besteht darin, dass kein zusätzlicher Schutzwiderstand erforderlich ist.

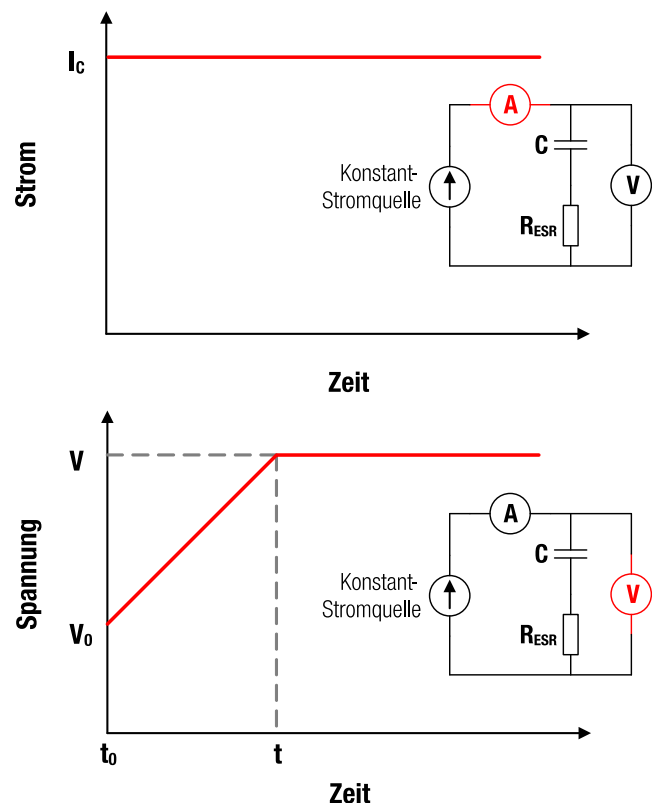


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Ladekennlinie mit Laden eines konstanten Stromes

Application Note

Superkondensatoren – Ein Leitfadens für den Design-In Prozess



Im Falle der Ladung des SC bei I_c beträgt die Spannung am Bauteil

$$V(t) = \frac{I_c}{C} (t - t_0) + V_0, \quad (\text{Gl.10})$$

wobei V_0 die Restspannung des Kondensators darstellt. Die entsprechende schematische Darstellung in Abbildung 3 veranschaulicht die lineare Spannungsabhängigkeit von der Ladezeit.

$V = V(t)$ ist die Spannung an den Anschlüssen des SC, da dieser mit einem konstanten Strom geladen wird. Der Einfachheit halber können wir das Subskript weglassen. Unter der Annahme, dass der Kondensator vollgeladen ist ($V(t) = V_r$), wird die Ladezeit im Konstantstrom-Modus mit

$$t_c = \frac{C}{I_c} \cdot (V_r - V_0) \quad (\text{Gl.11})$$

berechnet.

Die Ladezeit bei einem konstanten Strom ist direkt proportional zu C und umgekehrt proportional zu I_c . Eine Verdoppelung des Ladestroms halbiert also die Ladezeit und eine Verdoppelung von C verdoppelt die Ladezeit.

Wie bereits in Gleichung (Gl.8) erwähnt, ist es physikalisch nicht möglich, einen Kondensator mit einem Konstantstrom I_c bis zu 100 % aufzuladen, insofern die angelegte Spannung nicht größer als V_r sein darf. An einem bestimmten Punkt wird $I_c \cdot (R_{ESR} + R_p)$ größer als $V_r - V(t)$ sein. In diesem Fall ändert sich der Lademodus von Konstantstrom auf Konstantspannung.. Daher kann die effektive Ladezeit je nach Ladestrom und Gesamtserienwiderstand wesentlich länger sein als mit der Gleichung (Gl.11) berechnet. Es ist daher wichtig, die ohmschen Verluste so gering wie möglich zu halten.

3.5. Entladeprozess

Für den Entladevorgang können wir generell drei Szenarien unterscheiden:

- Entladen mit konstanter Leistung,
- Entladen über einen konstanten Widerstand und
- Entladen mit einem konstanten Strom.

In der vorliegenden Beispielapplikation verwenden wir einen Aufwärtswandler, der den SC mit einer konstanten Leistung P_c entlädt. Wir können daher den Fokus der Betrachtung auf diesen Fall legen. Der Einfachheit halber nehmen wir an, dass die Leistungsaufnahme der Anwendung P_c konstant ist und der Aufwärtswandler mit 100 % Wirkungsgrad arbeitet.

Der SC mit der Kapazität C hat eine bestimmte Anfangsspannung V_0 . Nach der Entladung bei konstanter Ausgangsleistung P_c , ist die Spannung auf

$$V(t) = \sqrt{V_0^2 - \frac{2 \cdot P_c}{C} (t - t_0)} \quad (\text{Gl.12})$$

abgefallen. $V = V(t)$ Beschreibt in diesem Fall den Spannungsabfall bei Entladung mit konstanter Leistung. Der Einfachheit halber können wir

das Subskript wieder weglassen. Mit der Beziehung $P_c = V \cdot I$ erhalten wir den Ausdruck für den entsprechenden Strom

$$I(t) = \frac{P_c}{\sqrt{V_0^2 - \frac{2 \cdot P_c}{C} (t - t_0)}} \quad (\text{Gl.13})$$

Die entsprechenden Spannungs- und Stromkennlinien sind in Abbildung 4 dargestellt.

Die Zeit, die benötigt wird, um den SC von V_0 auf V zu entladen, wird mit

$$t_{\text{dis}} = (t - t_0) = \frac{C}{2 \cdot P_c} \cdot (V_0^2 - V^2) \quad (\text{Gl.14})$$

berechnet.

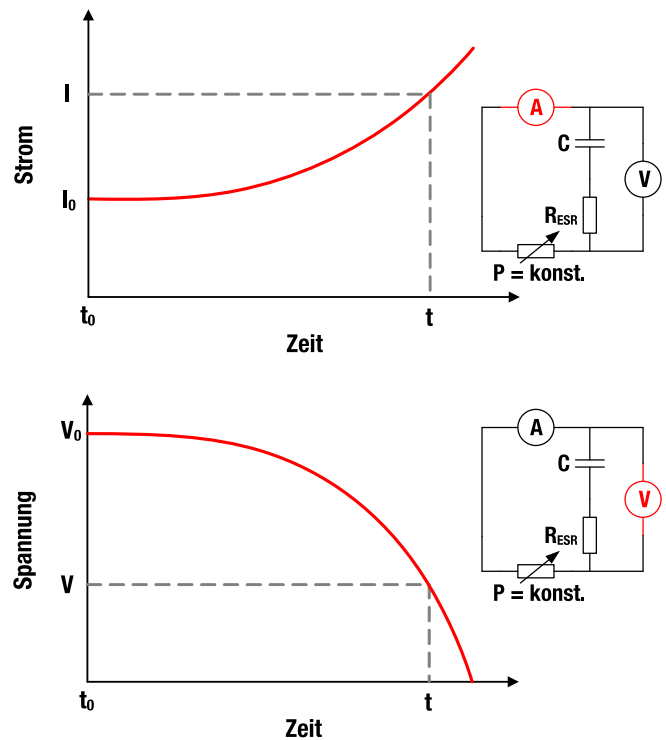


Abbildung 4: Schematische Strom- (oben) und Spannungskennlinie (unten) der SC-Einheit für konstante Leistungsentladung

Der in unserem Beispiel verwendete Aufwärtswandler entlädt den SC von $V_r = 2,7 \text{ V}$ bis zu seiner Abschaltspannung $V = 1 \text{ V}$ bei einer konstanten Leistung von $P_c \approx 0,75 \text{ W}$. Die für diesen Vorgang benötigte Zeit beträgt gemäß der obigen Gleichung

$$\frac{100 \text{ F}}{2 \cdot 0,75 \text{ W}} ((2,7 \text{ V})^2 - (1 \text{ V})^2) \approx 420 \text{ s.} \quad (\text{Gl.15})$$

4 Anwendungsbeispiel

4.1. Schaltplan/Aufbau

In unserem Anwendungsbeispiel zeigen wir einen Fall, bei dem sowohl die eigentliche Stromquelle als auch die Anwendung bei höheren

Application Note

Superkondensatoren – Ein Leitfadens für den Design-In Prozess



Spannungen als der SC-Nennspannung arbeiten. Wir verwenden daher einen Abwärtswandler zum Laden der SCs und einen Aufwärtswandler zur Versorgung der eigentlichen Testanwendung, die eine WPT-Applikation mit einem einfachen LED-Panel als Last ist. Wir zeigen, dass unter diesen realen Bedingungen SCs als Backup Energiequelle verwendet werden können.

Als Quelle wurde das programmierbare Netzteil HMP4040 von Rohde & Schwarz verwendet, das eine Spannung von 12 V(DC) an den Abwärtswandler, in unserem Fall eine Konstantstromquelle, bereitstellt. Der Abwärtswandler (Evaluation Board: 178004) ermöglicht das Laden mit einem konstanten Strom des SC auch unter Bedingungen, bei denen die eigentliche Stromquelle mit Spannungen $>V_r$ arbeitet. Der Aufwärtswandler (Synchron-Aufwärtswandler LTC3402 von Analog Devices) liefert die von der Testanwendung benötigte Leistung, in diesem Fall ein LED-Panel. Die Leistung zwischen dem Aufwärtswandler und dem LED-Panel wird drahtlos durch WPT übertragen. Weitere Einzelheiten sind in Abbildung 5 dargestellt.

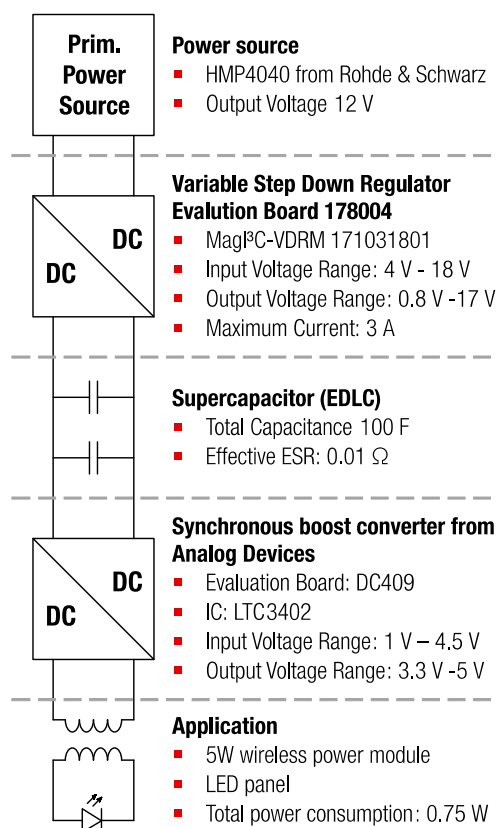


Abbildung 5: Applikationsbeispiel

Die Strom- und Spannungskennlinien wurden mit dem Digitalmultimeter HMC 8012 von Rohde & Schwarz gemessen und mit einem kundenspezifischen LabView-Programm bedient.

Für die nachfolgend dargestellten Messungen der Spannungs- und Stromkennlinien während des Lade- und Entladevorgangs wurden der Abwärtswandler bzw. der Aufwärtswandler von der SC-Einheit getrennt.

4.2. Ladeprozess

Da wir beabsichtigen, eine Anwendung mit einer Leistungsaufnahme von etwa $P = 0,8 \text{ W}$ (einschließlich Wandlungsverluste) für etwa $t = 5 \text{ min}$ zu betreiben, benötigen wir eine Gesamtenergiemenge von etwa $E = P \cdot t = 0,8 \text{ W} \cdot 300 \text{ s} = 240 \text{ J} = 0,067 \text{ Wh}$. Da der verwendete Wandler eine eingestellte Ladeschlussspannung von 2.7V besitzt, benötigen wir eine Kapazität von mindestens

$$C = 2 \cdot \frac{E}{V_1^2 - V_2^2} = 2 \cdot \frac{240 \text{ J}}{(2,7 \text{ V})^2 - (1 \text{ V})^2} \approx 76 \text{ F} \quad (\text{Gl.16})$$

(Neuanordnung der Gleichung (Gl.1) für C).

In unserem Beispiel laden wir zwei Kondensatoren parallel, die jeweils eine Kapazität von 50 F haben. Die Gesamtkapazität der gesamten SC-Einheit beträgt also 100 F bei einer Nennspannung von 2,7 V. Da die minimal erforderliche Kapazität 76 F beträgt, wird die Einheit genügend Energiekapazität bereitstellen. Da beide SC parallelgeschaltet sind, wird der effektive ESR dieser Einheit durch

$$\frac{1}{R_{\text{ESR}}} + \frac{1}{R_{\text{ESR}}} = \frac{2}{R_{\text{ESR}}} \quad (\text{Gl.17})$$

berechnet.

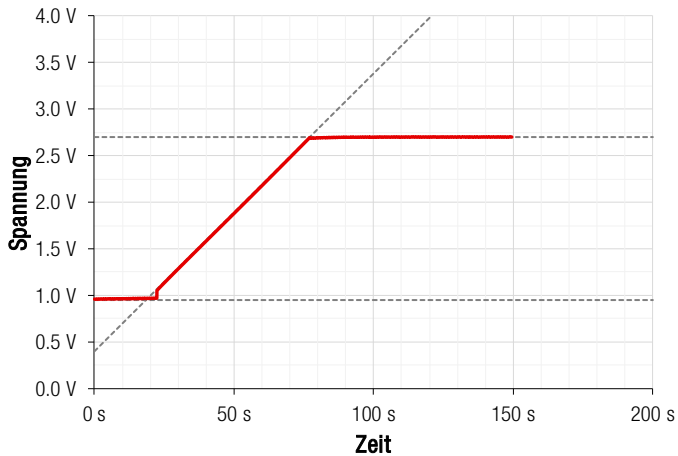
Mit dem im Datenblatt angegebenen Wert erhalten wir einen effektiven Serienwiderstand von $R_{\text{ESR}}/2 = 0,01 \Omega$. Um die Anzahl der Variablen zu minimieren, bezeichnen wir diesen Wert als den äquivalenten Serienwiderstand R_{ESR} .

Zum Laden verwenden wir einen Abwärtswandler (Stromquelle), der eine Eingangsgleichspannung von 12 V in eine Ausgangsgleichspannung von 2,7 V umwandelt. Der Vorteil der Verwendung dieser Stromversorgung ist, dass sie einen maximalen Strom von 3 A kontinuierlich bereitstellen kann. Es ist daher nicht notwendig, einen Schutzwiderstand für dieses Layout zu verwenden.

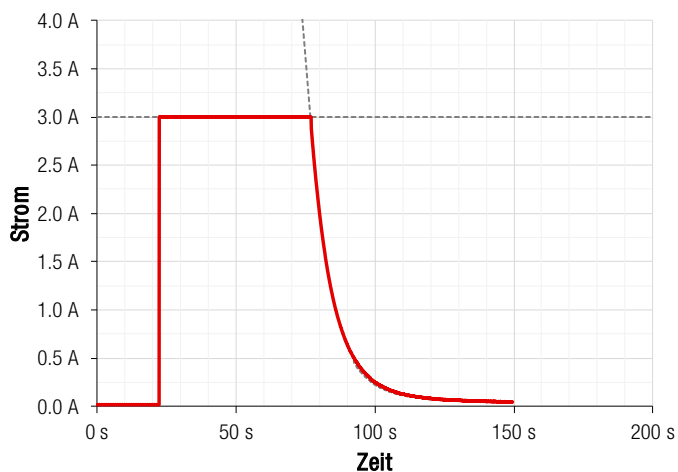
Vor der Messung wurde die SC-Einheit vollständig aufgeladen und anschließend entladen, wie von der Norm IEC 62391 empfohlen. Da die Eingangsspannung unseres Aufwärtswandler minimal 1 V betragen muss, haben wir für das Beispiel die untere SC Spannung von ca. 1 V gewählt. Während des Ladevorgangs wurde die Last abgeschaltet.

Application Note

Superkondensatoren – Ein Leitfadens für den Design-In Prozess



----- Theoretisches Verhalten — Gemessene Daten



----- Theoretisches Verhalten — Gemessene Daten

Abbildung 6: Spannungs- (oben) und Stromkennlinie (unten) der SC-Einheit für das Laden mit konstantem Strom. Nach der Konstantstrom-Ladezeit folgt die Konstanzspannungsladung.

Abbildung 6 zeigt die gemessene sowie die berechnete Ladekennlinie der SC-Einheit, wie sie mit einem konstanten Strom von 0,95 V bis 2,7 V geladen wird. Für die Berechnung der theoretischen Kurven wurden folgende Parameter verwendet: $R_{ESR} + R_p = 0,08 \Omega$, $C = 100 \text{ F}$ und $V_r = 2,7 \text{ V}$. Die Spannung steigt linear von der verbleibenden Spannung 0,95 V auf fast 2,7 V an. Während dieser Zeitspanne, die etwa 32 s bis 86 s dauert, wird der Strom konstant mit 3 A geregelt. Die Ladezeit für diesen Vorgang beträgt

$$\frac{100 \text{ F}}{3 \text{ A}} \cdot (2,7 \text{ V} - 0,95 \text{ V}) \approx 53 \text{ s.} \quad (\text{Gl. 18})$$

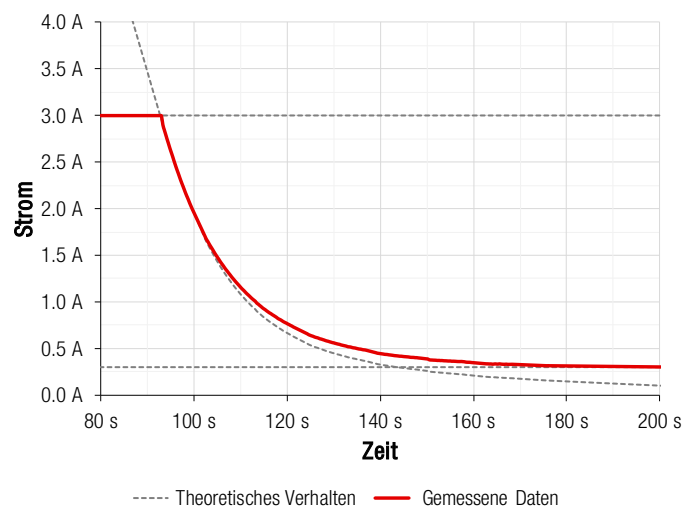
Diesem CCC-Prozess folgt dann ein CVC-Prozess, wie man an der exponentiellen Abnahme des Ladestroms erkennen kann. Das Phänomen wurde bereits in der Einleitung erwähnt und tritt auf, wenn die Differenz zwischen Ladespannung und angelegter Spannung kleiner

wird als $\Delta V = I_c \cdot (R_{ESR} + R_p)$. Die Ladezeit, die durch den zweiten Prozess entsteht, beträgt also $\approx 30 \text{ s}$ und kann mit $(R_{ESR} + R_p) \cdot C \cdot \ln((V_r \cdot 0,002)/\Delta V)$ berechnet werden. R_p ist eine Schätzung, da dieser Wert nicht einfach direkt gemessen werden kann. Wir haben ihn durch eine mathematische Anpassung der oben genannten Gleichungen bestimmt und festgestellt, dass der parasitäre Widerstand $R_p \approx 0,07 \Omega$ beträgt. Der praktischste Ansatz ist jedoch in vielen Fällen eine Testmessung während der Design-In-Phase.

Wir möchten auch erwähnen, dass die gemessene Spannung aufgrund des ohmschen parasitären Widerstands der Drähte und Kontakte nicht genau der Spannung der SC-Einheit entspricht. Aus diesem Grund zeigt die Spannungskurve während des zweiten CCC-Prozesses einen nahezu konstanten Wert von 2,7 V, aber keinen deutlichen exponentiellen Anstieg.

Abgesehen von diesem parasitären Widerstand von $R_p \approx 0,07 \Omega$, sind alle anderen zur Berechnung verwendeten Werte mit den technischen Parametern der SCs vergleichbar. Da der Aufbau nur zu Demonstrationszwecken entwickelt wurde, wurde das Hauptaugenmerk auf einen sehr modularen und leicht zugänglichen Aufbau gelegt.

Wie bereits oben erwähnt, wurden die in Abbildung 6 dargestellten Strom- und Spannungskurven bei von der SC-Einheit getrennter Last gemessen. Daher sinkt der Strommesswert auf Null, wenn sich der Superkondensator seinem vollgeladenen Zustand nähert. Unter realistischen Betriebsbedingungen würde die Last jedoch aufgrund der konstanten Leistungsaufnahme von 0,75 W einen konstanten Stromoffset verursachen, wie in Abbildung 7 gezeigt wird.



----- Theoretisches Verhalten — Gemessene Daten

Abbildung 7: Ladestrom bei einem Offset-Strom von 0,3 A

Hier konvergiert der Strom in Richtung

$$0,28 \text{ A} = \frac{P_c}{V} = \frac{0,75 \text{ W}}{2,7 \text{ V}} \quad (\text{Gl. 19})$$

Application Note

Superkondensatoren – Ein Leitfadens für den Design-In Prozess



(anstelle von 0 A wie in Abbildung 7), wenn der SC aufgeladen wird. Sowohl die Ladezeit als auch die Spannungscharakteristik bleiben wie oben beschrieben gleich.

Im Verlauf dieses Abschnitts haben wir gezeigt, wie der Ladevorgang des angegebenen Beispiels als zweistufiger Prozess beschrieben werden kann und wie die Ladezeit in einem solchen Fall berechnet wird. Im nächsten Abschnitt konzentriert sich diese Application Note auf die Erörterung des Entladevorgangs. Dazu werden wir auch die gemessenen Daten mit dem theoretischen Modell vergleichen und zeigen, wie die Entladezeiten berechnet werden können.

4.3. Entladeprozess

Der in unserem Beispiel verwendete Aufwärtswandler entlädt den SC von $V_0 = 2,7 \text{ V}$ auf seine Abschaltspannung $V = 1 \text{ V}$. Er versorgt ein WPT-System mit einer kleinen Anordnung von LEDs bei einer Spannung von 5 V und einer Leistungsaufnahme von ca. $0,75 \text{ W}$. Die Wirkungsgrade der Systeme sind in der Regel nicht konstant, sondern ändern sich mit der Eingangsspannung, der Umgebungstemperatur sowie anderen Designfaktoren.

In unserem Beispiel ändert sich der Wirkungsgrad von 90% bei $2,7 \text{ V}$ auf etwa 70% , wenn sich der Wandler seiner Abschaltspannung von 1 V nähert. Um ein genaues physikalisches Modell zu erhalten, müsste der konstante Wert P_c durch eine geeignete Funktion $P_c(V)$ ersetzt werden. Wir werden von einer genaueren Diskussion dieser Abhängigkeit absehen, da sie nur eine Formalie ist und nicht zu einem tieferen Verständnis des Entladevorgangs beiträgt.

Der Einfachheit halber verwenden wir die durchschnittliche Ausgangsleistung von $P_c = 0,75 \text{ W}$, berechnet mit

$$\bar{P}_c = \frac{1}{\Delta t} \int P(t) dt. \quad (\text{Gl.20})$$

Die Funktion $P(t)$ wurde experimentell auf der Grundlage der Gesamtstrom- und Spannungskurven des Konverters und des LED-Arrays bestimmt.

Da wir die Berechnung auf der Grundlage einer durchschnittlichen Ausgangsleistung durchgeführt haben, weicht die Stromkurve in Abbildung 8 zunehmend von der theoretischen Kurve ab, wenn der SC entladen wird. Die für diesen Entladungsvorgang erforderliche Zeit beträgt gemäß der obigen Gleichung

$$\frac{100 \text{ F}}{2 \cdot 0,75 \text{ W}} ((2,7 \text{ V})^2 - (1 \text{ V})^2) \approx 420 \text{ s} \quad (\text{Gl.21})$$

die in guter Übereinstimmung mit der gemessenen Spannung ist.

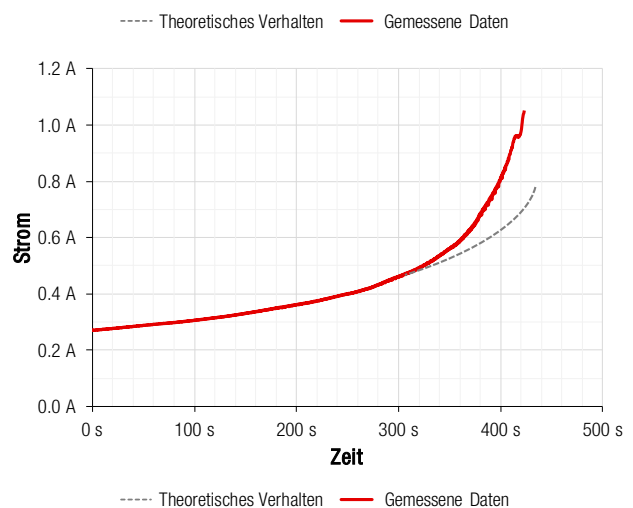
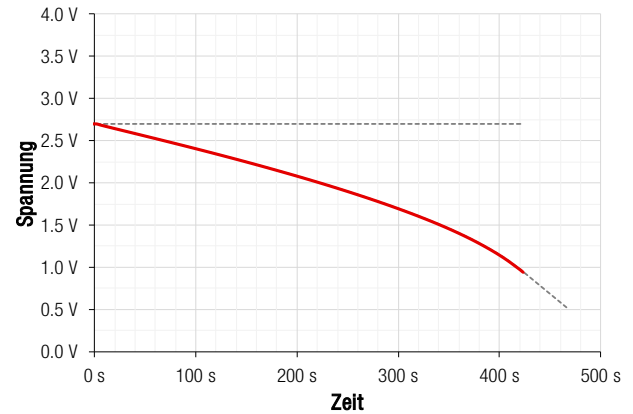


Abbildung 8: Spannungs- (oben) und Stromkennlinie (unten) der SC-Einheit für konstante Leistungsentladung. Die gestrichelte Linie zeigt das theoretische Entladeverhalten. Rote Linie zeigt die tatsächlich gemessenen Daten.

5 Zusammenfassung

Die in dieser Application Note beschriebene Vorgehensweise kann als Blaupause für die Spezifikation von SC-Lade-/Entladeschaltungen verwendet werden. Wir haben gezeigt, wie SCs je nach Spezifikation der Anwendung als kurzzeitige Energieversorgung eingesetzt werden können. Superkondensatoren sind geeignete Energiespeicher, um eine fluktuierende Stromversorgung auszugleichen. Darüber hinaus haben wir auch die erforderliche Energiekapazität für die Anwendung berechnet und geeignete SCs entsprechend ausgewählt.

Wir haben zwei Ladeverfahren identifiziert. In einem ersten Schritt wurde der Kondensator mit einem konstanten Strom bis zu einem bestimmten Ladezustand geladen. In einem zweiten Schritt wurde der Kondensator mit konstanter Leistung entladen.

Es wurde gezeigt, dass die Entladung mit einem Aufwärtswandler gut als ein Entladevorgang mit konstanter Leistung beschrieben werden kann.

Application Note

Superkondensatoren – Ein Leitfadens für den Design-In Prozess



A. Anhang

A.1. Komplete Applikation

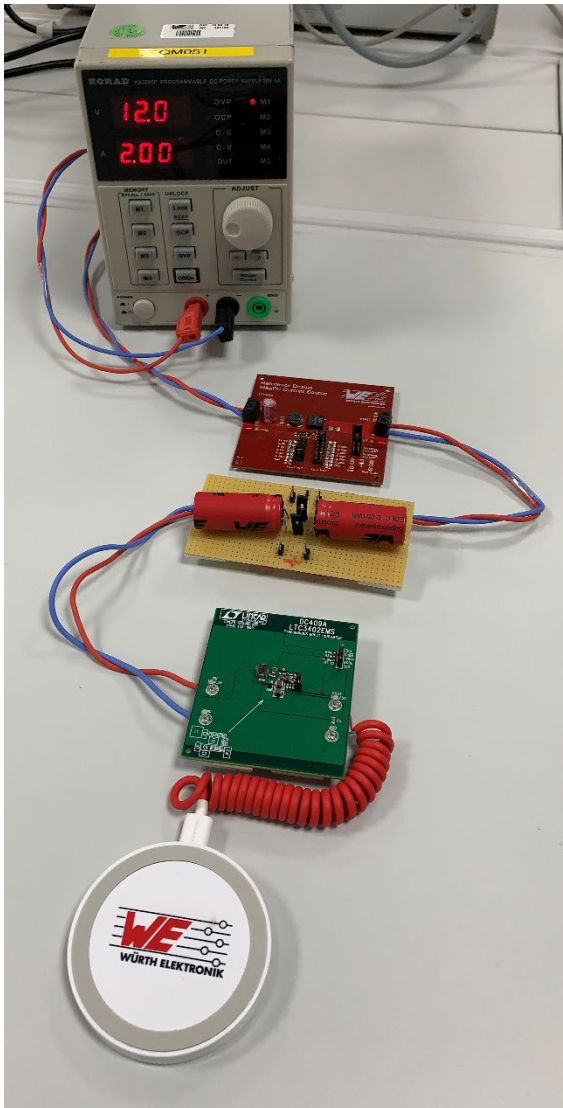


Abbildung 9: Bild der kompletten Anwendung mit den unterschiedlichen Leistungswandlern, der Superkondensator-Bank und der Last, jedoch mit einer anderen Spannungsquelle.

A.2. Referenzen

- [1] F. Beguin and E. Frackowiak (eds.), **Supercapacitors Materials, Systems, and Applications**, WILEY-VCH Verlag (2013)
- [2] B. E. Conway, **Electrochemical Supercapacitors, Scientific Fundamentals and Technological Applications**, Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York (1999)
- [3] N. Kularatna, **Energy Storage Devices for Electronic Systems (Rechargeable Batteries and Supercapacitors)**, Elsevier (2015)

Application Note

Superkondensatoren – Ein Leitfadens für den Design-In Prozess



WICHTIGER HINWEIS

Der Anwendungshinweis basiert auf unserem aktuellen Wissens- und Erfahrungsstand, dient als allgemeine Information und ist keine Zusicherung der Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG zur Eignung des Produktes für Kundenanwendungen. Der Anwendungshinweis kann ohne Bekanntgabe verändert werden. Dieses Dokument und Teile hiervon dürfen nicht ohne schriftliche Genehmigung vervielfältigt oder kopiert werden. Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG und seine Partner- und Tochtergesellschaften (nachfolgend gemeinsam als „WE“ genannt) sind für eine anwendungsbezogene Unterstützung jeglicher Art nicht haftbar. Kunden sind berechtigt, die Unterstützung und Produktempfehlungen von WE für eigene Anwendungen und Entwürfe zu nutzen. Die Verantwortung für die Anwendbarkeit und die Verwendung von WE-Produkten in einem bestimmten Entwurf trägt in jedem Fall ausschließlich der Kunde. Aufgrund dieser Tatsache ist es Aufgabe des Kunden, erforderlichenfalls Untersuchungen anzustellen und zu entscheiden, ob das Gerät mit den in der Produktspezifikation beschriebenen spezifischen Produktmerkmalen für die jeweilige Kundenanwendung zulässig und geeignet ist oder nicht.

Die technischen Daten sind im aktuellen Datenblatt zum Produkt angegeben. Aus diesem Grund muss der Kunde die Datenblätter verwenden und wird ausdrücklich auf die Tatsache hingewiesen, dass er dafür Sorge zu tragen hat, die Datenblätter auf Aktualität zu prüfen. Die aktuellen Datenblätter können von www.we-online.com heruntergeladen werden. Der Kunde muss produktspezifische Anmerkungen und Warnhinweise strikt beachten. WE behält sich das Recht vor, an seinen Produkten und Dienstleistungen Korrekturen, Modifikationen, Erweiterungen, Verbesserungen und sonstige Änderungen vorzunehmen. Lizenzen oder sonstige Rechte, gleich welcher Art, insbesondere an Patenten, Gebrauchsmustern, Marken, Urheber- oder sonstigen gewerblichen Schutzrechten werden hierdurch weder

eingräumt noch ergibt sich hieraus eine entsprechende Pflicht, derartige Rechte einzuräumen. Durch Veröffentlichung von Informationen zu Produkten oder Dienstleistungen Dritter gewährt WE weder eine Lizenz zur Verwendung solcher Produkte oder Dienstleistungen noch eine Garantie oder Billigung derselben.

Die Verwendung von WE-Produkten in sicherheitskritischen oder solchen Anwendungen, bei denen aufgrund eines Produktausfalls sich schwere Personenschäden oder Todesfällen ergeben können, sind unzulässig. Des Weiteren sind WE-Produkte für den Einsatz in Bereichen wie Militärtechnik, Luft- und Raumfahrt, Nuklearsteuerung, Marine, Verkehrswesen (Steuerung von Kfz, Zügen oder Schiffen), Verkehrssignalanlagen, Katastrophenschutz, Medizintechnik, öffentlichen Informationsnetzwerken usw. weder ausgelegt noch vorgesehen. Der Kunde muss WE über die Absicht eines solchen Einsatzes vor Beginn der Planungsphase (Design-In-Phase) informieren. Bei Kundenanwendungen, die ein Höchstmaß an Sicherheit erfordern und die bei Fehlfunktionen oder Ausfall eines elektronischen Bauteils Leib und Leben gefährden können, muss der Kunde sicherstellen, dass er über das erforderliche Fachwissen zu sicherheitstechnischen und rechtlichen Auswirkungen seiner Anwendungen verfügt. Der Kunde bestätigt und erklärt sich damit einverstanden, dass er ungeachtet aller anwendungsbezogenen Informationen und Unterstützung, die ihm durch WE gewährt wird, die Gesamtverantwortung für alle rechtlichen, gesetzlichen und sicherheitsbezogenen Anforderungen im Zusammenhang mit seinen Produkten und der Verwendung von WE-Produkten in solchen sicherheitskritischen Anwendungen trägt.

Der Kunde hält WE schad- und klaglos bei allen Schadensansprüchen, die durch derartige sicherheitskritische Kundenanwendungen entstanden sind.

NÜTZLICHE LINKS



Application Notes

www.we-online.de/app-notes



REDEXPERT Design Tool

www.we-online.de/redexpert



Toolbox

www.we-online.de/toolbox



Produkt Katalog

www.we-online.de/products

KONTAKTINFORMATION

appnotes@we-online.de

Tel. +49 7942 945 - 0



Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG
Max-Eyth-Str. 1 · 74638 Waldenburg · Germany

www.we-online.de

