

Support Note

Wie verwendet man Superkondensatoren? Eine kurze Anleitung für den Design-In-Prozess



SN009 // RENÉ KABLITZ / FRANK PUHANE

1 EDLC - Superkondensator

Im Vergleich zu anderen Kondensatorstechnologien zeichnen sich EDLCs (engl.: *Electric Double Layer Capacitor*) durch eine sehr hohe Ladungsspeicherkapazität und einen sehr niedrigen äquivalenten Serienwiderstand (ESR) aus. Ihre hohe Lebensdauer, niedrige Ladezeit und ihre große Leistungsabgabe machen sie zur idealen Wahl für viele Anwendungen im Bereich der Stromversorgung.

Mögliche Anwendungen sind:

Notstromversorgung

- Um eine Applikation während des Batteriewechsels oder bei Stromausfall mit Energie zu versorgen
- Energieversorgung im Notfall als unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)

Hybridanwendung mit Batterie

- Zur Entlastung der Batterien bei hohen Leistungsspitzen
- Pufferung von Energieschwankungen zur Verlängerung der Batterielaufzeit

Die wichtigsten Parameter für den Design-in-Prozess sind die Kapazität, die Entlade- und Ladezeit sowie die entsprechenden Spannungen. Nachfolgend finden Sie eine Zusammenfassung der wichtigsten Formeln und Berechnungsbeispiele. [1,2,3]



Abbildung 1: Allgemeines Konzept des Lade- und Entladeprozesses

2 Allgemeines Vorgehen beim Design-In

- 1) Ermittlung der Art des Entladevorgangs:
 - Konstanter Widerstand
 - Konstanter Strom
 - Konstante Leistung
- 2) Berechnung*) der erforderlichen Kapazität in Abhängigkeit von den gewünschten Betriebsparametern wie Betriebsdauer, Ausgangsleistung und Ausgangsstrom.

*) Der Einfachheit halber werden die Verluste durch ESR, Leitungen und Anschlüsse vernachlässigt.
- 3) Bestimmung des geeigneten Ladevorgangs:
 - Konstanter Strom
 - Konstante Spannung
- 4) Berechnung der Ladezeit in Abhängigkeit vom Ladestrom. Falls erforderlich, muss ein Schutzwiderstand berechnet werden.



Abbildung 2: Radiale through-hole EDLC-Serie **WCAP-STSC**

Einige wichtige Formeln für den Design-in-Prozess sind in den folgenden Abschnitten zusammengefasst.

Support Note

Wie verwendet man Superkondensatoren? Eine kurze Anleitung für den Design-In-Prozess



3 Parameter und Leistungsdaten

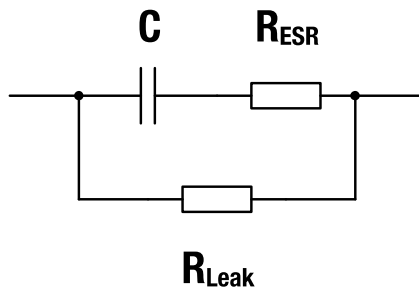


Abbildung 3: Ersatzschaltung eines EDLCs

Allgemeine Parameter:

V_R	Nennspannung <ul style="list-style-type: none"> ▪ nichtwässriges Elektrolyt (typ.) $\approx 2\text{ V} - 3\text{ V}$ ▪ wie im Datenblatt angegeben
C	Kapazität (im Datenblatt und direkt auf der Kennzeichnung der Kondensatoren angegeben)
R_{ESR}	Äquivalenter Serienwiderstand (ESR) (im Datenblatt angegeben)
R_{Leak}	äquivalenter Parallelwiderstand, Leckwiderstand <ul style="list-style-type: none"> ▪ entsprechender Parameter ist der Leckstrom I_{Leak}, der im Datenblatt angegeben ist. ▪ Zusammenhang: $R_{Leak} = \frac{U_R}{I_{Leak}}$ ▪ Einfluss auf die Fähigkeit zur Ladungsspeicherung $R_{Leak} \approx 10\text{ k}\Omega - 1\text{ M}\Omega$
P	Leistungsabgabe, d.h. Leistungsaufnahme der Applikation

Leistungsparameter:

V_1 Ladespannung, normalerweise $V_R = V_1$

V_2 untere Abschaltspannung

Energiespeicherkapazität:

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

$$E = \int P(t) dt = P \cdot t \quad (\text{wenn } P(t) = \text{konst.})$$

maximale Leistungsabgabe:

$$P_{\max} = \frac{V_R^2}{4 \cdot R_{ESR}}$$

3.1. Beispiel

Eine Applikation soll mit einer konstanten Leistung von $P = 0,4\text{ W}$ für die Dauer von $t = 360\text{ s}$ betrieben werden.

Die untere Abschaltspannung ist $V_2 = 1\text{ V}$. Wie groß ist die Gesamtenergiemenge E und wie groß ist die erforderliche Kapazität C ?

Berechnung:

$$P = 0,4\text{ W für } t = 360\text{ s; } V_1 = V_R = 2,7\text{ V; } V_2 = 1\text{ V}$$

$$E = P \cdot t = 0,4\text{ W} \cdot 360\text{ s} = 144\text{ J} = 0,04\text{ Wh}$$

Die erforderliche Energiemenge beträgt $E = 144\text{ J}$.

$$C = 2 \cdot \frac{E}{V_1^2 - V_2^2} = 2 \cdot \frac{144\text{ J}}{(2,7\text{ V})^2 - (1\text{ V})^2} \approx 46\text{ F}$$

Die erforderliche Kapazität beträgt $C = 46\text{ F}$, daher wird ein Kondensator mit einer Kapazität von 50 F empfohlen.

Support Note

Wie verwendet man Superkondensatoren? Eine kurze Anleitung für den Design-In-Prozess



4 Konstantspannungsladen

Für das Laden mit konstanter Spannung wird empfohlen, einen Schutzwiderstand in Reihe mit dem EDLC zu verwenden. Es kann erforderlich sein, den Strom mit einem Schutzwiderstand R_P auf einen bestimmten Wert I_{max} zu begrenzen. Für einen gegebenen I_{max} wird der Widerstand berechnet mit:

$$R_P = \frac{V_1}{I_{max}} - R_{ESR}$$

Die Ladungscharakteristik wird berechnet durch ($t_0 = 0$):

$$V = V_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{(R_{ESR} + R_P) \cdot C}} \right)$$

$$I = \frac{U_1}{R_{ESR} + R_P} \cdot e^{-\frac{t}{(R_{ESR} + R_P) \cdot C}}$$

Die entsprechende Ladezeit wird berechnet durch:

$$t = \ln\left(\frac{V_1}{V_1 - V}\right) \cdot (R_{ESR} + R_P) \cdot C$$

$$t = \ln\left(\frac{100\%}{100\% - \rho}\right) \cdot (R_{ESR} + R_P) \cdot C$$

Aufladung auf 99,9%.

$$t \approx 7 \cdot (R_{ESR} + R_P) \cdot C$$

C	Kapazität
V_1	Ladespannung
I_0	Strom bei t_0
I_{max}	max. zulässiger Strom
V_R	Nennspannung
V	Spannung bei t
t	Ladedauer
t_0	Startzeitpunkt
R_P	Schutzwiderstand
R_{ESR}	äquivalenter Serienwiderstand
ρ	Ladezustand in %

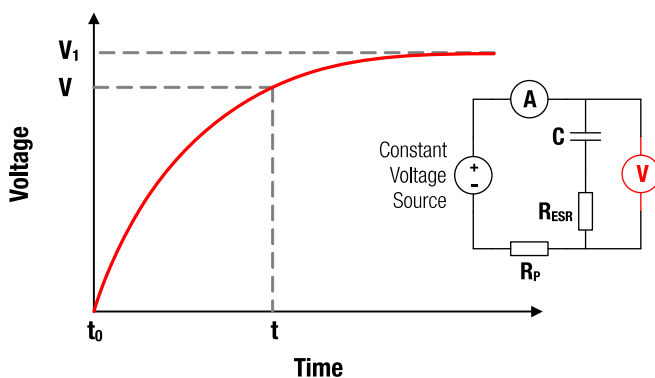


Abbildung 4: V-t Kennlinie für die Konstantspannungsladung

4.1. Beispiel Schutzwiderstand

Ein Kondensator mit einer Kapazität $C = 50 \text{ F}$ und einem äquivalenten Serienwiderstand $R_{ESR} = 0,02 \Omega$ soll mit einer ungeschützten Stromquelle bei $V_1 = V_R = 2,7 \text{ V}$ geladen werden. Die Stromquelle hat einen maximal zulässigen Strom von $I_{max} = 5 \text{ A}$. Wie groß sollte der Schutzwiderstand sein, um eine Überlastung zu vermeiden?

Berechnung:

$$I_{max} = 5 \text{ A}; V_R = V_1 = 2,7 \text{ V}; R_{ESR} = 0,02 \Omega$$

$$R_P = \frac{V_1}{I_{max}} - R_{ESR}$$

$$R_P = \frac{2,7 \text{ V}}{5 \text{ A}} - 0,02 \Omega = 0,52 \Omega$$

Um einen zu hohen Strom an der Stromquelle zu vermeiden, sollte ein Schutzwiderstand von $R_P \geq 0,52 \Omega$ verwendet werden.

4.2. Beispiel Ladezeit

Ein Kondensator mit der Kapazität $C = 50 \text{ F}$ wird auf $V = 2,16 \text{ V}$ (80 % von V_R) bei konstanter Spannung $V_R = 2,7 \text{ V}$ mit einem Schutzwiderstand $R_P = 0,5 \Omega$ und einem äquivalenten Serienwiderstand $R_{ESR} = 0,02 \Omega$ geladen. Wie lange dauert der Ladevorgang?

Berechnung:

$$C = 50 \text{ F}; V = 2,16 \text{ V}; V_1 = V_R = 2,7 \text{ V}; R_P = 0,5 \Omega; R_{ESR} = 0,02 \Omega$$

$$t = \ln\left(\frac{V_1}{V_1 - V}\right) \cdot (R_{ESR} + R_P) \cdot C$$

$$t = \ln\left(\frac{2,7 \text{ V}}{2,7 \text{ V} - 2,16 \text{ V}}\right) \cdot (0,02 \Omega + 0,5 \Omega) \cdot 50 \text{ F} \approx 42 \text{ s}$$

Die Ladezeit beträgt etwa 42 Sekunden.

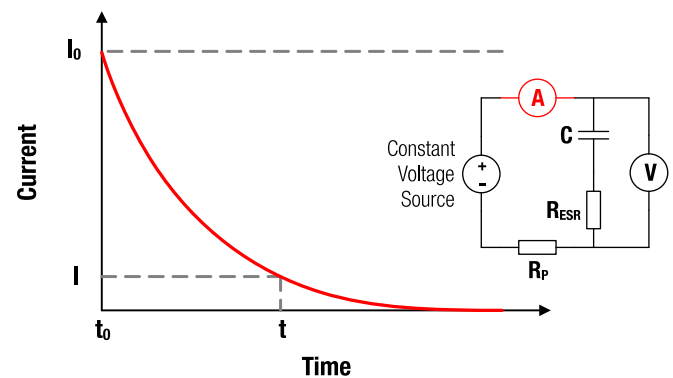


Abbildung 5: I-t Kennlinie für die Konstantspannungsladung

Support Note

Wie verwendet man Superkondensatoren? Eine kurze Anleitung für den Design-In-Prozess



5 Konstantwiderstandsentladung

Die Entladeeigenschaften eines Kondensators mit Kapazität C über einen vorgegebenen Lastwiderstand R_L werden berechnet mit ($t_0=0$):

$$V = V_0 \cdot e^{-\frac{t}{(R_{ESR} + R_L) \cdot C}}$$

$$I = \frac{V_0}{R_{ESR} + R_L} \cdot e^{-\frac{t}{(R_{ESR} + R_L) \cdot C}}$$

Die entsprechende Entladezeit wird berechnet mit:

$$t = \ln\left(\frac{V_0}{V}\right) \cdot (R_{ESR} + R_L) \cdot C$$

Die erforderliche Kapazität wird berechnet mit:

$$C = \frac{t}{\ln\left(\frac{V_0}{V}\right) \cdot (R_{ESR} + R_L)}$$

C	Kapazität
V_0	Ladespannung bei t_0
I_0	Strom bei t_0
V_R	Nennspannung
V	Spannung bei t
t	Entladedauer
t_0	Startzeitpunkt
R_L	Lastwiderstand
R_{ESR}	äquivalenter Serienwiderstand

5.1. Beispiel Entladezeit

Ein Kondensator mit der Kapazität $C = 50 \text{ F}$ wird von seiner Nennspannung $V_R = 2,7 \text{ V}$ auf $V = 0,3 \text{ V}$ mit einer Last von $R_L = 1 \Omega$ entladen. Wie lange dauert der Entladevorgang?

Berechnung:

$$R_{ESR} = 0,02 \Omega; R_L = 1 \Omega; C = 50 \text{ F}; V_0 = V_R = 2,7 \text{ V}; V = 0,3 \text{ V}$$

$$t = \ln\left(\frac{V_0}{V}\right) \cdot (R_{ESR} + R_L) \cdot C$$

$$t = \ln\left(\frac{2,7 \text{ V}}{0,3 \text{ V}}\right) \cdot (0,02 \Omega + 1 \Omega) \cdot 50 \text{ F} \approx 112 \text{ s}$$

Die Entladezeit beträgt ca. 112 Sekunden.

5.2. Beispiel Spannungsabfall

Ein Kondensator mit einer Kapazität $C = 50 \text{ F}$ wird von der Nennspannung $V_R = 2,7 \text{ V}$ mit einer Last von $R_L = 2 \Omega$ für einen Zeitraum von $t = 280 \text{ s}$ entladen. Wie hoch ist die Restspannung?

Berechnung:

$$R_{ESR} = 0,02 \Omega; R_L = 2 \Omega; C = 50 \text{ F}; V_0 = V_R = 2,7 \text{ V}; t = 280 \text{ s}$$

$$V = V_0 \cdot e^{-\frac{t}{(R_{ESR} + R_L) \cdot C}} = 2,7 \text{ V} \cdot e^{-\frac{280 \text{ sec}}{(0,02 \Omega + 2 \Omega) \cdot 50 \text{ F}}} = 0,17 \text{ V}$$

Die Restspannung beträgt 0,17 V.

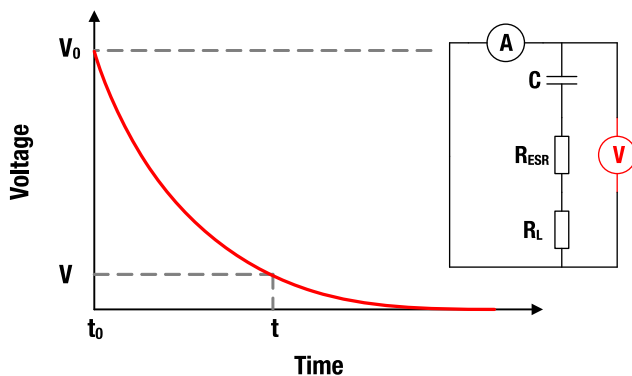


Abbildung 6: V-t Kennlinie für Konstantwiderstandsentladung

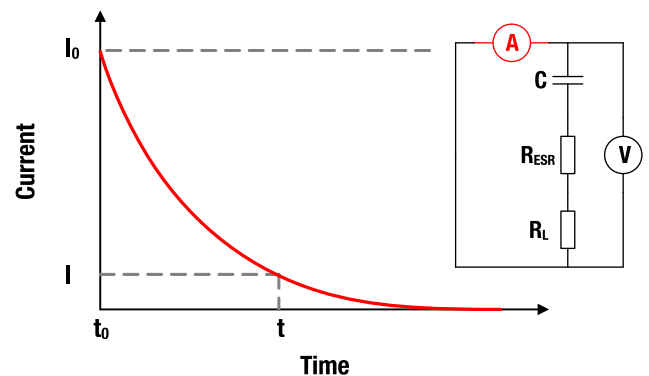


Abbildung 7: I-t Kennlinie für Konstantwiderstandsentladung

Support Note

Wie verwendet man Superkondensatoren? Eine kurze Anleitung für den Design-In-Prozess



6 Konstantstrom-Ladung/Entladung

Bei Verwendung eines Konstantstroms wird die Spannung V an den Klemmen für die Zeit t ($t_0 = 0$) berechnet mit:

$$V - V_0 = \frac{I_C}{C} \cdot t$$

Die entsprechende Entladezeit ($t_0 = 0$) wird berechnet durch:

$$t = (V_0 - V) \cdot \frac{C}{I_D}$$

Die entsprechende Ladezeit ($t_0 = 0$) wird berechnet durch:

$$t = (V - V_0) \cdot \frac{C}{I_C}$$

Die erforderliche Kapazität wird berechnet mit:

$$C = \frac{t \cdot I_D}{(V_0 - V)}$$

$I_{C,D}$ Konstantladestrom/Konstantentladestrom

C Kapazität

V_R Nennspannung

V, I Spannung, Strom bei t

V_0 Spannung bei t_0 (Ladung)

$|t - t_0|$ Lade/Entladedauer

t_0 Startzeitpunkt

R_{ESR} äquivalenter Serienwiderstand

6.1. Beispiel Ladezeit

Ein Kondensator mit der Kapazität $C = 50 \text{ F}$ wird von $V_0 = 0,3 \text{ V}$ auf seine Nennspannung $V_R = 2,7 \text{ V}$ mit einem Konstantstrom $I_C = 2 \text{ A}$ geladen. Wie lange dauert der Ladevorgang?

Berechnung:

$$I_C = 2 \text{ A}; C = 50 \text{ F}; V = V_R = 2,7 \text{ V}; V_0 = 0,3 \text{ V}$$

$$t = (V - V_0) \cdot \frac{C}{I_C} = (2,7 \text{ V} - 0,3 \text{ V}) \cdot \frac{50 \text{ F}}{2 \text{ A}} = 60 \text{ s}$$

Der Ladevorgang dauert 60 Sekunden.

6.2. Beispiel Spannungserhöhung

Ein Kondensator mit Kapazität $C = 50 \text{ F}$ und einer Anfangsspannung $V_0 = 0,3 \text{ V}$ wird mit einem Konstantstrom $I_C = 2 \text{ A}$ für $t = 5 \text{ s}$ geladen. Wie groß ist die Kondensatorspannung?

Berechnung:

$$I_C = 2 \text{ A}; C = 50 \text{ F}; V_0 = 0,3 \text{ V}; t = 5 \text{ s}$$

$$V = V_0 + \frac{I_C}{C} \cdot t = 0,3 \text{ V} + \frac{2 \text{ A}}{50 \text{ F}} \cdot 5 \text{ s} = 0,5 \text{ V}$$

Die Kondensatorspannung beträgt $0,5 \text{ V}$.

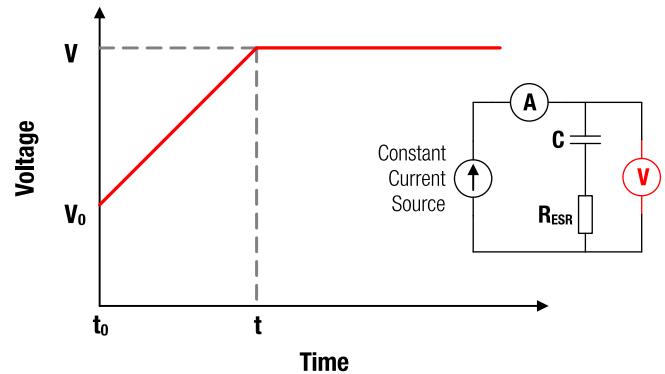


Abbildung 8: V-t Kennlinie für Konstantstromladung

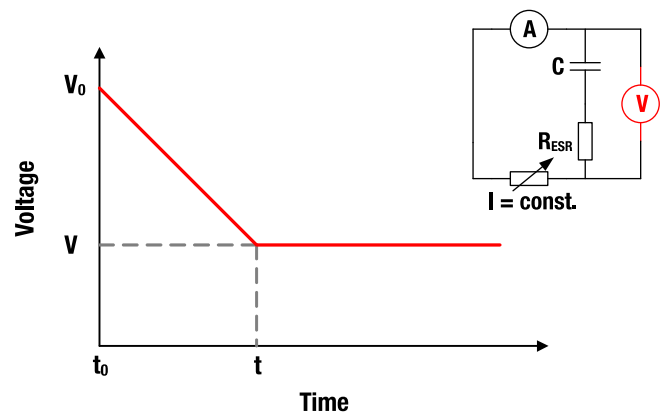


Abbildung 9: V-t Kennlinie für Konstantstromentladung

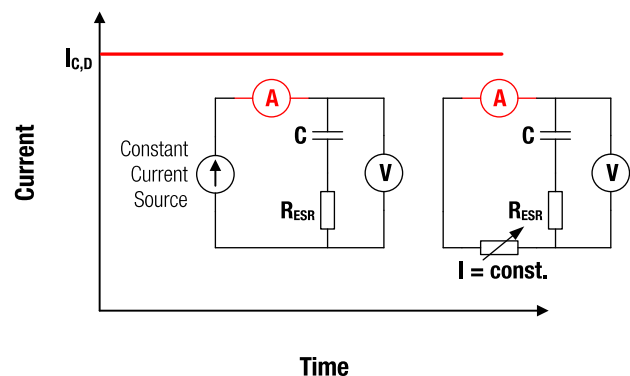


Abbildung 10: I-t Kennlinie für Konstantstromladung und -entladung

Support Note

Wie verwendet man Superkondensatoren? Eine kurze Anleitung für den Design-In-Prozess



7 Konstantleistungsentladung

Wird der Kondensator mit einer konstanten Ausgangsleistung P_C entladen, werden die Spannungs- und Stromkennlinie berechnet mit ($t_0 = 0$):

$$V_0^2 - V^2 = \frac{2 \cdot P_C}{C} \cdot t$$

$$|I| = \left(\frac{V_0^2}{P_C} - \frac{2}{C \cdot P_C} \cdot t \right)^{\frac{1}{2}}$$

Die entsprechende Entladezeit wird berechnet mit ($t_0 = 0$):

$$t = (V_0^2 - V^2) \frac{C}{2 \cdot P_C}$$

Die erforderliche Kapazität wird berechnet mit:

$$C = \frac{2 \cdot t \cdot P_C}{V_0^2 - V^2}$$

P_C	konstante Ausgangsleistung
C	Kapazität
V_R	Nennspannung
V, I	Spannung, Strom bei t
I_0	Strom bei t_0
V_0	Spannung bei t_0 (Ladung)
$t - t_0$	Entladedauer
t_0	Startzeitpunkt

7.1. Beispiel Entladezeit

Ein Kondensator mit Kapazität $C = 50 \text{ F}$ und Nennspannung $V_R = 2,7 \text{ V}$ wird mit konstanter Ausgangsleistung $P_C = 0,2 \text{ W}$ entladen. Die Abschaltspannung beträgt $V = 0,7 \text{ V}$. Wie lange kann der Kondensator unter dieser Bedingung betrieben werden?

Berechnung:

$$P_C = 0,2 \text{ W}; C = 50 \text{ F}; V_0 = V_R = 2,7 \text{ V}; V = 0,7 \text{ V}$$

$$t = (V_0^2 - V^2) \frac{C}{2 \cdot P_C}$$

$$t = ((2,7 \text{ V})^2 - (0,7 \text{ V})^2) \cdot \frac{50 \text{ F}}{2 \cdot 0,2 \text{ W}} = 850 \text{ s}$$

Der Kondensator kann für 850 Sekunden betrieben werden.

7.2. Beispiel Spannungsabfall

Ein vollständig geladener Kondensator mit Kapazität $C = 50 \text{ F}$ und Nennspannung $V_R = 2,7 \text{ V}$ wurde für $t = 180 \text{ s}$ bei konstanter Ausgangsleistung von $P_C = 0,7 \text{ W}$ betrieben. Wie groß ist die verbleibende Restspannung?

Berechnung:

$$P_C = 0,7 \text{ W}; C = 50 \text{ F}; V_0 = V_R = 2,7 \text{ V}; t = 180 \text{ s}; t_0 = 0 \text{ s}$$

$$V = \sqrt{V_0^2 - \frac{2 \cdot P_C}{C} \cdot t}$$

$$V = \sqrt{(2,7 \text{ V})^2 - \frac{2 \cdot 0,7 \text{ W}}{50 \text{ F}} \cdot 180 \text{ s}} = 1,5 \text{ V}$$

Die verbleibende Restspannung beträgt 1,5 V.

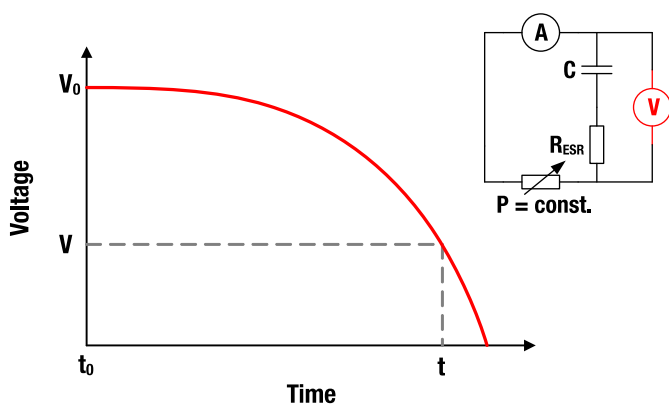


Abbildung 11: V-t-Kennlinie für Konstantleistungsentladung

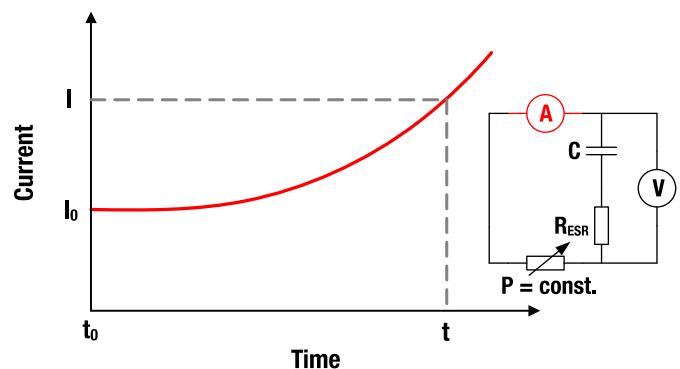


Abbildung 12: I-t-Kennlinie für Konstantleistungsentladung

Support Note

Wie verwendet man Superkondensatoren? Eine kurze Anleitung für den Design-In-Prozess



A. Anhang

A.1. Referenzen

- [1] N. Kularatna (2015). *Energy Storage Devices for Electronic Systems – Rechargeable Batteries and Supercapacitors*. Elsevier Academic Press (Print Book)
- [2] F. Beguin, E. Frackowiak, G. Q. M. Lu (eds.) (2013). *Supercapacitors - Materials, Systems, and Applications*. Wiley-VCH (Print Book)
- [3] B. E. Conway (1999). *Electrochemical Supercapacitors – Scientific Fundamentals and Technological Applications*. Kluwer Academics / Plenum Publishers, New York (Print book)

Support Note

Wie verwendet man Superkondensatoren? Eine kurze Anleitung 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 eingeräumt 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 Plattform

www.we-online.de/redexpert



Toolbox

www.we-online.de/toolbox



Produkt Katalog

www.we-online.de/produkte

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

