

APPLICATION NOTE

ANP124 | Kapazitive Netzteile – Auswahl des passenden Eingangskondensators



Jon Izkue Rodriguez

Die in diesem Dokument dargestellten technischen Sachverhalte sind rein akademischer Natur und nicht dazu gedacht, als fertige Schaltung in Hardware umgesetzt zu werden. Darüber hinaus wurden gesetzliche Anforderungen für Schaltungen, die mit Netzspannung versorgt/betrieben werden, bei den Überlegungen und Schlussfolgerungen außer Acht gelassen.

SICHERHEITSWARNUNG

- Die in diesem Dokument untersuchten und vorgeschlagenen Schaltungen sind direkt an Netzspannungen (120 Vac / 230 Vac) angeschlossen. Netzspannungen gelten als gefährliche Spannungen, die bei direkter Berührung zum Tod führen können. Stromkreise, die direkt an das Stromnetz angeschlossen sind, müssen daher bei der Prüfung und Handhabung mit äußerster Vorsicht behandelt werden. Nur eine fachkundige Person (gemäß IEC 62368-1) sollte mit Netzspannung arbeiten.
- Transformatorlose Stromkreise, die direkt an das Netz oder an gefährliche Spannungen angeschlossen sind, bieten keine Sicherheitstrennung zum Schutz gegen elektrischen Schlag. Es ist zwingend erforderlich, dass der vorgeschaltete Versorgungskreis eines transformatorlosen Stromkreises, wie in diesem Dokument beschrieben, eine Absicherung gemäß IEC 62368-1 gewährleistet. Die Konstruktion von elektrischer Hardware, die für Netzspannung, wie 120 V oder 230 V (AC), vorgesehen ist, birgt inhärente Risiken und Verantwortung.
- Durch die Entwicklung und Implementierung von elektrischer Hardware für Netzspannung erkennen Sie die Verantwortung für die Gewährleistung der Sicherheit und Konformität Ihres Designs an und akzeptieren diese. Der Abschnitt "WICHTIGER HINWEIS" am Ende dieses Dokuments ist unbedingt zu lesen, bevor Sie beginnen.

01. EINFÜHRUNG

Ein Kondensatornetzteil ist ein sehr preiswerter AC/DC-Wandler ohne Transformator oder Schaltkomponenten. Mit einer sehr geringen Anzahl von Bauteilen können diese Schaltungen eine Gleichspannung für Anwendungen mit geringem Leistungsbedarf bereitstellen. Außerdem werden keine elektromagnetischen Störungen erzeugt, da keine hochfrequenten Schaltvorgänge stattfinden.

Transformatorlose Netzteile werden häufig in Anwendungen mit geringem Leistungsbedarf eingesetzt, die an das Stromnetz angeschlossen sind und bei denen eine Isolierung nicht erforderlich ist. Dennoch sind viele Schaltungsentwickler mit dieser AC/DC-Wandlertopologie nicht vertraut. Es gibt mehrere Arten ähnlicher Schaltungen: Kondensatornetzteile, kapazitive Netzteile, und transformatorlose Netzteile.

Da der Ausgang des Netzteils nicht galvanisch von der Netzspannung getrennt ist, ist die Bandbreite der möglichen Anwendungen eingeschränkt. Das jüngste Interesse an Technologien für IoT (Internet of Things) und Smart-Home hat die Verwendung von kostengünstigen Stromversorgungen

mit geringer Leistung (< 1 W) erweitert, die z. B. für intelligente Geräte wie Lichtschalter oder Stromzähler und Umgebungssensoren (Temperatur, Licht) für Smart-Home-Anwendungen benötigt werden.

Das kritische Bauteil in einer kapazitiven Stromversorgung ist der Eingangskondensator. Theoretisch sind Kondensatoren der Klasse X2 elektrisch dafür geeignet, aber dies ist nicht die beabsichtigte Verwendung von X2-Kondensatoren gemäß der Definition in IEC-60664-1. Viele Kondensatorhersteller empfehlen X2-Kondensatoren für diese Anwendungen nicht, während einige die Verwendung erlauben oder alternative Serien für die kapazitive Stromversorgung anbieten. Wir werden die Gründe dafür in diesem Dokument untersuchen.

02. VOM SPANNUNGSTEILER ZUM NETZTEIL

Obwohl diese Anordnung nicht so bekannt ist wie andere alternative Lösungen, beruht ihr Grundkonzept auf einem der bekanntesten Konzepte der Elektrotechnik: Dem Spannungsteiler (Abbildung 1).

APPLICATION NOTE

ANP124 | Kapazitive Netzteile – Auswahl des passenden Eingangskondensators

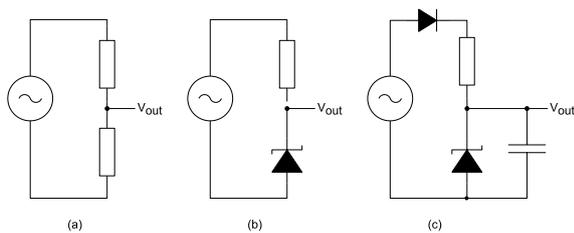


Abbildung 1: Spannungsteiler für Netzwechselfspannung

2.1 Anschluss eines Spannungsteilers an die Netzspannung

In der folgenden Betrachtung gehen wir davon aus, dass die aus V_{out} entnommene Leistung, die als Ziellast verstanden wird, so gering ist, dass sie den Rest der Schaltung nur unwesentlich beeinflusst. Die Schaltung in Abbildung 1(a) hat kaum einen praktischen Nutzen. Die Spannung in V_{out} ist zwar so niedrig wie gewünscht, aber es handelt sich immer noch um Wechselspannung, und um irgendeine nutzbare Leistung zu extrahieren, muss viel mehr Leistung über einen Widerstand abgeführt werden.

Ersetzt man den unteren Widerstand durch eine Zener-Diode, die für die gewünschte Spannung ausgelegt ist, wie in Abbildung 1(b) gezeigt, erhält man zumindest in jedem halben Zyklus die gewünschte Spannung in V_{out} . Während der anderen Hälfte der Zyklen beträgt V_{out} jedoch 0 V, und wir verlieren weiterhin den größten Teil der Leistung über den Widerstand, der die größte Last gegenüber der Spannung bildet.

Wenn wir die Schaltung wie in Abbildung 1(c) gezeigt vervollständigen, erhalten wir eine brauchbare Schaltung für unsere Zielspannung V_{out} . Die in Reihe geschaltete Diode liefert nur die Spannung der positiven Halbwelle, und der parallel zur Zener-Diode geschaltete Kondensator sorgt für die notwendige Gleichspannungsglättung an V_{out} . Dank der Gleichrichterdiode wird der Kondensator während der negativen Halbwelle nicht entladen, sofern die Ausgangsleistung niedrig genug für die gewählte Kapazität ist. Diese Schaltung ist einfach und funktioniert wie vorgesehen, sie ist jedoch aufgrund ihres sehr geringen Wirkungsgrades nicht praktikabel.

2.2 Kapazitiver Spannungsteiler

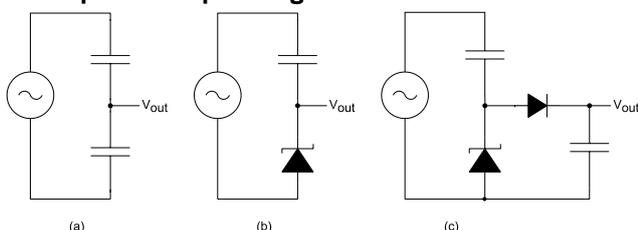


Abbildung 2: Kapazitiver Spannungsteiler

Wie können wir die Schaltung verbessern? Da wir mit Wechselstrom arbeiten, können wir die Widerstände im Spannungsteiler durch Kondensatoren ersetzen, wie in Abbildung 2(a) gezeigt. Die Impedanz eines idealen Kondensators ist gleich dem kapazitiven Blindwiderstand $Z = X = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$. Beispielsweise hat ein idealer Kondensator von 100 nF bei 50 Hz etwa $Z_{ideal@50\text{ Hz}} = X_{@50\text{ Hz}} = 31\,831\ \Omega$. Wir können dies als kapazitiven Spannungsteiler bezeichnen. Der Blindwiderstand des Kondensators nimmt die Spannungslast auf, sodass wir nicht wie beim ohmschen Spannungsteiler Energie ableiten müssen.

Mit einer Zenerdiode wie in Abbildung 2(b) erhalten wir, wie zuvor beschrieben, die Zener-Nennspannung während der Hälfte der Periode. Dies ist eine Wechselspannung von 0 V bis zur Zenerspannung, die wir nur noch gleichrichten müssen, um die Ausgangs-Gleichspannung zu erhalten.

In Abbildung 2(c) fügen wir schließlich die Gleichrichterdiode und einen Ausgangskondensator hinzu, um die erwartete Gleichspannung zu erhalten. Bei aufmerksamer Betrachtung fällt auf, dass wir den Gleichrichter an einer anderen Stelle als im Widerstandsbeispiel platziert haben. Das ist notwendig, da der mit Kondensatoren aufgebaute Spannungsteiler nur mit Wechselstrom funktioniert. Damit der Kondensator wie vorgesehen funktioniert, muss er mit Wechselstrom arbeiten, d. h. er muss in der Lage sein, sich entsprechend der Netzspannung sowohl in positiven als auch in negativen Halbzyklen zu laden und zu entladen.

2.3 Fertigstellung des Entwurfs für das kapazitive Netzteil

Wir haben jetzt einen funktionierenden AC/DC-Wandler mit nur vier Bauteilen, und zumindest im Vergleich zu den früheren Widerstandsvarianten ist er deutlich effizienter. Dieser Entwurf sollte noch mit kleinen Änderungen verbessert werden, damit er noch effizienter wird und in realen Anwendungen zuverlässig funktioniert.

Wenn wir die einfache Gleichrichterdiode durch einen Vollbrückengleichrichter ersetzen, nutzen wir sowohl positive als auch negative Halbwellen. Wie wir später sehen werden, können wir dadurch einen Eingangskondensator mit der Hälfte der Kapazität, im Vergleich zu vorher, wählen, für den gleichen Ausgangsstrom.

Der Spannungsteiler (unter der Annahme eines idealen Gleichrichters) wäre (wie in Abbildung 3)

APPLICATION NOTE

ANP124 | Kapazitive Netzteile – Auswahl des passenden Eingangskondensators

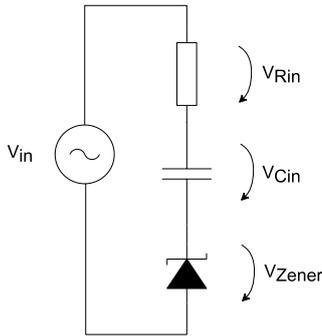


Abbildung 3: Finaler Spannungsteiler

$$V_{in} = V_{Rin} + V_{Cin} + V_{Zener} \quad (1)$$

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{Z_{total}} = \frac{V_{in}}{Z_{Rin} + Z_{Cin} + Z_{Zener+load}} \quad (2)$$

Auch bei der Platzierung eines Widerstands in der Eingangsleitung ergeben sich Vorteile. Wenn wir einen relativ großen Eingangskondensator an das Stromnetz anschließen, kann er im ersten Ladezyklus so viel Strom ziehen, dass er einen Schutzschalter auslösen könnte. Bei Hochleistungsnetzteilen mit großer Eingangskapazität wird dies durch den Aufbau komplizierter Sanftanlaufschaltungen gelöst, aber das wäre nicht in unserem Interesse, wenn wir das Design einfach und kostengünstig halten wollen.

Ein einfacher Eingangswiderstand sorgt für die notwendige Begrenzung des Einschaltstroms. Dieser Widerstand verursacht zwar eine zusätzliche Verlustleistung, ist aber ein notwendiger Schutz, und bei richtiger Dimensionierung wird nur eine relativ geringe Leistung abgeleitet und verbraucht.

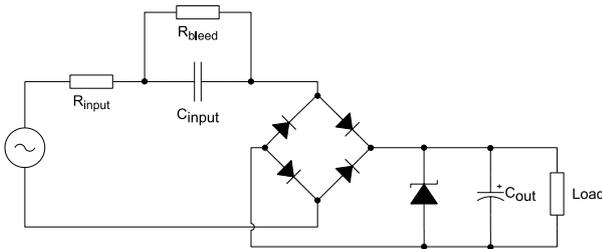


Abbildung 4: Einfaches kapazitives Netzteil

Abschließend fügen wir einen hochohmigen Widerstand parallel zum Eingangskondensator hinzu. Wie immer bei netzgekoppelten Schaltungen muss die sichere Entladung des Eingangskondensators gewährleistet sein. Dies ist eine Sicherheitsmaßnahme, die sich nur geringfügig auf die Leistung der Schaltung auswirkt.

In Abbildung 4 haben wir die Schaltung in der gebräuchlichsten Konfiguration dieser Anordnung neu aufgebaut.

03. ENTWICKLUNG EINES BEISPIELS FÜR EIN KAPAZITIVES NETZTEIL

Der wichtigste Designparameter des Wandlers ist der Eingangskondensator. Die Kapazität des Eingangskondensators bestimmt den maximalen Ausgangsstrom, (fast) unabhängig von der Ausgangsspannung. In den folgenden Schritten werden wir den Ausgangsstrom berechnen.

Zunächst gehen wir davon aus, dass der Widerstand parallel zum Eingangskondensator (siehe Abbildung 4) hoch genug ist, so dass wir seine Wirkung bei der Berechnung des im Eingangskondensator fließenden Stroms ignorieren können:

$$I_{Cin,rms} = \frac{V_{Cin,rms}}{|Z_{Cin}|} \quad (3)$$

Um den maximalen Strom zu berechnen, welcher der Last zur Verfügung steht, müssen wir zuerst den Eingangs-Effektivstrom berechnen. Wenn wir den Vorwärtsspannungsabfall über den Gleichrichterdioden ignorieren, ergibt sich Folgendes:

$$I_{in,rms} = \frac{V_{in,rms} - V_{Zener}}{|Z_{in}|} \quad (4)$$

Der Term $|Z_{in}|$ stellt den Betrag der kombinierten Impedanz des Eingangskondensators und des Reihenwiderstands dar, wobei der Entladewiderstand parallel zum Kondensator ignoriert wird:

$$I_{in,rms} = \frac{V_{in,rms} - V_{Zener}}{\sqrt{(R_{in})^2 + \left(\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_{in}}\right)^2}} \quad (5)$$

Der maximale Gleichstrom, welcher der Last zur Verfügung steht, hängt wie folgt mit dem Durchschnittswert des oben berechneten, vollständig gleichgerichteten Eingangsstroms zusammen:

$$I_{out,max} = \frac{2}{\pi} \cdot I_{in,peak} \quad (6)$$

Mit der Amplitude des Eingangsstroms

$I_{in,peak} = \sqrt{2} \cdot I_{in,rms}$, ergibt sich schließlich:

$$I_{out,max} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot I_{in,rms} \approx 0.9 \cdot I_{in,rms} \quad (7)$$

Die Last sollte so ausgelegt sein, dass der Laststrom nie höher als dieser Wert sein kann, da sonst die Spannung am Ausgang zusammenbricht. Die niedrige kombinierte Impedanz des Systems, das aus der Zener-Diode, dem Ausgangskondensator und der Last besteht, ist die Ursache für diesen Zusammenbruch.

Dabei muss beachtet werden, dass dieser Ausgangsstrom zwar für die Last zur Verfügung steht, aber aufgrund des Spannungsteilers immer durch den Kondensator "fließt". Folglich fließt der restliche Strom durch die Zener-Diode. Der gesamte Ausgangsgleichstrom bleibt konstant, unabhängig von seiner Verteilung auf die Zener-Diode, den Ausgangskondensator oder die Last.

3.1 Berechnung des Eingangswiderstands

Der Eingangsvorwiderstand ist nur notwendig, um den Einschaltstrom zu begrenzen, wenn das Netz angeschlossen und der Reihenkondensator entladen (oder im schlimmsten Fall mit umgekehrter Polarität geladen) ist. Zu Beginn wirkt der Kondensator wie ein Kurzschluss zur Netzspannung und ohne den Vorwiderstand könnte ein Einschaltstrom von mehreren hundert Ampere in den Stromkreis fließen und den Kondensator oder die Gleichrichterdiode beschädigen.

Um den Widerstand zu ermitteln, können wir den Einschaltstrom wie folgt berechnen

$$i_{\text{input inrush,max}} = \frac{V_{\text{peak}}}{R_{\text{in}}} \quad (8)$$

Der Vorwiderstand verursacht jedoch zu jeder Zeit während des Wandlerbetriebs eine Verlustleistung. Aus diesem Grund verfügen AC/DC-Hochleistungswandler über ein komplexes Softstart-/Bypass-System zur Umgehung der Strombegrenzung im Normalbetrieb. Ein solches System ist bei diesem Design nicht erforderlich, da die geringe Leistung des Wandlers diese Verluste gering hält. Die Verlustleistung kann mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$P_{R_{\text{in}}} = I_{\text{out,max}}^2 \cdot R_{\text{in}} \quad (9)$$

Es ist einfach, beide Formeln zu plotten, um einen Kompromiss zwischen der stationären Verlustleistung und einer gewünschten Sicherheitsstrombegrenzung zu finden. Wenn wir in diesem Beispiel einen Ausgangsstrom von 20 mA betrachten, erhalten wir ein Diagramm wie in Abbildung 5.

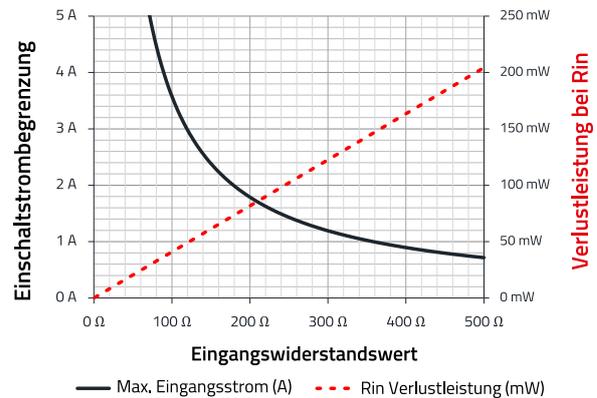


Abbildung 5: Auswahl des Eingangswiderstands, berechnet für $I_{\text{out,max}} = 20 \text{ mA}$

Abschließend muss das Design anhand der berechneten Nennleistung die physische Größe und Konstruktion des Widerstands berücksichtigen. Bedrahtete (THT-)Widerstände können hier hinsichtlich der Verlustleistung und der Vorteile in Netzspannungsschaltungen, wie z. B. größere Sicherheitsabstände und Überspannungsschutz, durchaus sinnvoll sein.

In unserer Schaltung haben wir 300Ω mit bedrahteten Widerständen realisiert, und der Einschaltstrom ist im ungünstigsten Fall kleiner als $1,1 \text{ A}$.

3.2 Wahl des Eingangskondensators

Aus den vorherigen Berechnungen geht hervor, dass die Eingangskapazität die Ausgangsleistung direkt begrenzt. Außerdem reduziert der Eingangswiderstand den Ausgangsstrom. Wir haben jedoch R_{in} bereits aus reinen Sicherheitsüberlegungen berechnet. Wenn wir zum Beispiel eine Eingangskapazität von 330 nF und einen Widerstand von 300Ω verwenden, können wir mit den obigen Formeln den verfügbaren maximalen Ausgangsstrom von 20 mA berechnen.

Es gibt weitere Anforderungen an den Eingangskondensator:

1. Der Eingangskondensator muss für die Netzwechselspannung ausgelegt sein.
2. Die Kapazitätsschwankungen aufgrund von Betriebsspannung und Temperatur müssen sehr gering sein, damit der verfügbare Laststrom stabil bleibt.
3. Der Kapazitätsabfall während der Lebensdauer muss ebenfalls sehr gering gehalten werden.

Für die meisten Anwendungen mit dieser Anordnung liegt die Eingangskapazität zwischen 100 nF und 1000 nF . Angesichts dieser Anforderungen werden am häufigsten AC-Folienkondensatoren mit Polypropylen-Dielektrikum (auch MKP-Kondensatoren genannt) verwendet.

APPLICATION NOTE

ANP124 | Kapazitive Netzteile – Auswahl des passenden Eingangskondensators

Es können auch Keramikkondensatoren (wie MLCCs) mit der entsprechenden Nennspannung verwendet werden. Keramikkondensatoren der Klasse 2 werden nicht empfohlen, da die Kapazität unter Lastspannung und Temperatur instabil ist. Daher werden Keramikkondensatoren der Klasse 1 (NPO) empfohlen. Jedoch kann es hiermit kostspielig sein, die erforderliche Kapazität zu erreichen, außer in Fällen mit extrem niedrigem Laststrom.

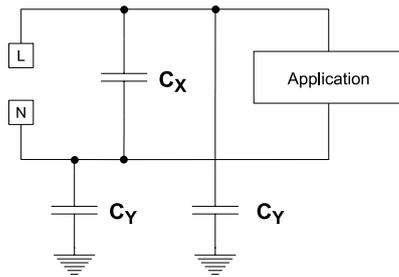


Abbildung 6: Anschluss der X- und Y-Kondensatoren

EMI-Entstörkondensatoren der Sicherheitsklasse X2, wie unsere WCAP-FTX2- und WCAP-FTXX-Folienkondensator-Produktserien sowie WCAP-CSSA-Keramik-Vielschichtkondensatoren, sind speziell für den Anschluss parallel zur Anwendung, also zwischen Phase und Neutralleiter, konzipiert (siehe Abbildung 6). Dieser Anschluss wird auch als Netzparallelschaltung bezeichnet. Das Lastprofil für den Eingangskondensator in der kapazitiven Stromversorgung ist ähnlich wie bei dieser Anwendung, außerdem können wir gegebenenfalls von dem Überspannungsschutz und den Selbstheilungsfähigkeiten profitieren (siehe IEC 60384-14).

Viele Hersteller raten jedoch ausdrücklich davon ab, reguläre X2 MKP-Kondensatoren in "Series-to-mains"-Anordnung, d.h. in Reihenschaltung zum Netz zu verwenden. Bei einem kapazitiven Netzteil sind die wichtigsten Eigenschaften die Kapazitätstoleranz und die Stabilität. Die Überspannungsfestigkeit ist von geringerer Bedeutung, da der Vorwiderstand und die Lastimpedanz eine höhere Impedanz in Reihe zum Kondensator bilden und die Überspannungen im Vergleich zur herkömmlichen X2-Verbindung als Filterelement reduziert werden.

Einige Kondensatorhersteller bieten eine spezielle Serie für diese Anwendung an, während andere "Temperature Humidity Bias" oder THB-Typ X2-Kondensatoren empfehlen. Dieser Kondensatortyp wird aus metallisierter Polypropylenfolie (MKP) hergestellt, wie herkömmliche X2-Folienkondensatoren, bietet aber engere Toleranzen und eine bessere Kapazitätsstabilität während der gesamten

Lebensdauer der Kondensatoren. Auch bei hoher Temperatur und Feuchtigkeit bieten diese Kondensatoren häufig bessere Eigenschaften, was durch THB-Tests unterschiedlicher Klassen in vielen Datenblättern bestätigt wird. Dieses Ergebnis wird durch unterschiedliche Fertigungsmaterialien und -verfahren erreicht: Ein hochwertigeres und dickeres Epoxidharz, eine spezielle Behandlung der Basisfolie und strenge Feuchtigkeitskontrollen während des Fertigungsprozesses verbessern die Eigenschaften dieser Kondensatoren.

Ein möglicher Grund dafür, dass die Hersteller keine gewöhnlichen X2-Kondensatoren für dieses Design empfehlen, ist, dass die X2-Typen nicht speziell für einen offenen Ausfall ausgelegt sind, wie die Kondensatoren der Y2-Klasse. Die Kurzschluss-Situation ist kein Problem in sicherungsgeschützten X2-Anwendungen wie einem Netzfilter, da die Sicherung bei einem Kurzschluss in der Leitung immer auslöst. Bei einem kapazitiven Netzteil könnten die Last und der Vorwiderstand den Kurzschlussstrom theoretisch so niedrig halten, dass die Sicherung nicht auslöst, aber es dennoch zu Schäden an der Last oder anderen Teilen kommen kann. Dieser Fehler kann auch durch die Verwendung eines Niederspannungsvaristors (oder MOV) hinter dem Reihenkondensator vermieden werden.

3.3 Kondensator-Entladewiderstand

Dem Eingangskondensator ist ein Widerstand parallel geschaltet, um ihn beim Abschalten der Netzspannung sicher zu entladen. Dieser Widerstand wird oft als Ableitwiderstand oder Entladewiderstand bezeichnet. Eine gute Faustregel zur Abschätzung der Zeit, die zum Entladen des Kondensators benötigt wird, ist die Berechnung der Zeitkonstante des RC-Netzwerks aus Kondensator und Widerstand.

Nach $5\tau = 5 \cdot R \cdot C = 5 \cdot R_{\text{bleed}} \cdot C_{\text{in}}$ erwarten wir, dass die Spannung am Kondensator 99 % niedriger ist als die Anfangsspannung zu Beginn der Entladung.

Auch hier gibt es einen Kompromiss zwischen der Entladegeschwindigkeit und der Verlustleistung des Widerstands. Um die richtige Nennleistung des Widerstands zu wählen, berechnen wir die Verlustleistung als Dauerlast des Widerstands:

$$P_{R_{\text{bleed}}, \text{loss}} = \frac{V_{C_{\text{in}}}^2}{R_{\text{bleed}}} \approx \frac{(V_{\text{in}} - V_{R_{\text{in}}})^2}{R_{\text{bleed}}} \quad (10)$$

Hierbei handelt es sich um eine Annäherung an den ungünstigsten Fall, wobei davon ausgegangen wird, dass der

Einfluss der Zenerspannung auf die Spannung des Eingangskondensators vernachlässigt werden kann.

3.4 Eingangsspannung

In den meisten europäischen Ländern ist eine Netzspannung von $230 V_{rms} \pm 10\%$ zwischen einer Phase und dem Nullleiter vorgeschrieben. Unser Konstruktionsbeispiel basiert auf diesem System und sollte für andere Betriebsbedingungen neu berechnet werden.

Die minimalen und maximalen Spannungswerte müssen bei allen vorherigen Berechnungen berücksichtigt werden, um geeignete Bauteile auszuwählen. Mit der minimal möglichen Spannung (207 V) können wir zum Beispiel die minimal erforderliche Eingangskapazität für den gewünschten Laststrom berechnen. Andererseits fließt der maximale Strom, wenn die Spannung auf dem maximal möglichen Niveau liegt (253 V). Mit dieser Definition der maximalen Leistung berechnen wir die Leistungswerte der Komponenten, insbesondere des Eingangswiderstands und der Zenerdiode.

| | | | |
|----------------|-------|------------------|---------|
| $V_{rms, nom}$ | 230 V | $I_{load, Vnom}$ | 18,2 mA |
| $V_{rms, min}$ | 207 V | $I_{load, Vmin}$ | 16,3 mA |
| $V_{rms, max}$ | 253 V | $I_{load, Vmax}$ | 20,1 mA |

Tabelle 1: Auswirkungen der Spannungstoleranz in Europa - $230 V \pm 10\%$ (50 Hz)

Es ist zu beachten, dass sich die Ergebnisse der Berechnungen bei anderen Frequenzen der Netzspannung ändern werden. Der Ingenieur muss dies bei der Berechnung der Toleranzen berücksichtigen. Im Gegensatz zu den meisten AC/DC-Schaltnetzteilen (SMPS) sind kapazitive Netzteile nicht für sehr weite Eingangsspannungsbereiche geeignet, wie z.B. den üblichen 100 bis 240 V-Eingang vieler AC/DC-Netzteile und Netzadapter.

Um die Extremwerte zu berechnen, können wir die Eingangskondensatortoleranz für die Kapazität addieren. Die von uns verwendeten Kondensatoren der Serie WCAP-FTXH haben beispielsweise eine Toleranz von 10 %, so dass wir bei maximaler Eingangsspannung und maximaler Kapazität 22,2 mA haben. Bei minimaler Spannung und Kapazität stehen uns nur 14,6 mA zur Versorgung unserer Last zur Verfügung.

3.5 Ausgangskondensator

Der Ausgangskondensator in dieser Schaltung ist notwendig, um eine stabile Gleichspannung an die Last zu liefern. Je nach Lastprofil muss mehr oder weniger Gesamtkapazität hinzugefügt werden. In unserem Entwurf führt ein $100 \mu F$ - Kondensator zu einer Restwelligkeit der Spannung von 0,5 V

Spitze-Spitze. Natürlich verzögert eine größere Kapazität die Aufladung, da der Ladestrom durch den maximalen Laststrom begrenzt ist. Bei unserem Entwurf mit $100 \mu F$ dauert es etwa 350 ms bis zur stabilen Spannung von 12 V. Jeder Elektrolytkondensator mit der richtigen Nennspannung ist geeignet, da die Zener-Diode einen zusätzlichen Schutz vor Überspannung bietet. Natürlich sind auch andere Kondensatortechnologien wie keramische Vielschichtkondensatoren (MLCC) oder Polymerelektrolytkondensatoren geeignet und könnten sogar einige Vorteile bieten, aber wir wollen die Bauteilkosten so niedrig wie möglich halten. In diesem Fall sind die Kosten pro μF bei Elektrolytkondensatoren am niedrigsten, ohne dass es Nachteile gibt.

3.6 Zener-Diode

Die Zenerdiode ist eine einfache und effiziente Methode, um eine konstante Spannung für unsere Last bereitzustellen. Der berechnete Ausgangsstrom, der durch den Gleichrichter fließt, bleibt im Betrieb konstant. Im ungünstigsten Fall, d. h. ohne Last und geladenem Kondensator, fließt der gesamte berechnete Ausgangsstrom durch die Zenerdiode. Damit haben wir unsere Konstruktionsspezifikation für die Nennleistung der Zenerdiode:

$$P_{Zener, rated} > P_{Zener, max} = i_{out, max} \cdot V_{Zener} \quad (11)$$

In unseren Berechnungen haben wir einen Laststrom errechnet, der im ungünstigsten Fall etwa 22 mA betragen wird. Im Betrieb kann ein Teil dieses Stroms oder der gesamte Strom durch die Zener-Diode fließen. Da die Zener-Spannung eine Toleranz von 5 % aufweist, beträgt die maximale Leistung $22 \text{ mA} \cdot 12,6 \text{ V} = 277,2 \text{ mW}$. Die weit verbreitete DO-35 (oder DO-204AH) Bauform hat eine Nennleistung von 500 mW, so dass dies kein Problem darstellen sollte.

Wenn die Last eine sehr stabile niedrige Spannung wie 3,3 V für einen Mikrocontroller benötigt, empfiehlt es sich, eine Zener-Diode für eine höhere Spannung und einen Spannungsregler nach dem Kondensator zu verwenden.

3.7 Leitungsschutz

Je nach dem System, an das das Netzteil angeschlossen wird, kann ein gewisser Schutz am Netzspannungseingang erforderlich sein. In unserer Testschaltung haben wir eine Kombination aus einem Varistor und einer Schmelzsicherung verwendet.

Am Eingang der Schaltung sollte ein Varistor platziert werden, um transiente Überspannungen aus dem Netz kurzzuschließen. Wir haben Scheibenvaristoren aus der Würth

APPLICATION NOTE

ANP124 | Kapazitive Netzteile – Auswahl des passenden Eingangskondensators

Elektronik **WE-VD Familie** mit einer Nennspannung von 300 Vrms verwendet.

Eine Sicherung in Reihe mit dem Stromkreis muss vor dem Varistor platziert werden und bietet bei einem Ausfall des kapazitiven Netzteils einen Überstrom- und Überlastschutz für das Netz.

X2-Kondensatoren fallen normalerweise offen aus, aber es ist theoretisch möglich, dass sie kurzgeschlossen werden, weil sie nicht so konstruiert sind, dass sie immer offen ausfallen, wie es bei Y2-Kondensatoren der Fall ist. Ein mögliches Sicherheitsproblem ist das Szenario, dass der Eingangskondensator kurzgeschlossen ist und der Eingangswiderstand den größten Teil der Wechselspannung aus dem Netz aufnimmt. Sowohl die Sicherung als auch der Eingangswiderstand müssen unter Berücksichtigung dieses Falles richtig ausgewählt werden.

3.8 Simulation

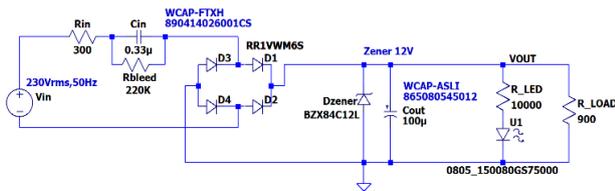


Abbildung 7 LTspice-Schaltplan

Mit LTspice XVII ist es möglich, verschiedene Simulationen durchzuführen, um die Berechnungen zu überprüfen und sie mit den Momentanwerten zu vergleichen. Wir haben für die meisten der verwendeten Bauteile die verfügbaren LTspice-Bibliotheken genutzt. Die LTspice-Bibliotheken für Kondensatoren und LEDs sind über die eiSos-Webseite von Würth Elektronik erhältlich. Wir haben auch eingebaute Bibliotheken für die Simulationsmodelle der Gleichrichterioden (simuliert als 4x reguläre Schottky RR1VWM6S) und der Zener-Diode (BZX84C24VL) verwendet.

3.9 Leistungsverluste und Wirkungsgrad

Eine Stärke der Simulationsanalyse ist die Möglichkeit, bessere Berechnungen der Verlustleistung und des Wirkungsgrads des Wandlers zu erhalten. Leistungsfunktionen für jede Komponente können geplottet und für Durchschnittswerte mit den „meas“-Anweisungen leicht integriert werden.

Zuvor können wir die Verluste anhand der vereinfachten Berechnung aus dem vorherigen Abschnitt abschätzen. Die Verluste am Eingangswiderstand, am Ableitwiderstand und am Gleichrichter betragen jeweils:

$$P_{\text{loss,Rin}} = I_{\text{in,rms}}^2 \cdot R_{\text{in}} \approx 153 \text{ mW} \quad (12)$$

$$P_{\text{loss,Rbleed}} = \frac{V_{\text{Cin,rms}}^2}{R_{\text{bleed}}} \approx 218 \text{ mW} \quad (13)$$

$$P_{\text{loss,rectifier}} = I_{\text{in,rms}} \cdot 2 \cdot V_{\text{D,fw}} \approx 32 \text{ mW} \quad (14)$$

Wie wir bereits festgestellt haben, steht der Laststrom nach dem Gleichrichter für die Last zur Verfügung, und der Rest fließt durch die Zenerdiode. Die zur Verfügung stehende Ausgangsleistung beträgt:

$$P_{\text{output}} = I_{\text{out,avg}} \cdot V_{\text{zener}} \approx 244 \text{ mW} \quad (15)$$

Die erforderliche Lastleistung sollte etwas unter diesem Wert liegen, um Toleranzen und die Alterung des Eingangskondensators zu berücksichtigen. Die von der Last nicht genutzte Leistung wird als Verlust an der Zener-Diode abgeleitet. Somit ergibt sich:

$$P_{\text{out}} = P_{\text{load}} + P_{\text{zener}} \approx 244 \text{ mW} \quad (16)$$

In unserer Beispielschaltung mit einer Last von 900 Ω (lassen wir die LED einmal außer Acht) haben wir eine Ausgangsleistung von 160 mW. Wenn wir also nur die zuvor besprochenen Verluste berücksichtigen, haben wir $P_{\text{losses}} + P_{\text{load}} \approx 153 + 226 + 32 + 244 \approx 646 \text{ mW}$ und können den Wirkungsgrad wie folgt berechnen:

$$\eta = \frac{P_{\text{load}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{load}}}{P_{\text{output}} + P_{\text{losses}}} \approx 24,7 \% \quad (17)$$

Diese Berechnungen werden durch die LTspice-Simulation bestätigt. Die Simulation ist genauer, weil sie uns die durchschnittlichen und integrierten Werte der Wellenformen liefert und weil wir auch realistischere Modelle der Komponenten verwenden. Wir erhalten auch Werte für die sehr geringen Verluste an den Eingangs- und Ausgangskondensatoren, die schwieriger zu schätzen sind. Die Leistungseffizienz kann leicht verbessert werden, wenn man die am Eingangsvorwiderstand (R_{in}), am Entladewiderstand (R_{bleed}) und an der Zener-Diode erzeugten Leistungsverluste betrachtet. Der Eingangswiderstand könnte auf 100 Ω reduziert und der Entladewiderstand auf 470 kΩ erhöht werden, ohne die Schaltung wesentlich zu beeinträchtigen. Mit diesen Maßnahmen können wir den Wirkungsgrad auf etwa 40 % erhöhen.

APPLICATION NOTE

ANP124 | Kapazitive Netzteile – Auswahl des passenden Eingangskondensators

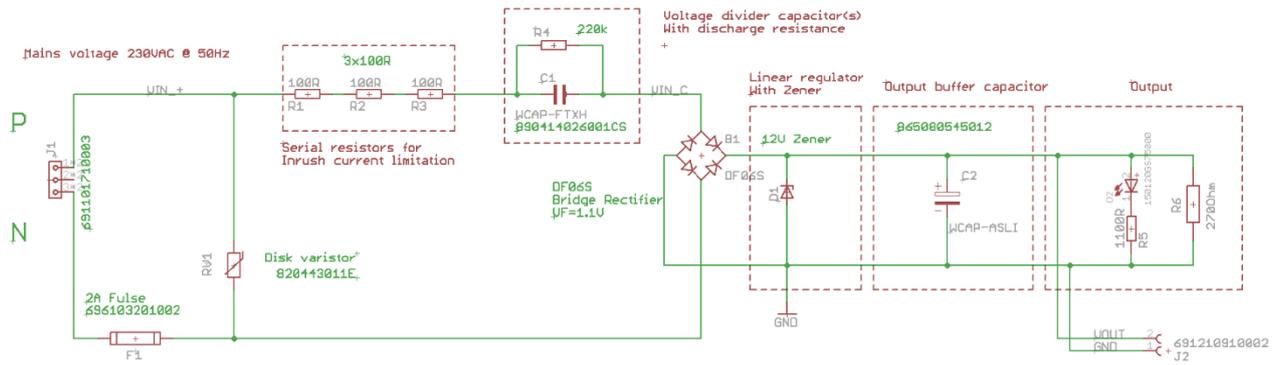


Abbildung 8: Schaltplan des Testboards in EAGLE

Die Leistungsverluste an der Zener-Diode könnten theoretisch auch reduziert werden, aber wie bereits erläutert, ist ein gewisser Zener-Strom für den korrekten Betrieb des Wandlers erforderlich. Je nach der erwarteten Lebensdauer und den Anforderungen an die Eingangsspannung kann es sogar erforderlich sein, den Zener-Strom zu erhöhen, wodurch der Wirkungsgrad unter normalen Betriebsbedingungen sinkt.

Eine weitere interessante Berechnung in LTSpice ist die Blindleistung geteilt durch die Wirkleistung und damit der Leistungsfaktor. Wir berechnen einen sehr niedrigen Leistungsfaktor von etwa 12 % (kapazitiv), was bei Betrachtung des Lastprofils zu erwarten ist: Vom Eingang aus gesehen können wir die gesamte Schaltung als einen Kondensator und einen relativ niederohmigen Widerstand (einschließlich Last) vereinfachen. Da die Eingangsimpedanz des Kondensators dominiert, bedeutet dies, dass das gesamte System eine überwiegend reaktive (kapazitive) Last ist.

Der niedrige Leistungsfaktor ist kein Problem, da die Nennleistung des kapazitiven Netzteils nicht hoch genug ist, um eine Leistungsfaktorkorrektur (PFC) erforderlich zu machen. Die EU-Norm IEC 61000-3-2 verlangt eine PFC nur für Netzteile mit einer Ausgangsleistung von mehr als 25 W.

04. AUFBAU EINES KAPAZITIVEN NETZTEILS

Wie bei jedem Schaltkreis, der an Netzspannung angeschlossen ist, muss die Sicherheit des Benutzers strengstens gewährleistet sein. Es liegt in der Verantwortung des Konstrukteurs, Sicherheitsaspekte in den Entwurf einzubeziehen.

Die IEC 60664-1 Isolationskoordination für Betriebsmittel in Niederspannungsnetzen - Teil 1: Grundsätze, Anforderungen und Prüfungen befasst sich allgemein mit den erforderlichen

Luft- und Kriechstrecken, um die notwendige Isolierung bei der Konstruktion von elektrischen Betriebsmitteln zu gewährleisten. Dies muss beim Layout der Leiterplatte berücksichtigt werden. Weitere Schutzvorrichtungen wie Überspannungsschutzgeräte und Sicherungen werden in der Norm beschrieben.

Die IEC 62368-1 Audio/Video-, Informations- und Kommunikationstechnik - Teil 1: Sicherheitsanforderungen und die IEC 61010-1 Sicherheitsanforderungen für elektrische Mess-, Steuer-, Regel- und Laborgeräte - Teil 1: Allgemeine Anforderungen sind produktspezifische Sicherheitsnormen. Beide können als Grundlage für die Bestimmung der Freigabe dienen

05. MESSUNG

5.1 Testboard

Es wurde eine Testplatte entworfen und montiert, um verschiedene Leistungskonfigurationen zu testen (siehe Schaltplan in Abbildung 8). Die Materialliste ist im Anhang dieses Dokuments enthalten. Der Hauptzweck der Testplatte bestand darin, die Verwendbarkeit der Schaltung als Stromversorgung zu demonstrieren. Um die Langzeitstabilität der Schaltkreise zu testen, haben wir einen Belastungstest unter hochbelasteten Umweltbedingungen als beschleunigten Lebensdauertest durchgeführt. Wir haben 230 V (AC) an den Eingang angelegt und die Schaltkreise für 1000 Stunden in einer Klimakammer bei einer Temperatur von 85 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 85 % platziert. Diese Bedingungen ähneln den harten Feuchtwärmetests, die die THB-Folienkondensatoren bestanden haben. Nach DIN-IEC 30485-14 qualifiziert dies die Bauelemente als Environmental Grade IIIB. In unserem Test haben wir 330 nF X2-Kondensatoren von verschiedenen

APPLICATION NOTE

ANP124 | Kapazitive Netzteile – Auswahl des passenden Eingangskondensators

Herstellern und mit und ohne "series-to-mains"-Anwendungsbewertung verwendet. Alle Kondensatoren, die für die Verwendung in einem Kondensator-Netzteil zugelassen sind, schnitten sehr gut ab, wobei alle weniger als 10 % ihrer Kapazität verloren, die meisten sogar weniger als 5 %. Bei Kondensatoren, die nicht für den Einsatz in Reihe mit dem Netz empfohlen werden, variierten die Ergebnisse stark von -10 % bis -50 % Kapazitätsverlust. Eine wichtige Schlussfolgerung aus unseren Tests ist daher, dass bei den regulären X-Kondensatoren in der Anwendung als Teil des Entstörfilters ein Kapazitätsabfall nur eine geringe Auswirkung auf ihre Verwendung haben kann, vorausgesetzt, der Filter wurde richtig ausgelegt. Im Gegensatz dazu kann ein Kapazitätsabfall in kapazitiven Spannungsteiler-Schaltungen zum Ausfall des Netzteils führen. Aufgrund des kritischen Charakters der Kapazitätsverschlechterung in dieser Anwendung empfehlen wir unseren Kunden, die solche Systeme entwickeln, eine breite Palette von beschleunigten Lebensdauerermessungen unter Last- und Hochfeuchtebedingungen durchzuführen und zu bewerten. Darüber hinaus müssen verschiedene Sicherheitsaspekte und Ausfallmechanismen der Komponenten analysiert werden, nicht nur die Alterung des Kondensators.

5.2 EMV-Prüfung

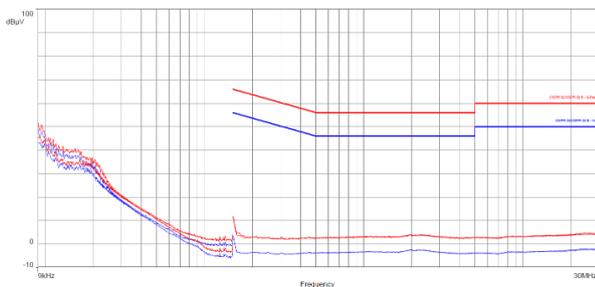


Abbildung 9: Ergebnis der EMV-Prüfung für leitungsgebundene Emissionen

Wir haben die Möglichkeit, unser EMV-Labor zu nutzen und eine vollständige EMV-Prüfung gemäß CISPR32 durchzuführen. Die Ergebnisse der Prüfung der leitungsgebundenen Störaussendung, gemessen an der neutralen Leitung, sind in Abbildung 9 zu sehen.

Das kapazitive Netzteil ist, vom Eingang aus gesehen, eine überwiegend kapazitive Last. Wie erwartet, gibt es in unserer Beispielschaltung keine Probleme, die EMV-Konformität hinsichtlich geleiteter Störemission zu bestehen.

06. ZUSAMMENFASSUNG

Transformatorlose kapazitive Netzteile sind extrem kostengünstige und relativ einfach zu konstruierende Lösungen für Anwendungen mit geringer Leistung, die keine galvanische Trennung erfordern. Dieses Dokument erläutert außerdem ihre Funktionsweise und Konstruktionsberechnungen.

Der Eingangskondensator ist die kritischste Komponente und muss sorgfältig ausgewählt werden, um Leistung und Lebensdauer zu gewährleisten. Als Ergebnis unserer Messungen raten wir von der Verwendung normaler Folienkondensatoren der X2-Klasse, wie den Serien [WCAP-FTXX](#) und [WCAP-FTX2](#), in Serie-zu-Netz-Anwendungen ab.

Kapazitive Stromversorgungen, die für eine lange Lebensdauer ausgelegt sind, erfordern Kondensatoren, deren Folien und Abmessungen speziell für diese Anwendung ausgelegt sind. Aufgrund ihrer Kapazitätsstabilität und Robustheit empfehlen wir für kapazitive Stromversorgungsanwendungen THB-Folienkondensatoren wie die Würth Elektronik eiSos [WCAP-FTXH-Serie](#). Bitte beachten Sie, dass nur ein Teil der Bauteile der WCAP-FTXH-Serie für Anwendungen in Reihe zum Netz empfohlen wird. Prüfen Sie das Datenblatt oder kontaktieren Sie unsere Vertriebsmitarbeiter oder uns direkt über unser [Kontaktformular](#).

APPLICATION NOTE

ANP124 | Kapazitive Netzteile – Auswahl des passenden Eingangskondensators

A ANHANG

A.1 Stückliste

| Bauteile | Bezeichnung | Form/Größe | Werte | WE Artikelnummer |
|------------|---|-------------------|--|--------------------------------|
| C1 | WCAP-FTXH THB X2 Film Kondensator | L26.5xW8.5xH17 | 330 nF ± 10 %, 310 V(AC), cat. 40/110/56/B | 890414026001CS |
| C2 | WCAP-ASLI Aluminium-Elektrolytkondensatoren | L6.6xW6.6xH7.7 | 100 µF ± 20 %, 35 V(DC), LC 35 µA, DF 14 % | 865080545012 |
| R6 | WRIS-KWKB Dickschicht Widerstand | 1225 | 270 Ω ± 1 %, 2 W, ±200 ppm/°C | 561020163011 |
| D2 | SMD Chip LED - Green | 1206 | 20 mA: 520 nm, 450 mcd, 3,2 V, 140° InGaN | 150120GS75000 |
| RV1 | WE-VD Disk Varistor | Rastermaß 14 mm | 300 Vrms, 385 Vdc, 470 Vvar, 6000 A, 175,0 J | 820443011E |
| J1 | WR-TBL Serie 411B | Rastermaß 5,00 mm | 3-pin Screwless Horizontal | 691411710003B |
| J2 | WR-TBL Serie 2109 | Rastermaß 2,54 mm | 2-pin Horizontal Entry | 691210910002 |
| F1 | WR-FSH Fuse Holder THR | L24,5xW9,4xH12,6 | 20 A 250 VAC | 696103201002 |
| D1 | Zener Diode | DO35 | Zener 12 V, 500 mW, 44 mA | - |
| B1 | Vollbrückengleichrichter | SDIP-4 | 420 V, 1,5 A, 1,1 V | - |
| R1, R2, R3 | Widerstand THT | 0204/5 | 100 Ω, 500 mW | - |
| R4 | Widerstand THT | 0207/10 | 220 kΩ, 250 mW | - |
| R5 | Widerstand SMD | 1206 | 1100 Ω, 500 mW | - |

A.2 Verweise

- [1] Designer Circuits, LLC; Transformerless Power Supply Design – DesignNote 001C“
- [2] Microchip, AN954 Transformerless Power Supplies Resistive and Capacitive, 2004
- [3] STMicroelectronics, AN2300 Application Note, An alternative solution to capacitive power supply using Buck converter based on VIPer12A, 2006

| | |
|---|--|
| Abbildung 1 : Spannungsteiler für Netzwechselfspannung.....2 | Abbildung 7 LTspice-Schaltplan..... 7 |
| Abbildung 2 : Kapazitiver Spannungsteiler2 | Abbildung 8 : Schaltplan des Testboards in EAGLE 8 |
| Abbildung 3 : Finaler Spannungsteiler3 | Abbildung 9 : Ergebnis der EMV-Prüfung für leitungsgebundene Emissionen..... 9 |
| Abbildung 4 : Einfaches kapazitives Netzteil3 | |
| Abbildung 5 : Auswahl des Eingangswiderstands, berechnet für $I_{out,max} = 20 \text{ mA}$4 | |
| Abbildung 6 : Anschluss der X- und Y-Kondensatoren5 | |

APPLICATION NOTE

ANP124 | Kapazitive Netzteile – Auswahl des passenden Eingangskondensators

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 Todesfälle 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.com/app-notes



REDEXPERT Design Plattform
www.we-online.com/redexpert



Toolbox
www.we-online.com/toolbox



Produkt Katalog
www.we-online.com/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.com