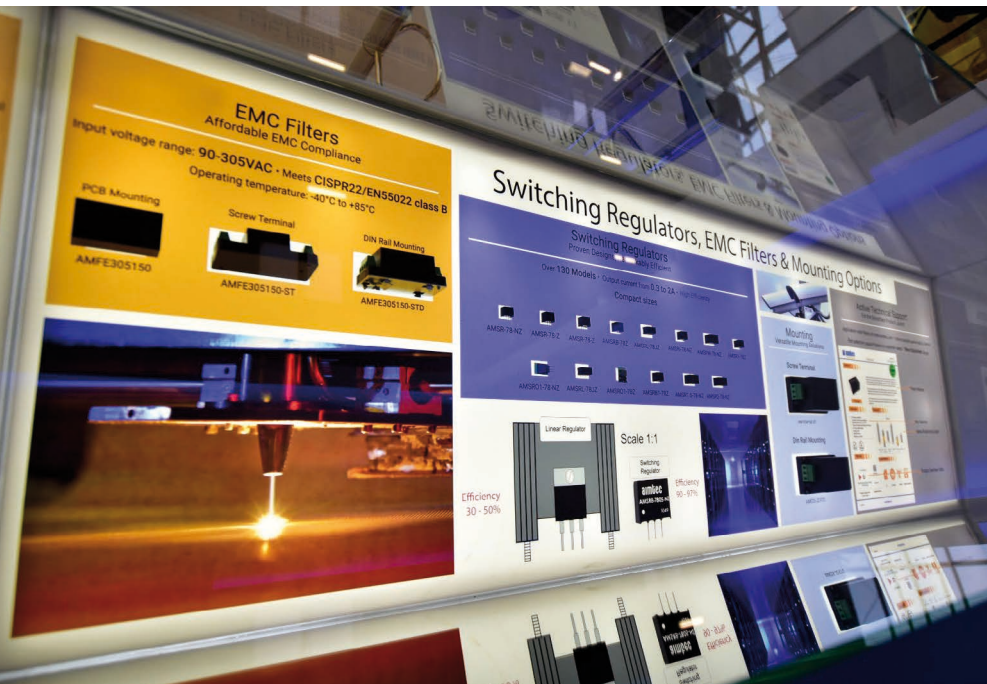


## Integration handelsüblicher Netzteile

Dimensionierung, Zuverlässigkeit und Zertifizierung für robuste Designs



- Was es bei Zuverlässigkeit und Zertifizierungen zu beachten gilt.
- Welche typischen Fehler man vermeiden muss.
- Konkrete Best Practices.

Die Inhalte sind sehr umfangreich und bilden zusammen eine komplette Entscheidungshilfe plus Entwicklungsleitfaden.

### Warum Off-the-Shelf Netzteile?

Vorteile und Entscheidungshilfen: Die Wahl des richtigen Netzteils hat maßgeblichen Einfluss auf die Entwicklungsdauer, die Produktkosten sowie die langfristige Zuverlässigkeit eines elektronischen Systems. Handelsübliche – sogenannte Off-the-Shelf Netzteile (OTS) – bieten eine Vielzahl von Vorteilen gegenüber kundenspezifischen Lösungen. Dieser Abschnitt beleuchtet die wesentlichen Argumente für deren Einsatz und zeigt, wann sich ein OTS-Ansatz besonders lohnt.

### Zeit- und Kostenvorteile bei OTS-Netzteilen

Ein wesentlicher Pluspunkt von OTS-Lösungen liegt im beschleunigten Entwicklungsprozess. Während eine individuelle Netzteilentwicklung typischerweise 3 bis 6 Monate benötigt – inklusive Layout, Magnetikdesign, EMV-Vortests und Sicherheitszertifizierungen – ist ein vorkonfektioniertes Netzteil oft innerhalb von 2 bis 4 Wochen integrierbar. Der entscheidende Unterschied liegt im Aufwand: OTS-Geräte sind seriengefertigt, vorzertifiziert und, abgesehen von Lieferzeiten, sofort verfügbar. Dadurch entfallen nicht nur lange Abstimmungen mit Zertifizierungsstellen, sondern auch die hohen Non-Recurring-Engineering-Kosten (NRE), wie sie bei individueller Hardwareentwicklung entstehen. Gerade bei Start-ups, Industriekunden mit engen Timelines oder Produktlinien mit hohem Wettbewerbsdruck kann dieser Zeitvorteil ein entscheidender Erfolgsfaktor sein. Aufgrund der Produktion in hohen Stückzahlen werden

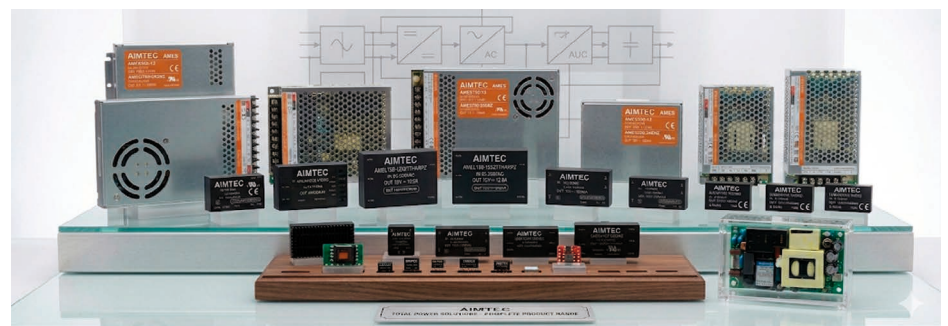
In modernen Elektronikprojekten ist eine stabile und normkonforme Stromversorgung entscheidend für die Funktionalität und Zuverlässigkeit des Endprodukts. Dabei stehen Entwicklungingenieure oft vor der Wahl: Ein individuelles Netzteil selbst entwickeln oder auf bewährte Off-the-Shelf Netzteile zurückgreifen? Letztere bieten zahlreiche Vorteile – darunter eine schnellere Markteinführung, geringere Entwicklungskosten und geprüfte Sicherheit. Im Folgenden werden alle zentralen Aspekte, die beim Einsatz von Off-the-Shelf (OTS) Stromversorgungen eine Rolle spielen behandelt:

- Warum OTS-Netzteile gegenüber Eigenentwicklungen oft überlegen sind.
- Wie man Eingänge, Ausgänge, Leistung, thermische Aspekte und das Lastverhalten korrekt dimensioniert.
- Die Herausforderungen des dynamischen Lastverhaltens (Load Dynamics).



Autoren:  
Vin Natham  
Product Manager  
Aimtec  
<https://aimtec.com/>

Paul-Martin Kamprath  
Leitung Marketing  
pk components GmbH  
[www.pk-components.de](https://www.pk-components.de)



Das Portfolio von Aimtec: Verschiedene handelsübliche Netzteile (OTS, off the shelf)



**OTS (off the shelf) Netzteil**

die Kosten und die Wirtschaftlichkeit von OTS-Netzteilen begünstigt („Economies of Scale“).

## Technologische Reife und Verfügbarkeit

Ein weiterer Vorteil handelsüblicher Netzteile liegt in ihrer technischen Reife. Diese Produkte sind für eine Vielzahl von Applikationen konzipiert und durchlaufen intensive Testreihen in unterschiedlichen Anwendungsszenarien. Parameter wie MTBF (Mean Time Between Failures) oder FIT (Failure in Time) sind in der Regel vom Hersteller dokumentiert und beruhen auf erprobten Bauteilen und Produktionsverfahren. Zudem bietet der Markt eine breite Auswahl an Varianten – von Open-Frame bis DIN-Rail, von medical grade bis industrietauglich. Diese Vielfalt ermöglicht eine bedarfsgerechte Auswahl, ohne auf teure Sonderlösungen zurückgreifen zu müssen. Gleichzeitig profitieren Entwickler von Supportleistungen erfahrener Hersteller – insbesondere bei Fragen zu EMV, thermischer Entkopplung oder Integrationsdetails.

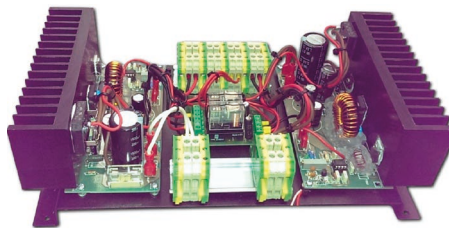
## Vergleich OTS vs. Eigenentwicklung

Die Entscheidung zwischen Off-the-Shelf Netzteilen und kundenspezifischer Entwicklung sollte auf Basis klarer Abwägungen getroffen werden. Während eine maßgeschneiderte Lösung maximale Flexibilität hinsichtlich Spannung, Formfaktor oder Kommunikationsschnittstellen erlaubt, bringt sie auch hohe Risiken mit sich – etwa bei EMV-Fehlversuchen oder unerwarteten Alterungseffekten.

OTS-Netzteile hingegen sind sofort einsetzbar, kostenoptimiert und in vielen Fällen bereits für gängige Sicherheitsnormen zertifiziert (z. B. IEC 62368-1 oder IEC 60601-1). Diese „Design-Reife“ führt zu einer erhöhten Planungssicherheit und reduziertem Engineering-Aufwand. Auch bei Redesigns, Lastanpassungen oder globaler Auslieferung zeigen sich OTS-Produkte anpassungsfähig – viele Modelle unterstützen universelle Eingangsbereiche und lassen sich problemlos weltweit einsetzen.

## Auswahlkriterien und elektrische Kenngrößen

Die Auswahl des richtigen Netzteils ist weit mehr als nur eine Frage von Spannung und Stromstärke. Eine Vielzahl elektrischer Parameter – vom Eingangsbereich bis zum transienten Verhalten – beeinflusst die Systemzuverlässigkeit maßgeblich. Dieser Abschnitt beleuchtet die



**Kundenspezifisches Netzteil**

entscheidenden Auswahlkriterien bei Off-the-Shelf Netzteilen, die für ein robustes und normgerechtes Design unerlässlich sind.

## Eingangsspannungsbereich und Umgebungseinflüsse

Ein zentrales Kriterium bei der Auswahl von Netzteilen ist der unterstützte Eingangsspannungsbereich. Klassische Off-the-Shelf Netzteile bieten in der Regel einen universellen AC-Eingang von 90 bis 264 VAC, womit sie global einsetzbar sind – von nordamerikanischen 110 V bis zu europäischen 230 V. Für besonders anspruchsvolle Industrieanwendungen empfiehlt sich jedoch ein erweiterter Bereich von 80 bis 305 VAC, um Netzschwankungen, Brown-out-Zustände (Abschaltung des Netzteils bei Unterspannung) oder temporäre Überspannungen abzufangen.

Gerade in instabilen Stromnetzen – etwa in ländlichen Regionen oder bei schwankenden Industrieanlagen – kann ein zu enger Eingangsspannungsbereich zu unerwarteten Abschaltungen oder Fehlstarts führen. Ergänzende Schutzmechanismen wie Verpolungsschutz, Überspannungsbegrenzung oder Transientenfilterung sind daher besonders relevant.

## Anwendungsspezifische Anforderungen

Im DC-Bereich unterscheiden sich die Anforderungen je nach Anwendung:

- **Telekommunikation:** typischerweise 36 - 72 VDC.
- **Automotive:** 9 - 36 VDC (inkl. Start/ Stopp-Zyklen und Spannungsabfälle beim „Kaltstart“).

- Bahntechnik: 24 - 110 VDC.

Fehlende Berücksichtigung dieser Anforderungen kann zu Systemversagen in der Anwendung führen – insbesondere wenn Produkte global vermarktet werden.

## Ausgangsspannung, Ripple und Toleranzen

Neben dem Eingang ist die Ausgangsspannung eines Netzteils von zentraler Bedeutung. Dabei spielen zwei Formen der Spannungsregelung eine Rolle:

- **Line-Regulation:** Schwankung der Ausgangsspannung bei variierender Eingangsspannung.
- **Load-Regulation:** Schwankung bei veränderlicher Last.

Typische Toleranzen bewegen sich im Bereich von  $\pm 0,5\%$  (Line) und  $\pm 1\%$  (Load). Für empfindliche elektronische Schaltungen – z. B. FPGAs, Mikrocontroller oder analoge Messwandler (ADCs) – ist eine stabile Versorgungsspannung zwingend erforderlich, um Fehlfunktionen und Systemstörungen zu vermeiden. Eine sehr nützliche Funktion ist die Möglichkeit die Ausgangsspannung zu trimmen, meist im Bereich  $\pm 10\%$ . So können beispielsweise ein Spannungsabfall aufgrund längerer Kabel oder höhere Lasten ausgeglichen werden.

## Ripple & Noise

Ein oft unterschätzter Aspekt ist das sogenannte Ripple & Noise, also hochfrequente Wechselanteile im Ausgangssignal, die durch Schaltvorgänge im Netzteil entstehen. Diese können sich negativ auf EMV, Signalqualität oder sogar die Funktion empfindlicher Komponenten auswirken. Hier helfen Low-Noise-Designs oder externe Filtermaßnahmen (z. B. LC-Filter).

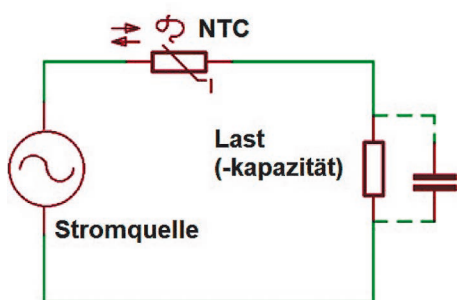
## Ausgangsstrom, Spitzenlast und Leistungspuffer

Ein drittes zentrales Auswahlkriterium ist die maximale Ausgangsleistung des Netzteils – also die Kombination aus Spannung und Strom. Dabei wird zwischen kontinuierlicher (steady state) und kurzzeitiger (peak) Belastung unterschieden.

## Vergleich OTS- und kundenspezifische Netzteile

Kriterium	Off-the-Shelf (OTS)	kundenspezifisch, Custom Design
Time-to-Market	2 - 4 Wochen	3 - 6 Monate (oder länger)
NRE-Kosten	sehr gering	sehr hoch (Transformatoren, Magnetik, PCB, Mechanik)
Zertifizierung	bereits vorhanden, schneller einsetzbar	vollumfängliche, teure Zertifizierung nötig
Technische Risiken	gering durch bewährte Designs	hoch: Fehler erst im Feldtest erkennbar
Support	erfahrene Hersteller verfügbar	kaum Unterstützung

# Stromversorgung



Prinzipschaltbild einer Last mit NTC als Einschaltstrombegrenzer

Zahlreiche Anwendungen, wie etwa Motorstarts, FPGA Boot-Sequenzen oder Funkmodule, erzeugen beim Einschalten kurzzeitige Stromspitzen, die 150 - 200 % des Nennstroms erreichen können.

## Ein typisches Beispiel:

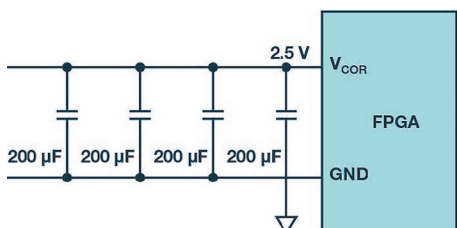
Ein System benötigt kontinuierlich 2 A, erzeugt aber beim Einschalten für 200 Millisekunden eine 6-A-Spitze. Hier muss das Netzteil in der Lage sein, diese Last kurzzeitig bereitzustellen – ohne in den Hiccup-Modus oder eine Schutzabschaltung zu gehen.

**Empfehlung zur Dimensionierung:** Fachleute raten zu einer Leistungsreserve von 20 bis 30 % über der maximalen Dauerlast. So lassen sich nicht nur Lastspitzen abfangen, sondern auch der Einfluss von Umgebungstemperatur, Alterung und Effizienzverlusten kompensieren.

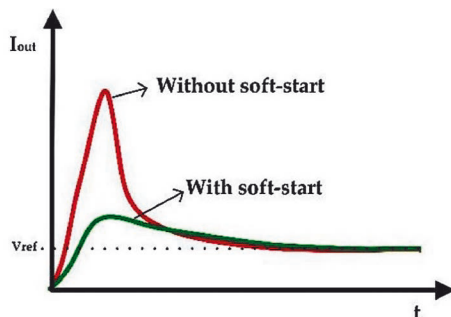
Beispiel: Eine Applikation mit 80 W Last - empfohlenes Netzteil: mindestens 100 - 110 W. Diese Reserve erhöht nicht nur die Systemstabilität, sondern verbessert auch die Lebensdauer temperaturempfindlicher Bauteile – insbesondere die der Elektrolytkondensatoren und damit der gesamten Stromversorgung.

## Dynamisches Lastverhalten

Ein Netzteil muss nicht nur im Dauerbetrieb stabil arbeiten, sondern auch in Situationen mit plötzlichen Lastwechseln, Einschaltströmen oder kapazitiven Verbrauchern zuverlässig reagieren. Gerade in modernen Elektronik-Anwendungen mit hochdynamischen Prozessen – etwa bei FPGAs, Motorsteuerungen oder drahtlosen Kommunikationsmodulen – wird das Verhalten unter realen Lastbedingungen zur



FPGA mit vielen Eingangskondensatoren für die Spannungsstabilisierung



Stromverlauf über die Zeit mit Softstart (Einschaltstrombegrenzung) und ohne

Herausforderung. Hier sprechen Experten von Dynamischem Lastverhalten = Load Dynamics.

## Einschaltstrom

Beim ersten Einschalten eines Netzteils laden sich die internen Kondensatoren schlagartig auf. Diese Phase verursacht einen kurzzeitigen Stromimpuls (surge current), der ein Vielfaches des Nennstroms erreichen kann. Wird dieser Einschaltstrom (Inrush Current) nicht berücksichtigt, kann er:

- Leitungsschutzschalter oder Sicherungen auslösen
- Relaiskontakte beschädigen
- Das Netzteil nicht richtig starten lassen

Moderne OTS-Netzteile verfügen oft über integrierte Eingangstrombegrenzer (Inrush-Current-Limiter) – etwa durch NTC-Thermistoren oder aktive Schaltungen. Dennoch sollten Entwickler die Inrush-Kennwerte in der Spezifikation prüfen und das Zusammenspiel mit Sicherungen und Lastsystemen testen. Bei mehreren Netzteilen ist ein Start in einer zeitlich definierter Abfolge das Mittel der Wahl.

## Kapazitive Lasten

Viele elektronische Baugruppen – darunter FPGAs, DC/DC-Wandler oder Motorsteuerungen – haben eigene Eingangskondensatoren, die beim Anlegen der Spannung sofort Energie ziehen. Diese kapazitive Ladung kann vom Netzteil als Kurzschluss fehlinterpretiert werden, was den Hiccup-Modus oder eine Schutzabschaltung auslöst. Wenn die Kondensatoren zu groß sind geht möglicherweise die Stromversorgung nicht in einen stabilen Zustand über und hängt im Anlauf-Modus fest (Boot Loop).

Hersteller geben häufig eine maximale kapazitive Last (z. B. in µF) an, die ein Netzteil stabil unterstützen kann. Bei darüber hinausgehenden Werten empfiehlt sich:

- Vorladeschaltungen (z. B. Precharge-Widerstände)
- Eingangstrombegrenzer (NTCs)
- Soft-Start-Funktionen

- oder die Wahl eines Netzteils, das explizit hohe kapazitive Lasten unterstützt

## Transientes Verhalten

Ein ebenfalls kritischer Punkt ist das Verhalten bei Lastsprüngen (Transient Response) – etwa wenn ein Mikrocontroller aus dem Sleep-Modus aufwacht oder ein Relais schaltet. Dabei kann es zu plötzlichen Strom- oder Spannungsänderungen kommen, auf die das Netzteil mit:

- Überschwingen (overshoot)
- Einbrüchen (undershoot)
- oder Oszillationen und Instabilitäten reagiert.

Diese Transienten können empfindliche Schaltungen wie AD-Wandler oder digitale Logik fehlerhaft triggern oder gar beschädigen. Ein gutes OTS-Netzteil sollte daher über:

- schnelle Regelschleifen
- ausreichende Ausgangskapazität
- und robuste Layoutführung verfügen

Zur Absicherung empfiehlt sich die Platzierung von zusätzlichen Stützkondensatoren nahe sensibler Bauteile sowie eine realitätsnahe Simulation der Lastsprünge im Prototypen. Darüber hinaus ist in den Datenblättern die Definition der maximal zulässigen Transienten zu prüfen.

## Derating und thermische Auslegung für langfristige Zuverlässigkeit

Eine der häufigsten Ursachen für vorzeitiges Versagen elektronischer Komponenten ist thermische Überlastung. Gerade bei Netzteilen entscheidet die richtige Auslegung hinsichtlich Temperatur, Kühlkonzept und Umgebungsbedingungen über die Langzeitzuverlässigkeit. Dieser Abschnitt zeigt, wie Sie durch bewusstes Derating und gezielte Maßnahmen im Thermomanagement die Lebensdauer Ihrer Stromversorgung signifikant erhöhen können.

## Temperatur-Derating und Kühlstrategien

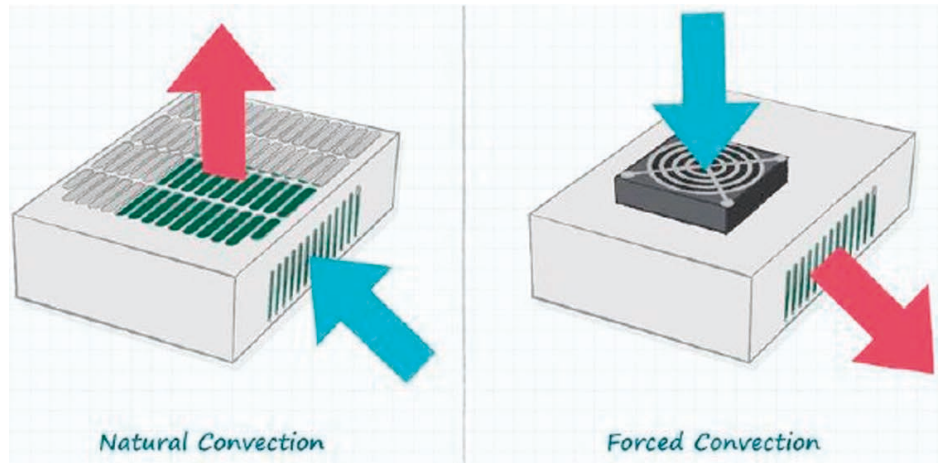
Jedes Netzteil hat eine spezifizierte maximale Ausgangsleistung – doch diese gilt in der Regel nur unter optimalen Bedingungen, meist bei Raumtemperatur (25 °C) und freier Konvektion. In der Praxis steigen die Temperaturen durch beengte Einbauverhältnisse, fehlende Luftzirkulation oder externe Wärmequellen schnell an. Deshalb definieren Hersteller sogenannte Derating-Kurven, die zeigen, wie sich die maximal zulässige Leistung mit steigender Temperatur reduziert. Diese Angaben befinden sich in der Regel in den Datenblättern und sind im Zusammenhang mit den Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen.

Beispiel: Ein Netzteil mit 100 W Nennleistung bei 25 °C kann bei 50 °C Umgebungstemperatur möglicherweise nur noch 70 - 80 W zuverlässig

liefern. Die richtige Interpretation dieser Kurven ist wichtig, um Überlastung und Ausfälle zu vermeiden.

## Lebensdauer der Elektrolytkondensatoren

Ein weiterer kritischer Punkt ist die Lebensdauer der Elektrolytkondensatoren, die in den meisten Netzteilen verbaut sind. Nach dem Arrhenius-Gesetz halbiert sich deren Lebensdauer bei jedem Temperaturanstieg von 10 °C. Deshalb gilt: Je kühler das Netzteil arbeitet, desto länger lebt es. Die empfohlenen Kühlstrategien reichen von optimierter Gehäuselüftung über Kühlkörper bis hin zu Zwangslüftung (forced air cooling) per Lüfter. Hierbei unterscheidet man grundsätzlich zwei Kühlmethoden:



Natürliche Konvektion und Zwangskühlung mit einem Lüfter

- **Konvektionskühlung** (natürliche Luftzirkulation): Diese Methode arbeitet lautlos, ist wartungsarm und eignet sich besonders für Anwendungen mit mittlerer Leistungsdichte. Allerdings ist die Kühlleistung begrenzt, was sich in einem stärkeren Derating bei höheren Temperaturen äußert. In geschlossenen Gehäusen ohne Lüftungsschlitze kann dies kritisch werden.

- **Zwangskühlung mittels Lüfter** (forced air): Hier wird aktiv Luft über das Netzteil geführt, meist durch integrierte oder systemeigene Lüfter. Dadurch lässt sich eine deutlich höhere Ausgangsleistung ohne Derating erreichen. Der Nachteil: Geräuschentwicklung, Staubeintrag sowie eine reduzierte Langzeitverlässlichkeit durch mechanische Verschleißteile. Zudem ist nicht immer klar dokumentiert, ob und wann der Lüfter aktiv ist – was Auswirkungen auf die EMV-Emissionen und thermische Stabilität haben kann.

## Hybrider Ansatz

Ein hybrider Ansatz – z. B. konvektionsgekühltes Netzteil mit separatem Gehäuselüfter – kann in vielen Fällen ein guter Kompromiss sein. Wichtig ist in jedem Fall, die Angaben zur Kühlmethode im Datenblatt sorgfältig zu prüfen und im Prototyp die realen Temperaturen unter Volllast zu messen. Es gibt auch Netzteile, die Angaben mit Konvektionskühlung und Zwangskühlung zur Verfügung stellen. Unabhängig von der Art der Kühlung ist es wichtig, dass der Luftstrom über die am stärksten erwärmten Stellen geführt wird, um eine maximale Effizienz zu gewährleisten.

## Höheneinfluss und Isolation

Nicht nur die Temperatur, auch die Installationshöhe über dem Meeresspiegel hat Einfluss auf die Netzteil-Leistung. Mit zunehmender Höhe nimmt die Luftdichte ab, wodurch die Konvektionskühlung weniger effektiv wird. Ab etwa 2000 m Höhe ist ein Derating der zulässigen Leistung von 10 - 20 % typisch. Gleichzeitig sinkt die elektrische Durchschlagsfestigkeit der Luft,

was die Auslegung von Kriech- und Luftstrecken im Netzteildesign beeinflusst. Das bedeutet: Ein Netzteil, das bei Meereshöhe sicher arbeitet, kann bei 4000 m unter Umständen die erforderliche Isolation nicht mehr gewährleisten – mit Auswirkungen auf Sicherheitszulassungen und EMV-Verhalten. Für Anwendungen in Bahn, Luftfahrt oder Höhenlagen (z. B. Messstationen) ist daher die Auswahl eines entsprechend zertifizierten Netzteils mit ausreichender Isolation und spezifizierter Betriebstauglichkeit bis z. B. 5000 m wichtig.

## Lebensdaueranalyse und MTBF-Berechnungen

Die theoretische Lebensdauer eines Netzteils lässt sich durch MTBF-Werte (Mean Time Between Failures) beziffern. Diese geben an, wie lange ein Gerät statistisch störungsfrei betrieben werden kann – unter standardisierten Testbedingungen. Off-the-Shelf Netzteilhersteller liefern hierzu in der Regel detaillierte MTBF-Berechnungen, oft nach MIL-HDBK-217F oder auch Telecordia SR-332, inklusive:

- **Gesamt-MTBF-Wert** (z. B. 375.000 Betriebsstunden)
- **FIT-Raten** (Failures In Time) für jedes relevante Bauteil
- **Failure-Mode-Analysen**, die auf typische Ausfallursachen und deren Eintrittswahrscheinlichkeit eingehen.

Diese Angaben erlauben es Entwicklern, die erwartbare Ausfallrate im Systemkontext zu bewerten und gezielt Schwachstellen zu erkennen.

## Problematische Bauteile

Auch wenn moderne Netzteile weitgehend robust konstruiert sind, gibt es erfahrungsgemäß Bauteile mit erhöhter Ausfallwahrscheinlichkeit:

- **Elektrolytkondensatoren:** begrenzte Lebensdauer, stark temperaturabhängig.

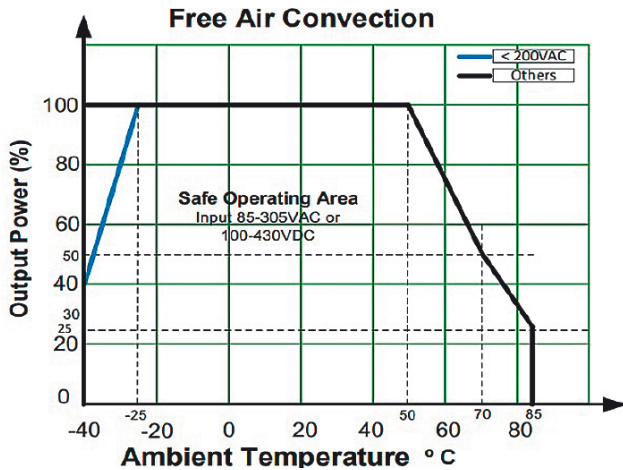
- **Transformatoren:** Alterung durch Isolationsmaterial, thermische Belastung.
- **Leistungs-MOSFETs:** empfindlich gegenüber Schaltspitzen und thermischem Stress.
- **Induktivitäten/Spulen:** Vibration, Alterung des Ferritmaterials oder Wicklungsisolierung. Gerade bei langfristigen Industrieanwendungen mit 24/7-Betrieb, hoher Auslastung oder schwieriger Umgebung (Staub, Feuchtigkeit, Hitze) hat die Qualität dieser Komponenten einen großen Einfluss auf die Lebensdauer. So hilfreich MTBF-Werte auch sind – sie basieren auf idealisierten Laborbedingungen. Die tatsächliche Ausfallwahrscheinlichkeit eines Netzteils im Feld hängt maßgeblich von mehreren realen Einflussfaktoren ab:

- **Temperatur:** jeder Anstieg um 10 °C kann die Lebensdauer eines Elektrolytkondensators halbieren
- **Lastprofil:** dauerhafte Volllast versus Betrieb bei 70 - 80 % Auslastung
- **Ein- und Ausschaltvorgänge:** elektrische Stressbelastung
- **Umgebungsbedingungen:** Feuchtigkeit, Staub, Vibrationen, Luftdruck

Deshalb empfiehlt es sich, nicht allein auf die MTBF-Zahl zu vertrauen, sondern auch systematische Lebensdauertests, Worst-Case-Simulationen und thermische Analysen im Anwendungskontext durchzuführen. Die Kombination aus Herstellerdaten und eigenen Feldtests ergibt das zuverlässigste Bild für die Projektplanung.

## Zertifizierung und EMV

Die Auswahl eines geeigneten Netzteils ist nur der erste Schritt – ebenso entscheidend ist dessen korrekte Integration in das Gesamtsystem. Gerade im Hinblick auf Sicherheitszertifizierungen, EMV-Konformität und systemweite Schutzfunktionen lauern zahlreiche Fallstricke. Dieser Abschnitt beleuchtet die regulatorischen Rahmenbedingungen und zeigt bewährte



Beispiel für die Angabe eines Temperatur-Deratings in einem Datenblatt



Beispiel für den Einfluss der Höhe über dem Meeresspiegel auf das Derating in einem Datenblatt

Strategien zur Vermeidung typischer Fehler bei der Integration von Off-the-Shelf Netzteilen.

## Sicherheitsnormen und regulatorische Anforderungen

Hersteller von OTS-Netzteilen bieten ihre Produkte in der Regel bereits vorgelistet oder vollständig zertifiziert nach internationalen Sicherheitsstandards an. Zu den wichtigsten zählen:

- IEC/UL/EN 62368-1: IT- & AV-Geräte
- IEC 60601-1: Medizintechnik (inkl. Anforderungen an Isolierung & Ableitstrom)
- IEC 61010-1: Labor-, Prüf- und Messgeräte

Diese Normen decken elektrische Sicherheit, Isolation, Schutz gegen elektrischen Schlag, Brand- und Explosionsschutz sowie thermische Risiken ab. Dabei ist zu beachten: Eine zertifizierte Komponente ist nicht gleichbedeutend mit einem zertifizierten Endprodukt. Der Hersteller des Gesamtsystems muss eine vollständige Systemzertifizierung durchführen – die jedoch deutlich einfacher gelingt, wenn die verbauten Netzteile bereits vorgeprüft sind.

## Zusätzliche Anforderungen

– abhängig vom Marktsegment – können sein:

- CE-Kennzeichnung / UL-Zertifikate/UKCA
- DOE / CoC Tier 2 (Energieeffizienzvorgaben)
- OVC-Level (Overvoltage Category, z. B. für Industrieanlagen)
- CB-Reports & DoC (Declaration of Conformity)

Viele OTS-Hersteller stellen diese Nachweise direkt bereit oder unterstützen beim Antragsprozess. In regulatorisch sensiblen Branchen – etwa Medizintechnik oder Bahntechnik – ist die Verfügbarkeit solcher Dokumente ein wichtiges Auswahlkriterium.

## EMV-Prüfungen und Schutzmechanismen

Ein besonders kritischer Aspekt ist die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Off-the-Shelf Netzteile müssen die geltenden EMV-Grenzwerte erfüllen, etwa:

- EN55032 / CISPR32, Klasse B (leitungsgebundene und gestrahlte Emissionen)
- IEC 61000-4-x Normenreihe für Störfestigkeit gegenüber:
  - ESD ( $\pm 4$  kV Kontakt,  $\pm 8$  kV Luft)
  - Burst ( $\pm 1$  kV) – Surge ( $\pm 1$  kV L-N)
  - leitungsgeführte Störungen

Trotz dieser Vorkehrungen kann das EMV-Verhalten im Gesamtsystem durch Masseführung, Kabellängen, Gehäusekonstruktion oder externe Einflüsse beeinträchtigt werden. Um das zu vermeiden, sollten folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Verwendung geschirmter Kabel
- Sternförmige Masseführung
- Erdung des Gehäuses, wo normativ gefordert
- Zusätzliche LC- oder Pi-Filter, falls das Basisnetzteil keine ausreichende Dämpfung bietet

## Schutzfunktionen

Gute Netzteile verfügen außerdem über eingebaute Schutzfunktionen wie:

- OVP – Over voltage protection, Überspannungsschutz
- OCP – Over current protection, Überstromschutz
- SCP – Short circuit protection, Kurzschlusschutz
- OTP – Over temperature protection, Übertemperaturschutz

Diese Mechanismen sorgen dafür, dass nicht nur das Netzteil selbst geschützt ist, sondern auch angrenzende Baugruppen und die Stromversorgung im Gesamtsystem erhalten bleibt.

## Häufige Fehler und Best Practices bei der Integration

Obwohl handelsübliche Netzteile viele Entwicklungsaufgaben vereinfachen, treten in der Praxis immer wieder Integrationsprobleme auf, die auf mangelnde Planung, fehlerhafte Annahmen oder unzureichende Testabdeckung zurückzuführen sind. Dieser Abschnitt fasst die häufigsten Fehler zusammen – und zeigt konkrete Best Practices zur sicheren und normkonformen Umsetzung.

## Fehlerhafte Dimensionierung und fehlende Leistungsreserve

Ein oft beobachteter Fehler ist die zu knappe Auslegung des Netzteils – insbesondere, wenn nur die Dauerlast betrachtet wird. Dynamische Belastungen, wie:

- Anlaufströme bei Motoren oder Relais
- kapazitive Ladeeffekte beim Einschalten
- zyklische Lastwechsel (z. B. bei Funkmodulen oder Pulslasten) können zu Spannungseinbrüchen, Abschaltungen oder Hiccup-Modus führen.

## Best Practice:

- Immer mit 20 - 30 % Leistungsreserve planen (über der maximalen Dauerlast).
- Load-Dynamics berücksichtigen: Peak-Lastfähigkeit, Soft-Start und Lastverhalten im Design testen.
- Die tatsächliche Stromaufnahme im Prototyp unter realen Bedingungen messen – nicht nur aus Datenblättern ableiten und mit einfachen Festwiderständen als Last betreiben.

- Reihenfolge der Sequenzierung/des Hochfahrens für bei Systemen mit mehreren Netzteilen überprüfen.

## Ignorieren thermischer und mechanischer Rahmenbedingungen

Viele Integrationsfehler entstehen durch eine Fehleinschätzung der thermischen Umgebung:

- Netzteile arbeiten unter Volllast in geschlossenen Gehäusen.
- Keine ausreichende Belüftung oder Kühlkonzepte.
- Derating-Kurven im Datenblatt werden ignoriert.
- Höhenlage >2000 m wird nicht berücksichtigt.

Dies führt zu vorzeitiger Alterung (insbesondere der Kondensatoren), erhöhtem Ausfallrisiko und MTBF-Abweichungen.

### Best Practice:

- Datenblatt sorgfältig lesen: Derating-Kurven, Maximaltemperatur, Kühlart (Convection vs. Forced Air).
- Ausreichend Luftströmung sicherstellen.
- Nahe Wärmequellen vermeiden.
- Temperaturmessung am Einbauort (Hotspots identifizieren und Luftströmung kontrollieren!).
- Bei höherer Umgebungstemperatur oder Einbauhöhe: Leistung reduzieren oder aktiv kühlen.

## Fehlende EMV-Strategie im Gesamtsystem

Auch wenn das Netzteil EMV-vorzertifiziert ist, kann die Integration EMV-Probleme im Gesamtsystem verursachen, etwa durch:

- Ungeeignete Masseführung (z. B. Schleifen, keine Trennung analog/digital)
- Zu lange Versorgungsleitungen
- Fehlende Filterelemente an den Eingängen
- Schlecht geschirmte Signalkabel

### Best Practice:

- Sternförmige Massekonzepte realisieren.
- Zusätzliche LC-Filter oder Ferritkerne/-bauelemente am Ein-/Ausgang einsetzen.
- Schirmung und Gehäuseerdung normgerecht umsetzen.
- Abblockkondensatoren in Lastnähe platzieren.
- EMV-Vorprüfung im realen Aufbau durchführen – nicht nur Simulation.

## Vernachlässigung der Schutzfunktionen

OTS-Netzteile bieten in der Regel umfassende Schutzmechanismen wie:

- OVP (Over Voltage Protection)
- OCP (Over Current Protection)
- SCP (Short Circuit Protection)
- OTP (Over Temperature Protection)

Ein häufiger Fehler besteht darin, sich ausschließlich auf diese Schutzmechanismen zu verlassen, ohne das Systemverhalten bei Störung zu testen.

### Best Practice:

- Verhalten bei Kurzschluss und Überspannung bzw. die Schutzfunktionen gezielt testen.
- Netzteil-Ausgang gezielt überlasten und Reaktion prüfen.
- Bei empfindlichen Lasten: zusätzliche Schutzbeschaltung oder Strombegrenzung einplanen.
- Einschaltströme, Einschaltverhalten, Wiederanlauf und Lastwechsel (Transienten) unter Systembedingungen validieren. Simulation des Worst Case.
- Leckströme analysieren, besonders bei medizinischen Geräten (z. B. <300 µA gemäß IEC 60601-1).

## Falsche Annahmen bei der Zertifizierung

Ein weiterer häufiger Irrtum: „Wenn das Netzteil zertifiziert ist, ist mein gesamtes Produkt ebenfalls normgerecht.“ Das ist falsch. Zwar vereinfacht ein zertifiziertes Netzteil die Systemprüfung, ersetzt diese jedoch nicht.

### Best Practice:

- Zertifizierte Komponenten sind hilfreich – aber nie ein Ersatz für die Systemprüfung.
- Alle relevanten Dokumente vom Netzteilhersteller einfordern:
  - CB-Report
  - DoC (Declaration of Conformity)
  - EMV-Protokolle
  - Sicherheitszertifikate
- Eigene Konformitätsbewertung im Endprodukt durchführen (insbesondere CE, UKCA, EMV).
- Relevante Standards in den Datenblättern prüfen.

## Ungeeignete Anschluss- und Layoutführung

Fehlfunktionen treten oft durch ungeplante Widerstände oder Spannungsabfälle in Versorgungsleitungen auf. Fehlerquellen sind:

- Zu dünne Leitungen führen zu Spannungsverlust.

- Keine Trennung von Sense-Leitungen.
- Fehlerhafte Masseführung oder Rückströme durch Signalleitungen.
- Keine galvanische Trennung, obwohl benötigt.

### Best Practice:

- Remote-Sense-Leitungen korrekt routen: nahe der Last, möglichst kurz, geschirmt, Schleifen vermeiden um Störeinkoppelungen zu minimieren.
- Leitungslängen minimieren, Querschnitt richtig wählen.
- Bei mehrfacher Versorgung: Vermeidung von Rückströmen zwischen Modulen.
- Isolation auf Leiterplattebene normkonform berücksichtigen (Kriechstrecken, Luftstrecken, Clearance).

Die Integration von Off-the-Shelf Netzteilen kann erhebliche Vorteile bieten: reduzierte Entwicklungszeit, geringere Kosten und ein hohes Maß an normativer Sicherheit. Dennoch ist ein solches Netzteil keineswegs eine „Plug-and-Play“-Komponente im klassischen Sinn. Die tatsächliche Leistungsfähigkeit entfaltet sich erst dann, wenn Auswahl, Dimensionierung und Integration bewusst und strukturiert erfolgen.

## Fazit

Es wurde deutlich:

- Die richtige Dimensionierung mit Berücksichtigung von Lastreserven und Derating ist entscheidend für die Langlebigkeit der Stromversorgung.
- Dynamische Anforderungen wie Lastsprünge, Einschaltstrom oder kapazitive Lasten erfordern ein detailliertes Verständnis des Lastverhaltens.
- Thermische Aspekte, Einbauhöhe und MTBF-Analysen beeinflussen die Zuverlässigkeit im Feld oft stärker als die reine Nennleistung.
- Auch bei zertifizierten Komponenten sind EMV-Verhalten, Schutzmechanismen und Systemzertifizierungen nicht zu vernachlässigen.
- Die häufigsten Fehler entstehen nicht durch das Netzteil selbst, sondern durch unzureichende Berücksichtigung seiner Integration ins Gesamtsystem.

Wer diese Faktoren frühzeitig im Entwicklungsprozess berücksichtigt, profitiert von deutlich höherer Zuverlässigkeit, schnelleren Zertifizierungsprozessen und einer langfristigen stabilen Versorgungslösung. ◀