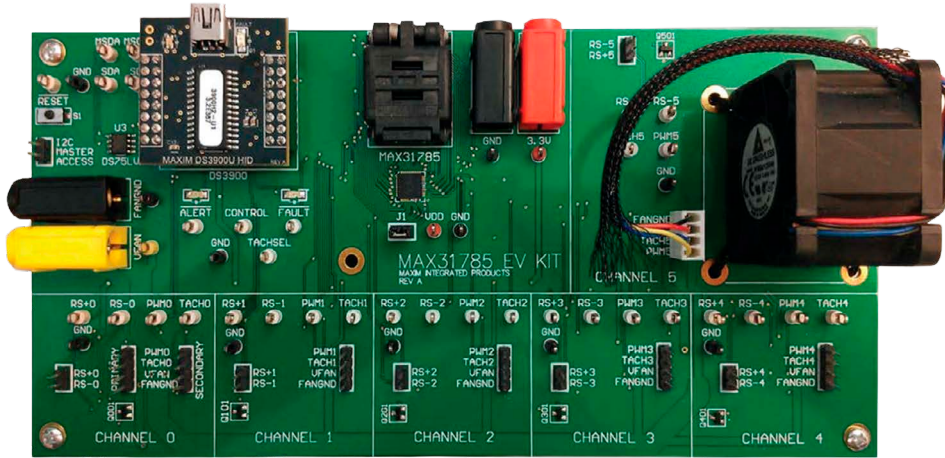


Mehr Effizienz durch die richtige Kühlung

Thermomanagement für Netzteile



Das MAX31785-Evaluierungskit

Für die Gewährleistung von Zuverlässigkeit, Effizienz und Langlebigkeit ist das Wärmemanagement bei der Entwicklung von Netzteilen essenziell. Mit steigender Leistungsdichte wird eine effektive Kühlung unerlässlich, um Überhitzung und Komponentenausfälle zu verhindern.

Einführung

Wärme ist einer der Hauptfaktoren, welche die Zuverlässigkeit elektronischer Systeme beeinflussen. In Netzteilen, dem Rückgrat moderner Elektronik, kann thermische Belastung die Leistung und die Systemintegrität erheblich beeinträchtigen. Diese Schaltungen wandeln elektrische Energie in stabile Spannungen um – für Anwendungen, die von Consumer-Geräten bis hin zu Luft- und Raumfahrtssystemen reichen. Da die Leistungsdichte mit der Nachfrage nach kleineren und leistungsfähigeren Designs weiter steigt, ist das Wärmemanagement zu einer entscheidenden Herausforderung bei der Entwicklung geworden.

Zu den Wärmequellen zählen Schalttransistoren in Leistungstransistoren, magnetische Verluste in induktiven Bauteilen und Leckströme in Halbleitern. Wird dieser Wärmeaufbau nicht kontrolliert, kann er zu einer Verschlechterung der elektrischen Leistung, einer verkürzten mittleren Ausfallzeit (Mean Time between Failures, MTBF) und sogar katastrophalen Bauteilausfällen führen. Effektive Kühlstrategien sind daher unerlässlich, um Effizienz und Zuverlässigkeit unter wechselnden Last- und Umgebungsbedingungen aufrechtzuerhalten.

Vier bewährte Kühlmethoden

Dieser Artikel untersucht vier bewährte Kühlmethoden, von denen jede unterschiedliche Eigenschaften aufweist, die für verschiedene Betriebsumgebungen und Designvorgaben geeignet sind. Durch das Verständnis ihrer technischen Kompromisse können Ingenieure fundierte Entscheidungen treffen, die Leistung, Zuverlässigkeit, Kosten und Komplexität in Einklang bringen, und so sicherstellen, dass Netzteile sicher und effizient arbeiten.

Wärmequellen in Netzteilen

Wärme entsteht durch Halbleiterbauelemente wie MOSFETs und Dioden, die Energie durch Leitungs- und Schaltverluste abgeben. Magnetische Komponenten wie Transformatoren und Spulen erzeugen Wärme aufgrund von Kupferverlusten in den Wicklungen sowie Kernverlusten durch Hysterese und Wirbelströme, während Widerstandselemente und Steuerkreise nur in geringem Maße zur Wärmeentwicklung beitragen.

MOSFET (Schalttransistor)

erzeugt Wärme durch Leitungsverluste, wenn Strom durch seinen Widerstand im eingeschalteten Zustand fließt, sowie durch Schaltverluste

während der Übergänge zwischen Ein- und Auszustand. Diese Verluste nehmen bei hohen Frequenzen und hohen Strömen deutlich zu, wodurch MOSFETs zu den Hauptwärmequellen in Schaltnetzteilen (Switch Mode Power Supplies, SMPS) gehören.

$$P_{cond} = I_{rms}^2 \times R_{DS(ON)} \quad (1)$$

Dabei gilt:

- I_{rms} : Effektivstrom durch den MOSFET
- $R_{DS(ON)}$: Drain-to-Source-Widerstand im eingeschalteten Zustand

$$P_{sw} = 0.5 \times V_{ds} \times I_d \times (t_{on} + t_{off}) \times f_{sw} \quad (2)$$

Dabei gilt:

- V_{ds} : Drain-to-Source-Spannung
- I_d : Drain-Strom
- t_{on} , t_{off} : Schaltübergangszeiten
- f_{sw} : Schaltfrequenz
- 0,5: Annahme einer linearen Überlappung von Spannung und Strom während des Schaltvorgangs

Diode (Gleichrichter)

erzeugt Wärme hauptsächlich aufgrund ihres Vorwärtsspannungsabfalls, wenn Strom durch sie fließt, wodurch Energie während der Leitung als Wärme abgegeben wird. Bei Hochgeschwindigkeits-Schaltanwendungen treten zusätzliche Verluste während der Rückwärtserholung auf, wenn gespeicherte Ladung abgebaut wird, während die Diode von der Vorwärts- in die Rückwärtsspannung übergeht.

$$P_{diode} = V_f \times I_{avg} \quad (3)$$

Dabei gilt:

- V_f : Vorwärtsspannungsabfall (0,7 V für Si, 0,3 V für Schottky)
- I_{avg} : Durchschnittsstrom durch die Diode

Spule/Transformator

erzeugt Wärme hauptsächlich durch Kupferverluste in den Wicklungen, die durch ohmsche Erwärmung verursacht werden, sowie durch Kernverluste aufgrund von Hysterese und Wirbelströmen im magnetischen Material. Beide Verluste nehmen mit steigendem Strom, höherer Frequenz und größerer Flussdichte zu, was eine sorgfältige Material- und Konstruktionsauswahl erfordert.

Autor:
Hermogenes Escala
Applications Engineer
Analog Devices Inc.
www.analog.com

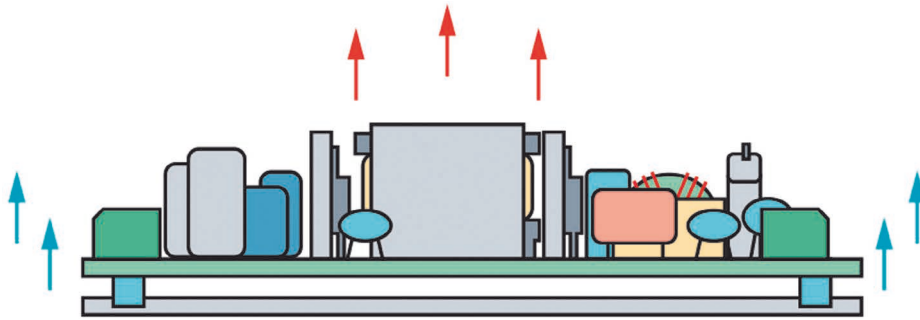


Bild 1: Konvektionskühlung in einem Netzteil

$$P_{cu} = I_{rms}^2 \times R_{winding} \quad (4)$$

Dabei gilt:

- I_{rms} : Effektivstrom in der Wicklung
- $R_{winding}$: Gleichstromwiderstand der Wicklung

Kernverlust (Steinmetz-Gleichung):

$$P_{core} = k \times f \times B^\alpha \times V_{core} \quad (5)$$

Dabei gilt:

- k : Steinmetz-Koeffizient (materialabhängig)
- f : Frequenz (Hz)
- B : Spitzenflussdichte (Tesla)
- α β : Steinmetz-Exponenten (typischerweise $\alpha \approx 1,3$ bis $1,6$, $\beta \approx 2,0$ bis $2,8$)
- V_{core} : Kernvolumen (cm^3 oder m^3)

Kondensatoren

erzeugen Wärme durch ihren äquivalenten Serienwiderstand (Equivalent Series Resistor, ESR), der Energie abführt, wenn Welligkeitsströme durch sie fließen. Dieser Effekt ist bei Elektrolytkondensatoren mit höherem ESR stärker ausgeprägt, was zu lokaler Erwärmung in Netzteilfiltern führt.

$$P_{ESR} = I_{ripple}^2 \times ESR \quad (6)$$

Dabei gilt:

- I_{ripple} : Welligkeitsstrom durch den Kondensator
- ESR: äquivalenter Serienwiderstand

Ein integrierter Schaltkreis

(Integrated Circuit, IC): trägt durch seine Sperrschichttemperatur – die Temperatur am Halbleiterchip im Inneren des Gehäuses – zur Wärmeentwicklung im System bei. Entwickler berechnen diese häufig anhand folgender Formel:

$$P_{ESR} = I_{ripple}^2 \times ESR \quad (6)$$

Dabei gilt:

- T_j : Sperrschichttemperatur ($^{\circ}C$)
- T_a : Umgebungstemperatur ($^{\circ}C$)

- θ_{ja} : Wärmewiderstand von der Sperrschicht zur Umgebung ($^{\circ}C/W$)

- P_d : Verlustleistung (W)

Höhere Stromstärken, Spannungen und Schaltfrequenzen lassen sowohl die Leistungsverluste als auch die Bauteil-Temperaturen ansteigen, wodurch das Wärmemanagement für das Design entscheidend wird. Die Minimierung dieser Verluste erfordert eine sorgfältige Bauteil-auswahl, einen optimierten Schaltungsentwurf und effektive Kühlstrategien. Die Berücksichtigung der Wärmeentwicklung verbessert nicht nur den Wirkungsgrad, sondern gewährleistet auch die Langlebigkeit des Netzteilsystems.

Kühlverfahren in Netzteilen

Kühlung durch natürliche Konvektion

Hierbei handelt es sich um ein passives Kühlverfahren, das auf der Bewegung der Luft beruht, die durch den Auftrieb verursacht wird. Wenn sich elektronische Bauteile erwärmen, wird die umgebende Luft weniger dicht und steigt nach oben, während kühler Luft nachströmt, um sie zu ersetzen. Dadurch entsteht ein kontinuierlicher Luftstrom um die wärmeerzeugenden Bauteile herum, ohne dass eine mechanische Unterstützung erforderlich ist. Bild 1 veranschaulicht, wie sich die Luft bei der Konvektionskühlung bewegt.

Die Wirksamkeit der natürlichen Konvektion hängt von mehreren Faktoren ab, darunter die Ausrichtung der Bauteile, die Geometrie des Gehäuses und die Umgebungstemperatur. Häufig werden Kühlkörper eingesetzt, um die Oberfläche zu vergrößern, die für die Wärmeabgabe verfügbar ist. Auch ihre Auslegung hinsichtlich

Lamellen, Materialien und Anordnung spielt eine entscheidende Rolle bei der Optimierung der thermischen Leistung.

Vor- und Nachteile: Zu den Vorteilen zählen ein geräuschloser Betrieb, minimaler Wartungsaufwand und hohe Zuverlässigkeit, da keine beweglichen Teile vorhanden sind. Diese Methode ist ideal für Anwendungen mit geringem Leistungsbedarf oder Umgebungen, in denen Geräuschentwicklung und mechanischer Verschleiß eine Rolle spielen. Zu den Einschränkungen zählen eine relativ geringe Wärmeableitungsleistung und die Abhängigkeit vom Umgebungsluftstrom, der in Systemen mit hoher Leistung oder hoher Bauteildichte unzureichend sein kann.

Zwangsbelüftung

ist ein Kühlverfahren, bei dem die Wärmeableitung durch aktives Umwälzen von Luft über die Bauteile mithilfe von Lüftern oder Gebläsen verbessert wird. Dadurch wird der konvektive Wärmeübergangskoeffizient erhöht, was eine effizientere Wärmeabfuhr von Oberflächen wie Kühlkörpern, Transformatoren und Schaltgeräten ermöglicht. Bild 2 zeigt, wie Luft bei Verwendung eines Lüfters in einem Netzteil strömt.

Aus konstruktiver Sicht erfordert die Zwangsbelüftung ein sorgfältiges Luftstrommanagement, um Hotspots zu vermeiden und eine gleichmäßige Kühlung zu gewährleisten. Konstrukteure müssen die Platzierung der Lüfter, die Richtung des Luftstroms, die Luftführung sowie die Geräuschdämpfung berücksichtigen. Die Regelung und Überwachung der Lüfterdrehzahl sind ebenfalls wichtig, um ein Gleichgewicht zwischen Kühlleistung, Energieverbrauch und Geräuschpegel herzustellen.

Vor- und Nachteile: Zu den Vorteilen zählen die Skalierbarkeit für höhere Leistungsstufen, die einfache Umsetzung und die Kompatibilität mit kompakten Bauformen. Zu den Nachteilen gehören mechanischer Verschleiß und potenzielle Ausfallstellen, regelmäßige Wartung sowie Geräuschentwicklung. Zwangsbelüftungssysteme können zudem in staubigen oder feuchten Umgebungen weniger effektiv sein, da der Luftstrom behindert oder verunreinigt werden kann.

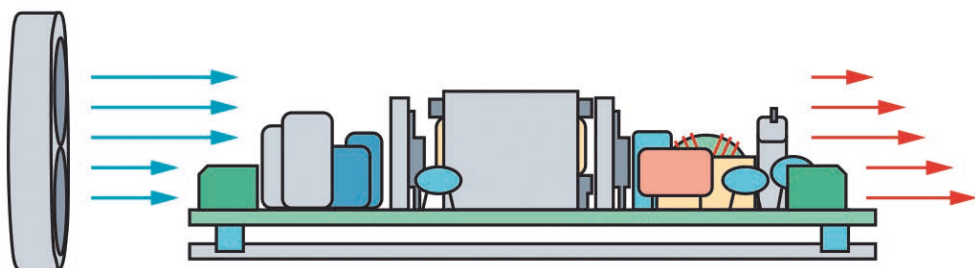


Bild 2: Zwangsbelüftung in einem Netzteil

Leitungskühlung

Bei dieser Methode wird Wärme durch physischen Kontakt direkt von den Bauteilen auf einen Kühlkörper oder das Gehäuse übertragen. Sie eignet sich besonders für versiegelte oder raue Umgebungen, in denen der Luftstrom eingeschränkt oder eine lüftergestützte Kühlung aufgrund von Staub, Feuchtigkeit oder Vibrationen unpraktisch ist. Bild 3 veranschaulicht, wie die Leitungskühlung in einem System umgesetzt wird.

Thermische Schnittstellenmaterialien (Thermal Interface Materials, TIMs) wie Wärmeleitpads, Wärmeleitpasten oder Phasenwechselmaterialien werden verwendet, um die Wärmeleitfähigkeit zwischen den Oberflächen zu verbessern. Die Effizienz der Leitungskühlung hängt vom thermischen Widerstand des Wärmepfads, den Materialeigenschaften (z. B. Kupfer vs. Aluminium) und der für die Wärmeübertragung verfügbaren Oberfläche ab.

Vor- und Nachteile: Zu den Vorteilen zählen hohe Zuverlässigkeit, Eignung für raue Umgebungen und der Verzicht auf bewegliche Teile. Zu den Nachteilen gehören eine begrenzte Kühlleistung im Vergleich zu aktiven Methoden sowie die Notwendigkeit einer präzisen mechanischen Konstruktion, um einen effektiven thermischen Kontakt zu gewährleisten.

Flüssigkeitskühlung

Bei dieser leistungsstarken Methode wird ein zirkulierendes Kühlmittel eingesetzt, um Wärme aufzunehmen und von den Bauteilen abzuleiten. Das Kühlmittel strömt durch Kühlplatten oder Wärmetauscher, die an den Wärmequellen angebracht sind, und die aufgenommene Wärme wird anschließend über einen Kühler oder ein externes Kühlsystem abgeführt. Bild 4 zeigt einen Ansatz der Flüssigkeitskühlung.

Technisch gesehen bietet die Flüssigkeitskühlung im Vergleich zu Luft eine überlegene Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität. Sie ermöglicht eine effiziente Kühlung von Hochleistungskomponenten auf kompaktem Raum.

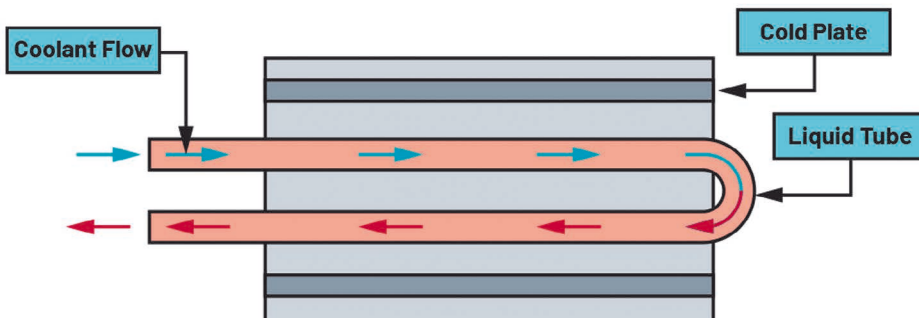


Bild 4: Methode für die Flüssigkeitskühlung

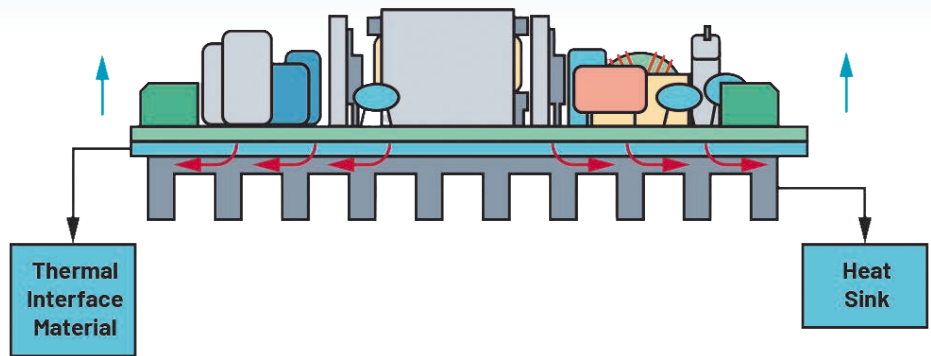


Bild 3: Leitungskühlung in einem Netzteil

Allerdings erfordert sie Pumpen, Schläuche, Vorratsbehälter und dichte Verbindungen, was das System komplexer und potenziell teurer macht.

Vor- und Nachteile: Zu den Vorteilen zählen eine hervorragende thermische Leistung, geringere Geräuschkentwicklung und die Eignung für Anwendungen mit hoher Bauteildichte oder hoher Leistung. Zu den Herausforderungen gehören erhöhte Kosten, das Risiko von undichten Stellen sowie die Notwendigkeit regelmäßiger Wartung, um die Systemintegrität und die Qualität des Kühlmittels sicherzustellen.

Bewährte Verfahren für das thermische Design

Ein effektives thermisches Design erfordert die Berücksichtigung elektrischer, mechanischer und umgebungsbezogener Faktoren. Im Folgenden werden wichtige Verfahren zur Gewährleistung einer optimalen thermischen Leistung aufgeführt.

Wärmebilanzierung und Leistungsprofilierung:

- Beginnen Sie mit genauen Schätzungen der Verlustleistung für jede Komponente unter Worst-Case-Bedingungen.
- Berücksichtigen Sie dabei Schaltverluste, Leitungsverluste und magnetische Verluste.
- Verwenden Sie Simulationstools und Werte aus Datenblättern, um die Sperrschichttemperaturen zu berechnen und thermische Sicherheitsmargen zu gewährleisten.

Optimierung des Leiterplattenlayouts:

- Verwenden Sie breite Kupferflächen und thermische Durchkontaktierungen, um die Wärme zu verteilen. Bild 5 veranschaulicht, wie man Durchkontaktierungen zur Wärmeverteilung nutzen kann.
- Platzieren Sie Hochleistungskomponenten in der Nähe von Kühlkörpern oder Wärmepfaden.
- Vermeiden Sie es, wärmeempfindliche Komponenten in der Nähe von Wärmequellen zu platzieren.
- Ziehen Sie mehrschichtige Leiterplatten mit internen Wärmeverteilungsschichten in Betracht.

Auswahl und Montage von Kühlkörpern:

- Wählen Sie Kühlkörper anhand des thermischen Widerstands, der Kompatibilität mit dem Luftstrom und der Montagebedingungen aus.
- Berücksichtigen Sie die Geometrie der Lamellen, deren Ausrichtung und die Oberflächenbehandlung (z. B. Eloxierung), um die Wärmeableitung zu verbessern.

Luftstrommanagement:

- Entwerfen Sie Luftströmungswege so, dass sie gleichmäßig und laminar verlaufen.
- Vermeiden Sie scharfe Kurven, Hindernisse oder Rückströmungszonen.
- Verwenden Sie Werkzeuge der rechnergestützten Strömungsdynamik (Computational Fluid Dynamics, CFD), um die Luftströmung zu simulieren und zu optimieren.
- Stellen Sie sicher, dass Einlass- und Auslassöffnungen richtig dimensioniert und positioniert sind.

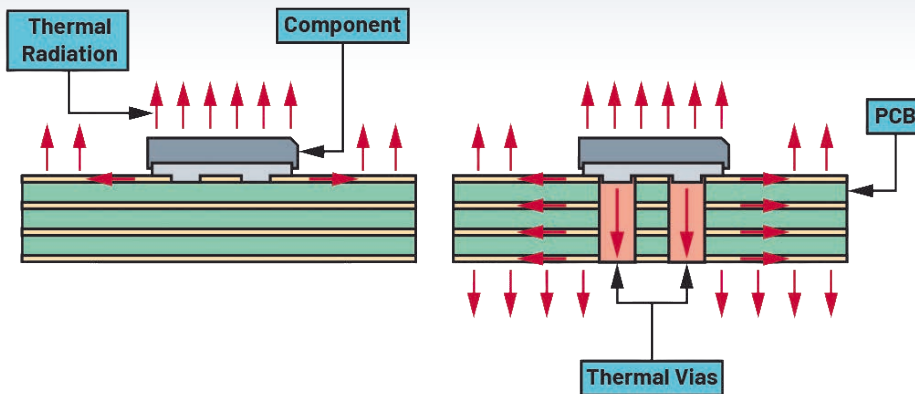


Bild 5: Wärmeverteilung in der Leiterplatte mit und ohne thermische Durchkontaktierungen

Aktive Kühlungssteuerung:

- Implementieren Sie eine dynamische Lüfterregelung unter Verwendung von Temperaturreckmeldung.
- Verwenden Sie Puls-Weiten-Modulation (PWM) oder Spannungssteuerung, um die Lüfterdrehzahl entsprechend der thermischen Belastung anzupassen.
- Integrieren Sie eine Fehlererkennung für Lüfterausfälle sowie thermische Alarmer für Übertemperaturzustände.

Umgebungsbedingungen:

- Berücksichtigen Sie Umgebungstemperatur, Höhe (beeinflusst die Luftdichte), Luftfeuchtigkeit und Verschmutzung.
- Verwenden Sie Schutzbeschichtungen oder versiegelte Gehäuse in rauen Umgebungen.
- Erwägen Sie eine Leistungsreduzierung der Komponenten für den Betrieb in großen Höhen oder bei hohen Temperaturen.

Häufige Fallstricke beim thermischen Design

Fehler beim thermischen Design sind oft kaum erkennbar, können jedoch die Zuverlässigkeit und Leistung des Systems erheblich beeinträchtigen. Einer der häufigsten Fehler ist die Unterschätzung der Wärmeentwicklung, insbesondere bei Spitzenlasten oder unter ungünstigen Umgebungsbedingungen. Entwickler

verlassen sich möglicherweise auf typische Betriebswerte und übersehen dabei kurzzeitige Spitzen oder den kumulativen Wärmeaufbau, die zu einer thermischen Überlastung führen können. Ein weiteres häufiges Problem ist die unsachgemäße Anwendung von TIMs. Uneinheitliche oder übermäßige Auftragsmengen können Luft einschließen, den Wärmewiderstand erhöhen und die Wirksamkeit der Wärmeleitung verringern. Ebenso kann eine unzureichende Luftstromplanung, wie beispielsweise eine ungünstige Platzierung von Lüftern oder verstopfte Abzugsöffnungen, zu Rezirkulationszonen und Hotspots führen, was die Effizienz der Zwangsbelüftung beeinträchtigt.

Anordnung der Komponenten

Auch die Anordnung der Komponenten spielt eine entscheidende Rolle für das thermische Verhalten. Werden wärmeempfindliche Komponenten zu nahe an Hochleistungsbauteilen platziert, können sie übermäßiger Hitze ausgesetzt werden, was das Betriebsverhalten verschlechtert oder zu vorzeitigem Ausfall führt. Die langfristige Zuverlässigkeit wird oft vernachlässigt; Lüfter verschleissen, TIMs trocknen aus und Staubansammlungen können den Luftstrom blockieren – all dies verringert die Kühlleistung im Laufe der Zeit. Das Überspringen von thermischen Simulationen und Tests unter realen Bedingungen ist eine weitere Gefahr, und das ausschließliche Vertrauen in Datenblattwerte oder theoretische Modelle kann zu

ungenauen Vorhersagen führen. Schließlich kann die Fehleinschätzung von Umgebungsfaktoren wie Höhe, Luftfeuchtigkeit oder Abdichtung des Gehäuses unerwartete thermische Herausforderungen zur Folge haben. Die frühzeitige Berücksichtigung dieser Fallstricke im Entwurfsprozess trägt zu einem robusten Netzteil-Design bei (Aufmacherbild und Bild 6).

Fazit

Eine effektive Kühlung ist für den sicheren und effizienten Betrieb von Netzteilen essenziell. Jede Kühlmethode – von natürlicher Konvektion über Zwangsluft-, Leitungs- bis hin zur Flüssigkeitskühlung – hat ihre eigenen Vorteile und Kompromisse. Die natürliche Konvektion ist einfach und geräuschlos, hat jedoch eine begrenzte Kapazität. Die Zwangsbelüftung ist skalierbar und effektiv, bringt jedoch mechanische Komplexität mit sich. Die Leitungskühlung ist robust und zuverlässig und somit ideal für versiegelte Umgebungen, während die Flüssigkeitskühlung unübertroffene Leistung für Hochleistungsanwendungen bietet – allerdings auf Kosten einer höheren Systemkomplexität.

Durch das Verständnis der technischen Prinzipien und Grenzen, die Anwendung bewährter Verfahren im thermischen Design, die Vermeidung häufiger Fallstricke und den Einsatz von Simulationswerkzeugen fundierte Entscheidungen getroffen werden, die genau auf die Anforderungen der Anwendung zugeschnitten sind.

Wer schreibt:

Hermogenes Escala ist Applications Engineer bei Analog Devices Inc. und unterstützt das EMEA Central Applications Center (CAC). Mit einem starken Fokus auf SMPS und Energiemanagement bringt Hermo umfassende praktische Erfahrungen und technisches Fachwissen in seine Tätigkeit ein. Er hat unter anderem an Armaturenbrettern für Kraftfahrzeuge, Audiosystemen, Netzteilen für unterschiedliche Anwendungen und medizinischen Geräten gearbeitet – wodurch er eine breit gefächerte und praxisnahe Perspektive auf reale technische Herausforderungen gewinnen konnte. ◀

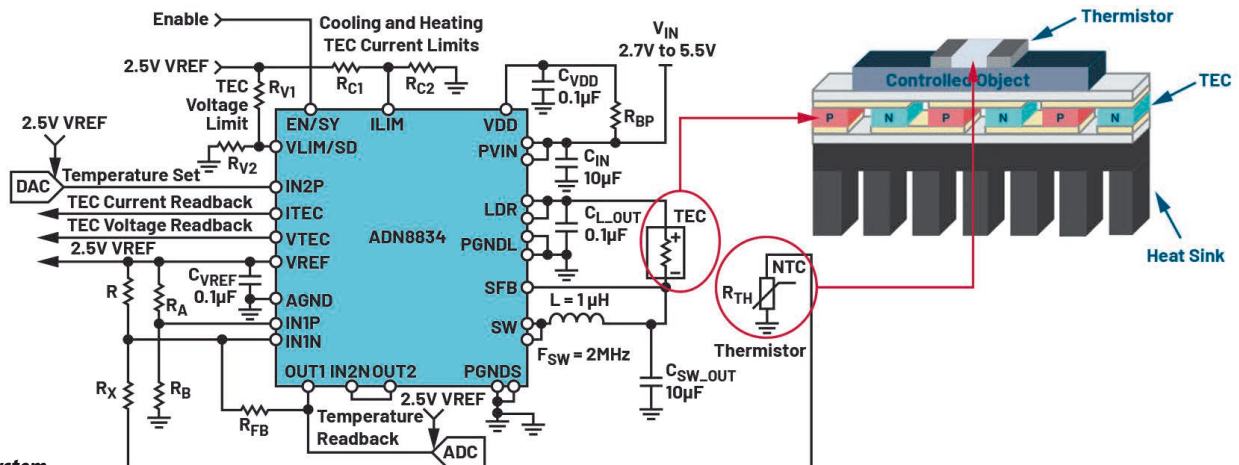


Bild 6: TEC-System