



# **AKTIVE VS. PASSIVE KÜHLUNG VON LEISTUNGSELEKTRONIK**

**Warum aktive Kühlung die bessere Technologie für Leistungselektronik ist.**

© Fronius International GmbH

Version 1.2, 9/2023, Jürgen Wolfahrt, Franz Breitwieser, Volker Haider, Jasmin Gross

Solar Energy

Fronius behält sich alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung vor. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form ohne schriftliche Genehmigung von Fronius reproduziert oder unter Verwendung elektrischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Es wird darauf hingewiesen, dass alle Angaben in diesem Dokument trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung des Autors oder von Fronius ausgeschlossen ist. Geschlechterspezifische Formulierungen beziehen sich gleichermaßen auf die weibliche und männliche Form.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>5</b>
1.1	Definition: Passive Kühlung .....	5
1.2	Definition: Aktive Kühlung .....	5
<b>2</b>	<b>Planung &amp; Systemdesign.....</b>	<b>6</b>
2.1	Mehr Flexibilität durch aktive Kühlung .....	6
2.1.1	Flexibilität in der Anlagenauslegung .....	6
2.1.2	Flexibilität in der Montage .....	7
<b>3</b>	<b>Wartung .....</b>	<b>9</b>
3.1	Geringere Kosten durch aktive Kühlung .....	10
<b>4</b>	<b>Lebensdauer.....</b>	<b>11</b>
4.1	Längere Lebensdauer durch aktive Kühlung .....	12
4.1.1	Lebensdauer eines Lüfters .....	12
<b>5</b>	<b>Ertrag.....</b>	<b>14</b>
5.1	Mehr Ertrag durch aktive Kühlung .....	14
5.1.1	Auswirkungen am Beispiel einer Referenzanlage .....	15
<b>6</b>	<b>Thermischer Vergleich .....</b>	<b>17</b>
6.1	Verhalten von passiv gekühlten Geräten .....	17
6.2	Verhalten von aktiv gekühlten Geräten.....	19
<b>7</b>	<b>Aspekte beider Kühlsysteme.....</b>	<b>20</b>
7.1	Aspekte der aktiven Kühltechnologie (Active Cooling) .....	20
7.1.1	Geräuschentwicklung.....	20
7.1.2	Geringere Kosten über die gesamte Produktlebenszeit .....	20
7.1.3	Mehr Komfort durch geringes Gewicht .....	20
7.1.4	Längere Lebensdauer.....	20
7.1.5	Höhere Flexibilität im Systemdesign.....	20
7.1.6	Mehr Ertrag .....	21
7.2	Aspekte der passiven Kühltechnologie.....	21
7.2.1	Geräuschentwicklung.....	21
7.2.2	Wirkungsgrad.....	21
<b>8</b>	<b>Weiterentwicklung von aktiver Kühlung .....</b>	<b>22</b>
8.1	Fronius GEN24 [Plus] .....	22

8.2	Strömungsverhalten im Kühlkörper des Fronius GEN24 [Plus] .....	23
8.2.1	Beitrag zur effektiven Energieerzeugung.....	24
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>25</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverweise .....</b>	<b>26</b>

# 1 EINLEITUNG

Hohe Umgebungstemperaturen beeinflussen nicht nur den Ertrag einer gesamten PV-Anlage sondern haben auch eine starke Auswirkung auf die Lebensdauer von Wechselrichtern. Nicht nur Wechselrichter selbst werden von hohen Außentemperaturen negativ beeinflusst, sondern auch die Performance sowie die Lebensdauer elektronischer Bauteile im Inneren des Gerätes.

Es stellt sich die Frage, wie man ein Überhitzen von elektronischen Bauteilen vermeiden kann, ohne hohe Summen für beispielsweise ein klimatisiertes Umfeld des Wechselrichters investieren zu müssen.

In diesem Whitepaper werden zwei am Markt übliche Kühltechnologien von Wechselrichtern näher untersucht und verglichen. Die Vergleichstests sollen Unterschiede und vorteilhafte Merkmale von passiver und aktiver Kühltechnologie herausheben.

## 1.1 Definition: Passive Kühlung

Bei passiver Kühltechnologie setzt man auf natürliche Konvektion. Um die Innentemperatur niedrig zu halten werden große Kühlkörper eingesetzt, was das Gerät tendenziell schwer macht.

## 1.2 Definition: Aktive Kühlung

Aktive Kühltechnologie zielt darauf ab, Hitzefelder mit Hilfe von Innenraumlüftern proaktiv zu vermeiden und warme Luft gesteuert abzuführen.

Bei Fronius ist *Active Cooling* ein Technologie-Standard in allen Geräten. Ein Lüfter sorgt zusätzlich zu einem kleinen Kühlkörper dafür, dass die Luft im Inneren der Wechselrichter zirkuliert und sogenannte Hotspots vermieden werden. Ein weiterer Lüfter ist dafür zuständig die Temperatur der Kühlrippen der Leistungselektronik niedrig zu halten. Die Geschwindigkeit der Lüfter variiert in Abhängigkeit von der Temperatur im Innenraum des Gerätes.

## 2 PLANUNG & SYSTEMDESIGN

Besonders im Bereich der Einfamilienhäuser ist intelligente Anlagenauslegung ein sehr wichtiges Thema, da einerseits die Dächer der Häuser oft verwinkelt und in verschiedene Himmelsrichtungen ausgerichtet sind und andererseits die Dachfläche begrenzt ist.

Zudem kann in der Praxis der Installationsort des Wechselrichters nur bedingt frei gewählt werden und man muss sich an die gegebenen Bedingungen anpassen. Bei einigen Wechselrichtern gibt es allerdings strikte Vorgaben rund um die Installationsart, -position und den Installationsort. Diese Einschränkungen sind meist bedingt durch das verwendete Kühlsystem im Wechselrichter.

### 2.1 Mehr Flexibilität durch aktive Kühlung

#### 2.1.1 Flexibilität in der Anlagenauslegung

Betrachtet man den maximalen Eingangsstrom ( $I_{DCmax}$ ) eines MPP-Trackers von passiv gekühlten Geräten etwas genauer, stellt man fest, dass diese eine Einschränkung in der Flexibilität aufweisen. Aufgrund der oftmals limitierten Stromstärke der MPP-Tracker bei passiv gekühlten Geräten, kann meist nur 1 Modulstrang an einen Tracker angeschlossen werden. Dies liegt daran, dass höhere Stromstärken auch höhere Bauteiltemperaturen verursachen ( $P = I^2 \times R$ ).

Passiv gekühlte Geräte verwenden tendenziell gleichmäßig aufgeteilte MPPT-Eingänge. Aufgrund der begrenzten Wärmeabführung sind die Stromstärken der MPPT-Eingänge begrenzt. Dadurch ergeben sich Einschränkungen in der Design-Flexibilität, da pro MPPT-Eingang vergleichsweise weniger DC-Modulstränge angeschlossen werden können. Aus diesem Grund ist auch eine asymmetrische Aufteilung nur eingeschränkt möglich.

Bei aktiv gekühlten Geräten hingegen kann mehr Wärme abgeführt werden, was höhere Stromstärken erlaubt. Höhere Stromstärken je MPP-Tracker bedeutet wiederum, mehr Flexibilität im Systemdesign, da mehr parallele Stränge angeschlossen werden können.

Aktiv gekühlte Geräte von Fronius erlauben zumindest bei einem MPPT-Eingang besonders hohe Ströme (z.B. 25 A bei 5 kW Symo GEN24 [Plus]). Dadurch ist es möglich an diesem MPPT-Eingang zwei oder mehrere DC-Stränge anzuschließen. Darüber hinaus gibt es bei aktiv gekühlten Fronius Wechselrichtern noch mindestens einen zweiten MPPT-Eingang. Somit ist eine breite asymmetrische Aufteilung auf beide MPPT-Eingänge möglich. Dies und auch die mögliche Überdimensionierung der DC-Leistung von bis zu 150 %, ermöglicht eine hohe Flexibilität bei der Anlagenauslegung und wird deshalb auch SuperFlex-Design genannt. Dies kann anhand eines einfachen Beispiels veranschaulicht werden.

#### Vergleichsbeispiel:

Anlagendaten		
AC-Leistung	Überdimensionierung	Modulleistung
5 kW	130 % (6,5 kWp)	285 Watt (8,97 A)

Mit einem aktiv gekühlten Fronius Wechselrichter kann man im Falle unserer Beispielanlage die beiden DC-Stränge problemlos an einem MPPT-Eingang anschließen. Es wäre außerdem möglich am zweiten MPPT-Eingang noch weitere Module von einem anders orientierten Dach anzuschließen.

Durch das SuperFlex-Design kombiniert mit einem aktiven Kühlsystem ist es somit mit Fronius Wechselrichtern möglich unterschiedlich komplexe Dächer optimal auszulegen. Bei passiv gekühlten Geräten ist man hingegen häufig auf eine verhältnismäßig symmetrische Aufteilung des PV-Generators angewiesen, was in der folgenden Grafik abzulesen ist.

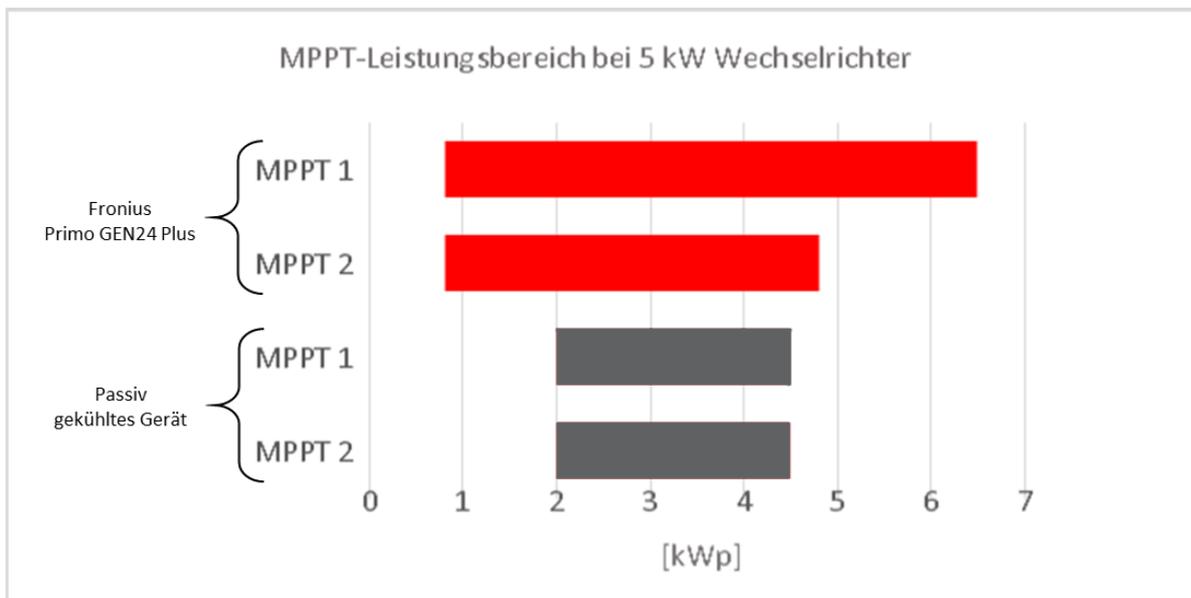


Abbildung 1: Gegenüberstellung der Leistungsverteilung der MPP-Tracker von passiv sowie aktiv gekühlten 5 kW Wechselrichtern

Zu erkennen ist, dass die Leistungsverteilung der MPP-Tracker bei aktiv gekühlten Geräten großzügiger gestaltet ist, als bei passiv gekühlten. Dies erklärt sich, da Wechselrichter mit passiver Kühlung der Leistungsklasse von z.B. 5 kW meist Maximalströme von nur 10 A bis 15 A erlauben.

Bezogen auf unsere Beispielanlage bedeutet das, dass bei passiv gekühlten Geräten die maximale asymmetrische Aufteilung mit 4,5 kW (MPPT1) und 2 kW (MPPT2) begrenzt ist, während beim aktiv gekühlten Fronius Wechselrichter eine asymmetrischere Aufteilung mit 5,7 kW (MPPT1) und 0,8 kW (MPPT2) realisiert werden kann.

Bei einem System mit einem Standardmodul von 285 Watt (Trina TSM-285), welches einen Strom von 8,97 A aufweist, können bei Fronius Wechselrichtern Stranglängen von 3 bis 22 Modulen auf Tracker 1 sowie 3 bis 20 Modulen auf Tracker 2 angeschlossen werden. Beim passiv gekühlten Gerät hingegen können an beiden Trackern gerade mal 7 bis 15 Module angeschlossen werden.

### 2.1.2 Flexibilität in der Montage

Bei passiv gekühlten Wechselrichtern muss eine möglichst ungehinderte Ein- und Ausströmung der Luft gegeben sein, was eine bestimmte Positionierung des Wechselrichters voraussetzt.

So dürfen Wechselrichter mit passivem Kühlsystem lediglich vertikal (90 °) montiert werden. Auch eine Installation Seite an Seite sowie übereinander ist nur eingeschränkt möglich, da sich sonst die Luft von Gerät zu Gerät erwärmt und dadurch der Kühleffekt stark reduziert wird. Von einer Positionierung des Wechselrichters an Orten mit direkter Sonneneinstrahlung ist ebenso abzuraten, da die Strahlungswärme das Gerät mit passivem Kühlsystem zusätzlich zur Umgebungstemperatur erhitzt.

Für Geräte mit aktivem Kühlsystem gibt es keine Einschränkungen bei der Montage. Die Wechselrichter können vertikal sowie horizontal (0 ° - 90 °) und sogar flach (auf einem Dach) montiert werden.



Abbildung 2: Flexible Befestigungsmöglichkeiten von aktiv gekühlten Fronius Wechselrichtern [Quelle: Fronius]

Mit einer intelligenten aktiven Luftführung ist es möglich, die Wechselrichter Seite an Seite zu montieren. Beispielsweise wird die kühle Luft von der Seite angesaugt und die erwärmte Luft nach oben abgeführt, wie in der nachfolgender Abbildung ersichtlich ist:

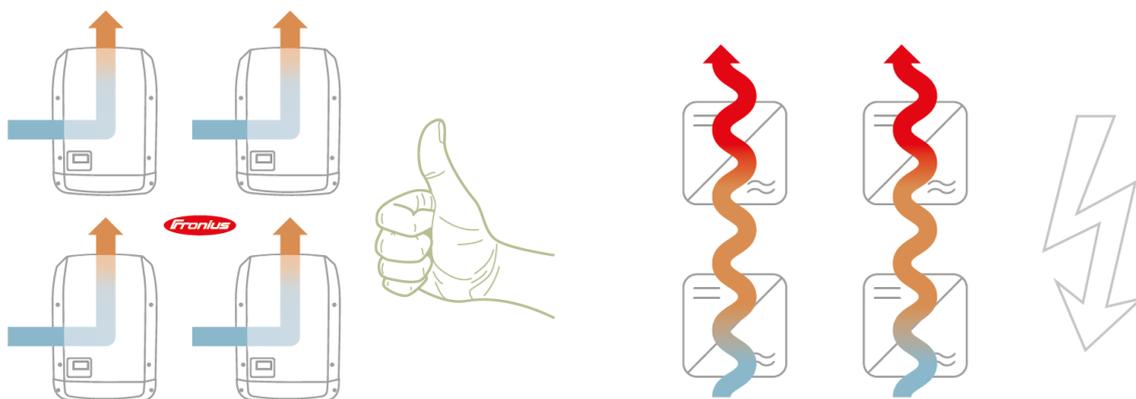


Abbildung 3: Flexible Montagemöglichkeit - Seite an Seite sowie übereinander aufgrund von intelligenter aktiver Luftführung [Quelle: Fronius]

Die geregelte Konvektion ermöglicht eine um ca. 5-fach erhöhte Wärmeabfuhr, im Vergleich zu passiver Konvektion, wodurch die Wechselrichter auch an Standorten mit höherer Sonneneinstrahlung platziert werden können.

### 3 WARTUNG

Wartung ist Bestandteil jeder Geräte-Instandhaltung, welche nach technischen Regeln oder einer Herstellervorschrift durchgeführt werden muss und sicherstellen soll, dass der funktionsfähige Zustand erhalten bleibt. Die Wartung wird im Allgemeinen in regelmäßigen Abständen, dem sogenannten Wartungsintervall, durchgeführt. Dies muss in der Regel von ausgebildetem Fachpersonal durchgeführt werden.

Wartungsfrei bedeutet, dass es keine vorgeschriebenen Wartungsintervalle gibt.

Bei passiven Kühlsystem müssen Staub- sowie Schmutzansammlungen nach vorgeschriebenen Wartungsintervallen entfernt werden. Werden diese vorgeschriebenen Wartungen nicht erfüllt, so hat das eine negative Auswirkung auf die Garantieleistung. Wie solche Vorgaben aussehen, kann nachstehender Wartungsliste eines Mitbewerbers entnommen werden (siehe nachfolgende Abbildung 4).

**Tabelle 8-1** Wartungsliste

Element	Prüfmethode	Wartungsintervall
Sauberkeit des Systems	Überprüfen Sie regelmäßig, ob die Kühlkörper frei von Partikeln und Staub sind.	Einmal alle sechs Monate bis einmal pro Jahr
Betriebsstatus des Systems	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stellen Sie sicher, dass der Wechselrichter nicht beschädigt oder verformt ist.</li> <li>• Überprüfen Sie, ob die Betriebsgeräusche des Wechselrichters normal klingen.</li> <li>• Wenn der Wechselrichter im Betrieb ist, stellen Sie sicher, dass alle Wechselrichterparameter korrekt eingestellt sind.</li> </ul>	Einmal alle sechs Monate
Kabelanschlüsse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überprüfen Sie, ob die Kabel fest angeschlossen sind.</li> <li>• Überprüfen Sie, ob die Kabel intakt sind, insbesondere ob die Teile, die metallische Oberflächen berühren, nicht zerkratzt sind.</li> <li>• Überprüfen Sie, ob die ungenutzten Ports „COM“, „USB“ und „AC OUTPUT“ mit wasserdichten Kappen verschlossen sind.</li> </ul>	Die erste Überprüfung muss sechs Monate nach der ersten Inbetriebnahme erfolgen. Führen Sie die Überprüfung danach einmal alle sechs Monate bis einmal pro Jahr durch.
Zuverlässigkeit der Erdung	Überprüfen Sie, ob die Erdungskabel fest angeschlossen sind.	Die erste Überprüfung muss sechs Monate nach der ersten Inbetriebnahme erfolgen. Führen Sie die Überprüfung danach einmal alle sechs Monate bis einmal pro Jahr durch.

Abbildung 4: Wartungsintervall [Quelle: HUAWEI Bedienungsanleitung Ausgabe 07, 2018-05-04]

Laut Wartungsliste dieses Herstellers müssen diverse Faktoren am Wechselrichter wie Sauberkeit der Kühlkörper, Betriebsstatus des Systems, Kabelanschlüsse sowie Erdungsanschluss bis zu zweimal jährlich aufgrund des wartungsintensiven passiven Kühlsystems überprüft werden. Dadurch entstehen hohe laufende Wartungskosten, speziell in Umgebungen mit hoher Staubbelastung.

Wird zusätzlich für die Reinigung der Kühlrippen des passiven Kühlsystems ein ausgebildetes Fachpersonal benötigt, was in der Regel der Fall ist, erhöhen sich wiederum diese laufenden Kosten (siehe nachfolgende Abbildung). Werden diese Wartungen nicht wie vorgeschrieben durch eine Fachkraft ausgeführt, so hat dies eine negative Auswirkung auf die Garantieleistung.

Ereignisnummer	Meldung, Ursache und Abhilfe
8003	<p><b>⚠ FACHKRAFT</b></p> <p><b>Wirkleistungsbegr. Temperatur</b> Der Wechselrichter hat seine Leistung aufgrund von zu hoher Temperatur für mehr als 10 Minuten reduziert.</p> <p><b>Abhilfe:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Die Kühlrippen an der Rückseite des Gehäuses und die Lüftungskanäle an der Oberseite mit einer weichen Bürste reinigen.</li><li>• Sicherstellen, dass der Wechselrichter ausreichend belüftet ist.</li><li>• Sicherstellen, dass die Umgebungstemperatur +40 °C nicht überschreitet.</li><li>• Sicherstellen, dass der Wechselrichter keiner direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist.</li></ul>

Abbildung 5: Vorgeschriebene Wartung durch Fachkraft [Quelle: SMA Bedienungsanleitung, SB30-50-1AV-40-BE-de-10]

### 3.1 Geringere Kosten durch aktive Kühlung

Ein Wechselrichter mit aktivem Kühlsystem ist hingegen in der Regel wartungsfrei, wodurch auffallend geringere laufende Kosten entstehen.

Bei Wechselrichtern mit aktivem Kühlsystem ist es dennoch ratsam eine regelmäßige Überprüfung der Luftwege durchzuführen. Speziell in Umgebungen mit hoher Staub- oder Schmutzbelastung empfiehlt es sich nach dieser Laufzeit jährliche Überprüfungen durchzuführen. Da es sich allerdings um keine vorgegebene Wartung handelt, ist hier auch kein ausgebildetes Fachpersonal nötig, was wiederum Kosten spart.

## 4 LEBENSDAUER

Die Zuverlässigkeit von Wechselrichtern wird oft mit MTBF-Werten (Mean Time Between Failures) angegeben - einem Erwartungswert der Betriebsdauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ausfällen. Dabei handelt es sich um eine mathematische Ermittlung auf Grundlage von Defektraten eines Bauteils, welche in Labortests oder bei kurzen Betriebszeiten ermittelt werden. Dabei wird beispielsweise vorausgesetzt, dass der Wechselrichter unter vorgegebenen Betriebsbedingungen (z.B. 4.000 Betriebsstunden pro Jahr auf 10 Jahre) genutzt wird. Diese ermittelten Werte weichen allerdings meist deutlich von realen Fehlerquoten ab.

Eine höhere Aussagekraft hat die sogenannte FIT (Failure in Time) Rate, welche aber nur über eine längere Betriebsdauer (z.B. > 10 Jahre) ermittelt werden kann. Fronius ist bereits seit mehr als 25 Jahren in der Wechselrichterbranche tätig und kann deshalb auf FIT-Raten zurückgreifen (siehe Kapitel 4.1.1).

Die Lebensdauer von elektronischen Bauteilen ist jedoch stark temperaturabhängig. Je heißer diese Komponenten werden, desto geringer ist die zu erwartende Lebensdauer bzw. desto höher ist die Ausfallwahrscheinlichkeit.

Eine häufig zitierte Faustregel für die Zuverlässigkeit von Kondensatoren in der Elektronik ist, dass sich bei **jedem 10° C Temperaturanstieg die Lebensdauer ungefähr halbiert** (siehe Texas Instruments [1]).

Die nachstehende Abbildung 5 zeigt die Fehlerrate je nach Betriebszeit in Abhängigkeit der Temperatur am Beispiel eines elektronischen Halbleiters.

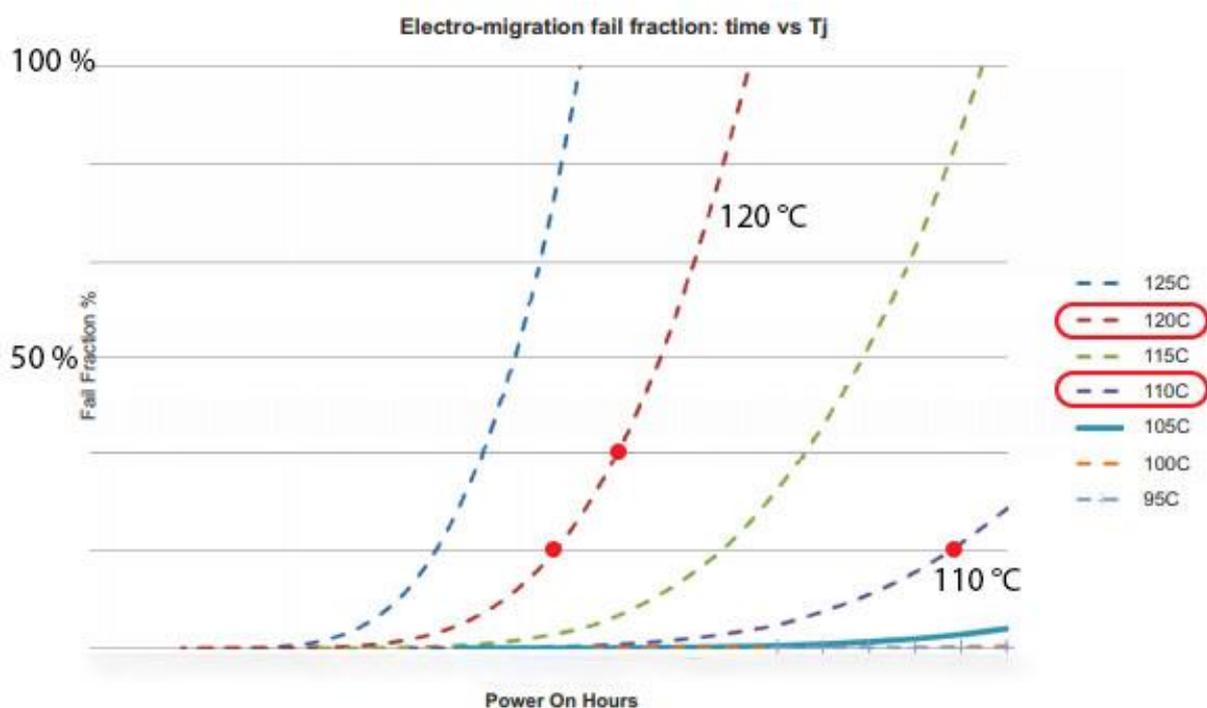


Abbildung 6: Fehlerrate in Abhängigkeit von Temperatur und Betriebszeit [Quelle: Texas Instruments [1]]

Man erkennt deutlich, dass bei extremen Temperaturen über einen längeren Zeitraum die Fehlerrate äußerst stark ansteigt und somit die Lebensdauer enorm reduziert wird. Betrachtet man z.B. den Temperaturanstieg von 110 °C auf 120 °C, so erkennt man, dass sich die Lebensdauer halbiert.

## 4.1 Längere Lebensdauer durch aktive Kühlung

Bei einer aktiven Kühlung werden die elektronischen Komponenten einer geringeren Temperatur ausgesetzt und dadurch weniger belastet, was wiederum zu einer längeren Lebensdauer führt.

Bei Wechselrichtern mit passiver Kühlung kann es zu lokalen Hotspots mit erfahrungsgemäß höheren Temperaturen kommen, wodurch die Lebensdauer reduziert wird.

Um ein Überhitzen elektronischer Bauteile zu verhindern, wird vom Wechselrichter eine gesteuerte Reduzierung der Leistung, das sogenannte „Derating“, durchgeführt. Bei passiv gekühlten Geräten startet dieses Leistungsderating früher als bei aktiv gekühlten Geräten, was unweigerlich zu Ertragsverlusten führt (siehe Kapitel 5).

### 4.1.1 Lebensdauer eines Lüfters

Bei aktiv gekühlten Wechselrichtern ist der Kühleffekt stärker. Begründet wird dies durch den Einsatz von Lüftern.

Bei passiv gekühlten Wechselrichtern werden Strömungsgeschwindigkeiten bis circa 1 m/s, abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Körper und Umgebung sowie von der Länge des Kühlkörpers, erreicht. Im Vergleich erreicht man bei aktiv gekühlten Wechselrichtern, durch die erhöhte Konvektion aufgrund des Lüfters, circa 5 m/s, also die 5-fache Wärmeabführung. Dadurch können die Bauteile schneller gekühlt werden und dies erhöht wiederum die Lebensdauer der elektronischen Komponenten.

Die bei Fronius für die aktive Kühlung eingesetzten Lüfter sind für eine Lebensdauer von mindestens 20 Jahren ausgelegt, was durch folgende Datenquellen unterstützt wird:

- / Lieferantendaten: Lebensdauerangaben von > 80.000 h gelten für den Betrieb bei Nennspannung. Die Lüfter werden jedoch meist bei reduzierter Spannung (geringerer Drehzahl) betrieben, wodurch sich die Lebensdauer erhöht.
- / Bauteil- und Systemlebensdauer tests: Bei Fronius wurden Geräte-Dauerbelastungstests mit über 15.000 Laborstunden durchgeführt, was in der Praxis über 20 Jahre Kundenbetrieb bedeutet. (In der Elektronikindustrie wird jedoch meist nur bis zu 1.000 h getestet.)
- / Fronius Garantiedaten: Der Wechselrichter Fronius IG [Plus] (mit bis zu 6 verbauten Lüftern) ist seit über 10 Jahren im Feld. Die Ausfälle der Lüfter liegen in Summe bei < 0,1 % aller verkauften Geräte. Umgerechnet bedeutet dies eine Bauteilzuverlässigkeit von < 10 FIT (failure in time). Dies entspricht ca. < 1 % der gesamten FIT aller Bauteile, was ein äußerst guter Wert ist.

In der nachfolgenden Abbildung 7 sind reale Betriebsdaten von zwei stark temperaturbelasteten Geräten über den Zeitraum eines Jahres dargestellt. Die Betriebsstunden des Lüfters sind nach 5 Umgebungstemperaturklassen in 10 °C Schritten eingeteilt (20-30 °C, 30-40 °C, 40-50 °C, 50-60 °C und 60-70 °C).

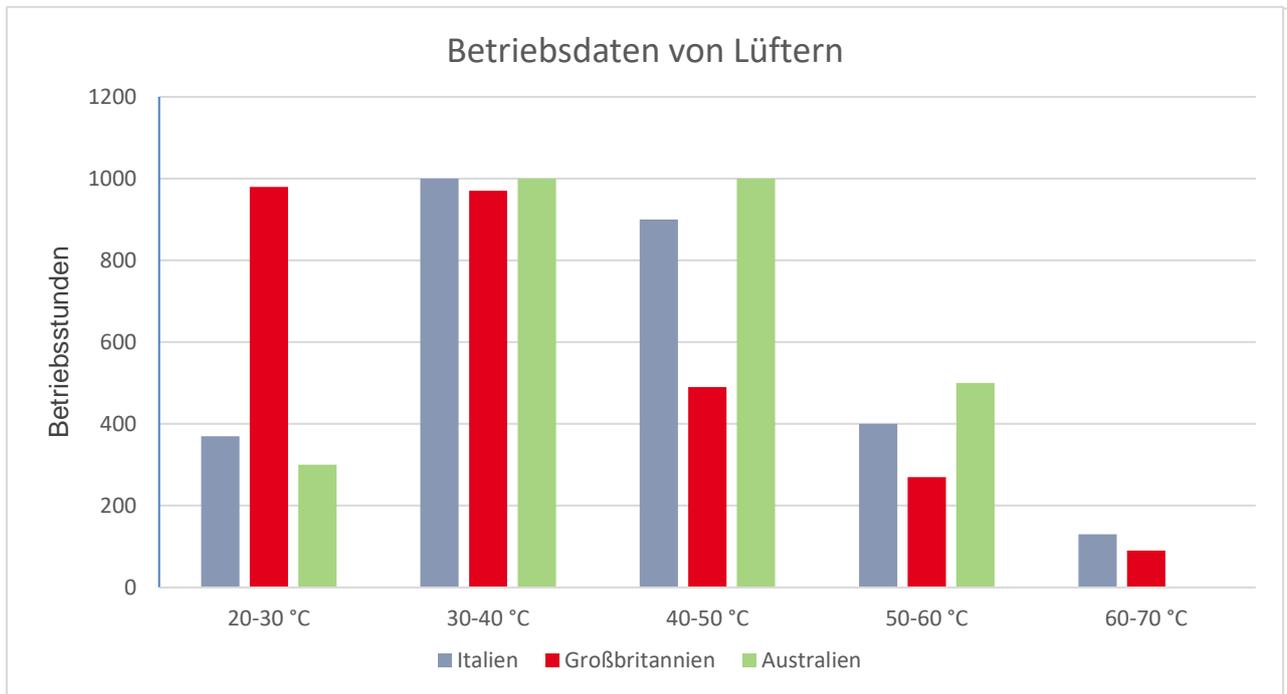


Abbildung 7: Jahres-Betriebsdaten von Lüftern aktiv gekühlter Geräte in Australien, Italien und Großbritannien [Quelle: Fronius]

Die drehzahlgeregelten Lüfter in Fronius Geräten sind durch das aktive Kühlsystem so konzipiert, dass diese **erst ab einer Umgebungstemperatur von 60 °C auf voller Drehzahl** laufen. Dieser Betriebspunkt kommt – wie in der Grafik ersichtlich – in der Praxis jedoch nur wenige Stunden pro Jahr vor. Die restliche Betriebszeit im Jahr läuft der Lüfter mit einer geringeren Drehzahl.

Auffällig ist zudem, dass in Australien die Lüfter über das Jahr nie auf voller Drehzahl laufen. Eine Überprüfung von weit mehr als 350 Anlagen hat gezeigt, dass sich in besonders heißen Gegenden, wie etwa in Australien, die PV-Leistung aufgrund der heißen Module so reduziert, dass dadurch der Wechselrichter und damit auch der Lüfter nicht auf voller Leistung laufen. Somit können Lüfter von Wechselrichtern, die in nördlicheren Gegenden platziert sind, insgesamt über das Jahr eine höhere Drehzahl aufweisen.

In der Praxis werden daher ohne Problem deutlich mehr Betriebsstunden erreicht, als die Herstellerangaben von z.B. 80.000 h, welche bei konstant voller Drehzahl ermittelt wurden.

## 5 ERTRAG

Wenn ein Wechselrichter hohen Temperaturen ausgesetzt ist, wird die Ausgangsleistung reduziert (= Derating), um ein Überhitzen der elektronischen Bauteile zu vermeiden. Dies wirkt sich allerdings – wie bereits eingangs erwähnt - negativ auf den Ertrag aus.

Wechselrichter mit aktiver Kühlung haben ein vorteilhafteres Deratingverhalten in höheren Temperaturbereichen. Sie beginnen erst bei höheren Umgebungstemperaturen ihre Leistung zu reduzieren, da der Kühleffekt um ein Vielfaches stärker ist, als bei passiv gekühlten Wechselrichtern.

Wechselrichter mit passiver Kühlung arbeiten schon bei niedrigeren Umgebungstemperaturen im Derating-Modus und sind daher für warmes Klima weniger gut geeignet, da mit zum Teil beträchtlichen Ertragseinbußen zu rechnen ist (siehe Kapitel 5.1.1).

### 5.1 Mehr Ertrag durch aktive Kühlung

Die Wechselrichter mit aktivem Kühlsystem können länger bei ungedrosselter Leistung betrieben werden und erzielen somit höhere Erträge. Dies kann man in der nachfolgenden Abbildung gut erkennen. Hier ist ein Fronius Wechselrichter mit aktivem Kühlsystem einem Wechselrichter mit passiven Kühlsystem, bei unterschiedlichen Spannungen, gegenübergestellt.

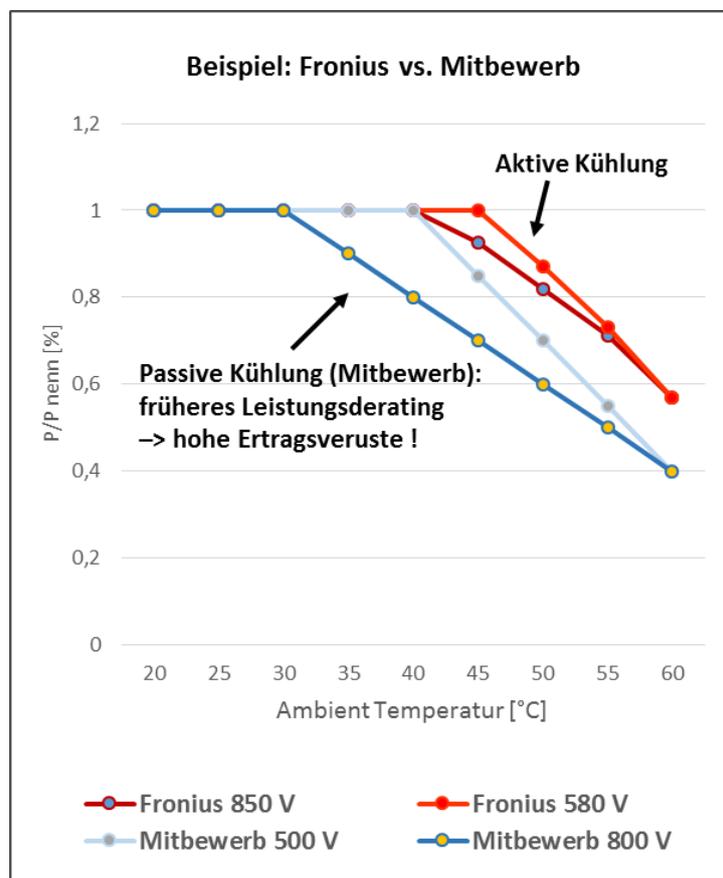


Abbildung 8: Leistungsreduzierung in Bezug auf die Umgebungstemperatur [Quelle: Datenblatt Mitbewerb]

Wie in der Grafik leicht zu erkennen ist, schaltet der passiv gekühlte Wechselrichter (800 Volt) bereits bei Umgebungstemperaturen von **30 °C** in ein Leistungsderating, was zu hohen Ertragsverlusten führen kann. Der aktiv gekühlte Fronius Wechselrichter (850 Volt) beginnt sein Leistungsderating hingegen erst ab 40 °C. Bei dieser Umgebungstemperatur läuft vergleichsweise das passiv gekühlte Gerät bereits **nur noch mit 80 % der Leistung!**

### 5.1.1 Auswirkungen am Beispiel einer Referenzanlage

Die Auswirkungen von einem frühen Leistungsderatings bei passiv gekühlten Geräten werden nachfolgend anhand einer in Australien installierten Anlage analysiert.

Bei diesem Referenz-System handelt es sich um eine Anlage in Australien (99.84kWp DC / 90kW AC) mit aktiv gekühlten Fronius Wechselrichtern. In der nachfolgenden Abbildung sind eine Tagesproduktionskurve der AC-Leistung sowie der Verlauf der Umgebungstemperatur dargestellt. In der australischen Beispielanlage treten Umgebungstemperaturen von bis zu 50 °C auf.

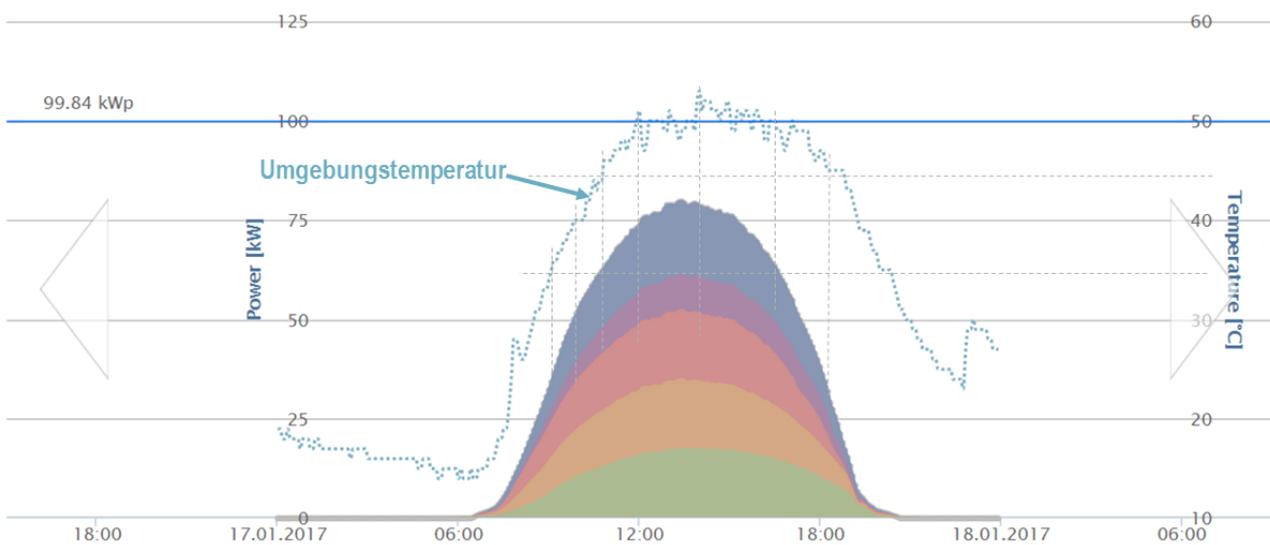


Abbildung 9: Tagesertragskurve und Umgebungstemperaturverlauf  
 [Quelle: Referenzanlage in Australien (99.84kWp DC / 90kW AC), Fronius [3] ]

Bei diesen Temperaturbedingungen kann mit aktiv gekühlten Fronius Wechselrichtern ein Ertrag von 647 kWh erzielt werden, welcher in der nachfolgenden Grafik als schraffierte Fläche unterhalb der schwarzen Kurve dargestellt ist:

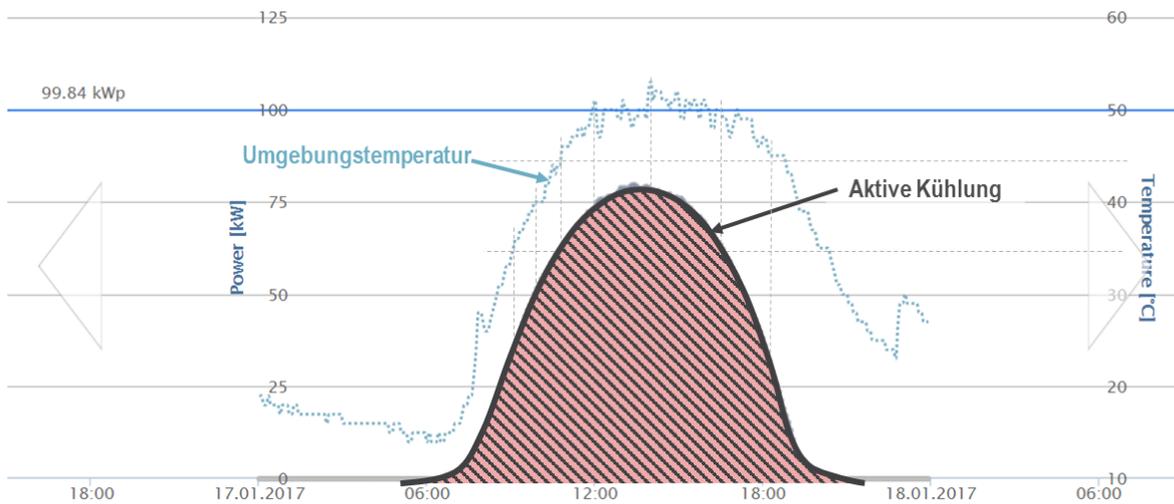


Abbildung 10: Ertrag mit aktiver Kühlung [Quelle: Referenzanlage in Australien, Fronius [3] ]

Um einen Vergleich zu passiv gekühlten Geräten unter selbigen Bedingungen herzustellen, wurde das im vorherigen Kapitel gemessene Deratingverhalten eines Wettbewerbsgerätes auf diese Anlage übertragen.

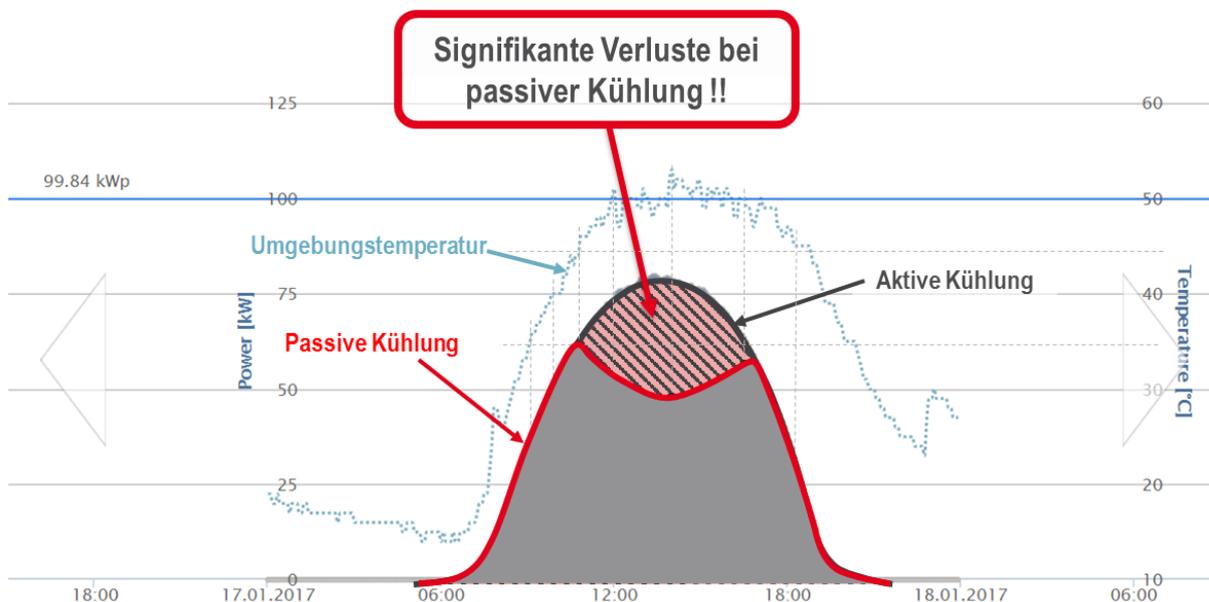


Abbildung 11: Zu erwartender Ertrag bzw. Verlust mit passiver Kühlung [Quelle: Referenzanlage in Australien, Fronius [3] ]

In Abbildung 10 ist der zu erwartende Ertrag dargestellt, wenn dieses System mit passiver Kühlung realisiert wäre. Unter der Annahme, dass ab einer Temperatur von ca. 35 °C das Leistungsderating startet, könnte lediglich ein Ertrag von 551 kWh erzielt werden.

Die berechneten Verluste mit passiver Kühlung lägen bei 96 kWh (schraffierte Fläche) – das entspricht einem **Ertragsverlust von 15 %**.

## 6 THERMISCHER VERGLEICH

Das Kühlsystem eines Wechselrichters ist besonders für die elektronischen Bauteile im Inneren des Gerätes essentiell. Wird es im Inneren des Gerätes zu heiß, kann dies schädliche Folgen für einzelne Komponenten haben, was wiederum Einfluss auf die Lebensdauer und den Gesamtertrag hat.

Um den Einfluss von passiver sowie aktiver Kühltechnologie gegenüberzustellen, wurden Temperatur-Vergleichsmessungen von passiv gekühlten Fremdwechselrichtern und aktiv gekühlten Fronius Wechselrichtern durchgeführt. Nachfolgend werden die Ergebnisse verglichen.

### 6.1 Verhalten von passiv gekühlten Geräten

In der nachfolgenden Abbildung ist die Temperaturverteilung mittels Wärmebildkamera im Innenraum eines passiv gekühlten Gerätes, bei einer Umgebungstemperatur von 55 °C, dargestellt. Unter diesen Bedingungen hat eine elektronische Komponente im Innenraum des passiv gekühlten Gerätes bereits eine Temperatur von 113 °C. Die maximal zulässige Bauteiltemperatur laut Herstellerangabe liegt jedoch bei 110 °C.

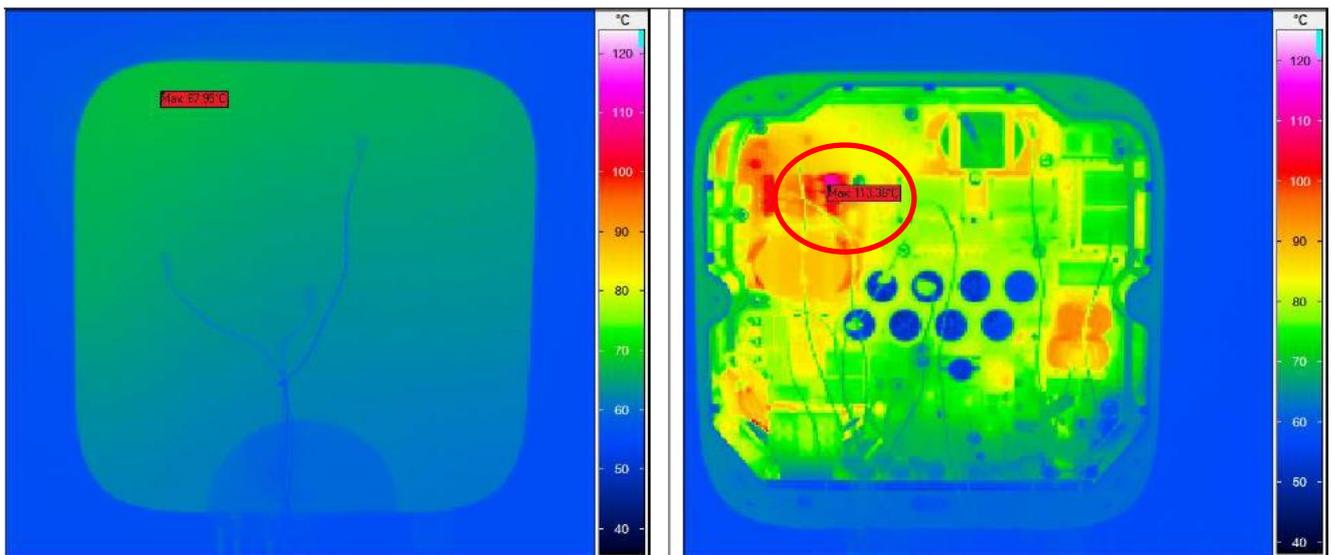


Abbildung 12: Wärmeverteilung im Inneren eines passiv gekühlten Wechselrichters bei 55 °C Umgebungstemperatur (PAC=5 kW, Umpp=260 V) [Quelle: Fronius]

Bei einem passiv gekühlten Wechselrichter eines anderen Herstellers mit der gleichen Leistungsklasse wurde bereits bei 35-45 °C Umgebungstemperatur (je nach DC-Spannung) eine Temperatur von 112 °C am elektronischen Bauteil gemessen, was in der nachfolgenden Abbildung 12 ersichtlich ist.

Bei diesem Gerät ist zwar ein Innenlüfter verbaut, dieser ist aber zu gering dimensioniert, da zwischen dem oberen und dem unteren Bereich des Fremdwechselrichters Temperaturdifferenzen von bis zu 40 °C im Inneren des Gehäuses auftreten. Dadurch entsteht die Gefahr, dass sich lokale Hotspots bilden, welche sich negativ auf die Lebensdauer des Wechselrichters auswirken können.

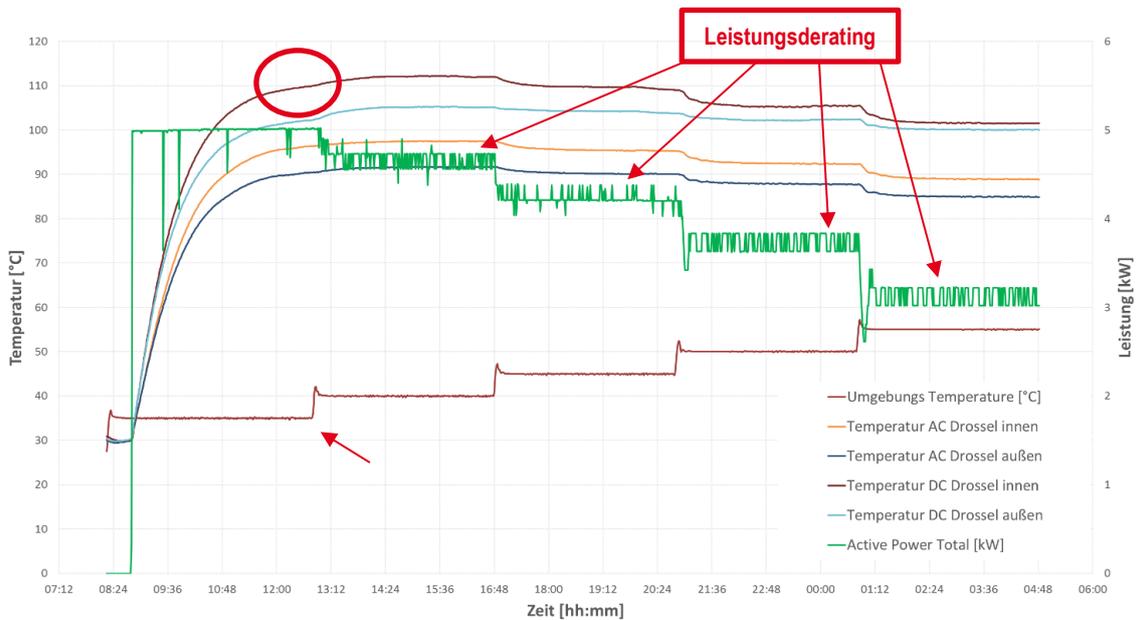


Abbildung 13: Temperatur- und Leistungsverlauf eines passiv gekühlten Wechselrichters (PAC = 5 kW,  $U_{mpp,min}=175\text{ V}$ )  
 [Quelle: Messungen Fronius]

In der Grafik ist ersichtlich, dass bereits ab Umgebungstemperaturen von 35 °C das Leistungsderating startet. Dadurch kann, bei 55 °C Umgebungstemperatur, die Temperatur des Bauteils (DC Drossel) auf 106 °C gesenkt werden. Die Leistung beträgt jedoch an dieser Stelle nur noch 60 % der Nennleistung (siehe grüne Kurve des Leistungsverlaufs in Abbildung 12).

Durchgeführte thermische Messungen haben ergeben, dass je nach DC-Spannung bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen das Leistungsderating unterschiedlich früh startet:

- / 35-40°C (175 V DC)
- / 45-50°C (365 V DC)
- / 45-50°C (500 V DC)

Die Messergebnisse decken sich mit den Herstellerangaben:

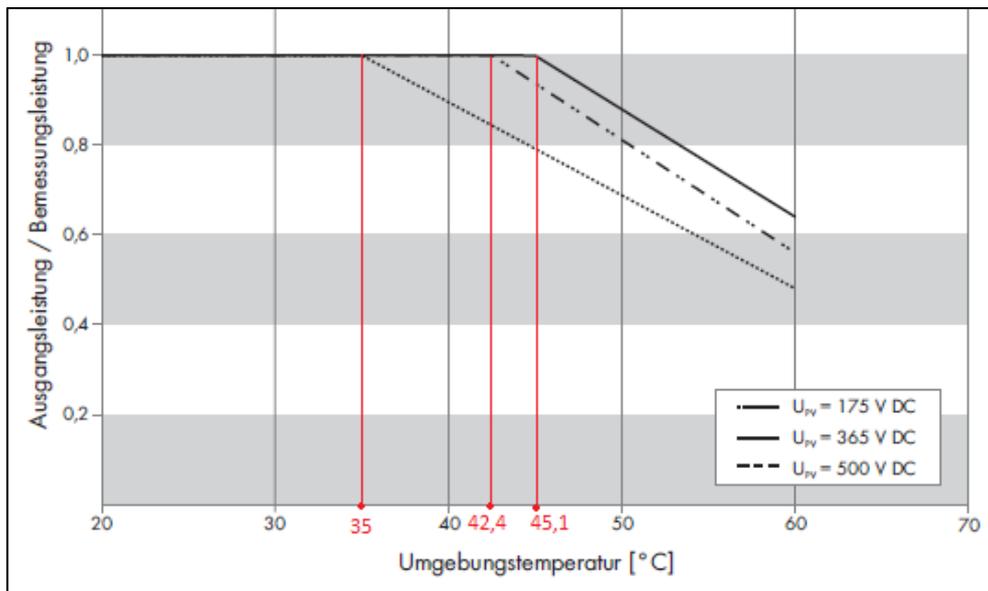


Abbildung 14: Leistungsderating abhängig von der Umgebungstemperatur bei PAC,nom = 5 kW [Quelle: Datenblatt Mitbewerb]

## 6.2 Verhalten von aktiv gekühlten Geräten

Bei einem aktiven gekühlten Fronius Wechselrichter der gleichen Leistungsklasse wie die passiv gekühlten Geräte wurde ebenfalls eine Bauteiltemperatur-Messung, bei einer Umgebungstemperatur von bis zu 55 °C, durchgeführt. Bei den aktiv gekühlten Geräten liegt die Bauteiltemperatur bei maximal 94 °C also um -19 °C niedriger und damit auch deutlich unter der maximal zulässigen Bauteiltemperatur von 110 °C (DC Drossel).

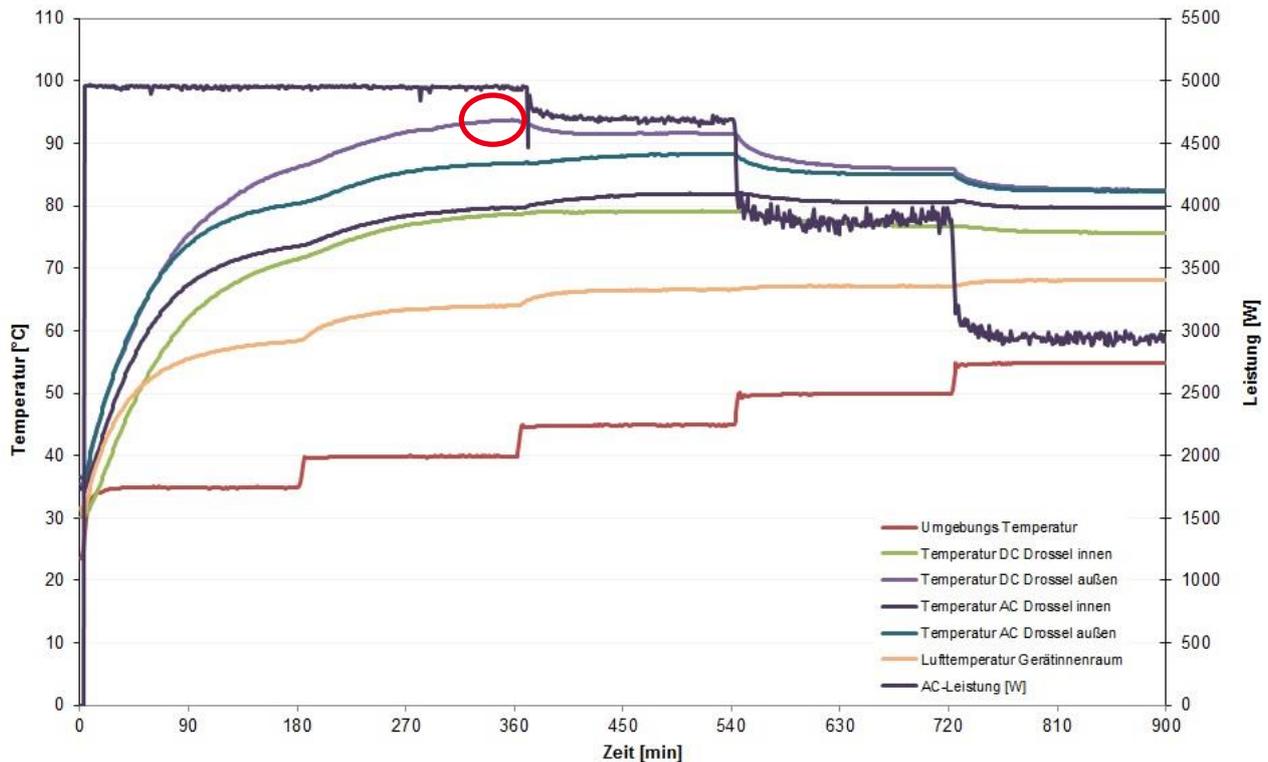


Abbildung 15: Temperatur- und Leistungsverlauf eines aktiv gekühlten Fronius-Wechselrichters (PAC = 5 kW, Umpp,=220 V)  
[Quelle: Messungen Fronius]

Wie man in der Grafik erkennen kann, befindet sich der Fronius Wechselrichter bei 55 °C zwar ebenfalls im Leistungsderating, der passiv gekühlte Wechselrichter verliert jedoch, aufgrund den höheren Bauteiltemperaturen, exzeptionell an Lebensdauer. Wie in Kapitel 4 erläutert, bedeutet in diesem Bereich ein Temperaturanstieg von 10 °C eine Reduzierung der Lebensdauer um 50 %.

# 7 ASPEKTE BEIDER KÜHLSYSTEME

## 7.1 Aspekte der aktiven Kühltechnologie (Active Cooling)

### 7.1.1 Geräusentwicklung

Im Vergleich zu passiv gekühlten Geräten weisen aktiv gekühlte Wechselrichter eine höhere Anzahl an Lüftern im Gerät auf, was zu einer höheren Geräusentwicklung führen kann. Feldmessungen von realen Anlagen ergeben, dass die Lüfter von aktiven Kühltechnologien selbst bei hohen Umgebungstemperaturen ca. 10 % der gesamten Betriebszeit auf voller Drehleistung laufen (siehe Kapitel 4.1.1).

Diese Lüfter im Inneren des aktiv gekühlten Wechselrichters weisen jedoch Vorteile auf, die im folgenden Kapitel erläutert werden.

### 7.1.2 Geringere Kosten über die gesamte Produktlebenszeit

Bei Wechselrichtern mit aktiver Kühltechnologie ist – wie im Kapitel 3 näher ausgeführt - gewöhnlich keine Wartung notwendig. Die OPEX (= operational expenditures) werden dadurch niedrig gehalten. Wechselrichter mit passivem Kühlsystem weisen hingegen hohe Wartungskosten auf. Vor allem in Umgebungen mit hoher Staubbelastung sind vermehrt 6-monatige Wartungsintervalle nötig. Die laufenden Kosten bei Systemen mit passiver Kühlung sind demnach deutlich höher als bei Geräten mit aktiver Kühlung.

### 7.1.3 Mehr Komfort durch geringes Gewicht

Wechselrichter mit aktiver Kühltechnologie sind grundsätzlich leichter als jene mit passiver Kühlung, da für passive Kühlkonzepte große und schwere Kühlkörper benötigt werden. Die Kühlung bei aktiv gekühlten Geräten wird durch einen Lüfter unterstützt. Somit ist lediglich ein kleiner und deutlich leichterer Kühlkörper nötig. Aktiv gekühlte Wechselrichter können dadurch einfacher und flexibler transportiert sowie montiert werden.

### 7.1.4 Längere Lebensdauer

Wie sich bei den Temperatur-Vergleichsmessungen gezeigt hat, sind hohe Temperaturen vor allem für sensible elektronische Komponenten im Wechselrichter kritisch. Je heißer diese werden, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit für Ausfälle. Bereits ein Temperaturanstieg von 10 Grad Celsius halbiert die Lebenszeit der Leistungselektronik. Da bei Fronius durch aktive Kühlung die Bauteile durch Lüfter gekühlt werden, ist ihre Temperatur niedriger als bei Geräten mit passiver Kühltechnologie. Fronius Wechselrichter haben dadurch eine höhere Lebensdauer.

### 7.1.5 Höhere Flexibilität im Systemdesign

Aktive gekühlte Wechselrichter weisen eine höhere Flexibilität auf, wenn es um das Thema Anlagenauslegung geht. So können deutlich asymmetrischere Anlagendesigns realisiert werden als bei passiv gekühlten Wechselrichtern. Außerdem sind Geräte mit aktiver Kühltechnologie auch ausgesprochen flexibel bei der

.....

Montage. Sie können vertikal sowie horizontal montiert werden. Auch Montagewinkel von 0° bis 90° sind möglich. Geräte mit passiver Kühlung dürfen hingegen ausschließlich vertikal an einer Wand montiert werden.

### **7.1.6 Mehr Ertrag**

Um ein Überhitzen elektronischer Bauteile zu verhindern, wird vom Wechselrichter ein gesteuertes Leistungs-Derating durchgeführt. Dieses Verhalten der Inverter mit aktiver Kühlung zeigt enorme Vorteile gegenüber Geräten mit passiven Kühlungssystemen. Aufgrund der deutlich kühleren Temperatur im Gehäuse weisen Fronius Wechselrichter ein optimiertes Deratingverhalten auf. Dies hat einen direkten Einfluss auf den Ertrag. Vor allem in wärmeren Regionen liefern Geräte mit aktiver Kühltechnologie deutlich höhere Erträge und reduzieren die Amortisationszeit der Investition.

## **7.2 Aspekte der passiven Kühltechnologie**

### **7.2.1 Geräusentwicklung**

Wechselrichter mit passiver Kühltechnologie besitzen meist keine Lüfter, weshalb sie eine geringere Geräusentwicklung aufweisen.

### **7.2.2 Wirkungsgrad**

Bei passiv gekühlten Wechselrichtern müssen meist weniger Lüfter versorgt werden. Diese haben dadurch zum Teil einen geringfügig höheren Wirkungsgrad. Dieser positive Effekt wird allerdings bei hohen Temperaturen durch ein Leistungsderating relativiert (siehe Kapitel 5).

## 8 WEITERENTWICKLUNG VON AKTIVER KÜHLUNG

Fronius ist bereits seit über 25 Jahren Innovationstreiber in dieser Branche und kann auf viele Erfahrungswerte und Forschungsergebnisse aus dem eigenen Hause zurückgreifen. Das aktive Kühlsystem hat sich seit Jahren bei Fronius Wechselrichtern bewährt.

Ziel ist es, stets die höchstmögliche Systemeffizienz sicherzustellen, denn ein Kernwert von Fronius ist Zukunftssicherheit. Zukunftssicherheit steht für Energielösungen, die während ihrer gesamten Nutzungsdauer so flexibel und verlässlich sind, dass sie auch in einer sich verändernden Energieumwelt bestehen können. Über die Jahre ist es Fronius gelungen das aktive Kühlsystem immer weiter zu optimieren und an neue Marktbedingungen anpassen. Dies ist der Grund, warum Fronius auch in Zukunft auf diese Technologie setzt und zuverlässige, wirtschaftliche und nachhaltige Energielösungen mit aktiver Kühlung entwickelt – für heute, morgen und übermorgen.

Heutzutage versuchen Ingenieure fortschrittliche elektronische Geräte von kleinster Größe und geringem Volumen, aber höchster Leistungsdichte zu entwickeln, um Produktionskosten und Energie zu reduzieren sowie die einfache Handhabung zu erhöhen. Diese Anforderung ist eine große Herausforderung für die Kühlsysteme der elektronischen Bauteile.

### 8.1 Fronius GEN24 [Plus]

Bei der Entwicklung der Fronius GEN24 [Plus] Geräte bestand das Schlüsselement darin, ein flaches, aber sehr effizientes System aus einem Kühlkörper und einem Lüfter zu konzipieren, um die leistungselektronischen Komponenten zu kühlen. Herzstück des Kühlkonzeptes ist ein individuell gestaltetes Lüftergehäuse, das in eine Aussparung eines Aluminium-Druckguss-Kühlkörpers mit speziell angeordneten Kühlrippen integriert ist (siehe nachstehende Abbildung).

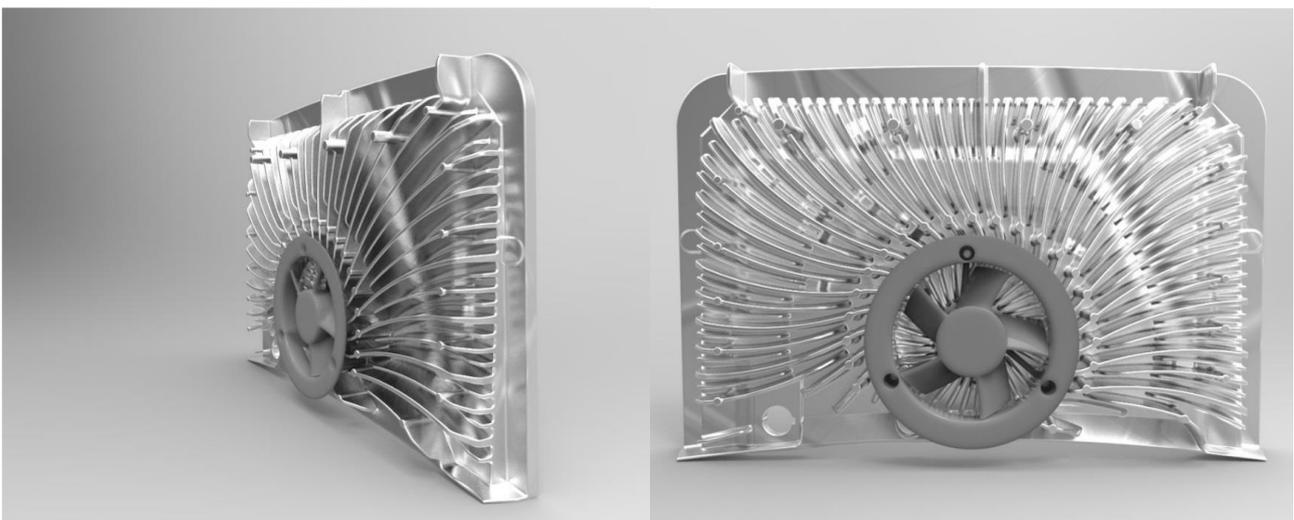


Abbildung 16: Innovatives Kühlsystem Fronius GEN24 [Plus] [Quelle: Fronius]

Dieses Gehäuse ist in der Lage strömungstechnisch ideale Druckverhältnisse zu schaffen. So kann ein optimales Ansaugen der Umgebungsluft sowie Durchströmung und Durchbiegung des Luftstroms ermöglicht werden, was eine effektive Kühlwirkung zur Folge hat. Durch dieses innovative Lüftergehäuse können Wechselrichter mit deutlich reduzierter Gehäusetiefe hergestellt werden.

## 8.2 Strömungsverhalten im Kühlkörper des Fronius GEN24 [Plus]

Durch großen Entwicklungsaufwand konnte das aktive Kühlsystem so optimiert werden, dass es einen noch besseren und effizienteren Kühleffekt bietet als in der Vergangenheit.

Verglichen mit dem Standardventilator ( $0,6 \text{ m}^3 / \text{min}$ ) können nun  $250 \%$  ( $1,5 \text{ m}^3 / \text{min}$ ) an Luftvolumen durch das System geleitet werden. Durch den hohen Luftvolumenstrom ist es möglich, selbst bei hohen Umgebungstemperaturen, die Wärme effizient und schnell von den elektronischen Bauteilen über die Kühlrippen abzuführen. So entsteht eine sehr homogene Temperaturverteilung am Kühlkörper (siehe Abbildung 16).

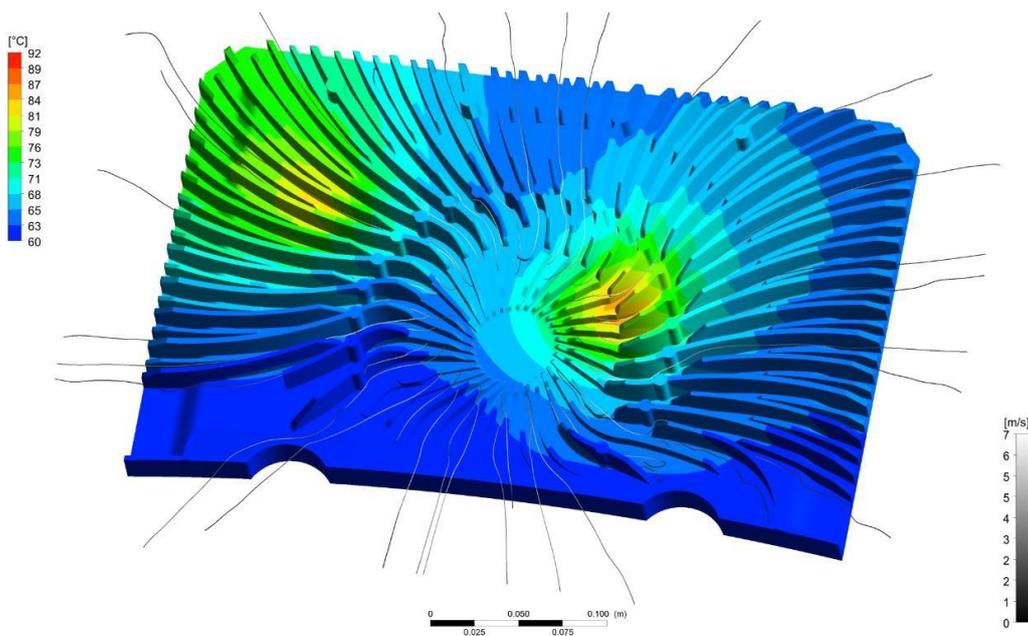


Abbildung 17: CFD-Strömungssimulation – rasche Abführung von Wärme über die Kühlrippen [Quelle: Fronius]

Durch das strömungsoptimierte Konzept ist eine um  $20 \%$  geringere Lüfterleistung nötig. Dies bedeutet, dass für das gleiche Ausmaß an Kühlung ein kleinerer Lüfter als bei herkömmlich aktiv gekühlten Geräten ausreicht. Daraus ergibt sich eine bessere Temperaturverteilung sowie eine geringere Geräuscentwicklung. Zusätzlich kommen dem Gerät dadurch ein geringes Gewicht und eine niedrige Einbautiefe zu Gute.

### 8.2.1 Beitrag zur effektiven Energieerzeugung

Große Gehäusekonzepte sind kostenintensiv in der Produktion sowie für den Kunden schwierig zu handhaben. Darüber hinaus müssen die Standorte, an denen Wechselrichter installiert werden, mehr Platz am Montageort bieten. Die hier beschriebene System-Miniaturisierung führt zu kostengünstigen, einfachen Photovoltaik-Wechselrichter mit weniger Komponenten. Da auch direkte Sonneneinstrahlung auf das Gerät möglich ist, müssen keine zusätzlichen Vorkehrungen zur Hitze-Abschirmung des Wechselrichters getroffen werden. Es sind keine zusätzlichen Verschattungsdächer oder beschatteten Vorrichtungen erforderlich, was wiederum Ressourcen schont und die Investitionskosten des Kunden deutlich reduziert.

Aufgrund des geringeren Stromverbrauchs des Lüfters trägt dieses optimierte Kühlsystem auch zu einer effektiven Energieerzeugung bei. Dank der verbesserten Kühlleistung treten wesentlich geringere Temperaturen im Innenraum des Gerätes auf, was die Lebensdauer von Leistungselektronik und Gerät erhöht sowie einen nachhaltigen Beitrag zum Umweltschutz liefert. Da die meisten Funktionalitäten des Wechselrichters in der Aluminiumgießform enthalten sind, werden darüber hinaus keine weiteren Kunststoff- und Eisenbauteile benötigt. Diese Innovation hilft daher auch Ressourcen zu schonen.

## 9 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Dokument wurden die aktive und die passive Kühltechnologie von Wechselrichtern gegenübergestellt. Zahlreiche Tests und auch Literaturnachweise zeigen deutlich die Vorteile der aktiven Kühltechnologie.

Durch den erzwungenen Luftstrom bei aktiv gekühlten Systemen wird die Temperatur im Wechselrichter optimal gesteuert und somit eine längere Lebensdauer realisiert.

Aktiv gekühlte Geräte weisen bereits bei der Planung einen Vorteil hinsichtlich der Auslegung sowie der Art der Platzierung auf. Zusätzlich sind Geräte mit aktivem Kühlsystem aufgrund ihres geringeren Gewichtes leichter zu installieren und zu transportieren, was Zeit, Aufwand und somit Geld spart. Außerdem fallen weniger Kosten durch geringeren bis gar keinen Wartungsaufwand an. Vor allem aber sind es der Mehrertrag durch bessere Performance sowie die längere Lebensdauer der Leistungselektronik, die für ein aktives Kühlsystem in einem Wechselrichter sprechen.

## 10 LITERATURVERWEISE

- [1] „Calculating Useful Lifetimes of Embedded Processors”, Application Report SPRABX4A–November 2014–Revised October 2017, Texas Instruments - <http://www.ti.com/lit/an/sprabx4a/sprabx4a.pdf>
- [2] “The Effect of Temperature on The Life of Power Electronic Devices”, CTM magnetics - <http://www.ctmmagnetics.com/the-effect-of-temperature-on-the-life-of-power-electronic-devices/>
- [3] PV system Robinvale - <https://www.solarweb.com/Home/GuestLogOn?pvSystemid=92147e5f-d215-4d8c-8737-a528007d3e2c>