

# ***Zuverlässigkeit von Enphase Mikro- Wechselrichtern***

## Inhalt

<b>Einführung</b> .....	<b>3</b>
<b>Ausfallrate</b> .....	<b>3</b>
<b>Frühe Ausfälle</b> .....	<b>3</b>
<b>Abnutzung</b> .....	<b>4</b>
<b>Schätzung der Abnutzung</b> .....	<b>4</b>
<b>Erster Test</b> .....	<b>5</b>
<b>Zweiter Test</b> .....	<b>5</b>
<b>Mittlere Zeit zwischen Ausfällen (MTBF)</b> .....	<b>6</b>
<b>Verfügbarkeit des Systems</b> .....	<b>7</b>
<b>Enphase Mikro-Wechselrichter haben eine hohe MTBF</b> .....	<b>7</b>
<b>Komponenten</b> .....	<b>7</b>
<b>Thermischer Fußabdruck</b> .....	<b>7</b>
<b>Bewertung des Gehäuses</b> .....	<b>7</b>
<b>Vergossen</b> .....	<b>8</b>
<b>Schlussfolgerung</b> .....	<b>8</b>
<b>Geschichte der Revision</b> .....	<b>9</b>

## Einführung

Die aktuelle Generation von Enphase-Mikrowechselrichtern hat eine mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen (MTBF) von über 600 Jahren für die IQ-Plattform. Das Konzept der MTBF wird oft mit der erwarteten Nutzungsdauer einer Komponente verwechselt. Dieses Dokument beschreibt die MTBF in Bezug auf die Produktlebensdauer, die frühe Ausfallrate, die Abnutzung und die Standards und Techniken, die zur Schätzung dieser Ausfälle verwendet werden.

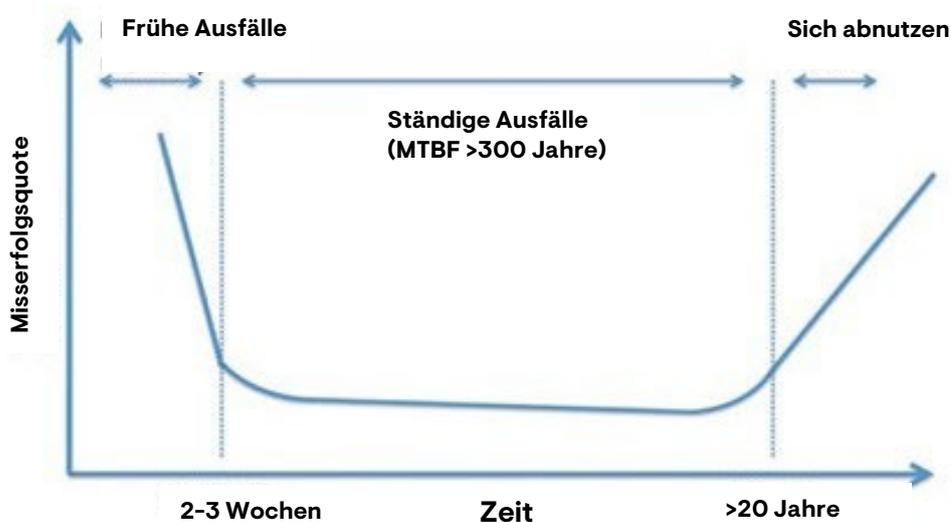
## Ausfallrate

Jedes Produkt, das in großen Stückzahlen eingesetzt wird, weist über seine Lebensdauer eine charakteristische Ausfallrate auf, die der folgenden Grafik ähnelt. Diese Kurve wird aufgrund ihrer charakteristischen Form als Badewannenkurve bezeichnet.

Die Kurve lässt sich je nach Art der Ausfälle in drei verschiedene Segmente unterteilen:

- Frühe Ausfälle
- Konstante (zufällige) Ausfälle
- Abnutzung

Auch der Enphase-Mikrowechselrichter weist diese typische Ausfallkurve auf.



## Frühe Ausfälle

Dieser Bereich der Kurve steht für die Qualität des Herstellungsprozesses, und diese Fehler treten in der Regel sehr bald nach der Installation auf. Die Dauer dieses Zeitraums, in dem es zu frühen Ausfällen kommt, wird durch die Analyse von Felddaten ermittelt. Im Fall des Enphase-Mikrowechselrichters kommt es zu frühen Ausfällen in der Regel innerhalb von zwei bis drei Wochen nach der Installation.

Um sicherzustellen, dass die frühe Ausfallrate minimiert wird, wird jeder Mikrowechselrichter von Enphase während der Herstellung umfangreichen Tests unterzogen, einschließlich

visueller optischer Inspektionen, In-Circuit-Tests, Funktionstests und Systemtests. Enphase hat kundenspezifische Teststationen entwickelt, um jeden Mikrowechselrichter einem strengen Fertigungsteststandard zu unterziehen.

Enphase analysiert jeden Fehler im Feld und wendet schnelle Korrekturmaßnahmen in einem bereits streng kontrollierten Qualitätsprozess an. Auf diese Weise wird die frühe Ausfallrate kontinuierlich verbessert.



FT-D (manuelle Einrichtung)



FT-D (manuelle Einrichtung)



GT-C und Toaster

## Abnutzung

Der Abnutzungsmechanismus bestimmt die Nutzungsdauer eines Produkts. Die Abnutzung führt zu einer steigenden Ausfallrate am Ende der Nutzungsdauer eines Produkts. Daher wird die Lebensdauer des Produkts durch die Höhe der Feldausfälle bestimmt, die für den Benutzer und Betreiber des Produkts unangenehm werden.

## Schätzung der Abnutzung

Der Mikro-Wechselrichter von Enphase ist für eine Lebensdauer von über 25 Jahren ausgelegt. Das Abnutzungssegment der Kurve stellt die Langlebigkeit der Konstruktion und der Komponentenauswahl des Produkts für die vorgesehene Betriebsumgebung dar. Es gibt verschiedene Methoden zur Bestimmung des Beginns der Abnutzung eines Produkts.

- Die gebräuchlichste Methode ist die Beobachtung des Versagens früherer Generationen ähnlicher Produkte über den interessierenden Zeitraum und die Verwendung der Versagensdaten zur Modellierung der Versagensmechanismen des neuen Produkts.

Dies ist bei völlig neuen Produkten mit langer Lebensdauer, wie z. B. den Enphase-Mikro-Wechselrichtern mit einer Lebensdauer von mehr als 25 Jahren, nicht praktikabel.

- Die zweite Methode besteht darin, das neue Design einer theoretischen Studie zu unterziehen, indem die Abnutzung der einzelnen Komponenten auf der

Grundlage der von den Komponentenherstellern bereitgestellten Daten bewertet wird.

- Die dritte und praktischste Methode besteht darin, das neue Produkt einem beschleunigten Lebenszyklustest (ALT) zu unterziehen, bei dem die gesamte Lebensdauer des Produkts in einem extrem kurzen Zeitraum simuliert wird.

Enphase verwendet die ALT-Methode, um die Abnutzung abzuschätzen. Eine der verwendeten Techniken besteht darin, die Enphase-Mikrowechselrichter einer Reihe von extrem belastenden Umwelttests zu unterziehen, wie sie in der als IEC61215 bekannten Prüfnorm vorgeschrieben sind. Diese Prüfnorm wird von den Herstellern von Solarmodulen verwendet, um die Abnutzungsdauer der Module zu bestimmen. Zwei Schlüsseltests wurden, wie erwähnt, über 110 Tage durchgeführt.

Bei diesen Tests werden die Mikro-Wechselrichter mit Nennleistung betrieben. Die Geräte werden AC/DC-Leistungszyklen unter Umgebungsstressbedingungen unterzogen. Eine Warnung ist, dass solche ALT-Tests nicht die Auswirkungen von UV-Strahlen auf das Gerät simulieren. Die Auswirkungen der UV-Strahlung auf den Mikro-Wechselrichter sind nicht signifikant, da das Produkt unter dem Modul installiert ist und die verwendete Verkabelung UV-geschützt ist. Alle neuen Enphase-Designs werden diesen IEC61215-Tests unterzogen, um ihre Abnutzung abzuschätzen.

## Erster Test

Der erste Test, ein Temperatur- und Feuchtigkeitstest, wird über 1500 Stunden (ca. 62 Tage) durchgeführt, bei dem die Mikrowechselrichter einer Temperatur von 85°C und 85% relativer Luftfeuchtigkeit ausgesetzt sind. Die Mikrowechselrichter werden unter diesen Umgebungsbedingungen betrieben, und ihre Leistung wird während dieses Tests vor Ort überwacht.

## Zweiter Test

Der zweite Test, der so genannte thermische Zyklustest, umfasst 600 Zyklen, bei denen die Mikrowechselrichter thermischen Umgebungsbedingungen von 85°C/85% relativer Luftfeuchtigkeit bis -40°C ausgesetzt werden. Die Mikrowechselrichter werden unter diesen Umgebungsbedingungen betrieben, und ihre Leistung wird während dieses Tests vor Ort überwacht. Dieser Test dauert etwa 75 Tage.

## Mittlere Zeit zwischen Ausfällen (MTBF)

MTBF ist kein Hinweis auf die tatsächliche Lebensdauer eines Produkts, sondern ein Hinweis auf die statistische Wahrscheinlichkeit, dass ein Gerät unter bestimmten Betriebs- und Umweltbedingungen während des durch die MTBF definierten Zeitraums ausfällt.

Die MTBF bezieht sich auf die Ausfallrate im Bereich des konstanten Ausfallsegments der Badewannenkurve zwischen den Segmenten der frühen Ausfälle und Abnutzung. Dieses Segment der Kurve stellt die Zuverlässigkeit des Designs für die gewählte Betriebsumgebung dar. Die MTBF-Bewertung für Enphase-Mikrowechselrichter wurde theoretisch nach den Richtlinien des *Telcordia* SR332-Standards durchgeführt. Dieser Standard wird zur Bestimmung der MTBF für Telekommunikationsgeräte angewendet, die in Außenumgebungen eingesetzt werden, die denen ähneln, in denen der Enphase-Wechselrichter installiert ist.

Wie die Badewannenkurve zeigt, ist die frühe Ausfallrate bei einer überlebenden Einheit keine Garantie dafür, dass alle eingesetzten Einheiten bis zum Beginn der Abnutzung durchhalten werden. Wie die Kurve zeigt, wird es bis zum Einsetzen der Abnutzung weiterhin eine niedrige Ausfallrate geben.

Dies sind zufällige statistische Ausfälle. Je größer die MTBF-Zahl ist, desto weniger Ausfälle sind auf zufällige Ereignisse zurückzuführen. Enphase Energy hat diese zufälligen Ausfälle durch das Verpackungsdesign, das Wärmemanagement und die Integration der Halbleitertechnologie in das Design des Mikrowechselrichters minimiert.

Das Konzept der MTBF wird oft mit der erwarteten Nutzungsdauer einer Komponente verwechselt, aber diese Konzepte sind nicht dasselbe. Eine Batterie kann zum Beispiel eine Nutzungsdauer von vier Stunden und eine MTBF von 100.000 Stunden haben. Diese Zahlen bedeuten, dass bei einer Population von 100.000 Batterien während ihrer vierstündigen Lebensdauer etwa jede Stunde ein Batterieausfall auftritt.<sup>1</sup>

Die MTBF-Bewertung des Enphase-Mikrowechselrichters von mehr als 600 Jahren ist im Kontext der MTBF-Bewertungen für andere gängige Geräte und Solaranlagen zu sehen:

Gerät	MTBF
Traditioneller Zentral- oder String-Wechselrichter	10–15 Jahre
Festplattenlaufwerk in einem PC	57 Jahre
Enphase Mikro-Wechselrichter	600 Jahre
Sonnenkollektor/Modul	>600 Jahre
Festkörperspeicher (in Computern verwendet)	800–1000 Jahre

Die MTBF von Enphase-Mikrowechselrichtern ist mit der von Solarmodulen vergleichbar. Ein angesehenes Unternehmen für Zuverlässigkeitstechnik, das die Zuverlässigkeit für Unternehmen wie Boeing und das US-Militär testet, hat festgestellt, dass die MTBF des Enphase-Mikrowechselrichters mehr als 300 Jahre beträgt.

<sup>1</sup>Grundlagen der Hochverfügbarkeit - Sun Microsystems, Inc

## Verfügbarkeit des Systems

Mit dem Enphase-Mikrowechselrichtersystem wird der Ausfall eines einzelnen Moduls vermieden, der beim Einsatz eines Zentral- oder String-Wechselrichters auftritt. Da alle PV-Module und die zugehörigen Mikrowechselrichter parallel geschaltet sind und jedes dieser Paare als unabhängiger Energieerzeuger fungiert, hat der Ausfall eines einzelnen Moduls oder Mikrowechselrichters keine Auswirkungen auf die Leistung der übrigen Module. Zwar gibt es in jeder Anlage mehr Wechselrichter als bei einem einzelnen Zentral- oder String Wechselrichter, aber die hohe MTBF jedes einzelnen Mikrowechselrichters in Verbindung mit der Parallelschaltung gewährleistet eine sehr hohe Anlagenverfügbarkeit. In großen kommerziellen Anlagen wird durch Simulationen gezeigt, dass eine Systemverfügbarkeit von mehr als 99,8 Prozent erreicht werden kann, verglichen mit 95 bis 97 Prozent bei einem Zentral- oder String Wechselrichter.

## Enphase Mikro-Wechselrichter haben eine hohe MTBF

Die verteilte Architektur des Enphase Mikro-Wechselrichtersystems bildet die Grundlage für verschiedene Konstruktionsmerkmale, die eine hohe Zuverlässigkeit ermöglichen:

### Komponenten

Im Gegensatz zu herkömmlichen Wechselrichtern, die viele Kilowatt Leistung bei sehr hohen DC-Eingangsspannungen verarbeiten, verarbeiten Enphase-Mikrowechselrichter geringe Leistungsmengen bei niedrigen DC-Eingangsspannungen und reduzieren so die Belastung der Komponenten. Darüber hinaus ermöglicht die Verarbeitung geringer Strommengen einen hohen Grad an Halbleiterintegration, wodurch die Anzahl der Komponenten drastisch reduziert wird. Halbleiterkomponenten haben eine extrem hohe Zuverlässigkeit.

### Thermischer Fußabdruck

Die Mikrowechselrichter von Enphase verarbeiten nur einen kleinen Teil der Leistung des gesamten PV-Generators. Der interne Temperaturanstieg für einen einzelnen Mikro-Wechselrichter ist relativ gering. Diese Verringerung der thermischen Zyklen und die passive Kühlung anstelle eines Lüfters reduzieren die Belastung der Komponenten erheblich.

### Bewertung des Gehäuses

Der Mikrowechselrichter von Enphase entspricht der Norm NEMA 6. Die Prüfung für NEMA 6 besteht darin, dass das Gerät unter einen Meter Wasser getaucht wird und 24 Stunden lang funktionieren muss. Herkömmliche Wechselrichter entsprechen in der Regel der Norm NEMA 3R, die das Eindringen von Staub, Außenluft, Wasser und möglicherweise Insekten zulässt (d. h. bei der Montage auf einer Unterlage. Transformatoren sind nach NEMA 3R eingestuft). Eine NEMA 6-Einstufung gewährleistet, dass das Gerät hermetisch gegen Umwelteinflüsse abgedichtet ist.

## Vergossen

Der Enphase M190 Microinverter ist vergossen. Das bedeutet, dass die innere Kammer des Gehäuses mit einer Vergussmasse gefüllt ist. Dies verlängert die Lebensdauer des Geräts durch verbesserte Wärmeableitung und Schutz der Komponenten.

Die wichtige Messgröße ist die Überprüfung der theoretischen Vorhersagen mit den Ausfallraten im Feld. Enphase-Mikrowechselrichter können ihre Leistungsdaten an die Enphase-Server übermitteln. Enphase überwacht diese Leistung kontinuierlich und nutzt sie, um die Ausfallraten im Feld mit den theoretischen Vorhersagen zu bestätigen.

## Schlussfolgerung

In Anbetracht der negativen Auswirkungen der historisch hohen Ausfallraten von Wechselrichtern auf Installateure und Kunden in der Solarbranche hat Enphase eine neue Mikro-Wechselrichtertechnologie entwickelt, die sich durch eine beispiellose Zuverlässigkeit auszeichnet. Enphase betrachtete die MTBF als eine der wichtigsten Messgrößen für die Vorhersage der Zuverlässigkeit. Enphase implementierte Testmethoden, die in der Telekommunikationsindustrie verwendet werden (die einige der höchsten Verfügbarkeitsstandards der Welt hat) und investierte viel in die Entwicklung spezieller Testgeräte, um diese besonders strengen Standards zu unterstützen.

Das Ergebnis dieser Konzentration auf die Zuverlässigkeit ist eine Wechselrichtertechnologie, die eine Verbesserung der MTBF um eine Größenordnung im Vergleich zur bestehenden Wechselrichtertechnologie aufweist. Diese Verbesserung wurde durch die Integration der Halbleitertechnologie, die Kontrolle der Umwelteinflüsse auf die Komponenten und das präzise Management der thermischen Elemente ermöglicht. Enphase konzentriert sich weiterhin auf die Verbesserung der Zuverlässigkeit mit jeder nachfolgenden Wechselrichtergeneration, um eine MTBF von 600 Jahren zu erreichen, vergleichbar mit PV-Modulen.

## Geschichte der Revision

Revision	Datum	Beschreibung
TEB-00098-1.0	Dezember 2023	Erste Veröffentlichung.