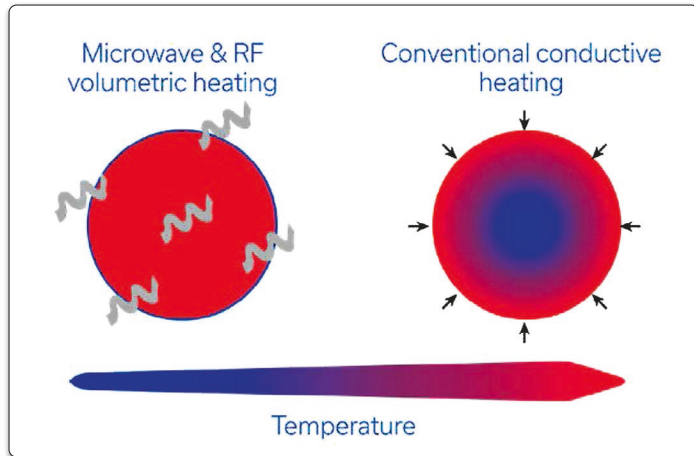


# Schlüsselfertige Solid-State-Verstärker für ISM- und Mikrowellen-Energie

Während herkömmliche Hochfrequenz- und Mikrowellenanwendungen hauptsächlich auf drahtlose Kommunikation oder Navigation ausgerichtet sind, haben die jüngsten Fortschritte in der Gerätetechnologie eine Reihe von spannenden Anwendungen für Hochfrequenz- und Mikrowellenenergie eröffnet, die nicht der Kommunikation oder Navigation dienen.



**Volumetrische HF- und Mikrowellen-Erwärmung im Vergleich zur konventionellen Erwärmung durch Konduktion oder Konvektion**

Die dielektrische Erwärmung, die auch als elektronische Erwärmung, Hochfrequenzerwärmung oder Mikrowellenenergie bezeichnet wird, ist der Prozess, bei dem elektromagnetische Wechselwellen ein dielektrisches Material erwärmen. Während herkömmliche Erwärmungsmethoden wie Konduktion oder Konvektion die Wärme auf die Oberfläche des Materials übertragen, erwärmt die HF- und Mikrowellen-Erwärmung die Molekularstruktur volumetrisch, also im gesamten Material auf einmal.

## Beeinflussung von Materialien

Die Nutzung von Hochfrequenz- und Mikrowellenenergie zur Beeinflussung von Materialien ist kein neues Konzept. Aber die Magnetronröhre, die im Mikrowellenherd zur Erzeugung von Hochleistungs-HF- und Mikrowellensignalen verwendet wird, hat inhärente Beschränkungen, die ihre Nützlichkeit auf rudimentäre, recht grobe Anwendungen begrenzen. Die Realisierung von Hochfrequenz- und Mikrowellenenergie durch Halbleitertechnologien hat eine noch nie dagewesene Kontrolle über Frequenz und Leistung für empfindlichere Anwendungen ermöglicht. Dank dieser neuen Präzision kann das System in Echtzeit und auf intelligente, vom Benutzer festgelegte Weise auf Änderungen der Lastbedingungen reagieren.

Derzeitige HF- und Mikrowellen-Energieanwendungen konzentrieren sich vor allem auf die ISM-Frequenzbänder (Industrie, Wissenschaft und Medizin), wie in Tabelle 1 dargestellt.

Die offene Nutzung der ISM-Bänder für viele Systeme, die nicht der Kommunikation dienen, ermöglicht eine Vielzahl von Anwendungen von Hochfrequenz- und Mikrowellenenergie, von denen einige bereits Halbleiterlösungen zur Erwärmung von Materialien einsetzen.

## Weitere neue Anwendungen sind:

- Pasteurisierung und andere Lebensmittelverarbeitung
- Gefriertrocknung mithilfe von Mikrowellen
- Schweißen und Materialverarbeitung
- mikrowellenunterstützte Chemie: Proteinanalyse, Zellerwärmung usw.
- Plasmaerzeugung für die Halbleiterherstellung, RF-angeregter Laser, Plasmabeleuchtung und Oberflächenbehandlung
- Teilchenbeschleuniger: Elektronen bzw. Röntgenstrahlen
- medizinisch: MRI, Diathermie
- Züchten von synthetischen Diamanten
- verschiedene Anwendungen zur Sterilisation und Desinfektion

Dies sind nur einige der Bereiche, in denen Hochfrequenz- und Mikrowellenenergie eingesetzt wird. Es gibt jedoch

noch viele andere und das endgültige Potenzial dieser Technologie wird gerade erst erforscht.

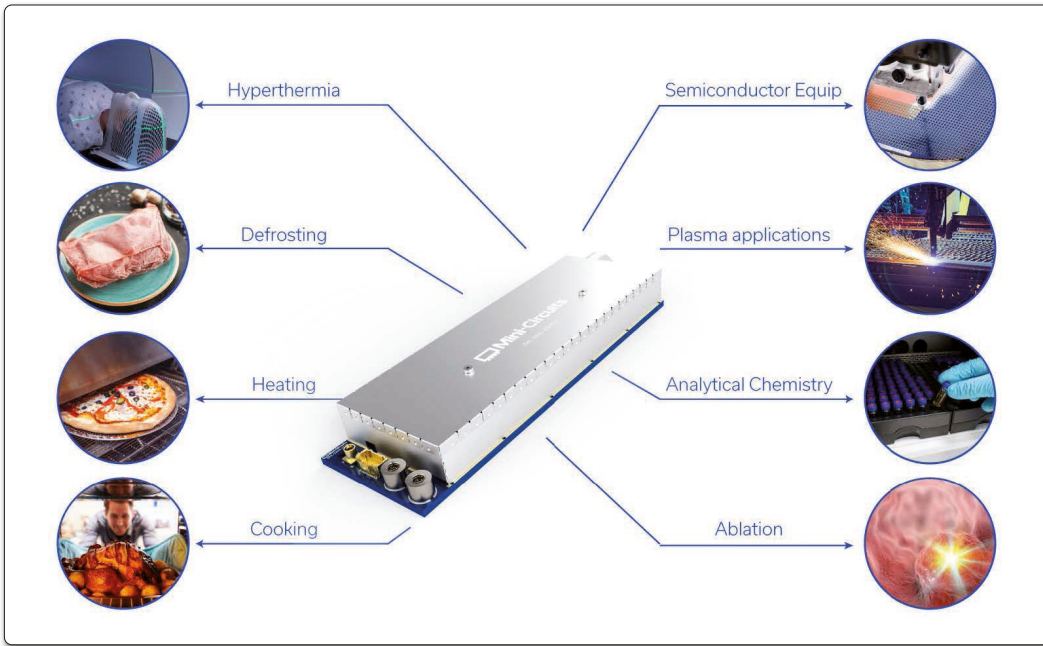
## Aktuelle Technologien für HF- und Mikrowellenenergie: Vergleich von Magnetronen mit Halbleitern

Bis vor kurzem wurden Anwendungen für Hochfrequenz- und Mikrowellenenergie hauptsächlich mit Magnetron-Generatoren und -Röhren bewerkstelligt. Diese Lösungen nutzen Hochfrequenz- und Mikrowellenenergie, um ein dielektrisches Material zu erwärmen, aber es handelt sich dabei um Brute-Force-Lösungen mit begrenzter Kontrolle. Das Magnetron ist zwar für einige Anwendungen praktisch, hat aber viele unerwünschte Eigenschaften. Die HF-Leistung von verschiedenen Magnetronen demonstriert das relativ verrauschte Frequenzspektrum dieser Technologie, und die Ausgangsfrequenz variiert naturgemäß, wenn die HF-Leistung erhöht wird. Für den Betrieb ist eine Vorspannung in der Größenordnung von einigen kV erforderlich, die von großen Stromquellen geliefert werden muss. Magnetrone haben nur sehr begrenzte Kontrollmöglichkeiten und können nicht einfach abgeschaltet und neu gestartet werden.

Frequency	Wavelength
27,1 MHz ± 0,2%	11,06 m
433,9 MHz ± 0,2%	69,14 cm
915 MHz ± 13 MHz	32,75 cm
2450 MHz ± 50 MHz	12,24 cm
5800 MHz ± 75 MHz	5,17 cm

**Tabelle 1: Frequenzen der ISM Bänder**

Autor:  
 Mark Murphy  
 Global Market Manager for  
 RF & Microwave Energy,  
 Mini-Circuits  
 www.mini-circuits.com  
 municom Vertriebs GmbH  
 www.municom.de



## Typische Anwendungen von HF- und MW-Energie

Im Vergleich dazu kann eine Halbleiter-Leistungsverstärkerlösung gesteuert und auf eine feste, stabile Frequenz und eine genau einstellbare Ausgangsleistung abgestimmt werden, so dass die HF- und Mikrowellene-Energie genau dort konzentriert wird, wo sie benötigt wird. Zu den weiteren Vorteilen gehört eine effizientere Leistungsabgabe an die Last, da sich das System ständig in Echtzeit an die Frequenz anpasst. Halbleiterverstärker haben einen kleinen Formfaktor und können durch ihre Modularität kaskadiert werden, um eine höhere Ausgangsleistung zu erzeugen. Während Magnetronen nur über begrenzte Kontrollmechanismen verfügen, können Halbleiterverstärker durch eine Rückkopplungsregelung, auf die wir weiter unten näher eingehen, leicht abgeschaltet werden.

## Betriebsdauer und Betriebskosten

Halbleitertechnologien haben im Vergleich zu anderen Technologien, einschließlich der erwähnten Magnetronen, von Natur aus eine längere mittlere Betriebsdauer bis zum Ausfall (MTTF). So liegt die Lebensdauer eines Magnetrons für industrielle Anwendungen in der Größenordnung von

einem Jahr, was bedeutet, dass das Bauteil relativ häufig ersetzt werden muss. Die Lebensdauer eines Halbleiterverstärkers liegt dagegen in der Größenordnung von 15 Jahren. Der Ersatz alter Magnetronen durch Halbleiterverstärker ist daher also sowohl aus Kosten- als auch aus Zuverlässigkeitsgesichtspunkten eindeutig von Vorteil.

## Rückkopplung und Steuerung

Wie bereits erwähnt, können Leistungspegel und Frequenzspek-

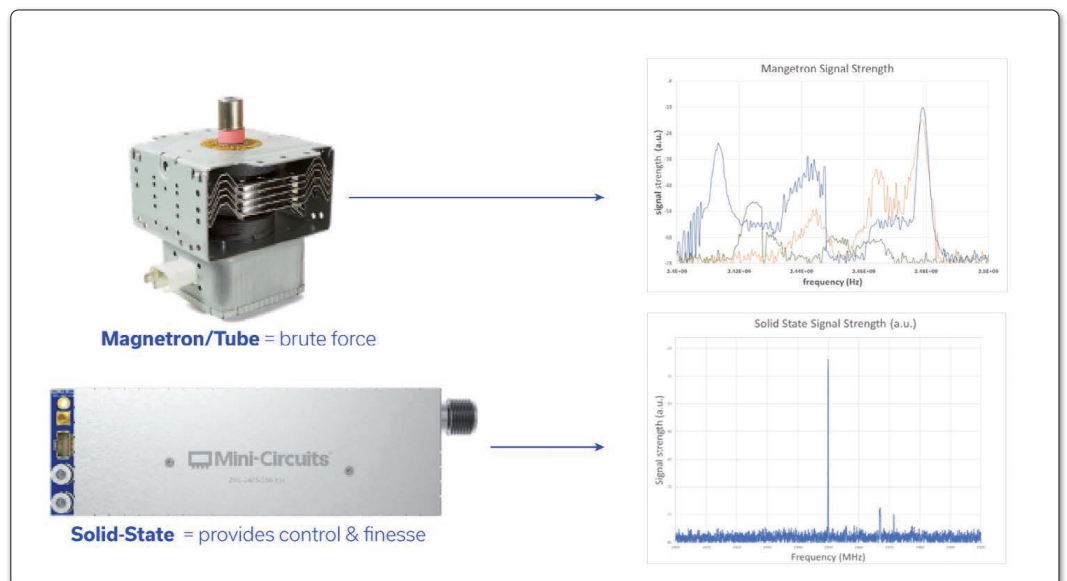
trum eines Magnetrons nur sehr schwer, bzw. in den allermeisten Fällen gar nicht gesteuert werden. Bei Halbleiterverstärkern können jedoch bekannte Techniken genutzt werden, um beide Parameter präzise zu steuern. Diese Fähigkeit gehört zu den größten Vorteilen der in Halbleitern erzeugten Hochfrequenz- und Mikrowellenenergie.

Etwa ein Halbleiter-Leistungsverstärker beheizt zwei Seiten eines Hohlraums und verfügt über eine Rückkopplungs-

schleife vom Verstärkerausgang zum HF-Synthesizer. Die Messung des vorwärts gerichteten und des reflektierten Signals zum und vom Hohlraum und die Verwendung dieser Messungen zur automatischen Anpassung der Frequenz und der Leistung der Quelle ermöglichen eine optimal effiziente Energiezufuhr zum Ziel. Diese Technik unterstützt CW- und gepulste Leistung, ermöglicht es dem Verstärker, die Leistung in Echtzeit an Veränderungen im dielektrischen Material anzupassen, und erlaubt eine schnelle automatische Abschaltung als Reaktion auf potenziell gefährliche Bedingungen.

## Die Lücke für eine schlüsselfertige Solid-State-Leistungsverstärkerlösung füllen

Die Vorteile von Solid-State-Lösungen gegenüber Magnetronen liegen klar auf der Hand, und viele Kunden sind bereits dabei, den Übergang zu vollziehen, aber es gibt noch einige Herausforderungen für eine breitere Vermarktung. Einige Kunden haben es auf sich genommen, ihre eigenen Halbleiterverstärkermodule zu entwerfen und herzustellen, was umfangreiche Designkenntnisse, Entwicklungszeit und Investitionen erfordert. Selbst für diejenigen, die über die entsprechenden



Vergleich des Frequenzgangs von drei verschiedenen Magnetronen (oben) mit einem Halbleiterverstärker (unten)

Merkmal	Magnetron	Halbleiter
Frequenzsteuerung	Nein	Ja
Begrenzte Steuerung der Ausgangsleistung	begrenzt	Ja, 0...100%
Automatische Abschaltung	Nein	Ja
Spannungsversorgung	kV-Bereich	30...35 V
Systemgröße	groß und schwer	klein und leicht
Betriebsdauer	1...1,5 Jahre	10...15 Jahre
Phasenkontrolle	kompliziert	einfach

**Tabelle 2: Vergleich der Eigenschaften von Magnetron- und Halbleiter-HF-Technologie**



**Vergleich der mittleren Ausfallzeit (MTTF) des Magnetrons mit der des Halbleiterverstärkers**

Mittel verfügen, bedeutet dieser Ansatz eine enorme Abzweigung von Ressourcen weg vom Endsystem, treibt die Projektkosten in die Höhe und verzögert die Markteinführung.

Für kleinere Kunden mit begrenztem Budget und technischem Personal ist die interne Entwicklung von Halbleiter-Leistungsverstärkern einfach unpraktisch. Die Auslagerung der Entwicklung von Halbleiterverstärkern bringt einige Herausforderungen mit sich, da es sich um eine noch relativ begrenzte Lieferbasis handelt. Sowohl die Produktqualität als auch die Stabilität der Lieferkette sind bei der Verwendung kleinerer oder weniger bekannter Lieferanten problematisch. Einige Halbleiter-Leistungsverstärker haben komplexe Integrationsanforderungen, und die Lieferanten bieten keine sachkundige technische Unterstützung für Kunden ohne spezielles HF-Fachwissen.

Die neue Produktlinie der Halbleiter-Leistungsverstärker von Mini-Circuits wird diese Defizite auf dem Markt mit kostengünstigen, schlüsselfertigen Lösungen für ISM-HF- und Mikrowellenenergieanwendungen ausgleichen. Alle

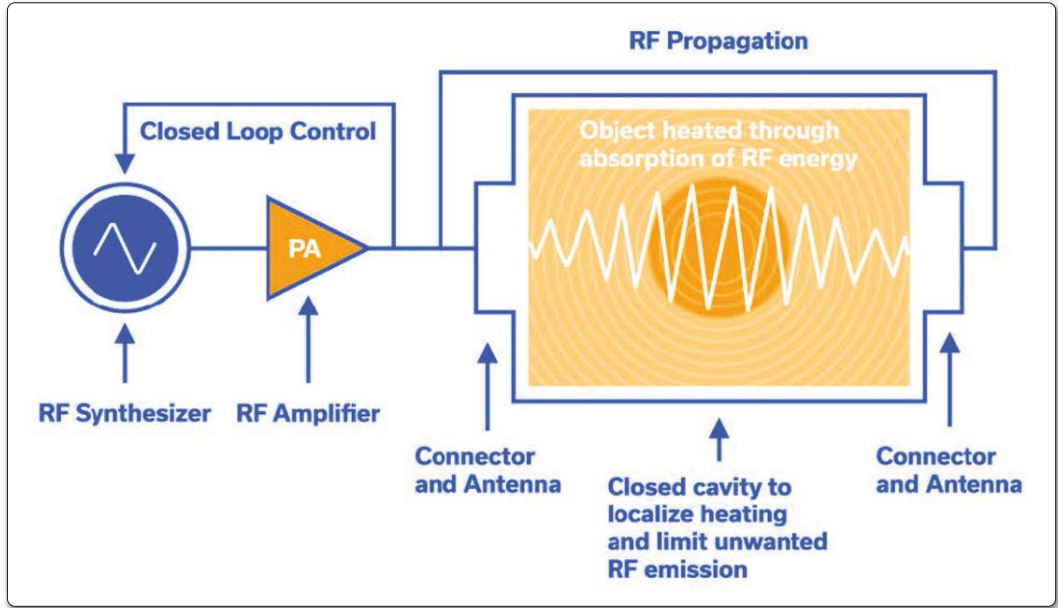
Modelle enthalten On-Chip-Sensoren für Rückmeldungen, die leicht in das Gesamtsystem integriert werden können. Diese Produkte bieten eine branchenführende Benutzerfreundlichkeit und werden durch den guten Ruf von Mini-Circuits in Bezug auf Qualität, Stabilität in der Lieferkette und jederzeit verfügbaren Anwendungssupport von Ingenieur zu Ingenieur unterstützt. Die Komplexität der Integra-

tion von Halbleiter-Verstärkern wird am besten von einem sehr erfahrenen Design-Team für Halbleiter-Leistungsverstärker unterstützt. Mini-Circuits hat ein Team aus einigen der erfahrensten Leistungsverstärker-Design-Ingenieure der Branche aufgebaut, die nicht nur die Produktlinie entwickeln, sondern auch mit den Kunden bei der Lösung von Problemen zusammenarbeiten.

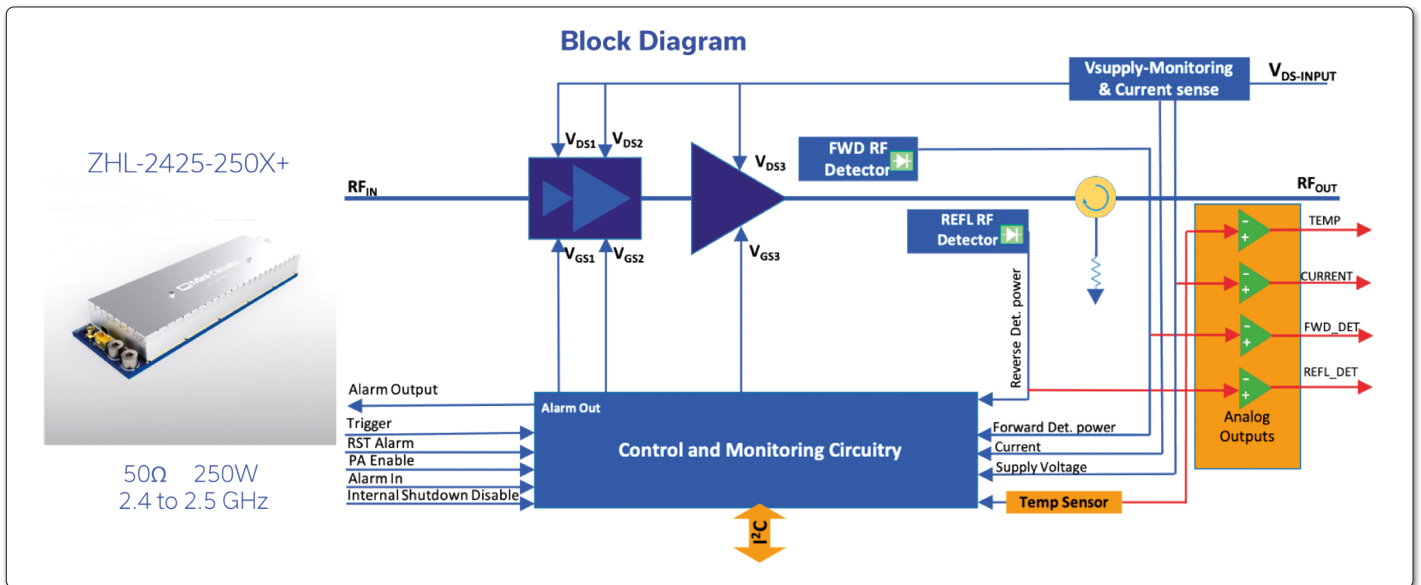
**Mini-Circuits' erster SSPA für RF- und Mikrowellen-Energie: ZHL-2425-250X+**

Der erste Halbleiter-Leistungsverstärker von Mini-Circuits für HF- und Mikrowellen-Energieanwendungen ist der ZHL-2425-250X+. Dieses Modell ist an den Eingangs- und Ausgangsanschlüssen an 50 Ohm angepasst und kann eine maximale CW-Leistung von 300 W im ISM-Band von 2,4 bis 2,5 GHz liefern. Das Blockdiagramm enthält den HF-Detektor, der die Ausgangsleistung im Vorwärtspfad misst, und einen zweiten HF-Detektor, der die reflektierte Leistung misst. Ein Zirkulator schützt das Verstärkermodul vor unerwünschter Leistung an der Ausgangsklemme. Der Steuer- und Überwachungsschaltkreisblock umfasst Analog-Digital- und Digital-Analog-Wandler, die es ermöglichen, die gemessenen analogen Spannungen des HF-Detektors sowohl im analogen als auch im digitalen Bereich auszulesen und über eine I<sup>2</sup>C-Verbindung eine Rückkopplungsschleife zum Steuergerät mit Reaktionszeiten in der Größenordnung von einigen zehn Mikrosekunden bereitzustellen.

Die analogen Ausgangspuffer, die für den Benutzer verfügbar sind, sind auf der rechten



**Feedback-Regelkreis für den Halbleiterverstärker**



## ZHL-2425-250X+ Package und Blockdiagramm

Seite des Blockdiagramms dargestellt. Diese können in der Regel verwendet werden, wenn eine schnellere Rückmeldung an die Anwendung erforderlich ist.

Die analoge Ausgangsspannung oder die digitalen Bits des ADC-Ausgangs stehen dem Benutzer für allgemeine Monitoringzwecke oder für das Hinzufügen einer Feedback-Regelschleife unter Verwendung eines eigenen Anwendungscontrollers zur Verfügung. Alternativ bietet Mini-Circuits eine intelligente, einfach zu bedienende Controller- und Signalquellenlösung (ISC-2425-25+) an, die mit dem ZHL-2425-250X+ zusammenarbeitet und die Rückkopplungsschleife schließt.

## Key-Performance

Der ZHL-2425-250X+ liefert eine präzise regulierbare CW-Leistung von 1 bis zu 300 W beim P3dB. Der mit hocheffizienter LDMOS-Technologie ausgestattete Verstärker wird mit einer einzigen 32-V-Versorgung betrieben und bietet 41 dB Verstärkung bei einem Eingangssignal von 14 dBm sowie einen Wirkungsgrad von 60% (PAE) in den meisten Anwendungen. Dieses Modell verfügt über umfangreiche integrierte Überwachungs- und Schutzfunktionen für Temperatur, Strom, Vor-

wärts- und Rückwärtsleistung sowie über eine automatische Abschaltung unter gefährlichen Bedingungen. Das kompakte, leichte Gehäuse (55,9 x 171,5 x 15 mm, 0,29 kg) ermöglicht die Integration einzelner oder mehrerer Geräte in beengten System-Layouts.

Der ZHL-2425-250X+ ist derzeit einer von drei Verstärkern in der wachsenden SSPA-Produktlinie von Mini-Circuits. Weitere Verstärker für Frequenzen von 13 MHz bis 5,8 GHz und Leistungen bis zu 25 kW und darüber hinaus befinden sich in der Entwicklung.

## Fazit

Mit der Einführung des ZHL-2425-250X+ und des ISC-2425-25+ hat Mini-Circuits eine robuste, wettbewerbsfähige schlüsselfertige Halbleiterverstärkerlösung für den HF- und Mikrowellen-Energiemarkt entwickelt.

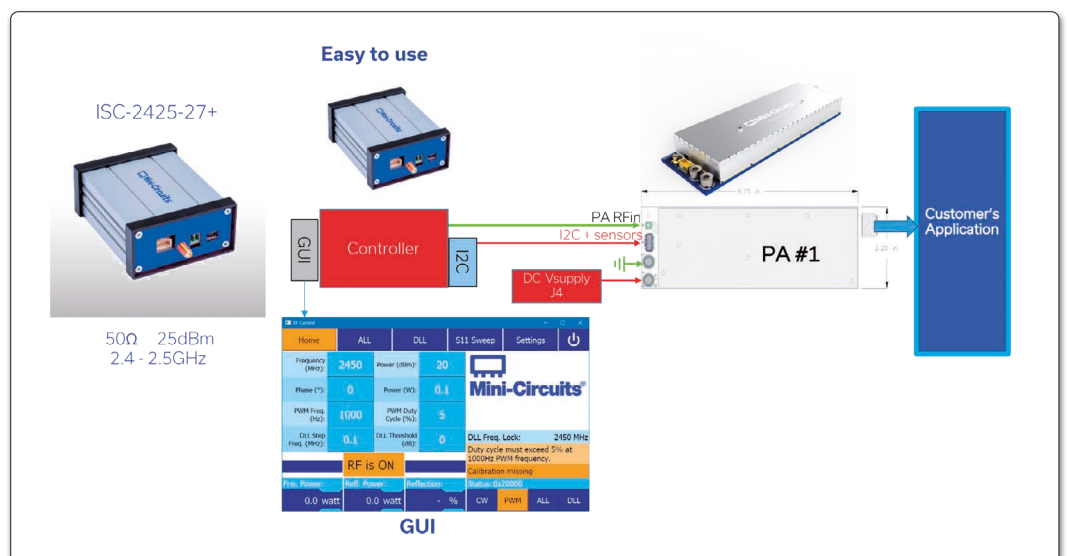
Das Produkt gibt den Anwendern die Sicherheit, die sich aus der über 50-jährigen Erfahrung von Mini-Circuits in der Lieferung von HF-Komponenten und integrierten Modulen ergibt.

Mini-Circuits wird den Erfolg des ZHL-2425-250X+ mit der

Einführung neuer Produkte weiter ausbauen, die sowohl höhere Leistungen als auch andere ISM-Band-Anwendungen unterstützen.

Weitere Einzelheiten und vollständige elektrische Spezifikationen finden Sie im Datenblatt auf [www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=ZHL-2425-250X%2B](http://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=ZHL-2425-250X%2B)

Erfahren Sie mehr über den ZHL-2425-250X+ und weitere Modelle unter <https://lp.minicircuits.com/en-us/ism-rf-energy-solutions>. ◀



Mini-Circuits System Controller (ISC-2425-25+) und Verstärkermodul (ZHL-2425-250X+)