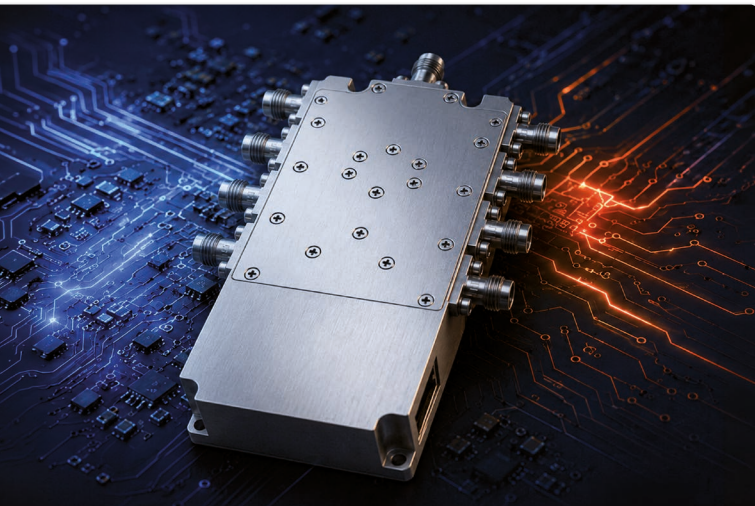


Moderne HF-Verstärker:

Wie sich Leistung, Bandbreite und Signalqualität vereinen lassen

HF-Verstärker können schnell in einen Zielkonflikt zwischen Rauscharmut, Linearität und Effizienz geraten. Wie schlagen sich hier moderne Verstärkerkonzepte im Praxiseinsatz?



Hochfrequenzverstärker sind zentrale Bausteine moderner HF-Systeme. Sie kommen überall dort zum Einsatz, wo Signale empfangen, verstärkt, verarbeitet oder mit hoher Leistung ausgesendet werden müssen. Ob in der 5G- und 6G-Kommunikation, in Radarsystemen, in der Satellitenkommunikation, in der elektronischen Kampfführung, in der Messtechnik oder in automatisierten Testsystemen: Ohne passende HF-Verstärker lässt sich die geforderte System-Performance kaum erreichen.



Autor:
Tobias Rieger
Leiter Hochfrequenz- und
Messtechnik
Telemeter Electronic GmbH
info@telemeter.de
www.telemeter.info

Erhöhte Anforderungen

Gleichzeitig steigen die Anforderungen an moderne Verstärkerlösungen deutlich. Signale werden breitbandiger, Modulationsverfahren komplexer und Frequenzbereiche reichen zunehmend bis in den Mikrowellen- und Millimeterwellenbereich. Entwickler und Systemintegratoren müssen daher heute mehr berücksichtigen als nur Ausgangsleistung oder Frequenzbereich.

Im Mittelpunkt steht ein klassischer Zielkonflikt: Ein Verstärker soll möglichst rauscharm sein, um schwache Signale zuverlässig erfassen zu können. Er soll hochlinear arbeiten, damit komplex modulierte Signale nicht verzerrt werden. Gleichzeitig soll er effizient sein, um Leistungsverluste, Wärmeentwicklung und Kühlaufwand zu reduzieren. Diese Anforderungen lassen sich jedoch nicht immer gleichzeitig maximieren.

Der größte Nutzen moderner HF-Verstärker liegt deshalb nicht allein in einzelnen Spitzenwerten im Datenblatt. Entscheidend ist

die passende Balance zwischen Rauschmaß, Linearität, Wirkungsgrad, Bandbreite, Ausgangsleistung, Leistungsdichte und thermischem Verhalten. Wer diese Faktoren frühzeitig bewertet, erhält eine Verstärkerlösung, die nicht nur technisch leistungsfähig ist, sondern auch zuverlässig, wirtschaftlich und gut integrierbar arbeitet.

Low-Noise Amplifier: Wenn jedes Zehntel Dezibel zählt

In Empfangssystemen entscheidet häufig die erste Verstärkerstufe über die Qualität der gesamten Signalkette. Low-Noise Amplifiers, kurz LNAs, übernehmen genau diese Aufgabe. Sie verstärken sehr schwache Eingangssignale und fügen dabei möglichst wenig Eigenrauschen hinzu.

Der Nutzen eines rauscharmen Verstärkers ist unmittelbar messbar: Ein geringes Rauschmaß verbessert die Systemempfindlichkeit. Dadurch lassen sich schwächere Signale erfassen, Reichweiten erhöhen und Messergebnisse stabiler auswerten.

Besonders wichtig ist das in Anwendungen wie Satellitenkommunikation, Radioastronomie, Radar, Funküberwachung, Spektrumanalyse und hochsensitiven Messsystemen.

Moderne LNAs decken heute breite Frequenzbereiche ab – von wenigen Megahertz bis weit über 40 GHz. Viele Lösungen sind als kompakte MMIC-Verstärker verfügbar und lassen sich dadurch gut in moderne HF- und Mikrowellen-Systeme integrieren. Gerade bei kompakten Baugruppen, mobilen Plattformen oder Mehrkanalsystemen ist diese hohe Integrationsdichte ein klarer Vorteil.

In der Praxis zählt jedoch nicht nur die niedrigste Rauschzahl. Ein LNA muss auch mit starken Störsignalen umgehen können. In realen Empfangsumgebungen treten häufig Nachbarsignale, Interferenzen oder hohe Pegelspitzen auf. Deshalb sind Linearität, Dynamikbereich, Intermodulationsfestigkeit und Übersteuerungsfestigkeit ebenso wichtig wie das Rauschverhalten.

Für Entwickler bedeutet das: Der passende Low-Noise Amplifier verbessert nicht nur die Empfangsleistung, sondern erhöht auch die Robustheit des gesamten Systems.

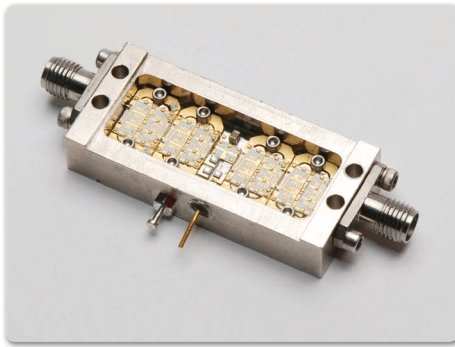
Kleinsignalverstärker: Lineare Arbeitspferde in komplexen HF-Ketten

Kleinsignalverstärker sind wichtige Funktionsbausteine in vielen HF-Signalketten. Sie sorgen für eine definierte Pegelanhebung und stellen sicher, dass nachfolgende Komponenten mit einem stabilen Signalniveau arbeiten können. Typische Einsatzbereiche sind Empfangspfade, Zwischenfrequenzstufen, Messketten, Breitbandsysteme und Laboraufbauten.

Ihr besonderer Nutzen liegt in der Kombination aus Verstärkung und Signalintegrität. Ein guter Kleinsignalverstärker hebt den Pegel an, ohne das Signal unnötig zu verfälschen.

Das ist vor allem bei komplex modulierten Signalen entscheidend, wie sie in modernen Kommunikationssystemen, Software Defined Radio, 5G-Testsystemen oder Radaranwendungen eingesetzt werden.

Wichtige Kennwerte sind hier der 1-dB-Kompressionspunkt (P1dB), der dritte Interzeptpunkt,



Kleinsignalverstärker

die Verstärkung, die Bandbreite und das Rauschverhalten. Sie beschreiben, wie linear ein Verstärker arbeitet und wie gut er mit mehreren Signalen gleichzeitig umgehen kann.

Nichtlineare Effekte können in breitbandigen oder mehrträgerfähigen Systemen schnell zu Intermodulation, Verzerrungen oder fehlerhaften Messergebnissen führen. Ein passender Kleinsignalverstärker reduziert dieses Risiko. Er sorgt für saubere Pegelverhältnisse, verbessert die Reproduzierbarkeit und trägt wesentlich zur Stabilität der gesamten HF-Kette bei.

Benchtop-Verstärker: Reproduzierbare Leistung für Entwicklung, Labor und Test

In der Entwicklung und Qualifizierung von HF-Komponenten sind reproduzierbare Testbedingungen entscheidend. Benchtop-Verstärker liefern definierte Ausgangsleistungen über einen breiten Frequenzbereich und ermöglichen es, reale Betriebsbedingungen im Labor gezielt nachzubilden.

Typische Anwendungen sind die Charakterisierung von Filtern, Mischern, Antennen, Empfängern, Sendern, Kabeln, Baugruppen und kompletten HF-Systemen. Auch in EMV-Prüfungen, Radar-Simulationen, Kommunikationsmessungen und automatisierten Testsystemen kommen Bench-Top-Verstärker häufig zum Einsatz.

Der Nutzen liegt in der hohen Flexibilität. Entwickler können Signale gezielt verstärken, Prüflinge mit definierten Pegeln

belasten und Messaufbauten schnell an unterschiedliche Szenarien anpassen. Dadurch lassen sich Fehler früher erkennen, Entwicklungszyklen verkürzen und Testergebnisse besser vergleichen.

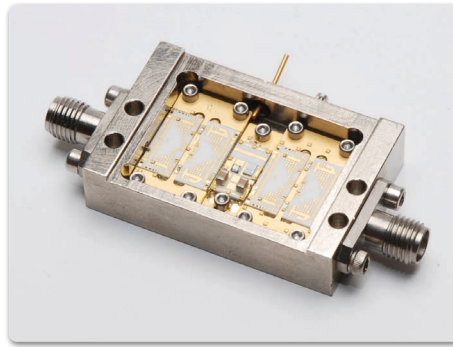
Neben Ausgangsleistung und Frequenzbereich gewinnen weitere Eigenschaften an Bedeutung: Kalibrierbarkeit, Langzeitstabilität, Schnittstellenintegration, Schutzfunktionen, einfache Bedienung und Fernsteuerbarkeit. Gerade in automatisierten Testumgebungen helfen diese Merkmale, Abläufe effizienter zu gestalten und Messunsicherheiten zu reduzieren.

Ein hochwertiger Benchtop-Verstärker ist damit weit mehr als ein Laborgerät. Er ist ein Werkzeug zur Qualitätssicherung, zur Systemvalidierung und zur zuverlässigen Entwicklung moderner HF- und Mikrowellen-Anwendungen.

Leistungsverstärker: High Power zuverlässig bereitstellen

Leistungsverstärker bilden das Rückgrat sendeseitiger HF-Systeme. Sie bringen ein Signal auf den Pegel, der für die jeweilige Anwendung erforderlich ist. Je nach Einsatzbereich reicht das von wenigen Watt bis in den Kilowattbereich.

Eingesetzt werden HF-Leistungsverstärker unter anderem in der Satellitenkommunikation, in Radarsystemen, in der elektronischen Kampfführung, in industriellen HF-Prozessen, in Prüfständen, in Kommunikationssystemen und in der Hochfrequenz-Messtechnik.



Benchtop-Verstärker

Ihr zentraler Nutzen ist die zuverlässige Bereitstellung hoher HF-Ausgangsleistung. Dadurch lassen sich größere Reichweiten erzielen, Antennen effizient speisen, Prüflinge realitätsnah belasten oder anspruchsvolle Testszenarien abbilden.

Mit steigender Leistung werden jedoch auch die technischen Herausforderungen größer. Ein Teil der aufgenommenen Energie wird als Verlustwärme abgegeben. Deshalb sind Wirkungsgrad, thermisches Management, Kühlung, Versorgungskonzept, Schutzschaltungen und mechanische Integration entscheidende Faktoren.

Ein weiterer Zielkonflikt besteht zwischen Effizienz und Linearität. Hohe Effizienz reduziert Energieverbrauch und Wärmeentwicklung. Hohe Linearität sorgt dafür, dass komplex modulierte Signale sauber übertragen werden. Moderne Halbleitertechnologien wie GaN, also Galliumnitrid, bieten hier deutliche Vorteile. Sie ermöglichen hohe Leistungsdichte, große Bandbreite, robuste Betriebsreserven und eine gute Eignung für anspruchsvolle HF- und Mikrowellen-Anwendungen.

Zusätzlich kommen moderne Verstärkerarchitekturen, wie Doherty-Verstärker oder Envelope Tracking, zum Einsatz. Sie helfen, den Wirkungsgrad zu verbessern, ohne die Signalqualität unnötig zu beeinträchtigen.

In der Praxis zeigt sich: Ein guter Leistungsverstärker überzeugt nicht nur durch maximale Ausgangsleistung. Entscheidend ist, dass er unter realen Betriebs-

bedingungen stabil, sicher und reproduzierbar arbeitet.

Breitbandverstärker: Flexibilität für moderne HF-Anwendungen

Viele moderne Systeme müssen nicht nur hohe Leistung oder geringe Rauschwerte bieten, sondern auch große Frequenzbereiche abdecken. Breitbandverstärker sind dafür besonders wichtig. Sie ermöglichen den Einsatz über weite Frequenzbereiche hinweg und reduzieren die Anzahl unterschiedlicher Verstärkerstufen.

Der Nutzen liegt vor allem in der Flexibilität. Ein breitbandiger HF-Verstärker kann verschiedene Frequenzbänder bedienen, Messaufbauten vereinfachen und Systeme schneller an neue Anforderungen anpassen.



Leistungsverstärker



Breitbandverstärker

Das ist besonders wertvoll in Forschung und Entwicklung, elektronischer Aufklärung, EW-Systemen, Testsystemen, Funkmesstechnik und Software Defined Radio.

Technisch ist Breitbandigkeit jedoch anspruchsvoll. Verstärkung, Ausgangsleistung, Impedanzanpassung, Linearität und Stabilität müssen über den gesamten Frequenzbereich möglichst gleichmäßig bleiben. Gerade an den Bandgrenzen zeigen sich häufig Unterschiede zwischen Datenblattwerten und realem Verhalten.

Deshalb sollten Entwickler nicht nur auf die maximale Bandbreite achten. Wichtig sind auch Verstärkungsverlauf, Pegelstabilität, Rückflussdämpfung, Phasenverhalten, thermisches Verhalten und Systemintegration. Ein gut ausgewählter Breitbandverstärker erhöht die Flexibilität und verbessert gleichzeitig die Planungssicherheit.

Von der Komponente zum System: Warum die Auswahl immer wichtiger wird

Die Auswahl geeigneter HF-Verstärker ist heute komplexer als früher. Die Vielfalt verfügbarer Technologien und Bauformen eröffnet viele Möglichkeiten, erhöht aber auch den Entscheidungsaufwand. Neben klassischen Datenblattwerten wie Frequenzbereich, Verstärkung und Ausgangsleistung müssen reale Einsatzbedingungen berücksichtigt werden.

Dazu gehören modulierte Signale, Temperaturprofile, Dauerbetrieb oder Pulsbetrieb, Lastfehlanpassung, EMV-Anforderungen, mechanische Schnittstellen, Versorgungsspannungen, Gehäuseformen und Umgebungsbedingungen.

In der Praxis zeigt sich häufig: Die optimale Lösung ergibt sich nicht aus einem einzelnen Datenblattwert, sondern aus dem Zusammenspiel der gesamten Signalkette. Verstärker müssen zu Filtern, Mischern, Kopplern, Dämpfungsgliedern, Antennen,

Kabeln, Steckverbindern und Messgeräten passen.

Der Nutzen einer systemorientierten Auswahl ist groß. Sie reduziert Entwicklungsrisiken, vermeidet Überdimensionierung, verbessert die Zuverlässigkeit und kann Kosten sparen. Gleichzeitig lässt sich die gewünschte Performance schneller und sicherer erreichen.

Für Entwickler und Systemintegratoren bedeutet das: Die Verstärkerauswahl ist keine reine Komponentenentscheidung mehr. Sie ist ein wichtiger Teil des System-Designs.

Praxisperspektive: Systemlösungen statt Einzelkomponenten

Gerade bei anspruchsvollen HF-Projekten ist Erfahrung in der Auswahl und Integration der passenden Komponenten entscheidend. Unternehmen wie die Telemeter Electronic GmbH unterstützen Anwender seit vielen Jahren bei der Umsetzung komplexer HF- und Mikrowellenlösungen.

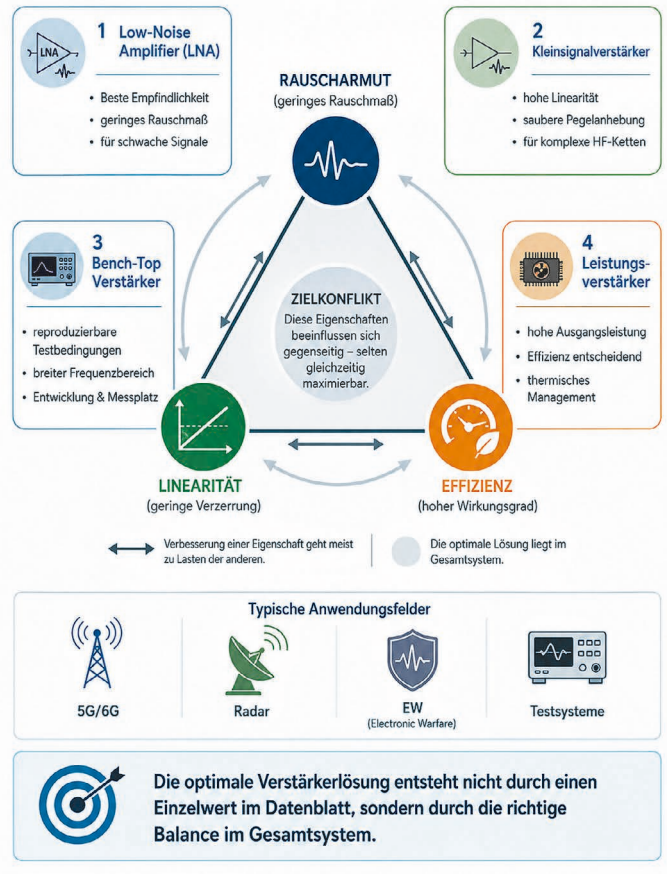
Als herstellerunabhängiger Anbieter von HF-Komponenten, Mikrowellenkomponenten, Verstärkerlösungen und Systemtechnik liegt der Fokus nicht nur auf einzelnen Produkten. Entscheidend ist die passende Lösung für die jeweilige Anwendung und die gesamte Signalkette.

In der Praxis bietet dieser Ansatz mehrere Vorteile. Geeignete Verstärkertechnologien können herstellerübergreifend ausgewählt werden. Einzelkomponenten lassen sich zu funktionsfähigen HF-Ketten kombinieren. Zusätzlich können Anforderungen an Schnittstellen, Gehäuse, Frequenzbereiche, Umgebungsbedingungen, Kühlung und Integration berücksichtigt werden.

Besonders in Bereichen wie Luft- und Raumfahrt, Verteidigung, Radar, elektronische Kampfführung, Kommunikationstechnik, Forschung, Messtechnik und automatisierte Testsysteme zahlt sich dieser systemorientierte Ansatz aus.

HF-Verstärker im Zielkonflikt

Zwischen Rauscharmut, Linearität und Effizienz



Die frühzeitige Einbindung eines erfahrenen Partners kann Entwicklungszeiten verkürzen, technische Risiken reduzieren und die Auswahl passender Verstärkerlösungen deutlich vereinfachen. Anwender profitieren dadurch von mehr Planungssicherheit, höherer Systemperformance und einer effizienteren Umsetzung.

Fazit: Komplexität beherrschen, Performance sichern

HF-Verstärker sind Schlüsselkomponenten moderner Hochfrequenzsysteme. Sie entscheiden darüber, ob Signale zuverlässig empfangen, sauber verarbeitet oder mit ausreichender Leistung ausgesendet werden können.

Die wichtigste Herausforderung liegt im Zielkonflikt zwischen Rauscharmut, Linearität, Effizienz, Bandbreite und

Ausgangsleistung. Moderne Technologien wie MMIC, GaN, Breitbandverstärker, Low-Noise Amplifier, Kleinsignalverstärker, Bench-Top-Verstärker und HF-Leistungsverstärker eröffnen viele neue Möglichkeiten. Gleichzeitig erfordern sie eine sorgfältige Auswahl und eine systemorientierte Integration.

Der größte Nutzen entsteht dort, wo Verstärker nicht isoliert betrachtet werden. Wer die gesamte HF-Kette im Blick behält, kann Signalqualität verbessern, Energieverluste reduzieren, thermische Risiken begrenzen und Entwicklungszeiten verkürzen.

Damit wird klar: Die passende Verstärkerlösung ist nicht einfach eine Komponente. Sie ist ein entscheidender Erfolgsfaktor für leistungsfähige, zuverlässige und zukunftssichere HF- und Mikrowellensysteme. ◀