

## KAPITEL 1

### Einleitung

Die Vision der Menschheit den Zugang zu beliebigen Informationen an jedem Ort der Erde zu gewährleisten ist in den vergangenen 25 Jahren sehr viel mehr Realität geworden, als es sich die kühnsten Pioniere des vergangenen Jahrhunderts wohl hätten vorstellen können. Einige von ihnen hatten sicherlich bei dem Begriff *Mobilfunk* eher ein vereinfachtes Bild, wie es in Abbildung 1.1 dargestellt ist, vor Augen.



ABBILDUNG 1.1. Vorstellungen vom zukünftigen Mobilfunk zu Beginn der 30er Jahre des vergangenen Jahrhunderts. © Bell Labs

Der Mobilfunk hat sich jedoch von einem gesellschaftlichen Randphänomen für Geschäftsleute und Manager zu einem Massenmarkt entwickelt. Das hat Konsequenzen für die technische Realisierung des Systems. Zu Beginn der Entwicklung des Mobilfunks standen vor allem grundlegende technische Gesichtspunkte im Vordergrund der Forschungsbemühungen. Aufgrund der geringen Teilnehmerzahl und der enormen technischen Hürden, die es zu nehmen galt, lag dort der primäre Fokus, um diesen Traum überhaupt Wirklichkeit werden zu lassen. Auch

heute sind diese grundlegenden Funktionen noch von fundamentaler Bedeutung und werden intensiv optimiert bzw. weiterentwickelt. Aufgrund der Evolution des Mobilfunks zu einem Massenmarkt und durch die Entwicklung des *broadband mobile internets* treten jedoch neue Gesichtspunkte in den Fokus bzw. werden die Entwicklungsbemühungen um zusätzliche Gesichtspunkte erweitert. Abbildung 1.2 belegt dabei deutlich, mit welchen Wachstumsraten bzw. absoluten Teilnehmerzahlen man im Bereich des Mobilfunks konfrontiert ist.

Die zukünftig dominierenden Wachstumsmärkte werden dabei Indien und China, sowie die sogenannten Tigerstaaten Vietnam, Thailand, Indonesien, Malaysia bzw. Korea sein.

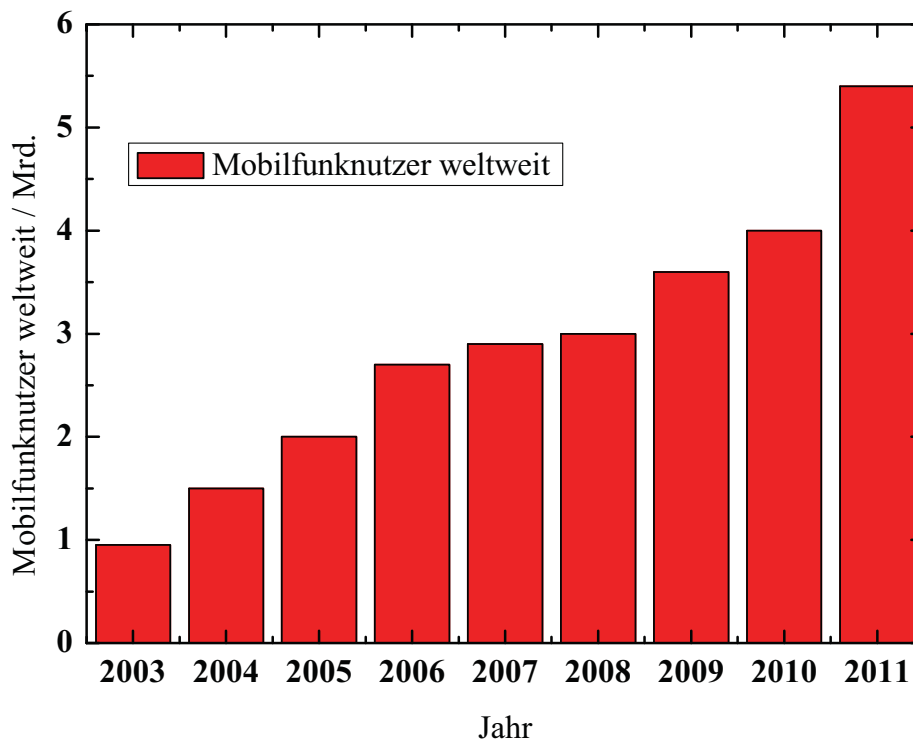


ABBILDUNG 1.2. Entwicklung und Prognose der Mobiltelefonteilnehmer weltweit in den Jahren 2003 bis 2011, Erstellt in 2008

Aus den dargestellten Teilnehmerzahlen lässt sich ableiten, dass auch die Anzahl der installierten Basisstationen weltweit weiterhin zunehmen wird bzw. muss. Die Nutzung der verschiedenartigen Dienstleistungen, die mittels Mobiltelefon/Smartphone in Anspruch genommen werden, wie Multimedia-Internet, MMS, SMS und klassische

Telefongespräche, können schließlich nur über eine zugrundeliegende Netzinfrastruktur abgewickelt werden.

Ein wichtiger Gesichtspunkt dabei ist die leistungsmäßige Effizienz dieser Infrastruktur. Unter Effizienz bzw. Wirkungsgrad wird dabei das nachfolgende Verhältnis verstanden:

$$\text{Effizienz} = \frac{\text{abgegebene Hochfrequenzleistung des Systems}}{\text{aufgenommene DC-Leistung des Systems}} \quad (1)$$

Für eine typische Basisstation, die nach dem Mobilfunkstandard UMTS arbeitet und den Stand der Technik vor ungefähr fünf Jahren widerspiegelt, ergibt sich die nachfolgend in Abbildung 1.3 dargestellte Leistungsbilanz der Einzelkomponenten. Von den rund 6200 W aufgenommener Leistung stehen dem Gesamtsystem ca. 5500 W zur Verfügung, da der DC-Konverter eine Effizienz von ca. 88 % aufweist. Von den 5500 W wiederum werden 620 W für die Kühlung, Diagnose und zentrale Steuerung verwendet. Der weitaus größere Teil der 5500 W, nämlich 4900 W, wird zur Erzeugung des Basisbandsignals, der Hochfrequenzaufbereitung, zur Steuerung, für den LNA/Duplexer und primär für den Hochfrequenzverstärker benötigt.

Aus den angegebenen Zahlenwerten kann eine Abschätzung der Effizienz der Hochfrequenzleistungsverstärker vorgenommen werden.

$$\text{Effizienz}_{\text{Einzelverstärker}} = \frac{20 \text{ W}}{490 \text{ W}} = 4 \% \quad (2)$$

Ein gewöhnliches Basisstationssystem, das zwei UMTS-Trägersignale abstrahlt und 3 Sektoren bedient, hat somit eine Leistungsbilanz von:

$$\text{Effizienz}_{\text{Basisstation}} = \frac{6 \cdot 20 \text{ W}}{6189 \text{ W}} = 1,9 \% \quad (3)$$

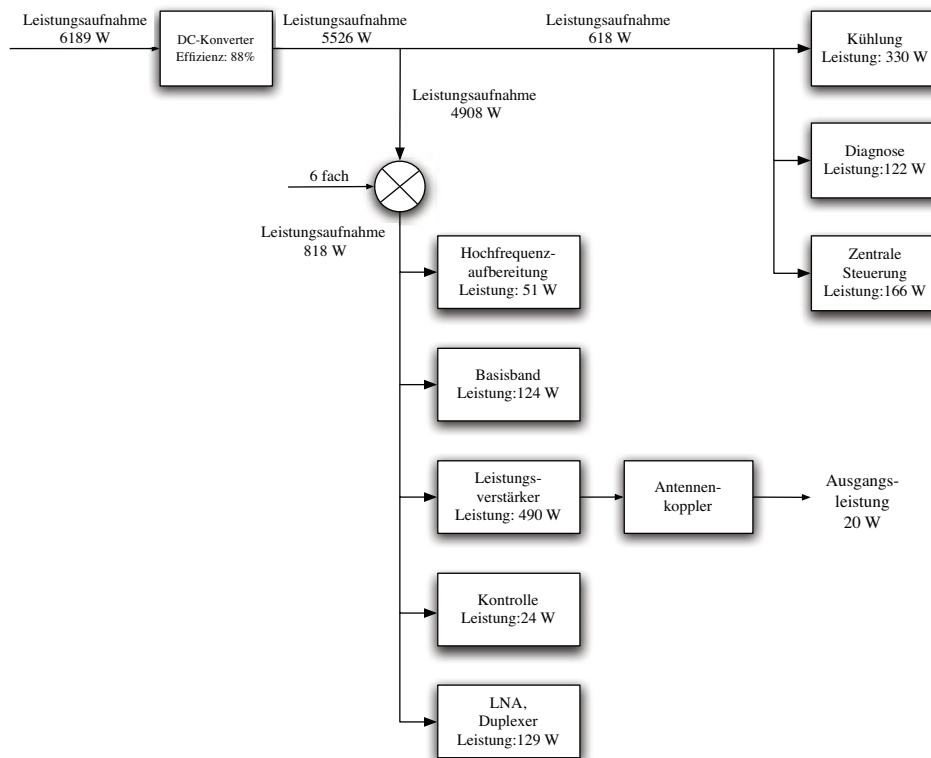


ABBILDUNG 1.3. Typische Leistungsbilanz einer UMTS-Basisstation im Jahre 2005, Quelle: Alcatel-Lucent

Durch diese einfachen Überlegungen muss sich deutlich erkennen, welchen Einfluss eine Effizienzsteigerung der Endstufe auf das Engergiebudget der gesamten Basisstation ausübt. Bei einer Gesamtleistungsaufnahme von 6189 W werden durch die Endstufen 2820 W in Wärme umgesetzt, da nur 120 W in Form von Hochfrequenzleistung abgestrahlt werden. Das bedeutet, dass 45 % der gesamten Verlustleistung des Systems in der Endstufe generiert werden. Dadurch wird schnell ersichtlich, dass eine Steigerung der Effizienz der Endstufe die wirksamste Möglichkeit zur Steigerung der Gesamtsystemeffizienz darstellt. Die Steigerung der Endstufeneffizienz führt zu weitreichenden Konsequenzen, die auf der einen Seite technische Aspekte beinhaltet, jedoch – nicht weniger wichtig, auch ökonomische Aspekte berücksichtigen muss. Die Konsequenzen werden hier nachfolgend in Kürze dargestellt.

Durch die Erhöhung der Endstufeneffizienz werden auf der einen Seite Einsparungen bei der aktiven Kühlung ermöglicht, da weniger Verlustleistung in Form von abzuführender Wärme anfällt. Die verringerte Aktivkühlung steigert dabei ebenfalls, jedoch nicht in dem Maße wie die Endstufe selbst, die Effizienz des Systems. Dabei ermöglicht gerade erst

die Verkleinerung der Aktivkühlung eine kompaktere Bauform der Basisstation, die eine notwendige Voraussetzung ist, um die Zelldichte zu erhöhen und damit höhere Datenraten bzw. wirkliche Breitbanddienste im Mobilfunkbereich anbieten zu können.

Auf der anderen Seite muss berücksichtigt werden, dass eine geringfügige Erhöhung der Effizienz der Basisstation zu einem Multiplikator wird, sofern man die Anzahl der installierten Basisstationen pro Mobilfunkbetreiber bzw. die Anzahl der weltweit installierten Systeme betrachtet, wie es stellvertretend durch die Teilnehmeranzahl im Mobilfunk in Abbildung 1.2 dargestellt ist. Allein in der Bundesrepublik Deutschland sind nach Auskunft der Bundesnetzagentur rund 66.000 Basisstationen installiert. Selbst bei einer geringfügigen Leistungseinsparung von 100 W pro Basisstation ergibt sich mit der Gesamtanzahl der Basisstationen multipliziert die Leistung eines kleinen Kraftwerks alleine für die Bundesrepublik. Somit stellt die Erhöhung der Endstufeneffizienz das Schlüsselement in der Gesamtkonzeption *broadband mobile internet* dar, denn nur durch eine deutlich höhere Zelldichte kann der Gedanke *broadband mobile internet* zur Wirklichkeit werden.

Durch die Optimierung der Leistungseffizienz ergeben sich nachgeordnete Effekte, wie z.B. geringere Installations- und Betriebskosten des Einzelstandortes, da geringere Installationskosten beim Bau des Basisstationsstandorts anfallen bzw. weniger Aufwand für die Erschließung der Standorte betrieben werden muss, denn eine Basisstation mit geringerem Gesamtleistungsaufnahme kann z.B. am klassischen 230 V-Netz erfolgen und benötigt nicht das sonst übliche Drei-Phasen-Stromnetz. Diese Leistungsmerkmale sichern den Systemherstellern Wettbewerbsvorteile und für die Netzbetreiber ergeben sich geringere Betriebskosten, was ebenfalls zu Wettbewerbsvorteilen führt.

Zu guter Letzt wird mit diesem Qualitätsvorsprung der aktuellen Diskussion um die Verminderung des  $CO_2$ -Ausstoßes Rechnung getragen, um die weltweite Klimaerwärmung zu reduzieren. Der verminderte Stromverbrauch bzw. die verbesserte  $CO_2$ -Bilanz lässt sich als verkaufkräftiges Argument nutzen lassen, wie es aktuell in der Computerbranche unter dem Stichwort *green IT* Einzug hält.

Eine aktuelle Ankündigung von TriQuint-Chef Ralph Quinsey [21] zeigt, wie sich das Argument *green IT* auch werbewirksam in der Halbleiterindustrie nutzen lässt. Dazu ein Auszug aus einer Produktankündigung für GaN-Transistoren der Firma im Juni 2008:

... Gallium nitride represents the newest generation of amplifier technology with significantly greater power density than other processes. It offers considerable power savings and smaller device form factors for space-conscious design applications and helps improve electricity consumption, size and weight problems for a range of communications applications. The benefits leads to better performance and lower overall system cost for the customer, and can shrink carbon footprints for network operators focused on reducing global warming ...

In der vorliegenden Arbeit geht es um die Designgrundlagen, Konzepte und Verstärkerarchitekturen, die eine hohe Effizienz bei der Leistungsverstärkung ermöglichen, um den oben genannten Forderungen Rechnung zu tragen. Dazu wurden mehrere hocheffiziente Verstärkerschaltungen und -konzepte untersucht und technisch realisiert, die eine möglichst hohe Effizienz bei gleichzeitig hoher Ausgangsleistung mit bis zu 20 W Spitzenleistung im Frequenzbereich bis 8 GHz ermöglichen. Der deutliche Fokus dieser Arbeit liegt daher im Bereich der Schaltverstärker, da die bekannten klassischen Verstärkerkonzepte nicht die geforderte hohe Effizienz aufweisen. Die verwendeten Halbleiterbauelemente zur Realisierung der Schaltungen sind mehrheitlich in GaN-Technologie realisiert worden. Zum Vergleich kommen vereinzelt auch Bauelemente in GaAs-Technologie zum Einsatz, um Potential bzw. Unterschiede der überlegeneren GaN-Technologie besser aufzeigen zu können. Die Arbeit gliedert sich dabei wie folgt:

Im Kapitel 2 wird die grundlegende Funktionsweise der Schaltverstärker, im Gegensatz zu klassischen analogen Verstärkern, erläutert. Kapitel 3 stellt die Modellierung eines Hochfrequenzgehäuses vor, welches der Aufnahme von Halbleiterleistungstransistoren dient, wie sie bei der Realisierung von Leistungsverstärkern im Hochfrequenzbereich verwendet werden. Im Kapitel 4 wird auf Basis des entwickelten Gehäusemodells ein hybrider GaN-Class-E-Verstärker entworfen und realisiert. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse bei diesem Design wird anschließend ein weiterer hybrider Klasse-E Verstärker entwickelt und realisiert, jedoch in GaAs-Technologie. Dabei kommen die am FBH entwickelten Hochvolt-HBTs zum Einsatz.

Das Kapitel 5 stellt ein neuartiges Konzept im Hochfrequenzbereich vor, dass mit Klasse-S-Verstärker bezeichnet wird. Dabei wird auf den Eingang des Hochfrequenzverstärkers direkt ein digitales Signal gegeben. Eine vorherige Umwandlung in ein Analogsignal entfällt. Dadurch, dass der Transistor mit einem Rechteck als Eingangssignal angetrieben wird, ist die Effizienz der Verstärkerstufe inhärent sehr groß. Auf der Ausgangsseite des Verstärkers erfolgt die Umwandlung mittels Filter wieder in ein analoges Signal, um die Bandbreite zu begrenzen. Dieses Verstärkerkonzept stellt damit eine neuartige Möglichkeit dar, sehr effiziente Schaltverstärker zu realisieren. Gleichzeitig lassen sich mit diesem Verfahren sehr viel einfacher rekonfigurierbare Mehrdienste-Systeme realisieren, da die Schaltungen mit einem Bitsignal arbeiten und nur noch das Filter bzw. die Codierung umgeschaltet werden muss.

Dazu wurden im Rahmen der Arbeit GaN-Schaltungen entwickelt und MMICs realisiert, die eine hohe Effizienz und Ausgangsleistung sowie große Bandbreite aufweisen, um die Möglichkeit der Ansteuerung mit einem digitalen Eingangssignal zu gewährleisten.