

KAPITEL 1

Einleitung

Der Wunsch der Menschheit, überall, immer und mit jedem kommunizieren zu können, bekam in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts durch eine wahre Kommunikationsrevolution einen kräftigen Auftrieb. Rund 10 Jahre nach dem experimentellen Nachweis der elektromagnetischen Strahlung durch *Heinrich Hertz* um 1888 konnte mittels der Erfindung der drahtlosen Telegrafie durch *Guglielmo Marconi* innerhalb weniger Jahre ein riesiger Fortschritt in Gang gesetzt werden. Mit Hilfe des von *Karl Ferdinand Braun* entwickelten “Braun-Senders” (Trennung von Schwing- und Antennenkreis) und der damit verbundenen höheren Reichweite wurde die drahtlose Übertragung auch über weite Entfernungen möglich. Folglich war die Kommunikation nicht mehr, wie seit jeher, auf die unmittelbare Umgebung einer Person begrenzt. So konnte man im März 1899 erstmals eine drahtlose Übertragung von Informationen über den Ärmelkanal und 1901 über 3400 km von Südengland nach Neufundland mittels eines Funktelegraphen demonstrieren.



ABBILDUNG 1.1. *G. Marconi*'s erster frequenzabstimmbarer Transmitter (1899)

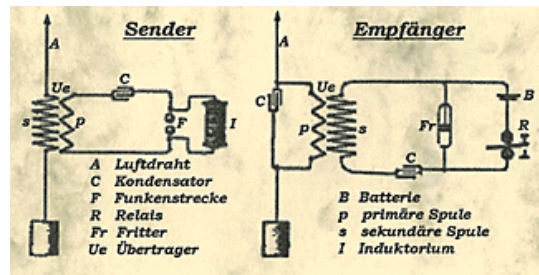


ABBILDUNG 1.2. Sender und Empfänger (Ersatzschaltbild) zur drahtlosen Funktelegrafie von *Karl Ferdinand Braun* um 1900

Die neu entwickelte Ferntelegrafie wurde bald immer schneller erweitert, wie z. B. um die Möglichkeit der Abstimmung (engl.: tuning) auf verschiedene Frequenzen zur Problembehebung der Interferenzen zwischen den Signalen. Diese bahnbrechenden Erfindungen beim Übergang vom 19. auf das 20. Jahrhundert leiteten eine rasante Entwicklung bis hin zu der heutigen breitbandigen und kabellosen Mobilkommunikation mit all ihrer Vielfalt ein. Von dem ersten Einsatz mobiler Funktelefone in den Zügen der Deutschen Reichsbahn 1926 über das erste Mobilfunknetz 1946 in den USA (Bell

Labs) bis hin zur drahtlosen Mobilkommunikation der gegenwärtig dritten (3G - seit 2001) bzw. vierten Generation (4G) hat sich der Mobilfunk von einer nur Spezialisten und Auserwählten zugänglichen und bekannten Kommunikationsform zu einem für nahezu jedermann offenen Massenphänomen entwickelt. Besonders die letzten 20 Jahre haben nochmals einen riesigen Sprung v.a. bezüglich Funktionalität, Kompaktheit, Verfügbarkeit und Übertragungsdatenraten bewirkt. Die Abbildungen 1.1 - 1.5 veranschaulichen die rasante Evolution der Mobilkommunikation in den letzten rund 100 Jahren.

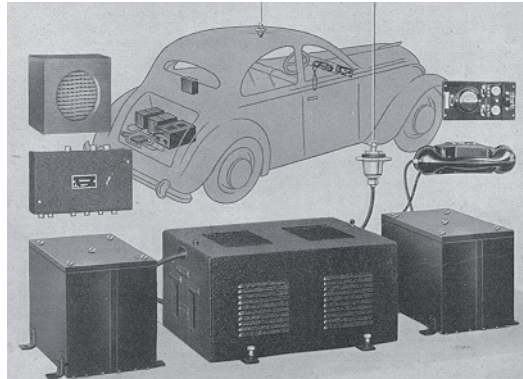


ABBILDUNG 1.3. Autotelefon um 1958



ABBILDUNG 1.4. Erste GSM¹-Telefone um 1991 (Deutsches Historisches Museum (München))



ABBILDUNG 1.5. Mobiltelefon der neuesten Generation (2009)

Die Entwicklung des Mobilfunks von einem Netz mit anfänglich einigen hundert Benutzern, wie z. B. im deutschen A-Netz (siehe Abbildung 1.3) für Politiker und Unternehmer, zu einem Massenmarkt mit immer mehr Teilnehmern bringt allerdings auch

¹engl.: **G**lobal **S**ystem for **M**obile **C**ommunications - Standard für volldigitale Mobilfunknetze der 2. Generation (2G)

steigende Herausforderungen mit sich. Zusätzlich zu den aufgrund erhöhter Nachfrage immer stärker wachsenden grundlegenden technischen Anforderungen treten auch mehr und mehr neue Aspekte auf, die berücksichtigt werden müssen. Aufgrund einer weltweit stetig steigenden Mobilfunkdichte, wie Abbildung 1.6 belegt, muss man sich auch intensiver mit den Themen der Wirtschaftlichkeit, des Energiemanagements und den sich daraus ergebenden Auswirkungen für die Umwelt auseinandersetzen.

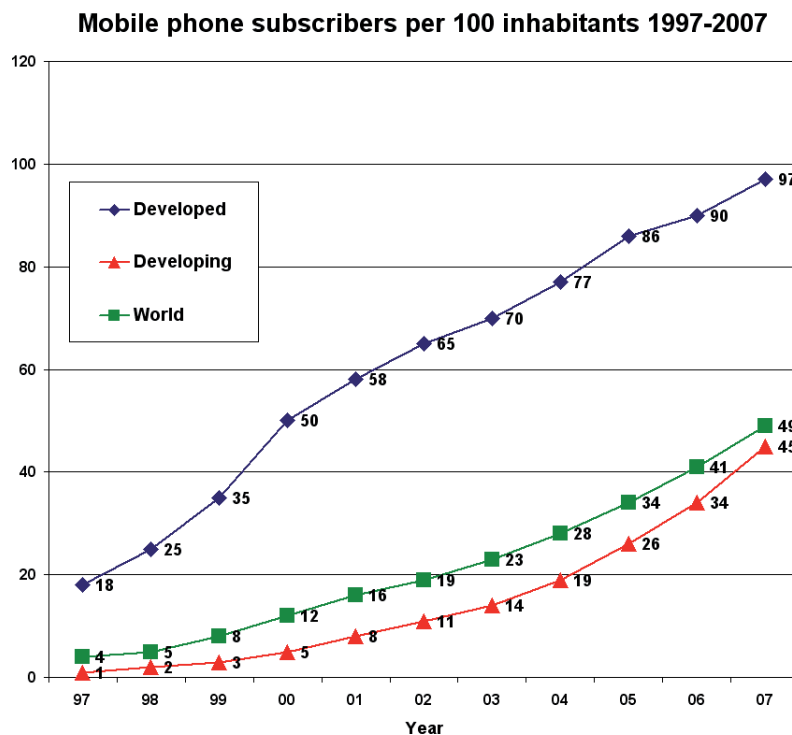


ABBILDUNG 1.6. Entwicklung der Mobilfunkdichte in Entwicklungsländern (rot - “Developing”), Industriestaaten (blau - “Developed”) und weltweit (grün - “World”) von 1997 bis 2007 [1]

Die obige Abbildung verdeutlicht die Entwicklung der Mobilfunkdichte, d. h. der Anzahl der Mobiltelefone pro Einwohner, von 1997 bis 2007. Die Statistik zeigt, dass im Jahr 2007 schon ca. 50 % der Weltbevölkerung (“World” in Abb. 1.6) am Mobilfunk (Telefonie, drahtlose Datenübertragungen etc.) teilgenommen hat. Das waren 3 Jahre zuvor (um 2004) nur rund ein Viertel. Beim Betrachten dieser Entwicklung lässt sich schlussfolgern, dass die weltweite Teilnehmerzahl heutzutage (2010) schon deutlich über dem Wert von 2007 liegen muss. In den Entwicklungsländern (“Developing”) zeigt sich ein noch etwas stärkerer Anstieg, wobei die Versorgungsrate im Jahr 2007 bei 45 % lag. Besonders in den letzten Jahren lassen diese Länder einen nahezu exponentiellen Anstieg erkennen. In den Industriestaaten (“Developed”) steigt die Anzahl der Mobilfunkteilnehmer im Vergleich zu den Entwicklungsländern in den letzten Jahren

nicht mehr ganz so stark. Das größte Wachstum fand dort rund zehn Jahre vorher von 1997 bis ca. 2000 statt. Hier beträgt die Versorgungsrate mit Mobilfunkanwendungen pro 100 Einwohner im Jahr 2007 ca. 97 %. Es nimmt also dort heutzutage schon nahezu jeder einzelne in irgendeiner Form am Mobilfunk teil. Im Jahr 1997 waren das nur 18 %.

Die weltweite Entwicklung wird auch in den nächsten Jahren verstärkt zunehmen, zumal viele bevölkerungsstarke Schwellenländer (gemäß Weltbank und IWF) wie Brasilien, Indien, Thailand, Russland und vor allem China trotz der Wirtschaftskrise von 2009 einen starken Anstieg der Mobilfunkteilnehmer verzeichnen werden. Stellvertretend dafür steht die Meldung von Juli 2009 [2], wonach ein großer Mobilfunkausrüster wie *Ericsson* von China den Auftrag bekommt, "bekannte Mobilfunknetze (hier: 2G und 3G) auszubauen, die Abdeckung und Kapazität der GSM/GPRS²-Netze in 18 Provinzen zu verbessern und für 15 Provinzen GSM/WCDMA³-Kernnetze und neue Zugangssysteme für das Funknetz zu liefern." Dies ist einerseits exemplarisch für den weiteren Anstieg der weltweiten Netzabdeckung durch Erstversorgungen mit Mobilfunkanwendungen wie z. B. Bluetooth, MMS, SMS, W-LAN und den (neuen) Mobilfunkstandards wie UMTS⁴ und LTE⁵.

Daraus ergibt sich, dass man für die neuen Mobilfunkstandards und ihre theoretisch möglichen sehr viel höheren Übertragungsdatenraten auch die bereits bestehenden Netze der 2. Mobilfunkgeneration (2G), die v.a. in den Industriestaaten schon existieren, engmaschiger und lückenloser mit Sendestationen ausrüsten muss. Nur so kann man die stetig steigende Nachfrage für z. B. das mobile breitbandige Internet (engl.: *broadband mobile internet*) befriedigen und die neuen Mobilfunkgenerationen verwirklichen. Diese Entwicklungen führen konsequenterweise zu einer noch stärkeren Verzweigung des Mobilfunkmarktes und somit zu einem rasanten Anstieg der dafür nötigen Basisstationen [2]. Im wesentlichen ist die große Nachfrage an Basisstationen also durch den weltweit wachsenden Markt der mobilen und drahtlosen Kommunikation sowie die parallel dazu verlaufenden steigenden Anforderungen der neuen Mobilfunkstandards bedingt.

Mit der zunehmenden Verbreitung ist - verstärkt durch die allgegenwärtigen Bemühungen zur Verringerung der CO_2 -Emission - der Energieverbrauch der Basisstationen besonders in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt. Um eine Basisstation bzw. ein Mobilfunksystem leistungsmäßig zu erfassen, ist es sinnvoll, den Wirkungsgrad (Effizienz) einzuführen. Er gibt in diesem Fall das Verhältnis von abgegebener Hochfrequenzleistung (Nutzleistung) zu zugeführter Leistung an:

$$\text{Wirkungsgrad (Effizienz)} = \frac{\text{(abgegebene) Hochfrequenzleistung}}{\text{zugeführte Leistung}} \quad (1)$$

²engl.: **General Packet Radio Service** - paketerorientierte Datenübertragung in GSM/UMTS-Netz

³engl.: **Wideband Code Division Multiple Access** - Codemultiplexverfahren bei z. B. UMTS

⁴engl.: **Universal Mobile Telecommunications System** - Mobilfunkstandard der 3. Generation (3G)

⁵engl.: **Long Term Evolution** - Mobilfunkstandard der 4. Generation (4G)

Je effizienter eine einzelne Basisstation ist, desto geringer ist die Differenz zwischen zugeführter und abgegebener Leistung. Die Verluste sind also minimiert. Die wesentlichen Komponenten bezüglich Platzbedarf und Leistungsbilanz werden nun anhand des Aufbaus einer typischen CDMA/UMTS-Basisstation der Firma *Alcatel-Lucent* aus dem Jahr 2005 in Abbildung 1.7 betrachtet.

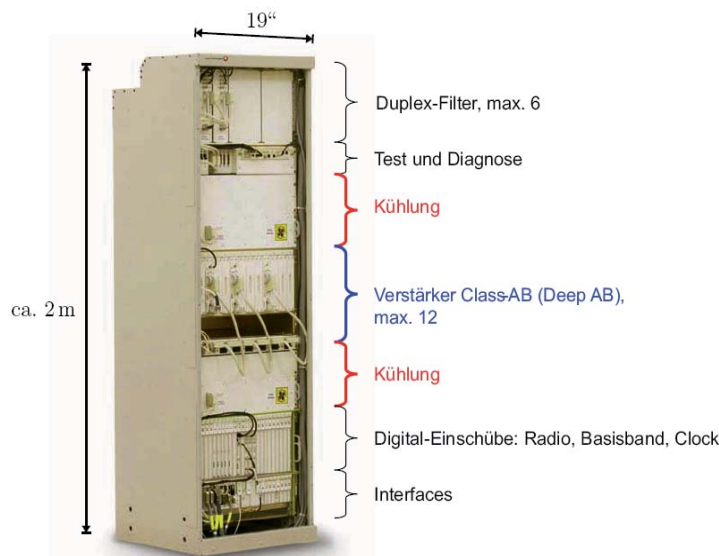


ABBILDUNG 1.7. Aufbau der *Alcatel-Lucent OneBTS™ Macrocell* CDMA/UMTS-Basisstation (©Alcatel-Lucent 2005)

Wie aus der Abbildung zu erkennen ist, besteht eine Basisstation volumenmäßig zur Hälfte aus den Leistungsverstärkern für die analoge Signalverstärkung (Klasse-AB Verstärker (hier: max. 12)) und deren Kühlung. Die verwendeten Klasse-AB Leistungsverstärker stellen zwar einen sehr guten Kompromiss zwischen Linearität (Klasse-A) und Effizienz (Klasse-B) dar, können allerdings einzeln nur eine theoretische maximale Effizienz von ca. 78 % erreichen, was Verluste zur Folge hat. Diese HF-Leistungsverstärker dominieren die Leistungsverluste in den heutigen Mobilfunk-Basisstationen [3]. Das ist auch maßgeblich durch die Charakteristika der benötigten neuartigen Modulationsverfahren (z. B. CDMA) für die modernen Mobilfunkgenerationen (z. B. UMTS (3G)) bedingt. Die sind durch den Erfolg des mobilen Internets und die steigenden Nutzerzahlen unausweichlich und erhöhen die Anforderungen an die Funknetztechnik.

Bei GSM (2G) werden die digitalen Daten mit einer Mischung aus Frequenz- und Zeitmultiplexing übertragen. Ursprünglich wurde es hauptsächlich für Telefongespräche,

Faxe und Datensendungen mit konstanter Datenrate konzipiert und musste für das mobile Internet mit Möglichkeiten zur paketorientierten Datenübertragung (z. B. GPRS mit Datenübertragungsraten bis zu 50 kbit/s) erweitert werden. Um die Übertragungsraten weiter zu erhöhen, wurde mit der dritten Mobilfunkgeneration (3G) eine neue Funkzugriffstechnik mit WCDMA, die auf CDMA basiert, eingeführt. Dadurch sind z. B. mit HSPA⁶ derzeit standardmäßig im Downlink bis zu 14,4 Mbit/s (maximal 28 Mbit/s) und im Uplink maximal ca. 6 Mbit/s möglich. Bei dem CDMA-Codemultiplexverfahren erfolgt die gleichzeitige Übertragung verschiedener Nutzdatenströme auf einem gemeinsamen Frequenzbereich. Somit können mehrere Datenströme gleichzeitig gesendet bzw. empfangen werden (z. B. Telefonie und E-Mails parallel). Der gemeinsam genutzte Frequenzbereich weist als wesentliche Eigenschaft eine größere Bandbreite auf, als der Nutzdatenstrom belegt. Durch die benötigten höheren Übertragungsraten werden also die Bandbreiten größer. Das zu sendende Signal wird stark gespreizt, was auch im Vergleich zu GSM zu einer verringerten Sendeleistung der Mobilstation führen kann [4]. Bei UMTS sind die Frequenzbänder bei der Datenübertragung mit WCDMA typischerweise 5 MHz. Beim OFDM⁷-Modulationsverfahren kann die Signalbandbreite bis zu 20 MHz (LTE) betragen.

Mit der Entwicklung bandbreite-effizienterer Modulationsverfahren, und damit wachsender Datenübertragungsrate bei mehr Signalbandbreite, steigt aber im zu übertragenden Kanal auch das Verhältnis von maximaler Leistung P_{max} zu mittlerer Leistung P_{mittel} , da die gesamte Kanalleistung den Spitzenwert nicht übersteigen darf. Das Verhältnis dieser beiden Größen wird als sogenannte *peak-to-average power-ratio (PAPR)* definiert.

$$PAPR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{max}}{P_{mittel}} \right) \quad [dB] \quad (2)$$

Die *PAPR* ist leistungsbezogen und wird auch als *power back-off*⁸ bezeichnet. Ein Maß für das Verhältnis der Signalamplituden ist der Crest-Faktor

$$C_F = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{A_{max}}{A_{mittel}} \right) \quad [dB] \quad (3)$$

mit maximaler Signalamplitude A_{max} und mittlerer Amplitude A_{mittel} .

Nachteilig an einem hohen *PAPR* ist, dass der Sender sehr hohe Spitzenleistungen abgeben können muss, während er andererseits nur eine verhältnismäßig geringe mittlere Leistung abgibt. Somit müssen die im Prinzip linearen HF-Leistungsverstärker in den Basisstationen für diese neuen bandbreite-effizienten Modulationsverfahren bei einem

⁶engl.: **H**igh **S**peed **P**acket **A**ccess - Erweiterung des UMTS

⁷engl.: **O**rthogonal **F**requency **D**ivision **M**ultiplex - Orthogonale Frequenzmultiplextechnik zur digitalen Datenübertragung mit hohem *power back-off* (> 10 dB)

⁸engl.: Leistungsminderung, Unteraussteuerung

Eingangsleistungspegel arbeiten, der teilweise weit unter ihrem eigentlichen Arbeitsbereich, der Vollaussteuerung (0 dB *power back-off*), liegt. Das sind z. B. 6 dB *PAPR* für das WCDMA-Verfahren beim UMTS-Standard. Der Wirkungsgrad der zumeist noch als Klasse-AB ausgeführten HF-Leistungsverstärker ist bei Betrieb im *back-off* allerdings sehr viel geringer als bei Vollaussteuerung. Bei einem *PAPR* von 10 dB fällt die Effizienz eines Klasse-AB-Verstärkers typischerweise schon unter 10 %. Folglich steigt der Energieverbrauch zusätzlich durch den für die neuen Modulationsverfahren nötigen Betrieb der Leistungsverstärker in den Basisstationen bei hohem *power back-off* und führt zu sehr geringen Wirkungsgraden.

Dabei beläuft sich die effektiv nutzbare Effizienz der HF-Leistungsverstärker inklusive aller Treiberstufen, Verkabelung und Filterung in den klassischen Basisstationen auf nur 4 %. Ungefähr die Hälfte der gesamten aufgenommenen Leistung (ca. 6 kW) aus dem Hauptversorgungsnetz wird durch diese Verstärkerstufen verbraucht (2.8 kW). Wenn man nur die nutzbare Hochfrequenzleistung ins Verhältnis zur gesamten aufgenommenen Leistung setzt, liegt der Wirkungsgrad für eine Basisstation wie in Abbildung 1.7 bei nur 1,9 % [3]. Die daraus folgenden massiven Wärmeverluste erklären auch, warum man in den bisherigen Basisstationen so viel Platz für die Kühlung der HF-Leistungsverstärker vorsehen muss. Demnach müssen HF-Leistungsverstärker entwickelt werden, die es ermöglichen, auch bei einem hohen *power back-off* oder im Idealfall unabhängig davon, hohe Effizienzen zu erzielen.

Notwendige *PAPR*'s bis zu 20 dB oder höher für eine reibungslose HF-Leistungsverstärkung sind in der Praxis allerdings nicht vertretbar. Dies würde bedeuten, dass die effektive Leistung eines Senders nur 1/100 seiner Spitzenleistung sein dürfte. Die Investitionskosten der Sender würden dadurch unwirtschaftlich hoch ansteigen. Deshalb werden schon Maßnahmen (bei OFDM z. B. "soft-clipping", "dummy"-subchannels) zur Reduktion des Crest-Faktors ergriffen, damit bei gegebener Spitzenleistung eines Sendeverstärkers noch genügend mittlere Leistung erzeugt werden kann und das *PAPR* nicht zu groß wird. Nichtsdestotrotz sind *power back-offs* von bis zu 12 dB (OFDM) bei den neuen Modulationsverfahren normal.

Auch deswegen hat z. B. *Nokia Siemens Networks* nicht von ungefähr auf der *CeBIT Green IT World 2009* neue Strategien zur Verbesserung der Energieeffizienz besonders bezüglich der Basisstationen für den Mobilfunk vorgestellt [5]. Gemäß [5] entstehen 80 % des Energiebedarfs in einem Mobilfunknetz in den Basisstationen. Das bekräftigt die bisherigen Ausführungen und impliziert, dass man am ehesten die Energieeffizienz des gesamten Mobilfunknetzes erhöhen kann, wenn die Basisstation effizienter wird. Hier muss man besonders an den bereits erwähnten Hochfrequenzleistungsverstärkern ansetzen, die mit ca. 50 % des Energiebedarfs die größten Verluste in einer Mobilfunk-Basisstation darstellen. Ein einfaches Beispiel verdeutlicht die dargelegten Fakten und das große Potential:

Laut [6] gab es Ende 2007 um die 3 Mio. Basisstationen weltweit. Davon wurden allein von Ende 2006 bis Ende 2007 rund 600000 neue Basisstationen installiert. Heute dürfte diese Zahl aufgrund der weltweiten Wachstumsraten weit über 4 Mio. liegen. Setzt man

nun eine verbesserte Effizienz und somit eine Leistungersparnis in jeder einzelnen Basisstation von nur 1 W an, ließe sich schon beinahe Energie in der Dimension eines mittleren Kraftwerks (z. B. Heizkraftwerk Berlin-Buch mit 5 MW Bruttoleistung [7]) einsparen. Üblicherweise kann man allerdings durch Effizienzsteigerung bis zu mehrere 100 W pro Basisstation einsparen, was multipliziert mit der Anzahl der Stationen der Bruttoleistung eines sehr großen Kraftwerks entspricht. Dies verdeutlicht die Dimensionen und den noch sehr großen Raum für Verbesserungen, durch die man v.a. durch neuartige effizientere Verstärkerkonzepte sehr viel Energie sparen kann.

Das führt auch zu einer merklichen Verringerung des CO_2 - Ausstoßes [5] und so im Endeffekt zur Reduktion der Treibhausgase. Somit lässt sich durch die Optimierung der Basisstationen bezüglich Energieeffizienz auch ein beachtlicher Beitrag zum Umweltschutz leisten. Dies wird seit einigen Jahren von der IT-Branche mit dem Schlagwort “green-IT” verfolgt. Nicht zuletzt liefern auch solch “umweltfreundlichere” Systeme immer mehr gute Argumente für einen steigenden Absatz und sind deshalb auch in wirtschaftlicher Hinsicht in der Zukunft sehr reizvoll.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass durch einen weltweit stetig wachsenden Mobilfunkbedarf die Erstausrüstung sowie die zusätzliche Bestückung von vorhandenen Netzen mit Basisstationen stark ansteigt und weiter zunehmen wird. Den zunehmenden Teilnehmerzahlen und den darüber hinaus wachsenden Anforderungen an die Telefonie und die Datenübertragung via *broadband mobile internet* muss man mit neuen bandbreite-effizienteren Modulationsverfahren Rechnung tragen. Das führt aber mit den klassischen HF-Leistungsverstärkern (meist Klasse-AB) aufgrund des erforderlichen *power back-off*-Betriebs zu noch ineffizienteren Basisstationen für die neuen Mobilfunkstandards. Gemeinsam mit der großen Wachstumsrate hat das einen stark ansteigenden Energieverbrauch zur Folge, der reduziert werden muss. Aufgrund der Digitalisierung der Basisstationen und des großen Potentials zur Verbesserung der Leistungsbilanz müssen neuartige, auch bei *power back-off* effiziente Verstärkerkonzepte erforscht und entwickelt werden. Nur so kann man entscheidend wirtschaftlichere Systeme für den Markt und seine stetig steigende Nachfrage realisieren und den wachsenden Energieverbrauch bewältigen.

Mit solch einem fortschrittlichen Verstärkerkonzept beschäftigt sich die vorliegende Arbeit. Sie beinhaltet im Rahmen des BMBF-Projektes “*GaN-Switchmode*” erzielte Forschungsergebnisse am *Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH)* und behandelt die Entwicklung, den Aufbau und die Charakterisierung von Mikrowellen-Leistungsverstärkern, die nach dem in der Hochfrequenztechnik neuartigen Klasse-S-Konzept arbeiten. Derartige Verstärker bieten zumindest theoretisch die Möglichkeit, den Wirkungsgrad auch im *back-off*-Betrieb hoch zu halten und so die Basisstationen für die drahtlose Mobilkommunikation sehr viel effizienter zu machen. Mit dem Klasse-S-Konzept sind sehr verlustarme Leistungsverstärkungen möglich, da der Hochfrequenzverstärker von der Eingangsstufe bis zum Ausgang der Endstufe im Klasse-S-Betrieb mit rein digitalen Signalen arbeitet. Das heißt, der verstärkende Transistor wird als Schalter im “An-” und “Aus-Zustand” betrieben und kann so das Signal mit einem

hohen Wirkungsgrad verstärken. Erst direkt vor der Antenne wird das gewünschte Nutzsinal herausgefiltert, um die Bandbreite zu begrenzen und unerwünschte Frequenzanteile zu reflektieren.

Der Klasse-S-Verstärker unterscheidet sich zu den herkömmlichen Schaltverstärkern (Klasse-E, Klasse-F, Klasse-D etc.) [8] - [12] auch in seinem digitalen Eingangssignal, der Bitsequenz. Diese wird aus einem analogen, bandbegrenztem Signal durch einen Bandpass- $\Delta\Sigma$ -Modulator (BP-DSM) erzeugt, ist sehr breitbandig und enthält sowohl die Amplituden- als auch die Phaseninformation des Signals.

Da die Bitsequenzen Frequenzanteile von einigen kHz bis zu mehreren Vielfachen der Signalfrequenz f_S (mehrere GHz; theoretisch unendlich breitbandig) enthalten und zu hohen Leistungen (20 W und mehr) verstärkt werden sollen, muss man auch eine geeignete Technologie wählen, mit der dies realisierbar ist. Hier bietet sich Galliumnitrid (GaN) an, da es aufgrund des großen Bandabstandes eine hohe Durchbruchspannung bei gleichzeitig hoher Ladungsträgergeschwindigkeit anbietet. Deshalb sind bei Grenzfrequenzen von mehr als 20 GHz gleichzeitig hohe Durchbruchspannungen von bis zu 70 V möglich. Somit können die gewünschten großen Ausgangsleistungspegel im Mikrowellenbereich ermöglicht werden. Die Verstärker-MMICs⁹, welche in dieser Arbeit zum Einsatz im Klasse-S-Verstärker kommen, wurden mit dem FBH-eigenen GaN-Prozess angefertigt [14].

Der Hauptfokus der Arbeit liegt auf dem Entwurf der hybrid ausgeführten Strukturen des Ausgangsnetzwerks für zwei verschiedene Topologien des Klasse-S-Konzeptes: Current-Mode¹⁰ (CMCS) und Voltage-Mode¹¹ (VMCS). Diese Ausgangsnetzwerke enthalten die analogen Bandpassfilter zur Filterung der gewünschten Signalfrequenz aus dem verstärkten Rechtecksignal sowie Topologie-abhängig komplexe DC-Quellen und Anpassnetzwerke, die abseits der klassischen Filterbetrachtung (S-Parameter) optimiert werden mussten. Mit ihrer Ankopplung an den Ausgang der entsprechenden Schaltverstärker-MMICs zur hocheffizienten Verstärkung der Bitsequenzen konnten im Rahmen dieser Arbeit weltweit erstmalig im Mikrowellenbereich für Signalfrequenzen von 450 MHz (CMCS und VMCS) und für HF-Leistungen bis zu 9 W komplette Klasse-S-Verstärker aufgebaut und charakterisiert werden. Die Gliederung der Arbeit stellt sich folgendermaßen dar:

Kapitel 2 gibt einen Überblick über das neuartige Klasse-S-Konzept mit all seinen Komponenten und seiner Umsetzung im Hochfrequenzbereich. Dabei wird zunächst der für die Umsetzung des analogen Signals in eine Bitsequenz benötigte Bandpass- $\Delta\Sigma$ -Modulator eingeführt und erläutert. Anschließend werden die zwei möglichen Schaltungstopologien der Endstufen für die Schaltverstärker-MMICs (Current-Mode, Voltage-Mode) beleuchtet und die jeweiligen Herausforderungen in Verbindung mit der äußeren Beschaltung (Filterstruktur, DC-Versorgung, Anpassung) dargelegt. Hier werden zusätzlich zu den klassischen Filterkriterien (Bandbreite, Verluste, Anpassung, 50 Ω

⁹engl.: Monolithic Microwave Integrated Circuit - monolithisch integrierte Mikrowellenschaltung

¹⁰engl.: Strom-Modus

¹¹engl.: Spannungs-Modus

S-Parameter) neue, für den Klasse-S-Betrieb wichtige Optimierungsparameter, herausgearbeitet. Diese sind abhängig von der Endstufenkonstellation und unterscheiden sich v.a. bei der Current-Mode-Struktur aufgrund eines differentiellen Anschlusses an die Verstärkerendstufe besonders stark von den üblichen Entwurfskriterien eines einfachen Filters im HF-Bereich.

Da das Signal bis zum Ausgang der Verstärkerendstufe digital ist, muss man sich auch mit dem Verhalten der (GaN-) Transistoren bzw. der kompletten Schaltungstopologien bei Digitalansteuerung beschäftigen. Das bringt v.a. messtechnisch neue Herausforderungen mit sich, da nun die Charakterisierung nicht mehr nur im Frequenzbereich (S-Parameter, ...), sondern auch im Zeitbereich stattfinden muss. Der Aufbau eines dafür nötigen Zeitbereichsmessplatzes mit all seinen Anforderungen und die damit durchgeführten Messungen werden in Kapitel 3 diskutiert. Darüber hinaus hat das Arbeiten im Zeitbereich auch Auswirkungen auf der Entwurfsebene und hier besonders auf die verwendeten Transistormodelle. Für den Entwurf ist es wichtig, neue Ansätze für die Modellierung der Transistoren im Zeitbereich zu berücksichtigen, um die Simulation anzupassen. Dafür wird eine speziell für den Zeitbereich neu entwickelte vereinfachte Beschreibung vorgestellt, diskutiert und mit einem etablierten Transistormodell verglichen. Auf dieser Grundlage werden dann die für die beiden Endstufentopologien nötigen Treiberkonzepte beschrieben. Darüber hinaus werden die kompletten GaN-MMICs zur Verstärkung der Bitsequenzen im Zeitbereich charakterisiert und ihre Messergebnisse und die daraus folgenden Wirkungsgrade als ein wichtiger Baustein im Gesamtgebilde des Klasse-S-Verstärkers besprochen.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden für den Entwurf und den Aufbau eines Voltage-Mode Klasse-S-Verstärkers in Kapitel 4 und zweier Current-Mode Klasse-S-Verstärker in Kapitel 5 verwendet. Dabei wird jeweils zunächst das Zusammenschalten aller Komponenten zu einem kompletten Modul erläutert und die realisierten Aufbauten präsentiert. Danach werden die Messergebnisse der aufgebauten Verstärker für die zwei Topologien im 450 MHz - Frequenzband diskutiert.

Anhand verschiedener Charakteristika wie Ausgangsleistung, Wirkungsgrad, Ausgangsleistung als Funktion der Signaleingangsleistung (*power back-off*), Variation der Überabtastrate beim BP-DSM und Verhalten bei Ansteuerung mit einem periodischen Signal werden die entwickelten Klasse-S-Verstärker klassifiziert. Des Weiteren werden andere Modulations- bzw. Betriebsmethoden zur Erhöhung der Effizienzen auch bei großem *back-off* erörtert und getestet. Somit ist es möglich, das gesamte Potential des Klasse-S-Konzeptes für den Einsatz beider Endstufenvariationen in Basisstationen für eine effizientere Leistungsverstärkung zu bestimmen.

Dazu werden in Kapitel 6 beide Konzepte zur Übersicht miteinander verglichen. Anhand dessen lassen sich Perspektiven für den VMCS- und CMCS-Ansatz im Vergleich aufzeigen und bewerten.

Abschließend wird die Arbeit in Kapitel 7 zusammengefasst und ein Ausblick für weiterführende Arbeiten gegeben.