



Tim Maiwald (Autor)

Integrierte Hochfrequenzschaltungen in SiGe BiCMOS-Technologien für die breitbandige Datenübertragung im D-Band



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8912>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

Die drahtlose Kommunikationstechnik ist in der heutigen modernen Gesellschaft fest verankert und nach wie vor Teil sehr aktiver Forschungsbemühungen. Nach Heinrich Hertz' experimentellem Nachweis der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im freien Raum im Jahre 1888 galt dessen Experiment lediglich als Beweis der Maxwellschen Theorie - jedoch zunächst ohne Aussicht auf praktische Verwendbarkeit. Doch schon kurz darauf nutzten die späteren Nobelpreisträger Karl Ferdinand Braun und Guglielmo Marconi dieses physikalische Phänomen für die Entwicklung der drahtlosen Telegraphie, und somit für einen frühen Vorläufer der heute allgegenwärtigen drahtlosen (digitalen) Übertragungstechnik [1]. Der Weg zum heutigen Stand der Technik der Kommunikationstechnik ist durch einige wenige Meilensteine in Technologie und Theorie geprägt, wodurch sich auch Zukunftstrends und entsprechende Forschungsschwerpunkte ableiten lassen.

Mit *“The Mathematical Theory of Communication”* veröffentlichte Claude E. Shannon [2] die bis heute gültigen mathematischen Grundlagen der Theorie zur Übertragung von Information. Wie beispielhaft in Abbildung 1.1 dargestellt, setzt sich jedes abstrakte Kommunikationssystem aus einer Informations-Quelle (Sender bzw. TX), einer Senke (Empfänger bzw. RX) und einem sogenannten Übertragungskanal zusammen. Die Kanalkapazität (C) beschreibt dabei die maximal mögliche Datenrate [bit/s] in einem Kommunikationssystem von der Quelle bis zur Senke. In dem durch Shannon beschriebenen Modell des Kanals wird ein von der Quelle ausgesendetes Symbol mit einem

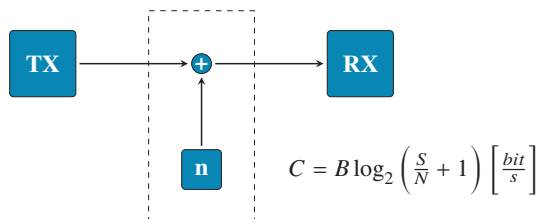


Abbildung 1.1.: Abstraktion einer (drahtlosen) Kommunikationsstrecke über einen AWGN-Kanal.

zufälligen Störsignal in Form von weißem Rauschen (Additives Weißes Gaussches Rauschen (AWGN)) überlagert. Shannons Theorie zeigt wie die Kanalkapazität direkt mit der Signalbandbreite (B) und dem Signal-zu-Rauschleistung (SNR) an der Senke verknüpft ist. Sie gibt dabei eine fundamentale physikalisch-technisch Grenze für das Leistungspotential praktischer Kommunikationssysteme an, welche die Weiterentwicklung der Kommunikationstechnik begleitet.

Heute bildet die drahtlose Kommunikationstechnik einen wesentlichen Eckpfeiler des Wohlstandes und ist dabei ein essentieller Bestandteil moderner Applikationen in nahezu allen Bereichen der Industrie und des Konsums. Da in der Realität nie unbegrenzt Signalleistung und Bandbreite für die Übertragung zur Verfügung stehen, müssen drahtlose Anwendungen im Zusammenspiel mit physikalisch-, praktischen und ökonomischen Randbedingungen entwickelt werden. Auch wenn damit längst nicht alle praxisrelevanten Effekte einer Übertragungsstrecke abgebildet sind. Dabei steht die Kanalkapazität als Maß für maximale Leistungsfähigkeit der Übertragungsstrecke in Bezug auf die maximal erzielbare Datenraten.

Ein Wegbereiter von Innovation und Kommerzialisierung der drahtlosen Kommunikationstechnik war und ist die Entwicklung der Halbleitertechnologie und der Schaltungstechnik, welche die zivile Nutzung und Massenvermarktung dieser Systeme überhaupt ermöglicht und gleichzeitig die Leistungsfähigkeit der drahtlosen Systeme maßgeblich beeinflusst. Von der Idee des Transistors von Julius Lilienfeld im Jahr 1926 vergingen über 20 Jahre bis zur ersten funktionalen Umsetzung eines npn-Transistors durch John Bardeen und Walter Brattain (1947) bzw. eines Feldeffekt-Transistors durch William Shockley (1950) [3]. Bis heute werden verschiedenste Transistor-Technologien und Halbleitermaterialien hinsichtlich ihrer (Herstellungs-)Kosten und Leistungsfähigkeit optimiert, wodurch drahtlose Kommunikationssysteme immer leistungsfähiger, sowie kosten- und energieeffizienter werden. Die Verwendung modernster Technologien erlaubt unter anderem die Bereitstellung größerer Bandbreiten und Signalleistungen, welche im Sinne von Shannons Kanalkapazität die Steigerung der maximalen Datenraten ermöglicht. Auf der anderen

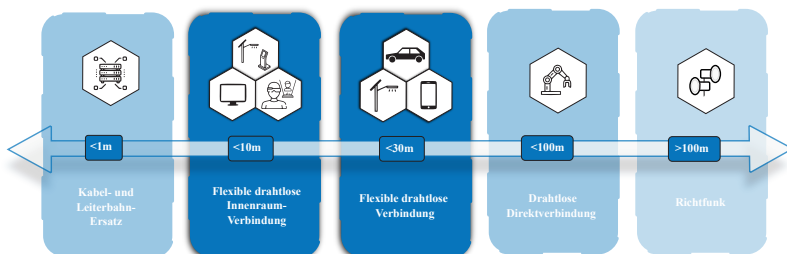


Abbildung 1.2.: Vereinfachte Darstellung verschiedener Anwendungsbereiche breitbandiger Kommunikationssysteme mit möglichst hohen Datenraten mit Trägerfrequenzen jenseits von 100 GHz.

Seite können energieverbrauchsoptimierte Anwendungen noch sparsamer werden, da die Transistoren selbst bei deutlich niedrigeren Betriebs-Spannungen und Strömen gleiche oder bessere Eigenschaften aufweisen als jene der Vorgängergeneration.

Bisher genannte Fortschritte in den Bereichen der Technologie und Theorien bilden das Rückgrat für die Entwicklung der modernen Kommunikationselektronik. Nicht zuletzt sorgen die Innovationen im Bereich des Systementwurfs, Methodiken für Schaltungsentwurf, Modellierung und Integration dafür, möglichst nah an physikalische Grenzen zu gelangen und anwendungsspezifische Herausforderungen bewältigen zu können.

Im Fokus dieser Arbeit steht der Entwurf von integrierten Hochfrequenzschaltungen für Anwendungen, welche besonders hohe Anforderungen an die Datenraten stellen. Als grundlegender Ansatz wird dabei die Verwendung von Trägerfrequenzen jenseits von 100 GHz gewählt, da hier Bandbreiten von bis zu mehreren 10 GHz für die Datenübertragung zur Verfügung stehen können. Im Speziellen werden effiziente Entwurfsmethodiken breitbandiger Schaltungen für Kommunikationssysteme im D-Band (110-170 GHz) mittels moderner Silizium-Germanium (SiGe) Bipolar-Technologien untersucht und demonstriert.

Wie durch Abbildung 1.2 verdeutlicht wird, lassen sich Systeme mit sehr hohen Datenraten und sehr hohen Trägerfrequenzen nochmals in verschiedene Anforderungsbereiche unterteilen, welche sich durch die gegebene Anwendung, Umfeld und die zu überbrückende Übertragungsstrecke ergeben. Wie in der Abbildung hervorgehoben, sollen insbesondere Anwendungen mit flexiblen Verbindungen und Entfernungen von bis zu 30 m als Orientierung für die Wahl der Leistungsparameter im Systementwurf dienen. Einsatzmöglichkeiten dieser drahtlosen Systeme sind zum Beispiel Anwendungen im Innenraum, wie virtuelle Realität und kabellose Übertragung ultra-hochauflösender Multimedia-Inhalte oder Anwendungen im Außenbereich wie autonome Mobilität [4].

1.1. Überblick zum Stand der Technik

Die vorliegende Arbeit ist in den Kontext des Schaltungsentwurfs für Kommunikationssysteme mit hohen Datenraten einzuordnen. Um den Stand der Technik in diesem Bereich der Kommunikationstechnik besser einordnen zu können, muss jedoch zwischen kommerziellen Systemen und Systemen aus akademischen Arbeiten unterschieden werden. Im kommerziellen Umfeld sind Standards, Zuverlässigkeit, sowie Kosteneffizienz wesentliche Faktoren, wohingegen die Leistungsfähigkeit im akademischen Bereich hauptsächlich unter Laborbedingungen demonstriert wird. Akademische Arbeiten dienen oft als Vorstudien für die Standardisierung kommerzieller Systeme und lassen daher Prognosen zur Leistungsfähigkeit künftiger Kommunikationsstandards zu. Des Weiteren ist der Stand der Technik im Bereich des Schaltungsentwurfs zu betrachten, welcher den Entwurf von effizienten Schaltungen mit Frequenzen jenseits von 100 GHz ermöglicht. Insbesondere hierbei können verfügbare Halbleitertechnologien und Entwurfsmethodiken als Orientierung dienen.

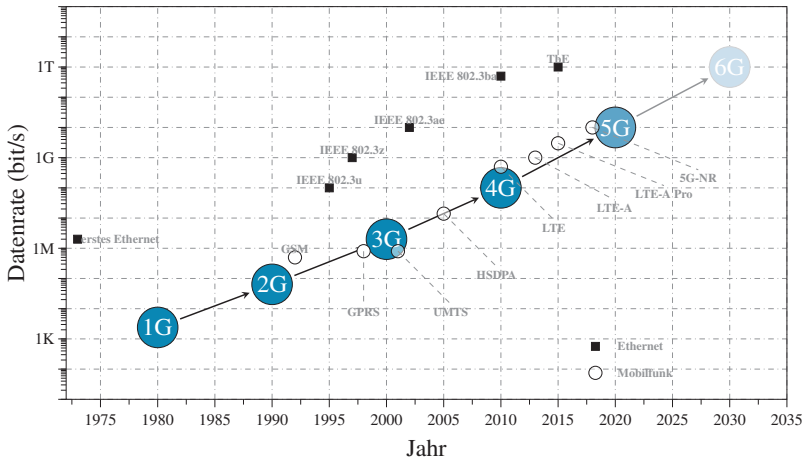


Abbildung 1.3.: Entwicklung der (Peak-) Datenraten über einer Auswahl von Generationen der (3GPP-) Mobilfunk- und (IEEE-) Ethernet-Standards [4, 9].

Kommerzielle Kommunikationssysteme

Kommerzielle drahtlose Kommunikationssysteme im Bereich der Konsumerelektronik unterliegen in der Regel einer Standardisierung, welche durch internationale Institutionen wie beispielsweise dem 3rd Generation Partnership Project (3GPP) [5] und dem Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [6] geleitet werden. Im Gegensatz zu den akademischen Arbeiten müssen kommerzielle Systeme zusätzlich strengen Vorgaben von internationalen Regulierungsbehörden wie der International Telecommunication Union (ITU) sowie regionalen Standards der US-amerikanischen Federal Communications Commission (FCC) oder der europäischen European Telecommunications Standards Institute (ETSI) einhalten. Das bedeutet, dass für solche Systeme spektrale Masken, d.h. Frequenzbänder und Ausgangsleistungen, eindeutig festgelegt und eingehalten werden müssen. Somit sind die verfügbare Leistungsfähigkeit bzw. Kanalkapazität bereits maßgeblich durch den Standard beeinflusst. Das bedeutet auch, dass bei der Weiterentwicklung der Standards neue Frequenzbänder erschlossen oder im Austausch bestehende Standards umgewidmet werden müssen. Zum Zeitpunkt der Entstehung dieser Arbeit befindet sich der (3GPP-) Mobilfunkstandard der 5. Generation (5G) in der Einführung. Ein Novum ist hier, dass seit 3GPP Release 15 (2018) auch ein Teil des Standards ein Frequenzbereich (FR-2) im mm-Wellen-Bereich (z.B. 28-39 GHz) definiert ist, der unter anderem Kanalbandbreiten von mehreren 100 MHz für die Datenübertragung zur Verfügung stellt [7, 8]. In Abbildung 1.3 ist die chronologische Entwicklung der (Peak-) Datenraten der Mobilfunkgenerationen skizziert. Diese konnten seither mit jeder Generation und innerhalb jeder Dekade um mindestens eine Zehnerpotenz gesteigert werden. Auch für die 6. Generation,

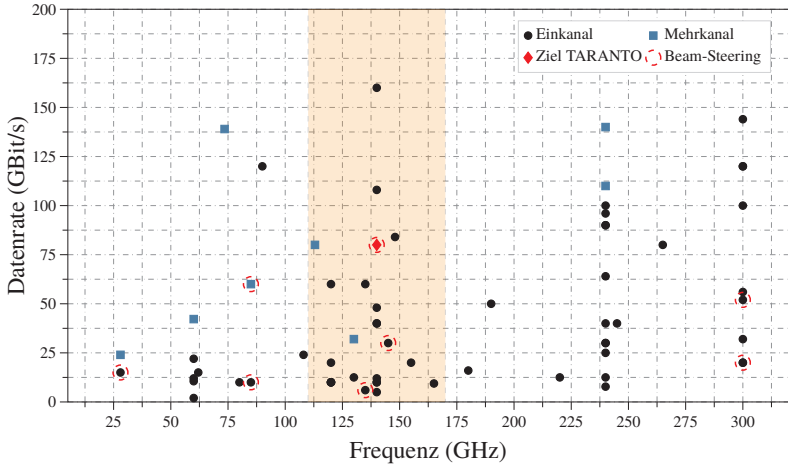


Abbildung 1.4.: Stand der Technik erzielter Datenraten von voll-elektrischen, drahtlosen Kommunikationssystemen [14–86].

dessen Einführung aktuell im Jahr 2030 erwartet wird, haben bereits erste Standardisierungsbemühungen begonnen. In dieser Generationen wird unter anderem der Einsatz von Trägerfrequenzen jenseits von 100 GHz mit mehreren 10 GHz Bandbreite erwartet [10]. Als bereits vom IEEE verabschiedete Standards im Bereich der mm-Wellen Frequenzen und hohen Datenraten sind *IEEE 802.11.ad/ay* (WiGig) und *802.15.3d-2017* (High Rate WPAN) zu nennen. Bei diesen Standards werden im Frequenzbereich um 60 bzw. 300 GHz Datenraten in Größenordnungen von bis zu 44 bzw. 100 Gbit/s spezifiziert [11, 12]. Von den beiden letztgenannten Standards sind bisher (Sommer 2022) nur WiGig-fähige Endgeräte kommerziell erhältlich, welche in Form von Kabel-Ersatz bei der Übertragung von ultrahochauflösenden Multimedia-Inhalten zum Einsatz kommen [13].

Stand der Technik im akademischen Kontext

Mit dem Stand der Technik im akademischen Kontext sind jene Ergebnisse zusammengefasst, die im Rahmen von Konferenzbeiträgen oder Zeitschriften veröffentlicht wurden. In Abbildung 1.4 sind die höchsten veröffentlichten Datenraten voll-elektrischer¹, drahtloser Kommunikationssysteme über ihrem jeweiligen verwendeten Trägerfrequenz aufgetragen. Es wird deutlich, dass sich, trotz weniger Ausnahmen, ein Trend zwischen Trägerfrequenz und erreichter Datenrate beobachten lässt. Eine mögliche Ursache ist die verfügbare absolute Bandbreite, die für das System zur Verfügung steht, selbst wenn sie mit gleicher relativer Bandbreite ausgelegt wurden. Die Abbildung offenbart außerdem, dass mit stei-

¹Mit "voll-elektrisch" sind Systeme gemeint, die keinerlei photonische Schnittstellen/Signalumwandlungen verwenden.

Tabelle 1.1.: Übersicht zu voll-integrierten Kommunikationssystemen jenseits von 100 GHz aus dem Stand der Technik.

Ref.	f_c (GHz)	D (m)	R (Gbit/s)	Tech. (nm)	EIRP (dBm)	Ant.
[30]	113.0	0.1	80.0	28 [†]	0.0	PCB
[87]	130.0	5.0	12.5	55 [‡]	16.3 (32.5 ^{**})	AiP*
[42]	140.0	0.15	12.0	45 [†]	13.2	AoC
[83]	145.0	0.07	84.48	45 [°]	13	PCB
[50]	190.0	0.06	50.0	130 [‡]	-1.0	AoC
[60]	240.0	0.8	100.0	130 [‡]	n.a.	AoC*
[61]	240.0	1.0	110.0	130 [‡]	n.a.	AoC*
[65]	240.0	n.a.	16.0	65 [†]	1.0	AoC

* Systeme mit zusätzlichen Linsen; **mit Linse; †CMOS; °SOI CMOS; ‡SiGe BiCMOS HBT.

gender Frequenz weniger mehrkanalige Systeme veröffentlicht wurden, welche zudem keine wesentliche Verbesserung der Datenrate im Vergleich zu einkanaligen Systemen im gleichen Frequenzbereich erreichen konnten. Mehrkanalige Systeme nutzen mehrere Antennen und parallele Datenströme. Beispiel hierfür ist das in [61] demonstrierte Multi-Input Multiple-Output (MIMO) System mit polarisierten Antennen. Mögliche Ursachen könnten Kosten und Komplexität der Aufbauten und der Messtechnik sein. Die Zahl der Veröffentlichungen von Systemen, die Beam-Steering (BS) verwenden, ist ebenfalls vergleichsweise gering, was auch auf Kosten und Komplexität zurückgeführt werden könnte. Außerdem sind die dabei demonstrierten Datenraten deutlich unterhalb der veröffentlichten Rekordwerten in den jeweiligen Frequenzbereichen. Da Beam-Steering-Systeme als Schlüsseltechnologie für den Einsatz in praxistauglichen mm-Wellen Kommunikationssystemen gelten, werden entsprechende Herausforderungen in dessen Umsetzung im Rahmen der Systemstudie in Abschnitt 2.2.2 diskutiert. Ein weiterer Aspekt, der die Leistungsfähigkeit von drahtlosen Systemen beschreibt ist die drahtlos überbrückbare Distanz und der Grad der Integration. Tabelle 1.1 fasst veröffentlichte Systeme zusammen, welche sich durch einen hohen Integrationsgrad auszeichnen, weshalb sie einen guten Vergleich mit den Anforderungen kommerzieller Produkte zulassen. Die in Tabelle 1.1 aufgeführten Systeme verdeutlichen, dass die höchsten Datenraten lediglich auf Entfernungen von bis zu höchstens 1 m demonstriert wurden. Als Antennen kommen sowohl Leiterplattenbasierte Antennen (PCB), sowie Antennen im Gehäuse (engl. Antenna-in-Package, AiP) und Antennen auf dem Chip (engl. Antenna-on-Chip, AoC) zum Einsatz. Zur Erhöhung der Richtwirkung und der effektiven Reichweite ist der Einsatz zusätzlicher Linsen nicht unüblich. Bezüglich der erreichten Distanz sticht [85] heraus, wobei eine vergleichsweise niedrige Datenraten von circa 6 Gbit/s erreicht werden konnte. Weitere Hintergründe zu Herausforderungen und Abwägungen bezüglich Systemintegration werden in Abschnitt 2.2 diskutiert.

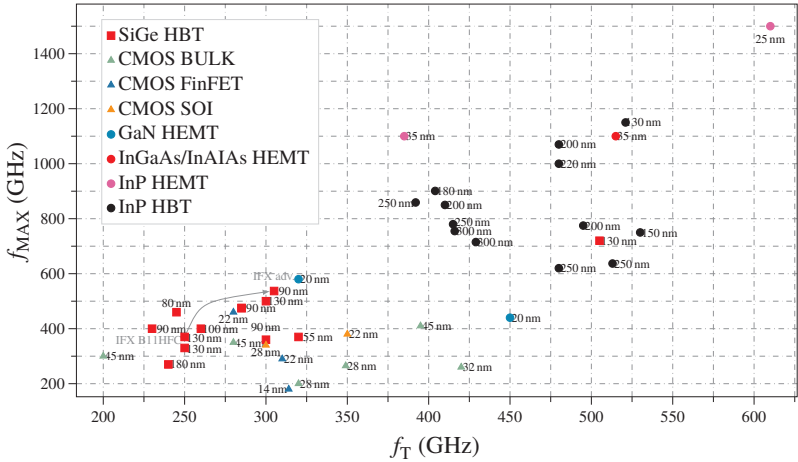


Abbildung 1.5.: Vergleich aktueller Halbleiterprozesse bezüglich f_T und f_{MAX} als Indikator für Leistungsfähigkeit in Schaltungen mit Frequenzen jenseits von 100 GHz. [88–113]

Das in dieser Arbeit verwendete Frequenzband von 110-170 GHz (D-Band) ist in Abbildung 1.4 farblich markiert. In Anbetracht der derzeit verfügbaren Technologien verspricht dieses Band großes Potential für die Integration praktischer Systeme mit sehr hohen Datenraten. Das in [82] veröffentlichte System erzielt die derzeit höchste Datenrate von 160 Gbit/s und arbeitet ebenfalls im D-Band. An dieser Stelle sei auch darauf hingewiesen, dass Teile der veröffentlichten Systeme nicht den aktuellen von FCC oder ETSI vorgeschriebenen Regularien [13] folgen, sodass diese für solche Systeme gegebenenfalls angepasst werden müssten.

Abschließend lässt sich zum Stand der Technik im akademischen Kontext zusammenfassen, dass die für 6G prognostizierten Datenraten von ITB/s mit integrierten voll-elektrischen System derzeit noch nicht demonstriert werden konnten. Große Herausforderungen sind außerdem noch im Bereich der Integration und Reichweite zu finden, was unter anderem Teil des Forschungsschwerpunktes des EU-Projekts *TowARds Advanced bicmos Nano-Technology platforms for rf and thz applicatiOns* (TARANTO) war, in dessen Rahmen die vorliegende Arbeit entstanden ist.

Stand der Technik im Bereich der Halbleitertechnologien

Der Fortschritt in der Kommunikationstechnik wird durch die Weiterentwicklung von Halbleiter-Technologien unterstützt. Das aktuelle Angebot an integrierten Technologien umfasst Bulk- und Silicon on Insulator (SOI) Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS), SiGe Bipolar CMOS (BiCMOS) und eine Vielzahl von Technologien auf Basis

von III-V-Materialien. Ein Vergleich aktuell veröffentlichter Technologien über f_T und f_{MAX} ist in Abbildung 1.5 dargestellt. Die Werte für f_T und f_{MAX} sind gängige Kenngrößen für die maximale Betriebsfrequenz der Transistoren in den jeweiligen Technologien. Vereinfacht ist anzunehmen, dass je größer diese Werte sind, desto effizienter lassen sich Hochfrequenz-Schaltungen mit diesen Technologien realisieren. Im Detail unterscheiden sich diese Technologien natürlich noch durch andere Kenngrößen wie z.B. Rauscheigenschaften und Durchbruchspannungen, die für den Entwurf bestimmter Komponenten vor- bzw. nachteilig im Sinne der Systemperformance sind. Eine tabellarische Gegenüberstellung wesentlicher Kenngrößen ist in [114] zu finden. Die Abwägung darüber, welche der Technologien für ein zu entwerfendes Kommunikationssystem zum Einsatz kommt, ist mit dem Einsatz immer höherer Frequenzen auch deutlich komplexer geworden. Aus rein ökonomischen Gründen wurde aufgrund der vergleichsweise geringen Herstellungskosten bisher große Teile der (Konsumer-)Kommunikationssysteme mit Silizium basierten CMOS-Technologien gefertigt, sobald es in einem solchen Prozess möglich war [115]. Grund dafür ist, dass Digital- und HF-Schaltungen direkt auf einem Chip integriert werden können, wodurch die Ausbeute steigt und Kosten sinken [3]. Wie auch in Abbildung 1.5 ersichtlich, erzielen jedoch die fortgeschrittensten CMOS-Prozesse im Zuge weiterer Miniaturisierung keine höheren Werte für f_T und f_{MAX} im Vergleich zu ihren Vorgängern. Des Weiteren sinkt die zulässige Betriebsspannung, was den Entwurf leistungsfähiger Sendeschaltungen erschwert. Aufgrund dieser Datenlage ist anzunehmen, dass sich für zukünftige Systeme hybride- oder heterogene Integrationslösungen gegenüber reinen CMOS-Systemen durchsetzen. Für detailliertere Ausführungen zum Thema Integration und Technologien sei an dieser Stelle auf [114] verwiesen.

Die für diese Arbeit verwendeten SiGe-Prozesse von Infineon zählen zu den mit den höchsten Werten für f_T und f_{MAX} im industriellen Umfeld. Silizium basierte BiCMOS-Prozesse verursachen vergleichsweise geringe Herstellungskosten und bieten den Vorteil, dass neben den schnellen Bipolar-Transistoren auch CMOS-Transistoren auf dem selben Chip integriert werden können. In aktuellen Prozessen sind die dabei verwendbaren CMOS-Transistoren jedoch nicht konkurrenzfähig zu denen auf reinen CMOS-Prozessen. Trotzdem sind sie eine exzellente Ergänzung für die Verwendung in Steuer- oder Versorgungsschaltungen. Wie auch in Abbildung 1.5 zu sehen ist, erreichen neuste SiGe-BiCMOS-Prozesse Werte für f_T und f_{MAX} im Bereich von 500 bzw. 700 GHz [100], wodurch sie mit III-V Technologien aufschließen konnten. [114]

1.2. Motivation, Einordnung und Aufbau der Arbeit

Aktuelle Veröffentlichungen zeigen, dass der Schaltungsentwurf für Frequenzen oberhalb von 100 GHz im Bezug auf neue Kommunikationsstandards und eine damit verbundene Steigerung der Datenraten deutlich an Bedeutung gewinnt. Damit einhergehend stieg in den letzten Jahren auch das Interesse im Bereich der Forschung und Entwicklung sowohl an Universitäten, als auch im industriellen Umfeld. Die in der vorliegenden Arbeit entwickelten Schaltungen und Methodiken sind im Rahmen des EU ECSEL Pro-

jekts TARANTO [116] entstanden. Dieses zielte darauf ab die technologischen Barrieren für die Entwicklung der nächsten BiCMOS- Technologieplattformen zu durchbrechen und die Leistung von Heterojunction Bipolar Transistoren (HBTs) zu steigern. Diese neue Generation von HBTs gilt als Schlüsselfaktor, um den Anforderungen im Bereich Hochgeschwindigkeits-kommunikationssysteme mit hohen Datenraten gerecht zu werden. Anwendungsbereiche sind die Integration heterogener intelligenter Systeme sowie intelligente Mobilitätssysteme für künftige vollautomatische Verkehrssysteme [116].

Des Weiteren existierte im Rahmen von TARANTO ein Arbeitspaket zur Entwicklung breitbandiger drahtloser Kommunikationssysteme mit BS im D-Band. An diesem Arbeitspaket waren mehrere Partner aus der Industrie und von Universitäten beteiligt. Das während des Projekts entstandene Systemkonzept ist in Abbildung 1.6 dargestellt. Es besteht aus dual-polarisierten Sende- und Empfangskomponenten, wobei Sender-seitig je zwei Sender mit BS Funktionalität vorgesehen sind. Die maximale Datenrate sollte dabei 80 Gbit/s betragen wobei je 40 Gbit/s auf die beiden Polarisierungen aufgeteilt sind. Die Kommunikationsstrecke sollte dabei 30 m überbrücken können. Weitere Parameter sind in Tabelle 1.2 zusammengefasst. Wie in Abbildung 1.4 dargestellt, übertrifft diese Spezifikation den heute gültigen (2022) Stand der Technik deutlich. An dieser Stelle sei erwähnt, dass bis heute jedoch die Demonstration dieser Kommunikationsstrecke noch aussteht. Das Systemkonzept wurde durch Nokia Bell Labs in Stuttgart betreut. Den SiGe BiCMOS Prozess stellte die Infineon Technologies AG zur Verfügung. Am Entwurf der Sendeschaltungen waren Ingenieure des imecs in Belgien beteiligt. Packaging und Antennen wurden am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entwickelt. Für den Entwurf des analogen D-Band Empfänger-Front-Ends war die Friedrich-Alexander-Universität

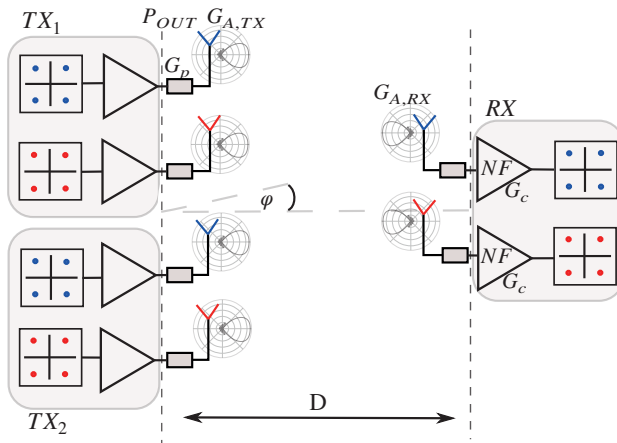


Abbildung 1.6.: Abstraktes Systemkonzept des Demonstrators im Rahmen des TARANTO Projekts.

Tabelle 1.2.: Auswahl der für das TARANTO-Projekt entwickelten Systemspezifikationen für das D-Band-Kommunikationssystem.

	Wert	Einheit	Kurzbeschreibung
P_{OUT}	15	dBm	Ausgangsleistung Sender
NF	7	dB	Rauschzahl des Empfängers
NF_P	10	dB	Rauschzahl Empfänger in Gehäuse
B	>20	GHz	3dB-Bandbreite
$G_{A,TX}$	17	dB	Antennengewinn Sender
$G_{A,RX}$	17	dB	Antennengewinn Empfänger
λ	2.2	mm	mittlere Wellenlänge in Luft
f_0	135	GHz	Mittenfrequenz des Übertragungssignals
G_p	3	dB	Gehäuseverluste
G_c	40	dB	Umsetzungsgewinn des Empfängers
SNR_{TX}	50	dB	SNR des Senders

Erlangen-Nürnberg (FAU) zuständig. In diesem Rahmen sind auch große Teile der in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Schaltungen und Methodiken entwickelt worden.

Der Aufbau dieser Arbeit ist an den Entwicklungsprozess eines HF-Front-Ends eines Kommunikationssystems im D-band orientiert. Zu diesem Zweck werden in Kapitel 2 wesentliche nachrichten- und schaltungstechnische Grundlagen aufbereitet, welche das Leistungspotential des Systems und der Technologie anhand grundlegender Betrachtungen einordnen. Die nachrichtentechnische Betrachtung dieses Kapitels behandelt dabei aktuelle Konzepte und Herausforderungen zur Erhöhung der Datenrate und Reichweite von drahtlosen Systemen. Der Anspruch ist dabei eine möglichst grundlegende Einbeziehung wesentlicher Effekte für den Systementwurf, um daraus die nötigen Parameter für die schaltungstechnische Umsetzung ableiten zu können. Der anschließende Abschnitt bietet einen Einblick in HF-schaltungstechnische Grundlagen und dient als Einordnung zur erwarteten Leistungsfähigkeit der zur Verfügung stehenden Technologien. Dabei werden auch die in dieser Arbeit verwendeten SiGe BiCMOS Halbleitertechnologien vorgestellt. Des Weiteren werden Grundlagen zum Entwurf passiver Schaltungskomponenten eingeführt, worauf eine wesentliche Design-Philosophie innerhalb dieser Arbeit basiert. Auf dieser Basis lassen sich die aus der nachrichtentechnischen Betrachtung gewonnenen Aspekte mit den schaltungstechnischen Bedingungen verknüpfen, was die theoretische Grundlage dieser Arbeit bildet.

Kapitel 3 stellt die verwendete systematische Methodik für den Entwurf von D-Band Schaltungen im Rahmen dieser Arbeit vor. Dabei wurde vorhandene Electronic-Design-Automation (EDA) Software um eine effiziente Entwurfsmethodik erweitert, um die benötigten D-Band Schaltungskomponenten zu optimieren. Dieser Teil demonstriert die Entwicklung einer einfachen Beschreibungssprache für passive Komponenten, welche nicht nur einen prozessunabhängigen und algorithmischen Entwurf passiver Koppler-Elemente