

Beiträge aus der Informationstechnik

Andres Seidel

**Leistungsverstärker für den Einsatz in
energiesparsamer Informations- und
Kommunikationstechnik**

 VOGT

Dresden 2023

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available on the Internet
at <http://dnb.dnb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2023

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation
„Leistungsverstärker für den Einsatz in energiesparsamer Informations- und
Kommunikationstechnik“ von Andres Seidel überein.

© Jörg Vogt Verlag 2023
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-95947-066-7

Jörg Vogt Verlag
Niederwaldstr. 36
01277 Dresden
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921
Telefax: +49-(0)351-31403918
e-mail: info@vogtverlag.de
Internet : www.vogtverlag.de

Technische Universität Dresden

**LEISTUNGSVERSTÄRKER FÜR DEN EINSATZ IN
ENERGIESPARSAMER INFORMATIONS- UND
KOMMUNIKATIONSTECHNIK**

Dipl.-Ing.
Andres Seidel

der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

| | |
|---------------|--------------------------------------|
| Vorsitzender: | Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach |
| Gutachter: | Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Ellinger |
| Gutachter: | Prof. Dr. Rüdiger Quay |

Tag der Einreichung: 28.03.2023

Tag der Verteidigung: 30.06.2023

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass die nachfolgende Dissertation, einschließlich aller relevanten Erkenntnisse und Resultate, von mir selbstständig und ohne unzulässige Hilfe Dritter erarbeitet wurde. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken und Ergebnisse sind als solche gekennzeichnet. Diese Dissertation wurde bisher weder an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik noch an einer anderen wissenschaftlichen Einrichtung im In- oder Ausland in gleicher oder ähnlicher Form eingereicht. Des Weiteren fand noch keine Veröffentlichung der vorliegenden Form statt, jedoch wurden bedeutende Ergebnisse im Rahmen meiner wissenschaftlichen Tätigkeit an der Professur für Schaltungstechnik und Netzwerktheorie als Konferenzbeiträge und Zeitschriftenartikel im Vorfeld veröffentlicht. Auf die eigenen im Literaturverzeichnis aufgeführten Arbeiten, welche die Referenzform [Sei...] verwenden, wird zu Beginn der entsprechenden Kapitel und Abschnitte hingewiesen.

Andres Seidel

Dresden, 04.07.2023

Kurzfassung

Thematisch eingebettet in das Forschungsgebiet der energiesparsamen Informations- und Kommunikationstechnik (IKT), beschäftigt sich diese Dissertation mit dem Entwurf und der Analyse von Leistungsverstärkern (LV) für drahtlose Übertragungssysteme. Die Arbeit konzentriert sich einerseits auf den asymmetrischen Doherty-Leistungsverstärker (DPA), welcher in einem Ausgangsleistungs-Backoff (OBO) von mehr als 6dB einen zusätzlichen Effizienzhochpunkt aufweist. Andererseits wird die Topologie des geschalteten inversen Klasse-E Verstärkers beleuchtet, der sich durch einen theoretischen Wirkungsgrad von 100 % auszeichnet und daher für den Einsatz in energie-sparsamer IKT von besonderem Interesse ist.

Das Breitbandverhalten des DPA wird zur Optimierung der Leistungseffizienz (PAE) theoretisch analysiert. Hierbei wird der Einfluss der charakteristischen Impedanz des Impedanzinverters (IT) im Main-Pfad untersucht. Daran anknüpfend werden drei asymmetrische Sub-6GHz DPA mit unterschiedlichen IT entworfen. Labormessung ergeben eine maximale PAE zwischen 52 % und 63 % bei einer Ausgangsleistung von 41 dBm bis 42 dBm, was für einen derartigen LV mit einer Mittenfrequenz oberhalb von 3GHz den höchsten Wert im Vergleich zum Stand der Technik darstellt. Neben diesem diskreten Aufbau werden zwei weitere integrierte asymmetrische DPA-Designs in Galliumnitrid (GaN) bzw. Siliziumgermanium (SiGe) vorgestellt. Für den GaN-DPA mit Chebyshev-Anpassnetzwerk wird in der Messung eine abweichende Phasenlage zwischen Peak- und Main-Pfad detektiert, die nachträglich durch Bonddrahtmodifikation auf dem Chip verbessert wird. Der Schaltkreis erreicht eine hohe PAE im OBO von 34 % bis 54 %. Der dritte Entwurf untersucht einen zweistufigen asymmetrischen DPA in SiGe, der auf einer Analyse des WLAN-Standards bei 60GHz basiert. Diese Analyse

ergibt ein Verhältnis von maximaler zu mittlerer Ausgangsleistung (PAPR) von 8dB. Der LV erreicht im Frequenzbereich von 59GHz bis 67GHz den vergleichsweise höchsten Leistungsgewinn von 22dB.

Die inverse Klasse-E Topologie wird als Ausgangsstufe in einem polaren Vektormodulator mit niedriger Versorgungsspannung verwendet. Eine theoretische Analyse der Topologie zeigt, dass die für einen effizienten Betrieb erforderlichen Induktivitäten geringer sind als beim klassischen Klasse-E Verstärker. Der daraus resultierende geringere Bedarf an Chipfläche macht diese Topologie besonders für stark skalierte CMOS-Prozesse interessant. Es werden zwei integrierte Schaltkreise (IC) in 45 nm bzw. 22 nm CMOS entworfen. Das Prinzip des Vektormodulators wird mit dem in 45 nm gefertigten IC getestet. Zur Steigerung der Ausgangsleistung auf bis zu 19,3dBm wird die Topologie in eine neuartige inverse Klasse-E Gegentaktstufe überführt. Die kompakte Schaltung zeichnet sich durch eine hohe relative Bandbreite von 70,5 % aus.

Neben den rein schaltungstechnischen Inhalten der Arbeit wird in einer kollaborativen Studie das Reduktionspotential von Treibhausgasemissionen durch IKT untersucht. Ziel ist der interdisziplinäre Brückenschlag zwischen Umwelt- und Ingenieurwissenschaften, um die ganzheitliche Sichtweise auf das Thema energieeffizienter IKT zu erweitern. Am Beispiel deutscher Konferenzreisen für das Jahr 2030 wird anhand einer Szenarioanalyse gezeigt, dass die deutschen CO₂-Emissionen durch den Einsatz neuartiger 2D/3D-Videokonferenzsysteme jährlich um bis zu 20,51MtCO₂e gesenkt werden könnten. Dies entspräche rund 2,7% der gesamtdeutschen Emissionen. In diesem Teil der Arbeit werden mögliche Chancen des IKT-Beitrags zur Erreichung der Klimaziele deutlich. Unklar bleibt allerdings, ob es zu Rebound-Effekten kommt und wie Ressourcenbedarf und Recycling der Technologie in Zukunft nachhaltig gestaltet werden können.

Abstract

In the context of green information and communication technologies (ICT), this thesis deals with the design and analysis of power amplifiers (PA) for wireless communication systems. It focuses mainly on the asymmetric Doherty power amplifier (DPA), which has an additional efficiency peak at an output power back-off (OBO) of more than 6 dB. Furthermore, the topology of the switched inverse class E amplifier is highlighted, which features a theoretical efficiency of 100% and is therefore of particular interest for use in green ICT.

In the theoretical part of the thesis, the broadband behavior of the asymmetric DPA is analyzed in order to improve its power added efficiency (PAE). Specifically, the influence of the characteristic impedance of the impedance transformer (IT) in the main path of the DPA is examined. Three asymmetric DPA with different IT are designed for operation in the sub-6 GHz range. Laboratory measurements yield a maximum PAE between 52% and 65% at an output power of 41 dBm to 42 dBm, which is the highest value for such a PA with a center frequency above 3 GHz compared to the state of the art. In addition to this discrete PA, two further integrated asymmetric DPA designs in gallium nitride (GaN) and silicon germanium (SiGe) are presented. For the integrated GaN DPA with Chebyshev matching network, a deviating phase shift between peak and main paths is detected, which can be subsequently improved by on-chip bond wire modification. The circuit achieves a high PAE in the OBO from 34% to 54%. The third design investigates a two-stage asymmetric DPA in SiGe based on an analysis of the WLAN standard at 60 GHz. This analysis results in a peak-to-average power ratio (PAPR) of 8 dB. The PA achieves the comparatively highest power gain of 22 dB in the frequency range of 59 GHz to 67 GHz.

The inverse class E amplifier is utilized as output stage in a polar vector modulator with a low-voltage supply. A theoretical analysis of the topology shows that the inductance values required for efficient switched mode operation are lower than for the conventional class E topology. Due to a more

compact chip layout, this topology is of particular interest for highly scaled CMOS processes. Two integrated circuits (IC) are designed in 45 nm and 22 nm CMOS, respectively. The principle of the vector modulator is tested with the circuit manufactured in 45 nm. To increase the output power up to 19.3 dBm, the topology is implemented as a novel inverse class E push-pull stage. The compact circuit is distinguished by a high relative bandwidth of 70.5 %.

In addition to the thesis' purely circuit design-related scope, the results of a collaborative study on the reduction potential of greenhouse gas emissions through ICT are presented. Our aim is to create an interdisciplinary link between environmental and engineering sciences to broaden the holistic view of energy-efficient ICT. Considering German conference trips for 2030, a scenario-based analysis shows that German carbon emissions could be reduced by up to 20.51 MtCO₂e annually by the use of novel 2D/3D videoconferencing. This would correspond to around 2.7 % of Germany's total emissions. Our findings also highlight potential opportunities for the ICT contribution to achieving climate goals. However, it remains uncertain whether rebound effects will occur and how the resource requirements and recycling of the technology can be made sustainable in the future.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abkürzungsverzeichnis | IV |
| Symbolverzeichnis | VII |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Reduktion von Treibhausgasemissionen durch Informations- und Kommunikationstechnik | 5 |
| 2.1 Einordnung | 5 |
| 2.2 Verfahrensweise/Methodik | 9 |
| 2.2.1 Technologische Ansätze für Videokonferenzen . . . | 9 |
| 2.2.2 Definition der Szenarien | 11 |
| 2.2.3 Leistungsaufnahme von Videokonferenzen | 12 |
| 2.2.4 Grundlegende Annahmen zu Konferenzreisen | 15 |
| 2.3 Ergebnisse | 17 |
| 2.3.1 Ermittlung der CO ₂ e-Emissionen einer einzelnen Reise | 17 |
| 2.3.2 Absolute Reduktion der Treibhausgasemissionen . . | 19 |
| 2.4 Zusammenfassung | 21 |
| 3 Grundlagen zu Leistungsverstärkern | 23 |
| 3.1 Konventionelle Leistungsverstärker | 24 |
| 3.1.1 Wirkungsgrad bei Vollaussteuerung | 25 |
| 3.1.2 Wirkungsgrad unterhalb der Vollaussteuerung | 29 |
| 3.2 Doherty-Leistungsverstärker | 30 |
| 3.2.1 Grundprinzip | 31 |
| 3.2.2 Analyse des Breitbandverhaltens | 37 |
| 3.3 Inverse Klasse-E Leistungsverstärker | 46 |
| 3.3.1 Basisgleichungen für hocheffizienten Betrieb | 47 |
| 3.3.2 Betrachtung und Vergleich der Induktivitäten | 53 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4 | Asymmetrische Doherty-Leistungsverstärker | 57 |
| 4.1 | Diskreter Entwurf für Sub-6 GHz zur Untersuchung des Einflusses vom Impedanztransformator auf das Breitbandverhalten | 57 |
| 4.1.1 | Schaltungsentwurf | 58 |
| 4.1.2 | Experimentelle Ergebnisse | 64 |
| 4.1.3 | Auswertung | 73 |
| 4.2 | Integrierter Entwurf für Sub-6 GHz in 250 nm GaN-Halbleitertechnologie | 74 |
| 4.2.1 | Schaltungsentwurf | 74 |
| 4.2.2 | Experimentelle Ergebnisse | 79 |
| 4.2.3 | Auswertung | 84 |
| 4.3 | Integrierter Entwurf für Millimeterwellen in 130 nm SiGe-Halbleitertechnologie | 86 |
| 4.3.1 | Charakterisierung des 60 GHz WLAN-Übertragungsstandards | 87 |
| 4.3.2 | Schaltungsentwurf | 88 |
| 4.3.3 | Experimentelle Ergebnisse | 97 |
| 4.3.4 | Auswertung | 100 |
| 5 | Integrierte inverse Klasse-E Leistungsverstärker für Sub-6 GHz | 103 |
| 5.1 | Entwurf als Vektormodulator in 45 nm CMOS | 103 |
| 5.1.1 | Schaltungsentwurf | 103 |
| 5.1.2 | Experimentelle Ergebnisse | 107 |
| 5.1.3 | Auswertung | 110 |
| 5.2 | Entwurf als Gegentaktstufe in 22 nm CMOS | 112 |
| 5.2.1 | Schaltungsentwurf | 112 |
| 5.2.2 | Experimentelle Ergebnisse | 116 |
| 5.2.3 | Auswertung | 120 |
| 6 | Zusammenfassung und Ausblick | 123 |
| A | Anhang | 129 |
| A.1 | Tabellen zu Kapitel 2 | 129 |

| | |
|-------------------------------------|------------|
| A.2 Tabellen zu Kapitel 4 | 133 |
| Nachwort | 135 |
| Literaturverzeichnis | 137 |
| Abbildungsverzeichnis | 163 |
| Tabellenverzeichnis | 171 |
| Lebenslauf | 173 |
| Danksagung | 175 |

Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Beschreibung (<i>Englische Beschreibung</i>) |
|-------------------|---|
| 5G | Mobilfunkstandard der fünften Generation |
| 6G | zukünftiger Mobilfunkstandard der sechsten Generation |
| AAN | ausgangsseitiges Anpassnetzwerk |
| BiCMOS | Bipolar CMOS |
| BMBF | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| BPSK | binäre Phasenmodulation (<i>Binary Phase-Shift Keying</i>) |
| CMOS | <i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i> |
| CO ₂ e | Kohlenstoffdioxid-Äquivalent, Maßeinheit zur Verdeutlichung der Klimawirkung von Treibhausgasen, normiert auf Kohlenstoffdioxid |
| DAC | digital-zu-analog Konverter (<i>Digital-to-Analog Converter</i>) |
| DAKORE | D atenfunknetz mit A daptivhardware und KI -Optimierung zur R eduktion des E nergieverbrauches |
| DPA | Doherty-Leistungsverstärker (<i>Doherty Power Amplifier</i>) |
| DPD | digitale Vorverzerrung (<i>Digital Pre Distortion</i>) |
| E-UTRA | Schnittstelle für LTE-Mobilfunkstandard (<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access</i>) |
| EAN | eingangsseitiges Anpassnetzwerk |
| EM | elektromagnetisch |
| FD-SOI | <i>Fully-Depleted Silicon On Insulator</i> |
| FET | Feldeffekttransistor |
| GaAs | Galliumarsenid |
| GaN | Galliumnitrid |
| HBT | Bipolartransistor mit Heteroübergang (<i>Heterojunction Bipolar Transistor</i>) |

| Abkürzung | Beschreibung (<i>Englische Beschreibung</i>) |
|------------------|--|
| HD | <i>High Definition</i> , im Zusammenhang mit hochauflösendem Video |
| HEMT | Feldeffekttransistor mit hoher Elektronenbeweglichkeit (<i>High Electron Mobility Transistor</i>) |
| HF | Hochfrequenz |
| IC | Integrierter Schaltkreis (<i>Integrated Circuit</i>) |
| IHP | Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik (<i>Innovations for High Performance</i>) |
| III-V | Halbleitertechnologie mit chemischen Elementen aus der dritten und fünften Hauptgruppe |
| IKT | Informations- und Kommunikationstechnik |
| IP | <i>Internet Protocol</i> |
| ISM | ISM-Frequenzband (<i>Industrial, Scientific and Medical Band</i>) |
| IT | Impedanzinverter (<i>Impedance Transformer</i>) |
| KI | Künstliche Intelligenz |
| LTE | Mobilfunkstandard der vierten Generation (<i>Long Term Evolution</i>) |
| LV | Leistungsverstärker |
| MIMO | Datenübertragungsverfahren mit mehreren Ein- und Ausgängen (<i>Multiple Input Multiple Output</i>) |
| MMIC | monolithisch integrierte Mikrowellenschaltung (<i>Monolithic Microwave Integrated Circuit</i>) |
| OBO | Ausgangsleistungs-Backoff (<i>Output Power Backoff</i>) |
| OFDM | orthogonales Frequenzmultiplexverfahren (<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>) |
| OOK | <i>On-Off Keying</i> |
| PAPR | Verhältnis von Spitzenleistung zur mittleren Leistung (<i>Peak-to-Average Power Ratio</i>) |
| PCB | Leiterplatte (<i>Printed Circuit Board</i>) |

| Abkürzung | Beschreibung (<i>Englische Beschreibung</i>) |
|------------------|--|
| PEP | Hüllkurvenspitzenleistung (<i>Peak Envelope Power</i>) |
| PHY | Bitübertragungsschicht (<i>Physical Layer</i>) |
| PWM | Pulsweitenmodulation |
| QAM | Quadraturamplitudenmodulation |
| RAN | Funkzugangsnetz (<i>Radio Access Network</i>) |
| SC | Single Carrier |
| SiGe | Siliziumgermanium |
| SIGMA-5G | <i>Signal Transmission Architecture for 5G</i> |
| SMD | oberflächenmontiertes Bauelement (<i>Surface-Mounted Device</i>) |
| TN _A | Transformationsnetzwerk zum Knotenpunkt A |
| VCO | spannungsgesteuerter Oszillator (<i>Voltage Controlled Oscillator</i>) |
| WDF | Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion |
| WLAN | drahtloses lokales Netzwerk (<i>Wireless Local Area Network</i>) |
| WLT | Wilkinson-Leistungsteiler nach [1] |

Symbolverzeichnis

| Symbol | Beschreibung | Einheit |
|-----------------------|---|------------------------|
| BR_{Int} | Bitrate der Datenübertragung über das Internet | bits^{-1} |
| BR_{LD} | Bitrate der lokalen Datenübertragung | bits^{-1} |
| BR | Bitrate einer Datenübertragung | bits^{-1} |
| BW | Relative Bandbreite | % |
| B_L | Suszeptanz am Ausgang der inversen Klasse-E | S |
| B | Bandbreite | Hz |
| C_B | Kapazität an der Basis der Emitterstufe der Kaskodenschaltung | F |
| C_{Cas} | Kapazität an der Basis der Basisstufe der Kaskodenschaltung | F |
| C_{DC} | DC-Blockkapazität | F |
| C_W | Ersatz-Kapazität für Wilkinson-Leistungsteiler | F |
| C_{in} | Kapazität am Schaltungseingang | F |
| C_{out} | Kapazität am Schaltungsausgang | F |
| EM_{real} | Gesamtemission für eine real durchgeführte Konferenzreise | gCO_2e |
| EM_{virt} | Gesamtemission für eine virtuelle Konferenz | gCO_2e |
| $E_{\text{Int},2030}$ | Energie zur Datenübertragung im Internet im Jahr 2030 | WhGB^{-1} |
| G_{DC} | DC-Leitwert der inversen Klasse-E bei geschlossenem Schalter | S |
| G_L | Leitwert der Ausgangslast der inversen Klasse-E | S |
| G_P | Leistungsgewinn/Leistungsverstärkung eines Verstärkers | dB |
| I_C | Kollektorstrom eines Bipolartransistors | A |
| I_{DC} | Gleichstrom oder auch Gleichstromanteil | A |

| Symbol | Beschreibung | Einheit |
|-----------------------------|---|---|
| I_D | Drainstrom eines Feldeffekttransistors | A |
| $I_{D,n}$ | Effektivwert der n-ten Harmonischen vom Drainstrom eines Feldeffekttransistors | A |
| L_{DC} | HF-Blockinduktivität | H |
| L_F | Induktivität des Filternetzwerkes bei inverser Klasse-E | H |
| L_S | Serielle Induktivität bei inverser Klasse-E | H |
| L_W | Ersatz-Induktivität für Wilkinson-Leistungsteiler | H |
| MIX_{Jahr} | Emissionsfaktor elektrischer Energie für ein bestimmtes Jahr | $\frac{\text{gCO}_2\text{e}}{\text{kWh}}$ |
| N | Index für das Verhältnis von Peak- und Main-Verstärker an der Ausgangsleistung P_{out} des Doherty-Verstärkers | – |
| PAE | Leistungseffizienz (<i>Power Added Efficiency</i>) | % |
| PE_{IKT} | Produktionsbedingter Emissionsfaktor der IKT-Geräte | $\frac{\text{gCO}_2\text{e}}{\text{h}}$ |
| P_{DC} | Gleichleistung | W |
| P_{Int} | Leistungsaufnahme bei Datenübertragung über das Internet | W |
| P_{LD} | Leistungsaufnahme bei Datenübertragung über das lokale Datennetzwerk | W |
| $P_{\text{SUM},2D}$ | Leistungsaufnahme 2D-Videokonferenz | W |
| $P_{\text{SUM},3D}$ | Leistungsaufnahme 3D-Videokonferenz | W |
| $P_{\text{in,dB}}$ | Hochfrequenz-Eingangsleistung im logarithmischen Maßstab | dBm |
| P_{in} | Hochfrequenz-Eingangsleistung | W |
| $P_{\text{out},1\text{dB}}$ | Hochfrequenz-Ausgangsleistung im ausgangsbezogenen 1 dB-Kompressionspunkt | W |

| Symbol | Beschreibung | Einheit |
|-----------------------------|---|----------------|
| $P_{\text{out,M}}$ | Hochfrequenz-Ausgangsleistung des Main-Verstärkres | W |
| $P_{\text{out,OBO}}$ | Hochfrequenz-Ausgangsleistung im Ausgangsleistungs-Backoff | W |
| $P_{\text{out,PEP}}$ | Hochfrequenz-Ausgangsleistung bei Hüllkurvenspitzenleistung | W |
| $P_{\text{out,P}}$ | Hochfrequenz-Ausgangsleistung des Peak-Verstärkers | W |
| $P_{\text{out,dB}}$ | Hochfrequenz-Ausgangsleistung im logarithmischen Maßstab | dBm |
| $P_{\text{out,sat}}$ | Gesättigte Hochfrequenz-Ausgangsleistung | W |
| P_{out} | Hochfrequenz-Ausgangsleistung | W |
| R_{B} | Bias-Widerstand an der Basis der Emitterstufe der Kaskodenschaltung | Ω |
| R_{Cas} | Bias-Widerstand an der Basis der Basisstufe der Kaskodenschaltung | Ω |
| R_{L} | Lastwiderstand | Ω |
| R_{int} | Reellwertiger Bezugswiderstand zwischen zwei Verstärkerstufen | Ω |
| $R_{\text{opt,int}}$ | Optimaler Lastwiderstand an der internen Stromquellen-Referenzebene eines diskreten Transistors | Ω |
| $U_{(\text{BR})\text{CBO}}$ | Kollektor-Basis-Durchbruchspannung bei offenem Kollektor | V |
| $U_{(\text{BR})\text{CEO}}$ | Kollektor-Emitter-Durchbruchspannung bei offener Basis | V |
| $U_{(\text{BR})\text{CER}}$ | Kollektor-Emitter-Durchbruchspannung bei Beschaltung der Basis mit einem Widerstand | V |
| U_{B} | Bias-Spannung der Emitterstufe bei Kaskodenschaltung | V |

| Symbol | Beschreibung | Einheit |
|-------------------|--|----------------|
| U_{CC} | Versorgungsspannung beim Bipolartransistor | V |
| U_{Cas} | Bias-Spannung der Basisstufe bei Kaskodenschaltung | V |
| U_{DD} | Versorgungsspannung | V |
| $U_{DS,sat}$ | Drain-Source-Sättigungsspannung | V |
| U_{DS} | Drain-Source-Spannung | V |
| U_{GS} | Gate-Source-Spannung | V |
| U_G | Gate-Bias-Spannung | V |
| U_L | Spannung über dem Lastwiderstand | V |
| U_{PHS} | Kontrollspannung zur Modulation der Phase bei inverser Klasse-E | V |
| U_Y | Kontrollspannung zur Modulation des Tastverhältnisses bei inverser Klasse-E | V |
| $U_{in,\xi}$ | Eingangsspannung für maximal breitbandige Anpassung | V |
| U_{in} | Eingangsspannung | V |
| U_{th} | Schwellspannung eines Transistors | V |
| Z_0 | Charakteristische Impedanz | Ω |
| $\Phi_{M,offset}$ | Elektrische Länge der Offset-Leitung am Ausgang des Main-Verstärkers | $^\circ$ |
| $\Phi_{P,komp}$ | Elektrische Länge der Phasenkompensationsleitung am Eingang des Peak-Verstärkers | $^\circ$ |
| $\Phi_{P,offset}$ | Elektrische Länge der Offset-Leitung am Ausgang des Peak-Verstärkers | $^\circ$ |
| Φ | Elektrische Länge bzw. Phasenverschiebung einer Struktur | $^\circ$ |
| $\alpha_{D,t}$ | Modulationsindex des Doherty-Verstärkers nach Transformation | – |
| α | Stromleitwinkel eines Verstärkers | rad, $^\circ$ |

| Symbol | Beschreibung | Einheit |
|------------------------|--|---------------------|
| η | Wirkungsgrad, beim FET die Drain-Effizienz | % |
| λ | Wellenlänge einer periodischen Welle | m |
| ω | Kreisfrequenz | rad s^{-1} |
| $\bar{\eta}$ | Gemittelter Wirkungsgrad | % |
| ψ | Phasenwinkel der Admittanz aus B_L und G_L | rad, ° |
| θ | Zeitmaß, Winkelmaß | rad, ° |
| $I_{M,t}$ | Komplexer Strom im Pfad des Main-Verstärkers nach der Impedanztransformation | A |
| I_M | Komplexer Strom im Pfad des Main-Verstärkers | A |
| I_P | Komplexer Strom im Pfad des Peak-Verstärkers | A |
| \underline{U}_A | Komplexe Spannung am gemeinsamen Knotenpunkt A von Main- und Peak-Pfad | V |
| \underline{U}_M | Komplexe Ausgangsspannung des Main-Verstärkers | V |
| $\underline{U}_{in,M}$ | Komplexe Eingangsspannung des Main-Verstärkers | V |
| $\underline{U}_{in,P}$ | Komplexe Eingangsspannung des Peak-Verstärkers | V |
| \underline{Z}_A | Impedanz am gemeinsamen Knoten A von Main- und Peak-Verstärker | Ω |
| \underline{Z}_{Cheb} | Impedanz nach Transformation mit Chebyshev-Tiefpassfilter | Ω |
| \underline{Z}_G | Impedanz am Gate | Ω |
| \underline{Z}_{Load} | Lastimpedanz aus Load-Pull-Analyse | Ω |
| \underline{Z}_L | Lastimpedanz | Ω |
| $\underline{Z}_{M,t}$ | Last am Ausgang des Main-Verstärkers nach der Impedanztransformation | Ω |

| Symbol | Beschreibung | Einheit |
|---------------------------|---|----------|
| \underline{Z}_M | Last am Ausgang des Main-Verstärkers | Ω |
| $\underline{Z}_{OPT,ext}$ | Optimale Lastimpedanz an der Bias/Bauteil-Referenzebene eines diskreten Transistors | Ω |
| $\underline{Z}_{OPT,in}$ | Optimale Eingangsimpedanz | Ω |
| \underline{Z}_P | Last am Ausgang des Peak-Verstärkers | Ω |
| \underline{Z}_{Source} | Quellimpedanz aus Source-Pull-Analyse | Ω |
| \underline{Z}_W | Impedanz des Wilkinson Leistungsteilers | Ω |
| \underline{Z}_{in} | Eingangsimpedanz | Ω |
| $\underline{\alpha}_D$ | Komplexer Modulationsindex des Doherty-Verstärkers vor Transformation | – |
| φ | Phasenverschiebung einer harmonischen Schwingung | rad, ° |
| ξ | Skalierungsvariable des Impedanzinverters TL_0 | – |
| ζ | Normalisierter Anstieg im Umschaltzeitpunkt bei inverser Klasse-E, siehe [2] | – |
| f_0 | Mittenfrequenz | Hz |
| f_{CLK} | Taktfrequenz eines geschalteten Verstärkers | Hz |
| f_T | Transitfrequenz | Hz |
| f_{max} | maximale Oszillationsfrequenz | Hz |
| f | Frequenz | Hz |
| $g_{m,M}$ | Steilheit des Main-Verstärkers | S |
| $g_{m,P}$ | Steilheit des Peak-Verstärkers | S |
| i_{SW} | Strom durch den Schalter bei (inverser) Klasse-E | A |
| i_{out} | Ausgangsstrom bei (inverser) Klasse-E | A |
| i_x | Strom durch die Suszeptanz am Ausgang bei inverser Klasse-E | A |

| Symbol | Beschreibung | Einheit |
|---------------|--|----------------|
| i_n | Durch paralleles Filter fließende harmonische Ströme bei inverser Klasse-E | A |
| m_e | Anzahl paralleler Emmitter beim Bipolartransistor | – |
| r_{3D} | 3D-Anteil bei Videokonferenz | – |
| t_{virt} | Dauer einer virtuellen Konferenz | h |
| t | Zeit | s |
| u_L | Spannung über Induktivität L_S bei inverser Klasse-E | V |
| u_{SW} | Spannung über Schalter bei (inverser) Klasse-E | V |
| u_{out} | Spannung über Ausgangslast bei (inverser) Klasse-E | V |
| y | Variable zur Bestimmung des Tastverhältnisses bei inverser Klasse-E, siehe [2] | rad, ° |

1 Einleitung

Als Reaktion auf eine wenig nachhaltige Entwicklung der Wirtschaft kündigte die Europäische Kommission im Dezember 2019 mit dem „Europäischen Grünen Deal“ ein Strategiepapier an [3], welches eine Reihe an tiefgreifenden Maßnahmen enthält, um den Übergang in die Klimaneutralität (Netto-Null Ausstoß von Treibhausgasen) der EU bis 2050 zu erreichen. Innerhalb dieser ganzheitliche Betrachtung wird deutlich, dass eine stärkere Digitalisierung vieler Industriebereiche zur Umsetzung der Klima-Ziele notwendig ist. Dabei zählen digitale Technologien wie Künstliche Intelligenz (KI), neuartige Breitbandnetze, Cloud-Computing und das Internet der Dinge zu den wesentlichen Treibern. Weiterhin unterstreicht [3], dass die Leistungs- und Rohstoffeffizienz im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik (z.B. für Netzwerke, Rechenzentren, Endgeräte, etc.) erhöht werden muss.

Nicht nur in Industrie und Wirtschaft, sondern in nahezu allen öffentlichen und privaten Bereichen der Gesellschaft hält die Verwendung von Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) immer stärkeren Einzug. So macht dieser Sektor weltweit gesehen aktuell rund 10% des Energiebedarfs aus, der laut [4] auf 21 % bis zum Jahr 2030 ansteigen wird. Nach Schätzungen in [5] nutzt heutzutage rund 66 % der Weltbevölkerung einen Zugang zum Internet, wobei über 29 Milliarden Endgeräte mit IP-Netzwerken verbunden sind. Neben der intensiveren Verwendung nimmt auch die Qualität von Video- und Bildübertragung permanent zu, wodurch zusätzlich die zu übertragende Datenmenge ansteigt. Mittlerweile beläuft sich beispielsweise der Anteil von Videostreaming auf 61 % der gesamten heruntergeladenen Daten [6]. Ein komfortabler Zugang zu schnellem mobilen Internet über den Mobilfunkstandard der vierten Generation (*Long Term Evolution*) (LTE) bzw. den aufkommenden Mobilfunkstandard der fünften Generation (5G) stimuliert zusätzlich den Datenaustausch, bedingt aber gleichzeitig zusätzliche

Netzkapazität und Ausbau entsprechender Infrastruktur. Diese Standards decken dabei aktuell rund 57 % der mobilen Kommunikation ab, wobei der Anteil vor allem im Bereich 5G weiterhin steigt [5].

An diese Perspektive anknüpfend, konzentriert sich die vorliegende Arbeit vor allem auf die Steigerung der Leistungseffizienz für die zukünftige drahtlose Datenübertragung. In den Basisstationen von Funkzugangsnetzen (RAN) ist der Leistungsverstärker (LV) die Komponente mit dem höchsten Leistungsbedarf. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojektes SIGMA-5G wurden Leistungsverstärker für den Einsatz in einem 5G-Sendepfad untersucht. Insbesondere der Doherty-Leistungsverstärker (*Doherty Power Amplifier*) (DPA) ist in diesem Zusammenhang eine vorteilhafte Topologie, da dessen Leistungseffizienz im Vergleich zu einem Klasse-B LV über einem größeren Aussteuerbereich erhöht ist. Wie diese Arbeit zeigt, ist der wenig untersuchte, asymmetrische Entwurf dieser Topologie für Modulationsverfahren mit großem Dynamikbereich (z.B.: LTE, 5G, WLAN-Übertragung) besser geeignet, als die verbreitetere symmetrische Variante. Neben der Asymmetrie wird auch das Breitbandverhalten der Schaltung theoretisch betrachtet und messtechnisch untersucht. Auf Grundlage der gesammelten Erkenntnisse entstanden diverse Konferenzbeiträge und ein Beitrag in einer Fachzeitschrift, auf deren Inhalt dieser Teil der Arbeit aufbaut.

Neben diesem thematischen Schwerpunkt wird mit dem inversen Klasse-E LV eine weitere Verstärkertopologie untersucht. Diese sogenannten geschalteten Verstärker weisen eine theoretische Effizienz von 100% auf und sind daher für den Einsatz in energiesparsamer IKT besonders prädestiniert. Auf Grundlage der theoretischen Entwurfsgleichungen werden zwei inverse Klasse-E Verstärker als zentrale Komponente eines Vektormodulators in *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* (CMOS) entworfen. Dabei offenbaren sich Limitierungen, die der theoretisch erreichbaren Effizienz entgegenwirken. Der Entwurf ohne explizite Anwendung verläuft dabei als Konzeptstudie zur Topologie und weist in diesem Zusammenhang auf Vor- und Nachteile hin.

Über die schaltungstechnischen Betrachtungen und Entwürfe hinaus, befasst sich diese Arbeit mit einer weiter ausholenden Studie zum Reduktionspotential von Treibhausgasemissionen durch IKT. Am Beispiel deutscher Konferenzreisen wird mittels einer Szenarioanalyse eruiert, wie stark der CO₂e-Ausstoß bis zum Jahr 2030 gesenkt werden kann, wenn reale Reisen durch virtuelle Konferenzen, die hochqualitative 2D- oder neuartige 3D-Videokonferenzsysteme verwenden, teilweise ersetzt werden. Die Studie zeigt, dass mit Hilfe von IKT die Treibhausgasemissionen anderer Sektoren, in diesem Fall der Verkehrssektor, signifikant gemindert werden können.

Gliederung der Arbeit

Im nun folgenden Kapitel 2, das die Reduktion von Treibhausgasen durch IKT untersucht, wird die gesellschaftliche Relevanz der Technologie genauer eingeordnet und deren Potential beispielhaft quantifiziert. Dies motiviert unter anderem die Bestrebungen zur Effizienzsteigerung der LV.

In dieser Hinsicht bildet Kapitel 3 die theoretische Grundlage der durchgeführten Schaltungsentwürfe. Neben der grundlegender Funktionsweise wird besonders auf den Wirkungsgrad konventioneller Verstärker eingegangen. Außerdem wird der DPA vorgestellt und insbesondere unter dem Gesichtspunkt der asymmetrischen Architektur und des Breitbandverhaltens betrachtet. In Abschnitt 3.3 werden die Gleichungen zur Dimensionierung der inversen Klasse-E hergeleitet.

Die an die Theorie anschließenden Kapitel 4 und 5 beschäftigen sich mit dem Entwurf und der messtechnischen Charakterisierung entsprechender Leistungsverstärker, die zum Vergleich in den Stand der Technik eingeordnet werden. Der Entwurf eines diskreten DPA für den Sub-6GHz Bereich in Abschnitt 4.1 nutzt die hergeleitete Theorie aus Abschnitt 3.2. Es werden drei Verstärker mit unterschiedlichen Werten des eingeführten Entwurfsparameters ξ entworfen und anhand von Labormessungen verglichen. Integrierte Entwürfe asymmetrischer DPA folgen in den Abschnitten 4.2 und 4.3. Dabei werden die Halbleitertechnologien Galliumnitrid (GaN) für den Entwurf im

Sub-6 GHz Bereich und Siliziumgermanium (SiGe) für den Entwurf im ISM-Frequenzband (*Industrial, Scientific and Medical Band*) (ISM) bei 60 GHz verwendet.

In Kapitel 5 werden zwei Schaltungsentwürfe in 45 nm bzw. 22 nm CMOS vorgestellt. Beide Entwürfe nutzen die in ihrer Theorie (Abschnitt 3.3) vorgestellte inverse Klasse-E Topologie als Ausgangsstufe eines Vektormodulators. Zunächst wird das Konzept anhand eines Entwurfs in 45 nm CMOS vorgestellt und messtechnisch getestet. Ein auf diesen Erkenntnissen aufbauender Entwurf überführt anschließend die Architektur in einen 22 nm *Fully-Depleted Silicon On Insulator* (FD-SOI) Prozess. Dabei wird die Ausgangsstufe zu einer inversen Klasse-E Gegentaktstufe mit höherer Ausgangsleistung erweitert.

Abschließend werden die Ergebnisse der Arbeit in Kapitel 6 zusammengefasst und ein Ausblick auf künftige Untersuchungen gegeben. So widmet sich das seit Mitte 2022 laufende Forschungsprojekt **Datenfunknetz mit Adaptivhardware und KI-Optimierung zur Reduktion des Energieverbrauches** (DAKORE) ebenfalls dem Design hocheffizienter und zusätzlich schnell an- und abschaltbarer LV. Für den Einstieg in dieses Gebiet wird das An- und Abschaltverhalten des Verstärkers aus Abschnitt 4.1 messtechnisch analysiert. Zusätzlich zielt das Projekt darauf ab, die Effizienz der Verstärker für ein Ausgangsleistungs-Backoff (*Output Power Backoff*) (OBO) von mehr als 14 dB zu optimieren, was neuartige Mehrpfad-DPA ermöglichen sollen.