

Kapitel 1

Einleitung

In den Anwendungen der Hochfrequenztechnik spielt von Beginn an die Signalerzeugung eine wichtige Rolle. Die Frequenzmultiplikation an einer Nichtlinearität wurde schon früh als eine Möglichkeit erkannt, die Harmonischen einer Fundamentalfrequenz zu nutzen.

Für die Dimensionierung eines Hochfrequenzsenders (Signalerzeugers) sind je nach Anwendung neben Abstimmbarkeit, Signal-zu-Rauschabstand und Preis folgende Kriterien von Interesse: Das benötigte Volumen/Gewicht und die erzielbare Ausgangsleistung. Die benötigte Signalleistung ist naturgemäß abhängig von der zu erzielenden Reichweite und von der Frequenz. Die Funkwellendämpfung steigt nach Bild 1.1 mit der Frequenz und ist zudem stark abhängig von den Absorptionsmaxima des Gasgemisches der Luft. Insbesondere dort, wo die Atmosphäre Dämpfungsminima (-Fenster) aufweist, besteht ein Interesse an leistungsstarken Sendern.

Die Leistungserzeugung ist in jedem interessierenden Frequenzbereich nahezu vollständig über die Röhrentechnik abdeckbar (siehe Bild 1.1). Leistungsröhren im Millimeterwellenbereich nutzen die Wechselwirkung zwischen einem Elektronenstrahl und elektromagnetischen Feldern, dabei wird die kinetische Energie des Elektronenstrahls in elektromagnetische Energie umgesetzt. Als Beispiele aus der Röhrentechnik sind das Gyrotron und der Rückwärtswellenoszillator zu nennen. Nachteilig bei dieser Technologie ist die beschränkte Lebensdauer, die aufwendige Hochspannungsversorgung und die schlechte Abstimmbarkeit. Für mobile Anwendungen ist diese Art der Signalerzeugung aus diesen Gründen häufig nicht einsetzbar.

Die Leistungserzeugung mit Halbleiterbauelementen bietet dagegen den Vorteil, dass sie durch kompakte, handelsübliche Netzteile mit Gleichstrom versorgt werden können. Die Herstellung – im Rahmen einer Massenfertigung – ist deutlich günstiger. Für den Einsatz in mobilen Systemen spricht die geringe Größe. Als gravierender Nachteil ist die im Vergleich zur Röhrentechnik geringe Ausgangsleistung zu nennen. Die erzielbare Leistung sinkt im Zentimeterwellenbereich umgekehrt proportional zur Frequenz. Im Millimeterwellenbereich sinkt sie abhängig von dem verwendeten Bauelement umgekehrt proportional zur zweiten Potenz der

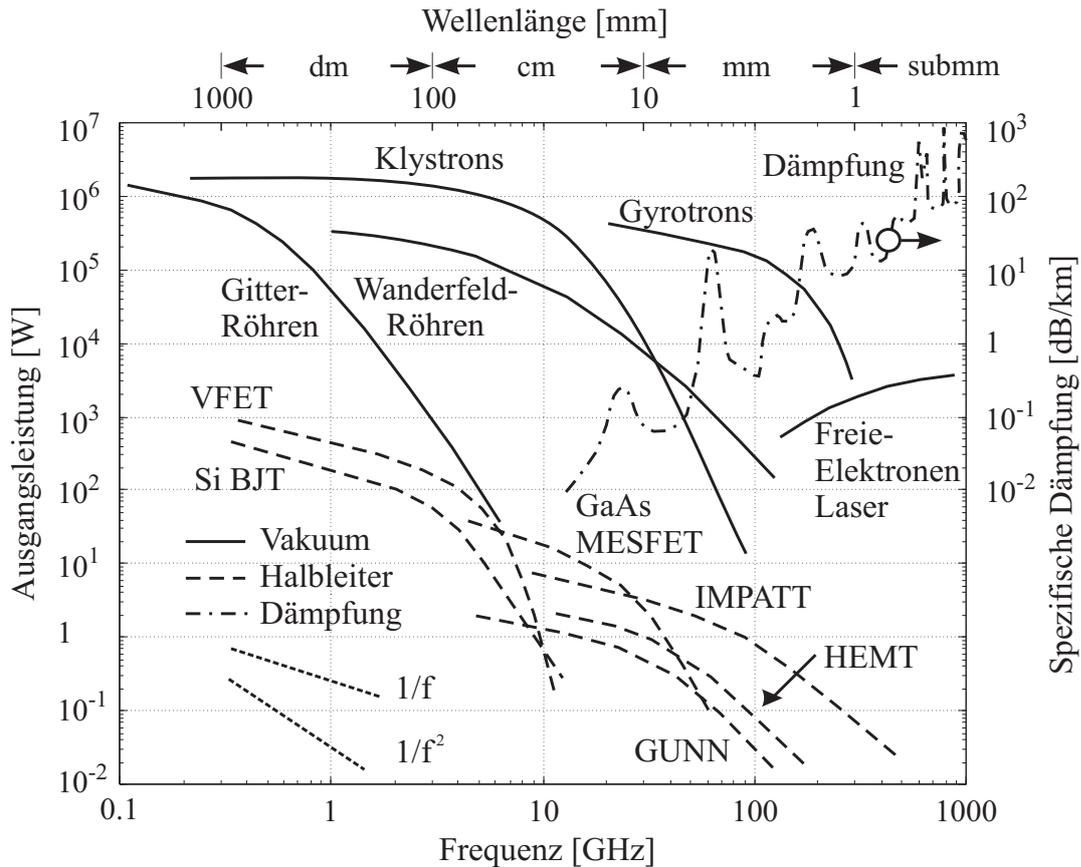


Bild 1.1: Ausgangsleistung einiger Quellen der Hochfrequenztechnik (nach [Yor97]). Spezifische Dämpfung der Atmosphäre in Meereshöhe: Dämpfungsfenster befinden sich unter anderem bei 35, 94, 140 und 220 GHz, Absorptionsspitzen bei 21, 60, 119 und 183 GHz (nach [Kla00]).

Frequenz [Sze90]. Ab gewissen Grenzfrequenzen wird bei fast allen Generatoren sogar von einem Leistungsrückgang proportional zu f^{-3} ausgegangen [Shi89, Eis98]. Begründet wird dieses mit den technischen Problemen der Herstellung zusätzlich zu den schon limitierenden elektronischen Eigenschaften.

Im Frequenzbereich der Zentimeterwellen (3 bis 30 GHz) können durch Transistor-Oszillatoren (Dreipol-Elemente) Ausgangsleistungen bis zu einigen 10 Watt gewonnen werden. Das Leistungspotenzial dieser Elemente nimmt mit steigender Frequenz ab, sodass im Millimeterwellenbereich (30 bis 300 GHz) fast ausschließlich Zweipol-Elemente wie Gunnelemente oder IMPATT¹-Dioden zum Einsatz kommen².

Ab einer Frequenz von 100 GHz finden für die Signalerzeugung Frequenzvervielfacher Verwendung, da die Ausgangsleistung der Zweipol-Elemente stark abnimmt. Ausgehend von ei-

¹Die Abkürzung IMPATT leitet sich im Englischen aus **IMP**act **A**valanche **T**ransit **T**ime ab.

²Es ist Gegenstand aktueller Forschung, die Grenzfrequenzen von Transistoren deutlich zu erhöhen.

nem leistungsstarken Grundwellenoszillator wird eine stark nichtlineare Impedanz angesteuert und durch eine geeignete Schaltung eine Oberwelle ausgekoppelt. Eine Hintereinanderschaltung von mehreren Vervielfachern ermöglicht es, Frequenzen von über 1 THz und somit bis weit in den Submillimeterwellenbereich zu erzeugen [Sim99]. Die äußerst geringe erzielbare Leistung in diesem Bereich von weniger als $100 \mu\text{W}$ ermöglicht aber lediglich, Lokaloszillatoren für Heterodynempfänger und somit passive Messsysteme bereitzustellen. Für Sender, also für den Aufbau eines aktiven Systems, ist die Leistung deutlich zu gering.

Trotz der oben genannten Probleme sind die kurzen Wellenlängen sehr attraktiv, beispielsweise wegen der sehr kompakten Antennen und der erzielbaren Bandbreiten. Tiefere Frequenzbereiche sind häufig für Anwendungen bereits vergeben. Manche Anwendung gibt den hohen Frequenzbereich selbst vor; beispielsweise für die Detektion von Schadstoffen in der Luft durch die Auswertung von Absorptionslinien. Für die interstellare Spektroskopie bieten sich die atmosphärischen Dämpfungsfenster an (beispielsweise 660 und 850 GHz in [Lew93]). Strahlung von interstellaren Gebilden wie Staubnebel, Galaxien und die kosmische Hintergrundstrahlung erreicht hauptsächlich im Submillimeterwellenbereich die Erde [Phi94]. Satellitengestützte Observatorien erlauben eine Beobachtung des gesamten Spektrums, unter Ausschluss der dämpfenden Eigenschaften der Atmosphäre. Dies muss unter der Verwendung kleiner, leichter und verlässlicher Quellen erfolgen, welche mit einer einfachen Niederspannungsversorgung ausreichend Leistung generieren. Andere Anwendungen im Terahertzbereich bestehen in der Plasmediagnostik.

Frequenzvervielfacher mit Dioden lassen sich allgemein in zwei Kategorien aufteilen: durch die Verwendung von Varistor oder Varaktor als nichtlineares Element. Im ersten Fall wird ein nichtlinearer Widerstand genutzt, resultierend in einem geringeren Wirkungsgrad, aber einer großen möglichen Bandbreite. Im zweiten Fall wird eine nichtlineare Reaktanz eingesetzt, meist eine nichtlineare Kapazität. Varaktor-Frequenzvervielfacher können theoretisch einen Wirkungsgrad von 100 % erreichen (siehe Kapitel 2). Nachteilig im Vergleich zum Varistor-Vervielfacher ist jedoch die geringere Bandbreite und ein deutlich empfindlicheres Verhalten der Schaltung. In der Praxis vermischen sich diese beiden Fälle fast immer, sodass die Klassifizierung nach dem vorwiegend auftretenden Effekt vorgenommen wird.

Zwei der gebräuchlichsten Elemente zur Erzeugung von Leistung durch Vervielfachung im Millimeter- und Submillimeterwellenbereich werden in den Kapiteln 3 und 4 vorgestellt. Der Schottkyvaraktor findet überwiegend für die Frequenzverdopplung und -verdreifachung, der HBV nur für die Frequenzverdreifachung Verwendung. Auf der Basis der physikalischen Eigenschaften werden Ersatzschaltbilder (ESB) hergeleitet, mit denen die Bauelemente hochfrequenztechnisch analysierbar sind und mit festen schaltungstechnischen Randbedingungen eine Bauelement-Synthese betrieben werden kann. Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen, wird das üblicherweise verwendete Modell erweitert. Es wird dabei die Möglichkeit

geschaffen, messtechnisch ermittelte Parameter des Varaktors in die Hochfrequenz-Simulation mit einzubeziehen. Die untersuchten Dioden werden in Kapitel 5 in eine Schaltung eingebracht. Im Rahmen dieser Arbeit wurden diverse Vervielfacher untersucht, wobei der Schwerpunkt auf Frequenzverdopplern mit Schottkyvaraktoren und auf Frequenzverdreifachern mit Heterobarrieren-Varaktoren liegt. Zwei Entwicklungen werden genauer vorgestellt und messtechnisch charakterisiert. Grundsätzlich wird bei der Schaltungsentwicklung die Verwendbarkeit der Vervielfacher in Multielement-Anordnungen in den Vordergrund gestellt.

Das oben angesprochene Problem der geringen Leistung im Millimeter- und Submillimeterwellenbereich lässt sich prinzipiell durch die Addition vieler einzelner Quellen (Vervielfacher) lösen. Die Ansteuerung ist auf verschiedene Weise realisierbar. In diesem Frequenzbereich bietet sich die quasi-optische Leistungsteilung und -addition an, da diese für mehr als vier Elemente verlustärmer als z. B. die Leistungsaddition in einem Hohlleitersystem ist. Der in der Literatur propagierte Grid-Vervielfacher [Yor97] besteht aus den folgenden Komponenten: Der Eingangsstrahl bei der Fundamentalfrequenz wird durch ein Paar dielektrischer Scheiben angepasst an die Impedanz der nachfolgenden Schaltungsteile. Hinter einem Filter trifft der Strahl auf den eigentlichen Vervielfacher. Das Diodengrid ist eine periodisch mit Dioden besetzte Struktur, mit welcher die gewünschte Harmonische erzeugt werden kann. Die Oberwelle wird meist in einer anderen Polarisation abgestrahlt, sodass die Frequenztrennung verhältnismäßig einfach ist. Nach einer erneuten Impedanztransformation – wie am Eingang – wird die Harmonische dem Ausgang zugeführt. Durch eine Integration sehr vieler Elemente kann die Ausgangsleistung gesteigert werden. Die Leistungsaddition findet im Freiraum statt. Damit werden die Verluste reduziert, die üblicherweise in Netzwerken zur Leistungsaddition als begrenzender Faktor vorherrschen. Für eine Abstrahlung ohne Nebenkeulen muss das Grid eine Periodizität von weniger als einer Wellenlänge der höchsten Harmonischen aufweisen. Dies kann insbesondere bei einer hohen Verlustleistung zu einem Wärmestau führen.

Durch eine geeignete Strahlformung mit Hilfe eines Phasengitters kann die Ausbreitung der Nebenkeulen verhindert und so die Begrenzung des Interelementabstandes vermieden werden. Diese Phasengitter wurden in dieser Art erstmalig in [Sha98] vorgestellt, die Analyse und Synthese für den Millimeter- und Submillimeterwellenbereich in [Hoe02] fortgeführt. Im Kapitel 7 wird auf solche Multielement-Frequenzvervielfacher eingegangen. Die für die Multielementvervielfacher benötigten quasi-optischen Schaltungskomponenten werden in Kapitel 6 beschrieben. Im letzten Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen in diesem Bereich gegeben.

Die vorliegende Arbeit an Frequenzvervielfachern wurde im Rahmen einer DFG³-Forschergruppe durchgeführt. Ein Projektziel dieser Gruppe ist es, exemplarisch bei $n \times 150$ GHz Leistung zu erzeugen. Beginnend mit einer quasi-optischen Leistungsaddition

³Deutsche Forschungsgemeinschaft

mehrerer Halbleiteroszillatoren bei 150 GHz sollen die Harmonischen durch Frequenzvervielfacher entstehen. Aus diesem Grund liegt die Eingangsfrequenz untersuchter Vervielfacher immer bei 150 GHz. Nach Verdopplung bzw. Verdreifachung betragen die Ausgangsfrequenzen 300 bzw. 450 GHz.