

# **Die Chancen innovativer Satellitenkommunikation in einer modernen digitalisierten Gesellschaft**

von

Dr. Hans – Peter Petry

Backnang, Juni 2019

## **Die Chancen innovativer Satellitenkommunikation in einer modernen digitalisierten Gesellschaft**

### **Executive Summary**

Die Digitalisierung ist heute eine der entscheidenden Transformationen für eine zukünftige Gesellschaft. Dies ist inzwischen auf allen Ebenen verstanden worden, damit ist ein erster Schritt gemacht. Eine erfolgreiche und nachhaltige Umsetzung ist aber eine höchst komplexe Aufgabe, die weiteren Schritte müssen daher sorgfältig angegangen und durchgeführt werden. In der Öffentlichkeit werden entsprechende Diskussionen in der Regel auf der Anwendungsebene geführt. Hier gilt es, die Gesellschaft auf vielfältige neue Applikationen einzustimmen, die unser Leben im Laufe der digitalen Evolution deutlich verändern werden.

Der erste Teil der Ausarbeitung beschäftigt sich daher mit den wesentlichen Aspekten bei neuen Anwendungen wobei im Wesentlichen die Künstliche Intelligenz, das Internet der Dinge und zukünftige Lösungen zur Optimierung des Verkehrs behandelt werden. Es zeigt sich unmittelbar, dass alle diese Kernelemente auf einer leistungsfähigen und überall verfügbaren Infrastruktur für die feste und mobile Kommunikation aufbauen müssen. Fehlt diese oder ist sie nur unzulänglich vorhanden, werden viele Vorhersagen nicht oder nur über längere Zeit eintreffen. Die Qualität der Kommunikationsinfrastruktur ist also entscheidend.

Der zweite Teil der Ausarbeitung beschäftigt sich daher mit einer realistischen Sicht aktueller (terrestrischer) Telekommunikationsnetze für festen und mobilen Netzzugang. Hierzu werden alle beim heutigen Stand der Technik verfügbaren Übertragungsverfahren (Glasfasernetze, Hybride Glasfaser-Kupfernetze, Koaxialkabelnetze, Funknetze) im Hinblick auf Leistungsfähigkeit (erreichbare Datenraten im Normalbetrieb) und Verfügbarkeit (Flächendeckung) untersucht. Besondere Beachtung finden dabei aktuelle (4G) und zukünftige (5G) Mobilfunknetze, die wegen der hohen Bedeutung einer überall verfügbaren Mobilität für die Digitalisierung eine besondere Bedeutung haben. Bei genauerer und ehrlicher Betrachtung zeigen sich dabei allseits wohlbekannt Defizite, die vielfältige Ursachen haben. Manche davon hängen von wirtschaftlichen Zwängen ab und sind daher einfach zu verstehen, andere beruhen jedoch auf komplexen physikalischen Zusammenhängen und sind daher nicht so offensichtlich. Wirtschaftliche Defizite können bis zu einem gewissen Grad durch den Einsatz höherer Investitionen in Zusammenhang mit staatlichen Programmen oder einer Dienstverpflichtung verkleinert werden. Dies hat jedoch Grenzen sobald die Kosten unzulässig überproportional steigen. Dies ist immer dann der Fall, wenn eine nahezu vollständige Netzabdeckung erreicht werden soll. Physikalische Begrenzungen sind im Gegensatz

dazu naturgegeben, Marketing-Strategien neigen in der Regel dazu, dies zumindest teilweise zu ignorieren. Eine dynamische Auslegung moderner Kommunikationstechnologien unterstützt dies. Die Systeme können sich dynamisch an unterschiedliche Gegebenheiten anpassen, daher gibt es einen weiten Bereich möglicher Leistungsparameter. Vermarktet werden daher in der Regel die günstigsten Werte („bis zu“), in der Praxis ergeben sich aber erfahrungsgemäß deutlich niedrigere Werte. Trotzdem kann man im Rahmen der Evolution der Kommunikationssysteme davon ausgehen, dass auch für zukünftige Anwendungen ausreichende Bandbreiten und Systemkapazitäten insbesondere im Mobilfunk verfügbar werden. Ganz anders ist das bei der Netzabdeckung. Die durchgehende Versorgung mit breitbandiger fester Infrastruktur (insbesondere Glasfaser) ist aus Kostengründen nur bis zu einem gewissen Grad realisierbar, eine gute Mobilfunkversorgung ist nur mit niedrigen Trägerfrequenzen möglich, dies steht aber im Gegensatz zum Bedarf an höheren Datenraten, die nur bei Verwendung höherer Trägerfrequenzen und über mikrozellulare Netztopologien erreicht werden können. Insgesamt verbleibt demnach eine Lücke von 5 – 10 % zu einer vollständigen Netzabdeckung. Derartige Lücken sind für viele neue Anwendungen kontraproduktiv oder gar unzulässig.

Diese Gegebenheiten eröffnen neue Chancen für Kommunikationssysteme im erdnahen Raum, die bisher nur sehr eingeschränkt und isoliert betrachtet wurden. Die Kapitel 3 bis 7 behandeln daher mögliche Ansätze und Lösungen und untersuchen diese im Detail. Es zeigt sich, dass Satellitenkommunikation die erwähnte Abdeckungslücke von 5 – 10% technisch und kostenmäßig effizient abdecken kann. Die hierfür notwendigen Netzarchitekturen und Systemlösungen werden dargestellt und quantitativ bewertet, kritische Technologieelemente werden identifiziert. Notwendige Voraussetzung für einen globalen Erfolg ist dabei eine vollständige Integration in das Standardisierungswerk terrestrischer Systeme. Diese Notwendigkeiten wurden erkannt und entsprechende Aktivitäten sind gestartet worden. Die Standardisierungsaktivitäten umfassen demnach alle möglichen bekannten und neuen Ansätze im erdnahen Bereich. Beachtenswert sind insbesondere Aktivitäten der sog. „New Space Economy“, deren Ansätze über Konstellationen niedrigfliegender Satelliten aktuell große Aufmerksamkeit erzeugt haben. Damit kann – wie im Einzelnen gezeigt wird – eine direkte bidirektionale Kommunikation standardisierter Endgeräte mit einer Satelliteninfrastruktur implementiert werden. Was im Bereich der Navigation seit langem zur Selbstverständlichkeit geworden ist, wird daher auch im Bereich der Kommunikation möglich. Derartige Lösungen können die erwähnte Lücke von 5 – 10% effizient schließen. Ein wesentliches Element für eine bessere Abdeckung ist dabei die Tatsache, dass bei richtiger Dimensionierung terrestrische (horizontale) und satellitengestützte (vertikale) Ausleuchtung sich in hohem Masse ergänzen können.

Zur Verdeutlichung der ökonomischen Aussagen wird in Kapitel 8 ein detaillierter Kostenvergleich einer terrestrischen Mobilfunklösung mit einer Beispiellösung (Konstellation) durchgeführt. Die Konstellation ist dabei in ihrer Systemkapazität so dimensioniert, dass sie erwähnte Lücke von 5 – 10% schließen kann. Bedingt durch den asymptotischen Kostenverlauf

terrestrischer Systeme bei hohen Abdeckungsgraden ist die zusätzliche Satelliteninfrastruktur schon auf nationaler Ebene deutlich kostengünstiger als der Aufwand, ein terrestrisches System zu einer vergleichbaren Abdeckungsrate zu „tunen“. Noch interessanter werden die Relationen bei einer Betrachtung im europäischen Rahmen. Aktuelle Aktivitäten der Protagonisten der New Space Economy zielen gar auf einen globalen Einsatz. Die vorliegenden Ausführungen erklären damit auch die enormen Investitionen, die in diesem Bereich getätigt werden.

Das vorliegende Dokument ist daher als Informations- und Entscheidungshilfe gedacht, in welcher Form zukünftige Investitionen in Entwicklung und Bereitstellung notwendiger leistungsfähiger Telekommunikationsinfrastruktur getätigt werden können und sollen. Es wurde gezeigt, dass die Einbeziehung der Satellitenkommunikation in strategische Gesamtüberlegungen notwendig, ja zwingend ist. Sie ist in der Lage, die fehlenden Bausteine effizient bereitzustellen. Notwendige Technologieansätze sind sowohl national als auch europaweit vorhanden, kritische Technologieelemente und Systemwissen müssen auf nationaler und europäischer Ebene bewahrt und gefördert werden.

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>5</b>
Vorwort	8
1. Elemente der Digitalisierung	9
1.1. Künstliche Intelligenz	6
1.2. Das Internet of Things	10
1.3. Autonomes Fahren	11
2. Terrestrische Kommunikation	14
2.1. Informationstheoretische Grundlagen	14
2.2. Leitungsgebundene Übertragungstechniken	18
2.2.1. Glasfaser	18
2.2.2. Kupfer-Doppeladern	18
2.2.3. Koaxialkabel	19
2.3. Funkgestützte Übertragungssysteme	20
2.3.1. Mobilfunkgenerationen	20
2.3.2. 4G LTE	21
2.3.3. 5G	27
2.3.4. Fixed Radio Access	35
2.4. Optische Kommunikation	36
2.5. Erfolgsfaktoren und ihre Bewertung	36
2.5.1. Übertragungskapazität	36
2.5.2. Netzabdeckung und Verfügbarkeit	36
2.5.3. Latenz	39
2.5.4. Standardisierung	42
2.5.5. Wirtschaftlichkeit (Business Case)	43
3. Kommunikation im erdnahen Raum	45
3.1. Satelliten	45
3.1.1. Satellitenbahnen	45
3.1.2. Geostationäre Satelliten	48
3.1.3. Low Earth Orbit Satelliten	52
3.1.4. Konstellationen	58
3.2. High-Altitude Platforms	60

4. Klassische Satellitentechnik und „New Space Economy“	62
5. Systembetrachtungen	66
5.1. Elektrische Ausleuchtzonen	66
5.2. Linkbilanzen	69
5.3. Latenzen	77
5.4. Satellitenkapazität	80
5.5. Systemkapazitäten	82
5.6. Interferenzen	86
5.7. Dopplereffekt	87
5.8. Netzwerkaspekte	89
6. Kritische Technologie – Elemente	91
6.1. Antennen	91
6.2. On Board Processing	95
6.3. Optische Intersatelliten Kommunikation	97
6.4. Antriebe und Lageregelung	100
7. Use Cases	102
7.1. Remote Areas	102
7.2. Backhaul	104
7.3. BOS	104
7.4. IoT	105
7.5. Autonomes Fahren	107
7.6. Broadband Mobile Access	109
8. Wirtschaftlichkeit	110
8.1. Vorbemerkungen	110
8.2. Kosten terrestrischer Infrastruktur	111
8.3. Konstellationen und Skalierbarkeit	112
9. Zusammenfassung, Schlussfolgerungen	115
10. Literaturnachweise	116

## Vorwort

Künstliche Intelligenz, autonomes Fahren, das „Internet of Things“ sind aktuell in aller Munde als wesentliche Elemente einer immer weiter digitalisierten Gesellschaft. Medien und Politik überbieten sich im Herausstellen der Chancen und der Bedeutung für einen weiter prosperierenden Standort Deutschland und Europa, Milliarden werden in entsprechende Entwicklungsprojekte und Pilotvorhaben investiert. Unternehmen ohne KI werden nach landläufiger Meinung am Markt gnadenlos zurückfallen. Es wird darüber aber meist vergessen, dass für einen erfolgreichen Einsatz eine exzellente breitbandige und überall vorhandene Kommunikationstechnik und entsprechende Netze zwingend notwendig sind. Der kommende (Mobilfunk-) Standard 5G wird in der Regel als Lösung des Problems betrachtet.

Gleichzeitig hören wir aber von Defiziten beim Glasfaserausbau und „Funklöchern“ in der mobilen Kommunikation. Das passt nicht zusammen! Betrachten wir die aktuelle Situation in den Kommunikationsnetzen so sind doch Zweifel angebracht, ob die offensichtlichen Probleme so einfach zu lösen sein werden. Bei den Festnetzen besteht weiterhin das Problem, dass flächendeckend keine ausreichend breitbandige Infrastruktur zur Verfügung steht, ihre Installation ist teuer und scheitert neben den finanziellen Problemen auch an administrativen und organisatorischen Hürden. Im Mobilfunk wurden auch schon die Generationen vor 5G als Lösung aller Probleme vermarktet, es hat sich aber gezeigt, dass die Bäume nicht in den Himmel wachsen. Die terrestrische Funktechnik hat mit den physikalisch bedingten Ausbreitungsmechanismen elektromagnetischer Wellen zu kämpfen, die kann auch 5G nicht beseitigen. Das hat dazu geführt, dass bei allen vorangegangenen Mobilfunkgenerationen die Realität deutlich hinter den Erwartungshaltungen und Marketingversprechen zurückgeblieben ist. Dies wird bei 5G nicht anders sein.

Der Beitrag beschreibt die Gründe für die Defizite genauer und zeigt Möglichkeiten zur Verbesserung auf. Ein wesentliches Element dabei sind neuere Entwicklungen und Lösungen in der Satellitenkommunikation, die helfen können, die systembedingten Probleme terrestrischer Kommunikationstechnik deutlich zu verringern. Diese Möglichkeiten sind in Öffentlichkeit und Politik noch weitgehend unbekannt und müssen unbedingt in strategische Überlegungen zur effizienten Realisierung einer Digitalstrategie mit einbezogen werden.

## 1. Elemente der Digitalisierung

### 1.1 Künstliche Intelligenz

Ein prominentes Beispiel für die aktuelle Leistungsfähigkeit von Systemen mit „künstlicher Intelligenz“ ist das Programm Alpha-Go des Google Labors Deepmind. Schon 2016 hat das Programm gegen den besten Go-Spieler der Welt gewonnen. Dies war bis dato als nicht möglich angesehen worden, da das Brettspiel Go als zu komplex für Computer galt und für ein erfolgreiches Spiel eine Menge Intuition erforderlich ist. Die Entwickler schafften diesen Schritt durch Speicherung von Millionen von Zügen aus bekannten Partien („Big Data“) und ließen die Maschine dann gegen sich selbst spielen. Sie analysierte dann, welche Züge sie ans Ziel bringen – auch Züge die Menschen mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht spielen würden – und schlug so ihren menschlichen Gegner („Machine Learning“). Damit nicht genug: inzwischen gibt es ein Nachfolgeprogramm „Alpha-Go Zero“. Hier wurde das maschinelle Lernen noch weiter getrieben: das Programm lernte das Spiel allein aus den Regeln ohne die Eingabe von Daten die durch Menschen erzeugt wurden. Angeblich ist die neue Version um Größenordnungen besser.

Es ist unzweifelhaft, dass alles was unter „künstlicher Intelligenz“ (KI) verstanden wird, unser tägliches Leben verändert. Manches davon ist schon Realität: Siri und Alexa kommunizieren mit uns über (noch) einfache Algorithmen, sie werden „smart“ und helfen uns – wenn wir wollen – unseren Alltag einfacher zu machen. Wir reden also zunächst von Algorithmen, die die Maschinen steuern und sie somit intelligent erscheinen lassen. Aber ist das wirklich Intelligenz? Im Ernst: wenn ein System mit Daten gefüttert wird und mit Hilfe mathematischer Methoden Gesetzmäßigkeiten lernt und dann umsetzt, ist es eigentlich immer noch „dumm“. Trotzdem werden die Leistungen aufgrund immer weiter gesteigerter Speicherfähigkeit von Daten und Rechenleistungen von Computern imposanter, die Grenzen werden fließend. Insbesondere die Fortschritte bei komplexeren Algorithmen und im Bereich neuronaler Netze sind beeindruckend.

Es wird sich zeigen, wie sich dies weiterentwickelt. Wie immer bei innovativen technischen Entwicklungen gibt es Chancen und Risiken, wir müssen aber die Kontrolle behalten. KI gilt in vielen Bereichen als *die* Zukunftstechnologie. Kenntnisse über Algorithmen werden zwingend für zukünftige Produktentwicklungen in allen Bereichen von einfachen isolierten Produkten bis hin zu komplexen Systemen. Damit sind wir beim vorher erwähnten Problem der Kommunikation. Breitbandige und überall vorhandene Kommunikation wird zum wesentliche Erfolgsfaktor für alle Anwendungen, die mit KI zu tun haben. Einige davon werden wir in den folgenden Abschnitten näher beleuchten.

## 1.2 Das Internet of Things

Niemand konnte zum Start der Internet- und Mobilfunkära ahnen, welche Entwicklung die Teilnehmeranzahl nehmen würde. Es wurde aber schnell klar, dass in den Netzen die IP Adressen knapp werden würden. Aus diesem Grunde wurde mit einem erheblichen Aufwand ein neues Nummernschema für derartige Adressen eingeführt (IP V6).

Ein Grund für die IP Adressenknappheit war der Ansatz, dass neben den „normalen“ Telekommunikationsanwendern in Zukunft auch die verschiedensten Geräte ans Internet angeschlossen werden würden. Die Palette möglicher neuer Internet Teilnehmer ist praktisch unbegrenzt. Sie reicht beim heutigen Stand der Dinge von einfachen Sensoren für physikalische Größen, Betriebszustände und Steuerungsaufgaben über Geräte aus dem Hausumfeld (Smart Home), alle Arten von Fahrzeugen (Smart Traffic) bis hin zu komplexen Maschinen aus Produktion (Smart Production) und Medizin (Smart Health) – die Aufzählung kann man weiter fortsetzen.

Diese neuen Kommunikationsteilnehmer werden natürlich ausnahmslos an das Internet angeschlossen. Aufgrund der oft speziellen Lage der Sensoren und ihrer Mobilität ist eine drahtlose Verbindung meist zwingend. Wir erhalten also wie bei IP V6 eine überbordende Teilnehmerzahl in den Mobilfunknetzen. Diese sind hierfür nicht ausgelegt, es ist daher eine neue Generation von Netzen erforderlich (5G Standard). Die Übertragung zeitkritischer Information (bis hin zu Echtzeitbetrieb) ist eine weitere Forderung, die konventionelle Mobilfunkstandards nur unzureichend erfüllen. Auch hier soll 5G eine deutliche Leistungssteigerung bringen.

Wie schon bei KI ist daher ein leistungsfähiges Kommunikationsnetz ein wesentlicher Erfolgsfaktor – mehr noch – systementscheidend. Wird über leistungsfähige Mobilfunknetze gesprochen, steht meistens die Übertragungsrates im Vordergrund. Hier ist mit 4G schon ein durchaus leistungsfähiger Stand erreicht worden. Erhebliche Defizite bestehen aber bei einem anderen Parameter zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit: der Netzabdeckung. Diese ist heute schon für Mobilfunk nicht ausreichend, aber nicht unbedingt systembestimmend: wer keinen Empfang hat, muss zunächst damit leben, unschön zwar, eine Beeinträchtigung des Digitalisierungsfortschrittes, aber eben nicht entscheidend. Für IoT und insbesondere das autonome Fahren ist eine mangelnde Netzverfügbarkeit aber desaströs, d.h. ohne sie wird dieser Digitalisierungsschritt scheitern. Es wird nun allerorten darauf vertraut, dass sich dieses Problem im Laufe der Zeit lösen lässt. Hier soll insbesondere 5G ebenfalls neue Maßstäbe setzen. Wir werden im Folgenden zeigen, dass dies ein gewaltiger Trugschluss ist.

### 1.3 Autonomes Fahren

Moderne digitalisierte Systeme zur intelligenten Verkehrssteuerung werden ebenfalls unseren Alltag verändern und können darüber hinaus Sicherheit und Effizienz immer weiter wachsender Mobilität deutlich steigern. Man kann sich durchaus Situationen vorstellen, in denen „autonomes Fahren“ aus Sicht des Fahrers eher nicht attraktiv ist, der Begriff ist jedoch in der aktuellen Diskussion als Synonym für KI – gestützte Verkehrsnetze in den Vordergrund gerückt und das zu Recht, da immer komplexer werdende Systeme entsprechende Innovationen fordern.

Dabei konzentriert sich die Betrachtung zunächst - vom Begriff ausgehend - isoliert auf autonome Fahrzeuge. Die aktuelle Entwicklung hin zu Elektromobilität und anderen alternativen Antrieben ist von größter Bedeutung für die Automobilindustrie. Wertschöpfungsketten werden sich dramatisch verändern und neue Geräte und Subsysteme im Fahrzeug können absehbare Wertschöpfungsverluste kompensieren. Daher arbeiten alle Hersteller mit großem Aufwand an entsprechenden Entwicklungsprojekten.

Im Gegensatz zu bisher diskutierten Elementen der Digitalisierung kommt beim autonomen Fahren jedoch ein neuer ethischer Aspekt hinzu: die Sicherheit. Schon früh hat sich daher in Deutschland eine Ethikkommission mit den Anforderungen an derartige Systeme befasst und entsprechende Regeln aufgestellt [1]. Wichtigster Punkt ist dabei die höchstmögliche Sicherheit. Die entscheidende Frage ist nun: wie kann diese mit vertretbarem Aufwand erreicht werden? Wir sprechen hier natürlich von den höchsten Entwicklungsstufen beim autonomen Fahren [2].

Man kann sich die Bedeutung der Sicherheitsaspekte an einem einfachen Beispiel auch ohne große ethische Betrachtungen klar machen. Will man das Fahren in jeder Situation an eine Maschine (mit KI natürlich) delegieren, muss man vom bestehenden Zustand ausgehen. Der normale Autofahrer hat hier (trotz aller Probleme im Verkehr) den Standard gesetzt. Statistiken zeigen, dass es pro 100 Millionen gefahrene Kilometer einen Todesfall gibt. Schlimm genug, aber bezüglich der Sicherheit bedeutet dies eine Wahrscheinlichkeit von 0,000001 Prozent. Ein System zur automatischen Verkehrssteuerung muss aber um akzeptiert zu werden um eine oder zwei Größenordnungen (Faktor 10 oder 100) besser werden. Die Frage ist hier: mit welchem Aufwand kann das erreicht werden und wie viele Systeme werden hierfür benötigt.

Die aktuellen Entwicklungen der Automobilindustrie zielen zunächst auf eine rein fahrzeugzentrierte Lösung unter Benutzung einer Vielzahl verschiedener Sensoren und lokaler KI („Sensor Fusion“). Im Rahmen der technischen Entwicklung hat die Sensorik erhebliche Fortschritte gemacht [3], von Rückschlägen wird aber immer wieder berichtet. Zusammen mit immer weiter entwickelter KI im Fahrzeug wird es aber längerfristig sicher höchst leistungsfähige Produkte geben. Experten sind jedoch einhellig der Meinung, dass zusätzlich eine Vernetzung der Verkehrsteilnehmer untereinander unabdingbar ist. Dies ist aus mehreren Gründen offensichtlich:

zum einen ist eine lokale Lösung immer reaktiv, eine Aktion kann nur gestartet werden, wenn ein Problem auch aufgetaucht ist und erkannt wird. Dies führt automatisch zu Forderungen nach schneller Reaktionszeit der betroffenen Systeme, hohem Bedarf an Rechenleistung und niedrige Latenz eingebundener (lokaler) Kommunikation. Derartige Forderungen machen Systeme in der Regel teuer, erhöhen den Leistungsverbrauch und haben Probleme mit der Nachhaltigkeit. Ein weiterer Aspekt beruht auf der Tatsache, dass technische Systeme nie vollständig sicher sein können, egal, welchen Aufwand man betreibt. Das Problem ist aus der Luftfahrt bestens bekannt. Die Lösung ist: Vernetzung und Redundanz. Diese Überlegungen führen zu Systemszenarien, die den Sicherheitslevel auf die geforderte Stufe heben können. Erste Stufe ist eine lokale Sensor – Fusion, schon hier kann (und wird) Redundanz eingesetzt werden. Geräteredundanz ist aber in der Regel teuer. Viel interessanter ist eine zusätzliche regionale (natürlich mobile) Netzredundanz über die Verkehrsteilnehmer notwendige Informationen austauschen können. Über entsprechende Systeminformationen können dabei auch proaktive Maßnahmen ergriffen werden über die eine Vielzahl von möglichen Konflikten im Vorfeld erkannt werden und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können. Die starke Abhängigkeit von der Reaktionsgeschwindigkeit kann damit verringert werden.

Für regionale Kommunikationsnetze bieten sich natürlich die vorhandenen Mobilfunknetze mit ihren Standards an. Dies ist jedoch nur zielführend, wenn diese Netze flächendeckend vorhanden sind. Schon aktuelle Mobilfunknetze (4G) haben damit erhebliche technische und kommerzielle Probleme, mit 5G wird zwar das zusätzliche Problem der Latenz früherer Generationen verringert, das Problem der Abdeckung bleibt oder wird gar grösser wie wir in Kapitel 2 noch zeigen werden. Auch WLAN ist als Alternative in der Diskussion, hier bilden die Fahrzeuge selbst die Infrastruktur, entsprechende Standards sind in Entwicklung. Das Problem derartiger Konfigurationen ist jedoch offensichtlich: wegen der geringen Reichweite von WLAN ist eine Vernetzung nur bei hoher Verkehrsdichte möglich, der Zustand durchgehender Sicherheit ist nicht erreichbar.

Es ergibt sich also die Notwendigkeit nach einer dritten Komponente in einem zukünftigen hinreichend sicheren System. Diese Komponente kann von der Satellitenkommunikation bereitgestellt werden. Satellitenkommunikation ist heute schon ein integraler Bestandteil unseres digitalen Alltags in Form von Positionsbestimmung über Satelliten (z.B. GPS), die Technik ist in jedem modernen Endgerät zur mobilen Kommunikation oder Navigation enthalten. Man kann diesen Ansatz nun weiterentwickeln: wenn es entsprechende Systemlösungen gibt, kann man den Anwendungsbereich auf die bidirektionale Kommunikation erweitern. Damit erhält man die fehlende Komponente zur Erfüllung der Sicherheitsanforderung an das Gesamtsystem (Bild 1). Natürlich müssen Forderungen an Breitbandigkeit, Systemkapazität und Latenz erfüllt werden. Die mögliche Ausführung und die Verfügbarkeit derartiger Systeme wird in Kapitel 5 behandelt.

Wichtig ist dabei das synergetische Zusammenwirken der Komponenten. Dies wird besonders deutlich beim Problem der Abdeckung. Terrestrische Kommunikationssysteme haben das Problem, dass sich elektromagnetische Wellen horizontal ausbreiten müssen. Hierdurch ergeben sich Abschattungsprobleme sowohl in urbanen als auch ruralen Gebieten, die schon bei tiefen Frequenzen vorhanden sind, mit höherer Frequenz aber dramatisch zunehmen. Die Ausleuchtung z.B. durch einen überfliegenden Satelliten in geringer Höhe ist demgegenüber erheblich besser, beide Strategien ergänzen sich perfekt. Darüber hinaus ist ein Netz niedrig fliegender Satelliten naturgemäß global. Dies ist auch von großer Bedeutung für zukünftige IoT – Anwendungen.

Es bleibt anzumerken, dass diese Betrachtungen natürlich nicht nur auf das autonome Fahren beschränkt sind sondern ganz generell für die Bereiche autonome Mobilität und autonomen Transport gelten.

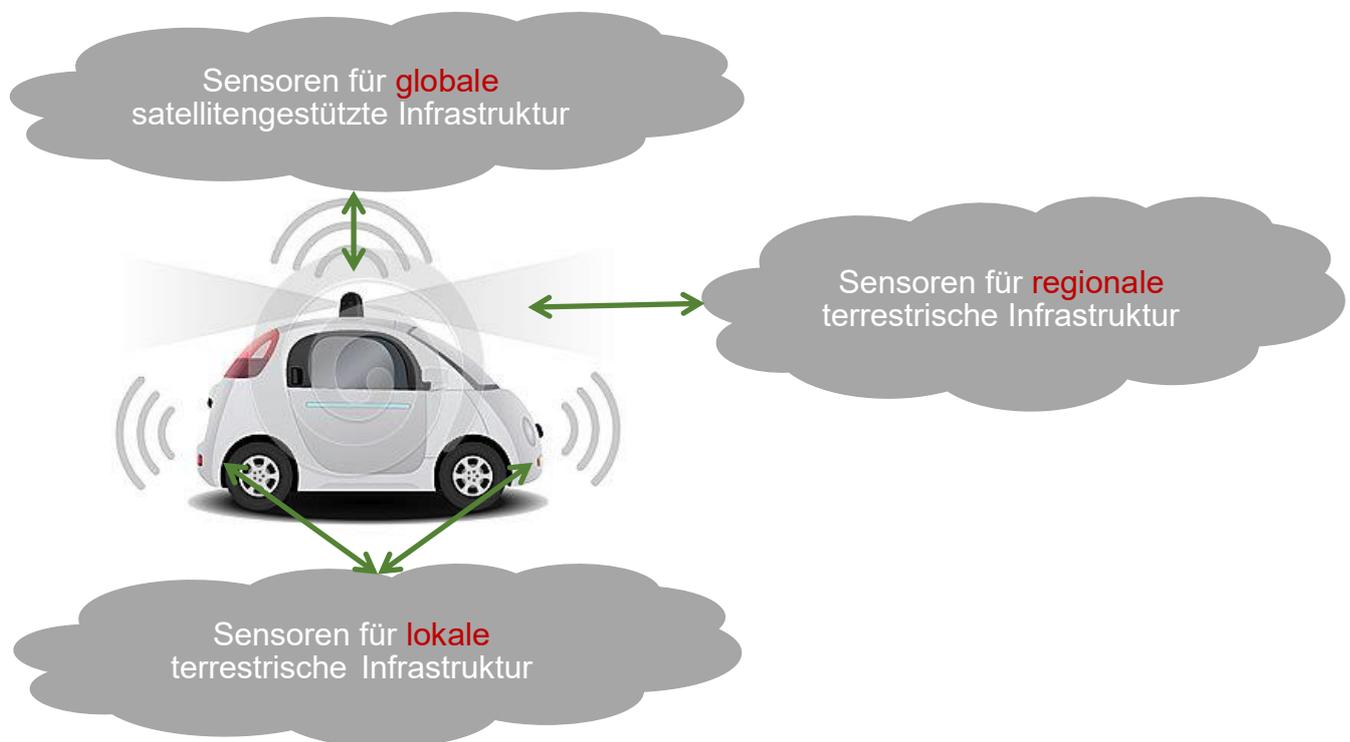


Bild 1: Mögliches Systemszenario für autonome Verkehrssysteme

Man kann nun einwenden, dass die Satellitenkommunikation und entsprechende Netzlösungen (insbesondere Konstellationen) zu spät kommen. In der Tat sind für Verkehrssteuerung geeignete Systemkonzepte noch nicht verfügbar, erste Ansätze konzentrieren sich auf andere Bereiche wie Breitband-Internet Versorgung von entlegenen Gebieten, Sonderanwendungen wie maritime Dienste oder Luftfahrt und IoT. Andererseits befindet sich aber auch wirklich autonomes Fahren noch in einem sehr frühen Stadium. Viele Probleme sind noch gar nicht richtig erkannt (Komplexität) bzw. werden unterschätzt (Sicherheit). Darüber hinaus sind leistungsfähige (und häufig redundante) Sensoren ein nicht zu unterschätzender Kostenfaktor. Auch hier wird nach aller Erfahrung ein deutlich längerer Zeitraum bis zu einer reifen Lösung verstreichen. Umso wichtiger ist daher die frühe Einbindung alternativer Systemkonzepte, die die Satellitenkommunikation im erdnahen Raum in die Überlegung mit einbeziehen.

## 2. Terrestrische Kommunikation

### 2.1 Informationstheoretische Grundlagen

Die aktuelle, allseits geführte Diskussion über den Breitbandausbau ist kontrovers und an vielen Stellen unsachlich bis sachlich falsch. Was sind die wirklichen Gründe für die Abweichungen von den vollmundigen Versprechungen von Netzbetreibern und Politikern? Ist es wirklich nur eine unzureichende Breitbandstrategie? Sind es wirklich nur die von geschäftspolitischen Notwendigkeiten getriebenen Netzausbaustrategien der Betreiber? Sind es wirklich nur die teilweise zu restriktiven und unflexiblen regulatorischen und baulichen Randbedingungen? Mit Sicherheit haben diese Aspekte auch zu der aktuellen Situation beigetragen, es gibt aber weitere technische, insbesondere informationstheoretische Gegebenheiten, die in der Regel zu wenig Beachtung finden oder ignoriert werden. Im Gegensatz zu politischen und kommerziellen Randbedingungen sind letztere nicht diskutierbar, sondern Fakt. Das bedeutet konkret, dass bestimmte Einschränkungen naturgegeben sind und hingenommen werden müssen.

Diese Sachverhalte sind seit langem bestens bekannt und für alle Formen der Übertragung gültig: jedwede Art von Kommunikation basiert auf einem Sender und einem Empfänger, die über einen Informationskanal miteinander in Verbindung treten. Dieser Informationskanal ist in der Regel reziprok, d.h. für die Sende- und Empfangsrichtung gelten die gleichen Gesetzmäßigkeiten. Die Qualität der Übertragung (Bandbreite, Verfügbarkeit) ist nun im Wesentlichen von den Eigenschaften und der Qualität des (einzelnen) Kanals abhängig.

$$C = B \cdot \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad (1)$$

Die erreichbare Übertragungskapazität  $C$  ist proportional zur Kanalbandbreite  $B$  und einem Faktor, der von der Signalqualität abhängt (1). Entscheidend ist hierbei der erreichbare Wert des Signal- zu Störabstandes.  $S$  bezeichnet in diesem Zusammenhang den Signalpegel am Empfangsort,  $N$  steht für die Summe aller Rausch- und Störsignale.

Diese von C.E. Shannon unter sehr allgemeinen mathematisch basierten Überlegungen angegebene Gesetzmäßigkeit [4] ist nun sehr gut geeignet, die maximal erreichbaren Eigenschaften verschiedenster Übertragungskanäle zu beschreiben. Unter Einführung der spektralen Effizienz

$$S_{eff} = \frac{C}{B} = \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2)$$

wird die rechte Seite der Gleichung unabhängig von der Kanalbandbreite.

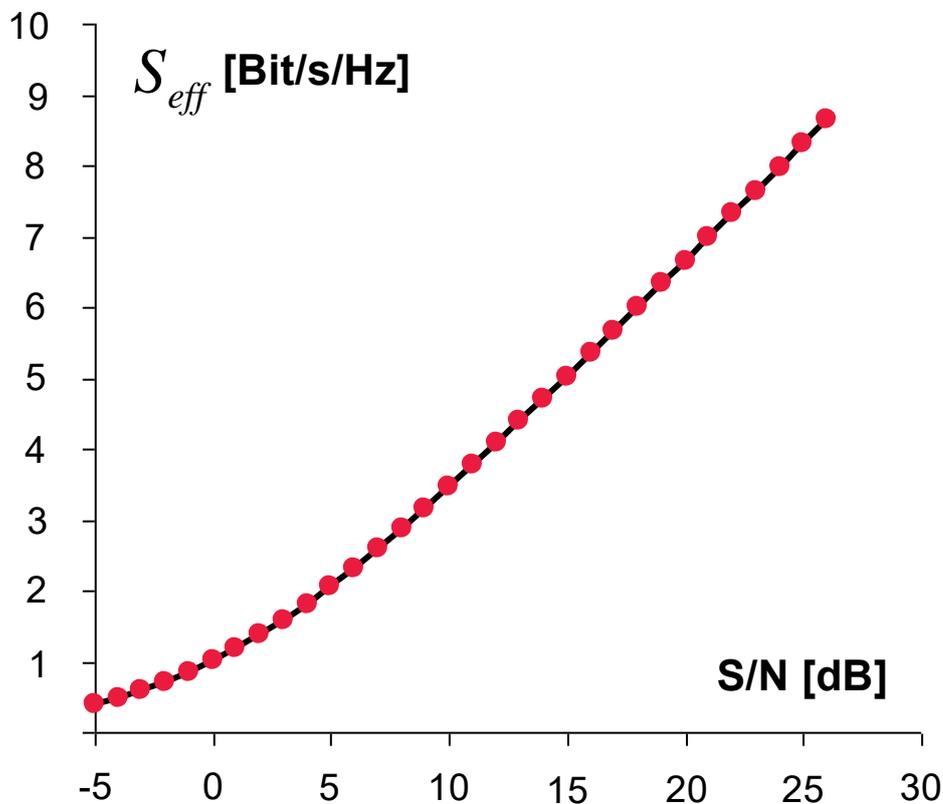
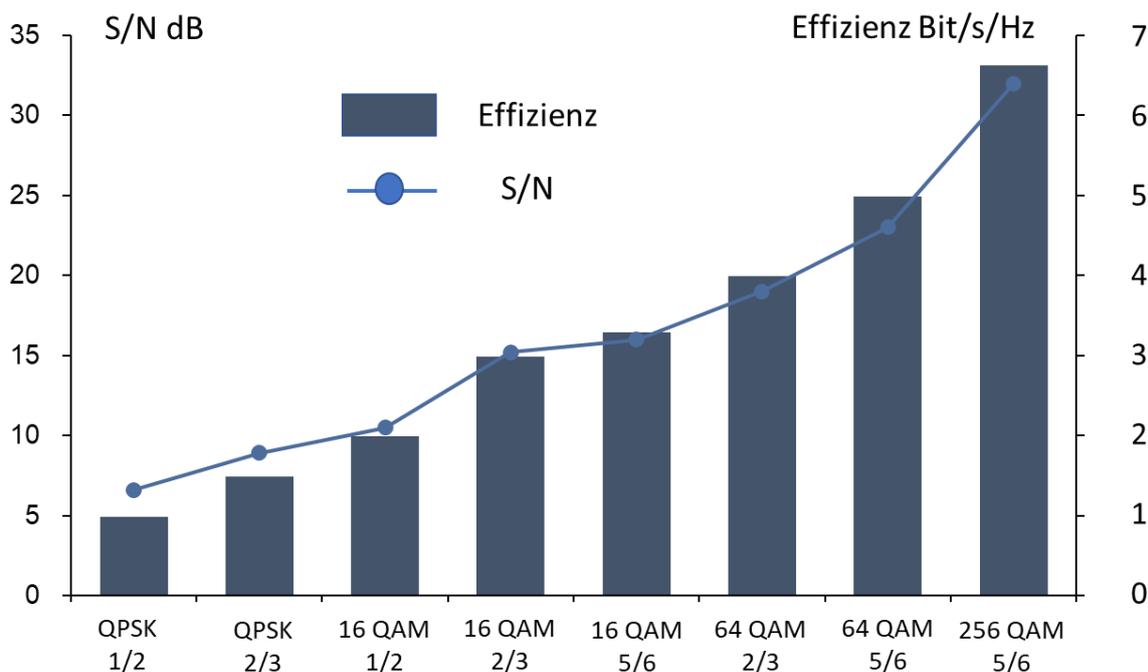


Bild 2: Spektrale Effizienz und Signal-Störabstand



**Bild 3:** Spektrale Effizienz und Modulations-/Codierungsverfahren

Bei gegebener Kanalbandbreite lassen sich nun mit Hilfe moderner digitaler und hochstufiger Modulationsverfahren [6] mehr Bit/s als Hz Bandbreite erreichen. Es ist aber leicht zu erkennen, dass mit wachsender Modulationsstufenzahl es immer schwieriger für den Empfänger ist, die einzelnen Zustände des Signals sauber voneinander zu unterscheiden. Die Verwendung hochstufiger Modulation erfordert demnach einen entsprechend hohen Signal-Rauschabstand (Bild 3). Zusätzlich müssen für sicheren Empfang Codierungsinformationen in das Signal eingebracht werden. Dies stellt aber eine Redundanz dar, diese Informationen können nicht für die Signalübertragung genutzt werden und reduzieren die Datenraten teilweise deutlich. Bei gutem Signal sind beim heutigen Stand der Technik im Mobilfunk Effizienzen bis ca. 4 Bit/s/Hz zu erreichen. In einer Mobilfunkzelle sind 30 dB Signal-Rauschabstand aber eher die Ausnahme, insbesondere am Rand der Zelle. Hieraus resultieren die starken Schwankungen der Signalstärke, die jeder kennt.

Es zeigt sich, dass bei ausreichendem Signal-Störabstand Übertragungskapazitäten weit über den durch die Bandbreite gegebenen Wert erreicht werden können. Dies ist besonders wichtig für Übertragungssysteme, die mit üblichen Radiofrequenzen (Frequenzbereich bis 30 GHz) arbeiten, da dort die verfügbaren Bandbreiten begrenzt sind. Für derartige Systeme ist daher die Optimierung von S/N das entscheidende Kriterium. Dies kann dadurch erreicht werden, dass gleichzeitig die Signalstärke maximiert und der Störpegel reduziert wird. Da aus Gründen elektromagnetischer Umweltverträglichkeit die Sendeleistung nicht beliebig gesteigert werden kann, ist eine ungestörte Empfangssituation von größter Wichtigkeit.

Es lässt sich hieraus leicht erkennen, dass leitungsgestützte Übertragungssysteme in der Regel funkgestützten Übertragungssystemen überlegen sind, da zum einen die verfügbaren Bandbreiten erheblich höher sein können (z.B. optische Kommunikation) und zum anderen meist sauber gegen Störungen abgeschirmte Leitungssysteme verwendet werden können. Die Sachverhalte gelten aber genauso für den Bereich der Sensorik (siehe autonomes Fahren). Hier können vielfältige Umwelteinflüsse (Spiegelungen in Wasser und an Objekten, Dämpfung durch Starkregen) die Übertragung beeinträchtigen oder unmöglich machen.

## 2.2 Leitungsgebundene Übertragungssysteme

### 2.2.1 Glasfaser

Im Sinne der Shannonschen Informationstheorie ist die Glasfaser bei weitem das leistungsfähigste Übertragungsmedium. Durch die optische Übertragung mit elektromagnetischen Wellen bei extrem hohen Frequenzen (6 Größenordnungen über üblichen Mobilfunkfrequenzen und 3 Größenordnungen über Frequenzen im Mikrowellenbereich) stehen enorme Bandbreiten zur Verfügung. Auch ohne Einsatz höherwertiger Übertragungsverfahren zur Steigerung der Effizienz sind entsprechende Übertragungskapazitäten erreichbar, der mögliche Einsatz höherstufiger Modulationsverfahren stellt eine weitere Reserve dar. Darüber hinaus können mit wenig Aufwand mehrere Fasern verwendet werden oder über Frequenzmultiplex (WDM, DWDM) die Übertragungskapazitäten vervielfacht werden. Glasfasern werden darüber hinaus für geringe Dämpfungen und gute Abschirmungswerte optimiert, so dass auch große Entfernungen überbrückt werden können.

Die Probleme bei der Glasfaser liegen bekanntermaßen bei der Verlegung. Zwar ist das Medium selbst kostenoptimiert, die Verlegung aber teuer. Solange nur Netzknoten miteinander verbunden werden kann der Ausbau wirtschaftlich dargestellt werden. Ein flächendeckender Ausbau ist aber vollkommen unrealistisch, da die Kosten weit überproportional mit der Flächendeckung ansteigen. Daher sind entsprechende strategisch/politische Aussagen über Versorgungsgrade mit äußerster Vorsicht zu genießen und in der Regel unrealistisch. Hinzu kommen Beschränkungen durch regulatorische und bauliche Einschränkungen, die sehr stark von der Region abhängen können und bei Angaben über Zeitplanung berücksichtigt werden müssen.

### 2.2.2. Kupfer-Doppeladern

Kupferinfrastruktur ist in vielen Ländern vorhanden und im Laufe der Entwicklung von Telefonnetzen über die Jahrzehnte auch zu einem hohen Grad flächendeckend verfügbar. Insofern stellt dieses Medium theoretisch eine mögliche Alternative für eine Breitbandversorgung dar. In Konsequenz wurden daher in den vergangenen Jahren große Entwicklungsanstrengungen unternommen, dieses schwierige Medium für höhere Datenraten zu qualifizieren. Aufgrund der langen Historie sind Kupfernetze von der Qualität her sehr heterogen: Dämpfung und Übersprechen wegen der fehlenden Abschirmung der Einzeladern sind beträchtlich, stark längenabhängig und die Schwankungsbreite ist hoch. Trotzdem ist es gelungen, mit Hilfe moderner hochstufiger und adaptiver Modulationsverfahren (xDSL) die Datenraten auf beträchtliche Werte zu steigern, die möglichen überbrückbaren Entfernungen bleiben aber sehr gering (in der Regel nur maximal einige wenige hundert Meter).

Das Problem besteht daher in der genauen Vorhersage der tatsächlichen Leistungsfähigkeit im speziellen Fall (Datenrate versus Entfernung). Eine wirklich präzise Garantie für Übertragungsraten und Entfernungen kann nicht gegeben werden, die tatsächlich erreichbaren Werte in der Praxis bleiben häufig unter den Erwartungen, ein Netzbetreiber kann daher in der Regel nur eine „bis zu“ Angabe machen. Eine entsprechend breitgestreute und endliche Kundenzufriedenheit ist die Folge. Darüber hinaus sind wirklich hohe Datenraten in den Gbit/s Bereich im realen Umfeld nicht zu erreichen, eine langfristige Zukunftsperspektive ist nicht gegeben.

### 2.2.3 Koaxialkabel

Netze auf Koaxialkabelbasis waren die ersten für Breitband ausgelegten Lösungen am Markt vor dem Siegeszug der Glasfaser. Ursprünglich für analoge TV Übertragung gedacht, hat das Koaxialkabel insbesondere bei modernen doppelt abgeschirmten Versionen sehr günstige Hochfrequenzeigenschaften. Dies betrifft insbesondere die Übertragungsbandbreite, die bis in den GHz Bereich geht. Auch hier werden moderne digitale Übertragungsverfahren (DOCSIS) angewendet, um das Maximum an Bandbreite herauszuholen. Die Leistung ist deutlich besser als bei xDSL, insbesondere in Bezug auf Reichweite. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass aufgrund der Netzstruktur in jedem Kabelstrang ein sog. „shared Medium“ vorliegt, d.h. die angeschlossenen Nutzer teilen sich die verfügbare Kapazität. Trotzdem können beim aktuellen Stand der Technik Nutzerdatenraten bis in den Gbit/s Bereich angeboten werden. Das Medium ist also durchaus auch zukunftssicher. Wegen der deutlich höheren Bandbreiten sind im Zubringerbereich Lösungen mit Glasfaser sinnvoll (HFC: Hybrid Fiber Coax).

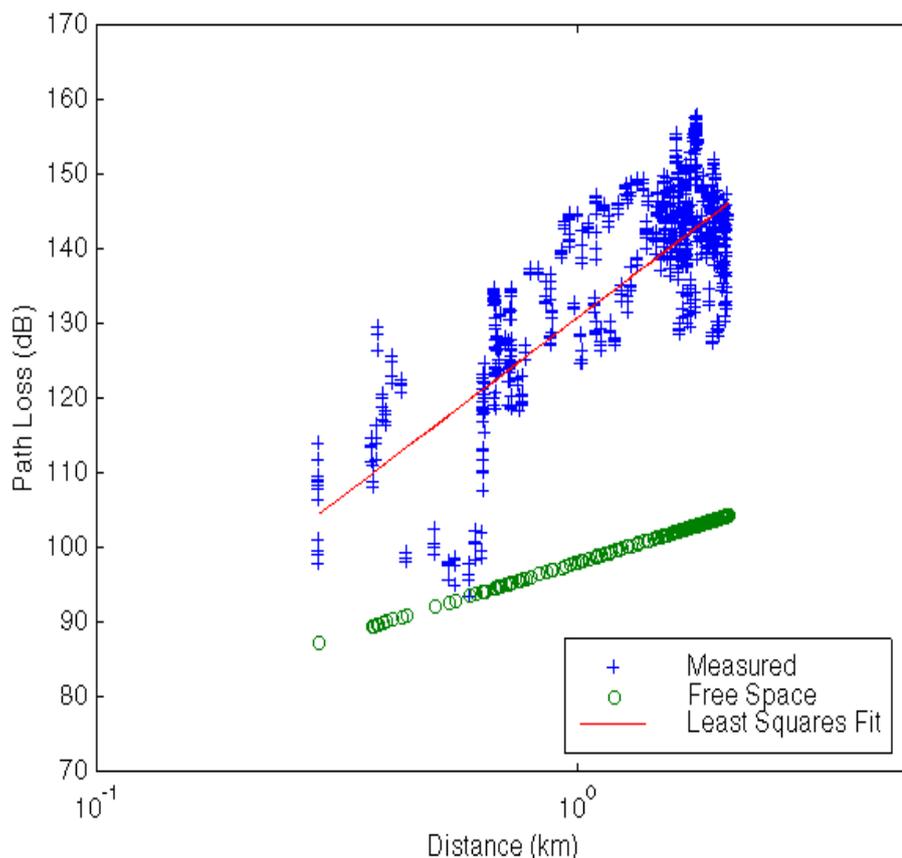
Basierend auf modernen digitalen höherstufigen Modulationsverfahren (DOCSIS 3.1) und der Nutzung mehrerer Kanäle können Netzbetreiber einen weiten Bereich an Datenraten und Tarifen anbieten. Die Erfahrung aus der Praxis zeigt eine weitaus höhere Kundenzufriedenheit als bei DSL. Leider sind aber Koaxialnetze aufgrund der historischen Entwicklung auch nicht flächendeckend vorhanden, sondern eher Inselösungen. Auch hier kann nicht von einem möglichen flächendeckenden Ausbau gesprochen werden.

## 2.3 Funkgestützte Übertragungssysteme

### 2.3.1 Mobilfunkgenerationen

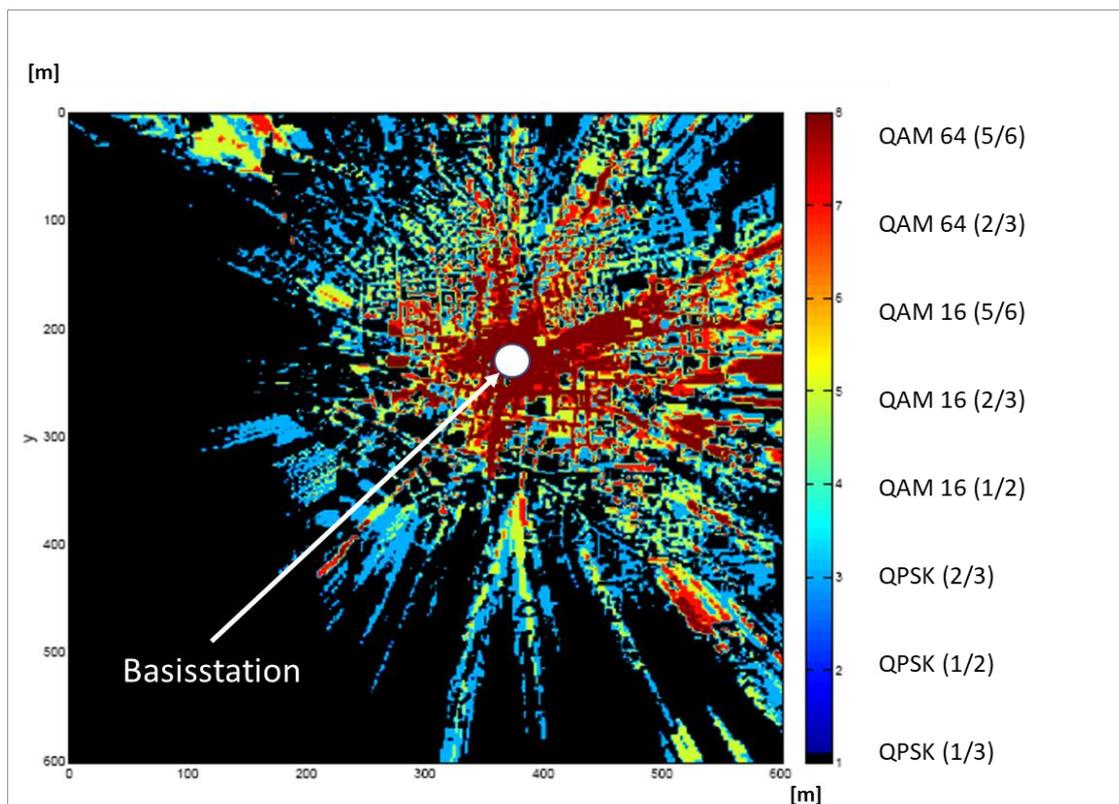
Der Mobilfunkkanal gehört zu den am schwierigsten zu beherrschenden Kanalformen. Die Mobilität muss mit erheblichen Einschränkungen erkaufte werden. Die horizontal ausgerichtete Ausbreitung elektromagnetischer Wellen unterliegt vielfältigen Beeinträchtigungen. Neben der Freiraumdämpfung gibt es eine Reihe physikalischer Mechanismen, die zusätzliche Dämpfung mindestens in der gleichen Größenordnung erzeugen und dabei sehr stark von der jeweiligen Ausbreitungssituation (urbane, suburbane und rurale Szenarien) abhängen. Dabei sind insbesondere Abschattung durch die geographischen und baulichen Randbedingungen zu nennen. Ein zusätzliches Problem ergibt sich durch die starke Frequenzabhängigkeit dieser Mechanismen.

Bild 4 zeigt typische Dämpfungsverhältnisse in einem urbanen Umfeld im Frequenzbereich 1-2 GHz. Naturgemäß nimmt die Dämpfung (insbesondere durch Abschattung) bei höheren Frequenzen zu, bei tieferen Frequenzen ergibt sich keine wesentliche Verbesserung. In realen Mobilfunknetzen ist also der erreichbare Signal-Rauschabstand beschränkt und demnach auch keine sehr hohe Effizienz in der gesamten Funkzelle zu erreichen.



**Bild 4:** Dämpfungsverhältnisse in einem Mobilfunksystem (Frequenz: 1-2 GHz)

Dies führt dazu, dass in einer realen Zelle der Signal-Rauschabstand dynamisch ist und stark schwankt (Bild 5). Moderne Modulationsverfahren sind adaptiv, können also mit dieser Situation umgehen. Die maximal mögliche Effizienz kann aber nur in günstigen Situationen und nahe an der Basisstation erreicht werden. Funknetzplaner rechnen daher in der Regel mit einer mittleren Effizienz, die mit Werten von etwa 2 Bit/s/Hz deutlich unter dem maximal möglichen Wert liegt. Hierdurch erklären sich die großen Abweichungen zwischen vermarkteten und realen Werten für die erreichbaren Datenraten, eine Tatsache, die oft zu Kundenunzufriedenheit führt.



**Bild 5:** Verteilung von Modulationsstufen in einer urbanen Zelle  
(Datenraten verhalten sich entsprechend, schwarze Bereiche sind Funklöcher)

Diese Erkenntnisse sind wichtig für die Entwicklung der digitalen Mobilfunkgenerationen über der Zeit (Bild 6). Obwohl bei jedem Entwicklungsschritt die nächste Generation als Revolution angekündigt wurde, zeigt sich bei genauerer Untersuchung jedoch, dass die Entwicklung eher evolutionär war. Dies gilt insbesondere auch für 5G, dies wird im Folgenden weiter ausgeführt. Die aus Bild 5 erkennbaren Fortschritte bei 5G beziehen sich demnach i. W. auf die Verwendung höherer Frequenzen zur Steigerung der Übertragungsrate, eine weiter reduzierte Latenz (siehe Bild 20) und Verbesserungen bei der Netzkonfiguration (Network Slicing).

Main Characteristics	2G		3G			4G			5G
	GSM	GSM EDGE	UMTS	UMTS HSDPA	UMTS HSUPA	Lte	Lte	Lte	5G
<b>Applications:</b>									
▪ Voice/Messaging	✓	✓	(✓)	✓	✓	(✓)	✓	✓	(✓)
▪ Data		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
▪ Broadband			(✓)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<b>Air interface:</b>									
▪ Single carrier	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓
▪ Multicarrier						✓	✓	✓	✓
▪ High Frequencies									✓ ⚠
▪ Adaptive (HO) modulation				(✓)	(✓)	✓	✓	✓	✓
▪ SU - MIMO							(✓)	✓	✓
▪ MU – MIMO								(✓)	✓
▪ Very low latency									✓ ⚠
<b>Network:</b>									
▪ Small Cells					(✓)	✓	✓	✓	✓
▪ Cloud RAN						(✓)	✓	✓	✓
▪ Network Slicing									✓ ⚠
<b>Performance:</b>									
▪ Peak DL user data rate [Mbit/s]		0.2	2.0	10	10	75	150	300	1000 +
▪ Average user data rate [Mbit/s]		0.2	0.2	2-4	2-4	40	60	80	?

Bild 6: Mobilfunkgenerationen und ihre wesentlichen Eigenschaften

### 2.3.2 4G LTE

Mit LTE (Long Term Evolution) ist in der Standardisierung ein relativ großer Entwicklungsschritt gelungen. Dies ist vor allem auf die Verwendung von Mehrträgerverfahren zurückzuführen, die im Vergleich zu Einzelträgerverfahren wie bei UMTS eine erheblich höhere Flexibilität für Kanal- und Systemoptimierungen ermöglichen. Darüber hinaus werden hochkomplexe aber leistungsfähige Raumfilterverfahren (MIMO – Multiple in Multiple Out, SU-MIMO – Single User MIMO, MU-MIMO – Multiuser MIMO) mit Hilfe entsprechend ausgelegter Antennen eingesetzt und graduell verbessert. Dabei werden bei SU-MIMO durch mehrfach vorhandene Antennen und Sendempfangseinheiten zusätzliche Kanäle erzeugt, für die jeweils das Shannon-Theorem gilt. Theoretisch wächst damit die Kapazität mit der Anzahl der Übertragungswege. Dies gilt aber nur, wenn diese vollständig entkoppelt sind; dies ist in einem realen Mobilfunksystem aber nicht der Fall. In der Praxis ist das Ergebnis daher eher ernüchternd. Darüber hinaus sind Mehrfachantennen in kompakten Endgeräten schwer zu realisieren, der Verkopplungsgrad ist hoch. Ob sich die notwendige Systemkomplexität und der erhebliche Aufwand bei Antennen rechnet, ist noch zu beweisen.

Vielversprechender aus informationstheoretischer Sicht ist MU-MIMO. Dabei werden Antennen auf der Basisstation nicht starr rundstrahlend oder sektorisiert sondern dynamisch stark bündelnd ausgelegt. Hierdurch verbessert sich die Linkbilanz aufgrund des höheren Gewinns und der besseren Unterdrückung von Störern deutlich, die S/N Werte wachsen und höherstufige Modulationsverfahren können häufiger eingesetzt werden. Beim Endgerät sind anders als bei SU-MIMO nicht unbedingt zusätzliche hardwarenahe Maßnahmen erforderlich. Die Komplexität bei Antennen (Hardware) und auf der Basisstation (Hardware und Software) wächst aber enorm: die adaptive Strahlsteuerung über ein Array erfordert im Gegensatz zu konventionellen und SU-MIMO Antennen flächige statt schlanke Geometrien (Bild 7). Hierdurch wachsen Windlasten und Antennenkosten beträchtlich. Es wird sich zeigen, wie sich dieser Ansatz in der Praxis bewährt.



Bild 7: Layout einer modernen aktiven MU-MIMO Antenne (Quelle: Deutsche Telekom)

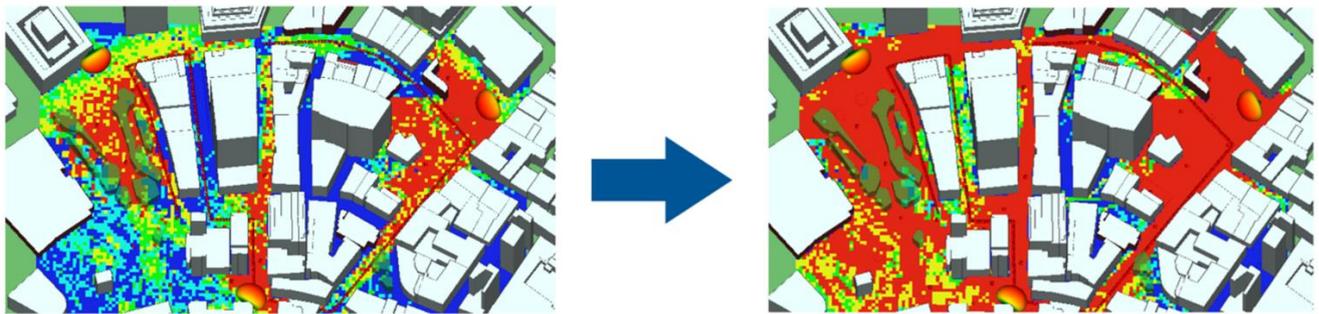


Bild 8:        Durchsatz- und Coverage- Verbesserung in einer MU-MIMO Zelle (Quelle: Remec)

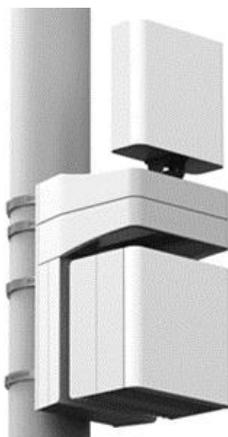
Die Verbesserungen in einer realen Zelle können deutlich sein wie das Beispiel von Bild 8 zeigt. Da aber die MU-MIMO Algorithmen nur bei ausreichenden Signal-Rauschabständen ordnungsgemäß funktionieren (es müssen ja permanent Kanalschätzungen vorgenommen werden), wird das Signal zunächst besser in Bereichen, in denen ohnehin eine gute Übertragung besteht. Aufbauend darauf, können sich dann diese Bereiche ausdehnen. Eine Steigerung der Übertragungsraten ist daher in manchen Bereichen möglich, das Problem der Funklöcher ist damit aber nicht zu lösen. Naturgemäß wird das mit wachsender Frequenz schwieriger.

MU-MIMO wird aktuell als wesentliche Verbesserung im Rahmen von 5G vermarktet. Dies ist aber nicht ganz korrekt, da diese Technik schon innerhalb der Evolutionsstufen von 4G (LTE-Advanced, LTE-Advanced Pro) entwickelt und standardisiert wurde. Der breite Einsatz wird allerdings erst mit 5G zu erwarten sein. Dies ist ein weiterer Beweis für die stetige und evolutionäre Entwicklung bei Mobilfunksystemen.

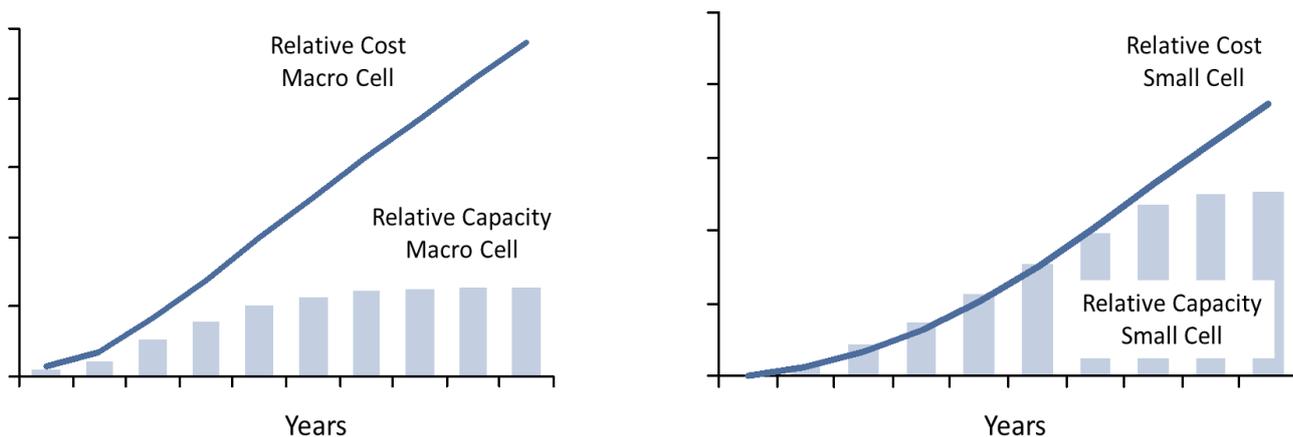
LTE wurde anfangs nur für Datenübertragung eingesetzt, was einen Parallelbetrieb von 2G, 3G und 4G notwendig machte und immer noch macht. Im Laufe der Zeit werden aber 3G Standards immer weiter rückgebaut. Aufgrund der in Kapitel 2.1 dargestellten Sachverhalte klaffen bei LTE die Werte für maximal mögliche und tatsächlich erreichbare Datenraten aber beträchtlich auseinander (Bild 5). Trotzdem ist aber mit LTE und seinen Varianten ein sehr leistungsfähiger Standard verfügbar. Die Diskrepanz zwischen maximal möglichen und realen Werten für den Durchsatz wird auch bei 5G bestehen bleiben.

Es zeigt sich aber, dass der Einsatz von Makrozellen langfristig den weiter dramatischen Bedarf an Bandbreite und Flächenkapazität nicht erfüllen kann. Hier kann der Einsatz von kleineren Zellen (Mikrozellen oder Small Cells, Bild 9) Abhilfe schaffen. Dies gilt insbesondere für urbane Gebiete, in denen eine entsprechende Installation auch leicht möglich ist. Aufgrund der geringeren Zellgrößen ist die Linkbilanz und Signalqualität in der Regel besser, die mittlere Effizienz in einer Small Cell nimmt daher zu und damit wird auch die Zellkapazität grösser. Der Ansatz kann natürlich nur wirtschaftlich sein, wenn die Kosten für die Kleinzelle einschließlich des notwendigen

Backhaul stärker sinken als die Anzahl zunimmt. Dies kann beim heutigen Stand der Marktpreise aber angenommen werden. Es zeigt sich, dass im Gegensatz zu Makrozellenstrukturen die Kosten nicht überproportional mit den Kapazitätsanforderungen steigen (Bild 10). Außerdem kann der Ausbau direkt an den lokal schwankenden Kapazitätsbedarf flexibel angepasst werden. Viele Netzbetreiber setzen daher diese Systemvariante inzwischen ein.



**Bild 9:** Typische Beispiele von Small-Cells (Quelle: Ericsson, Nokia, Huawei)



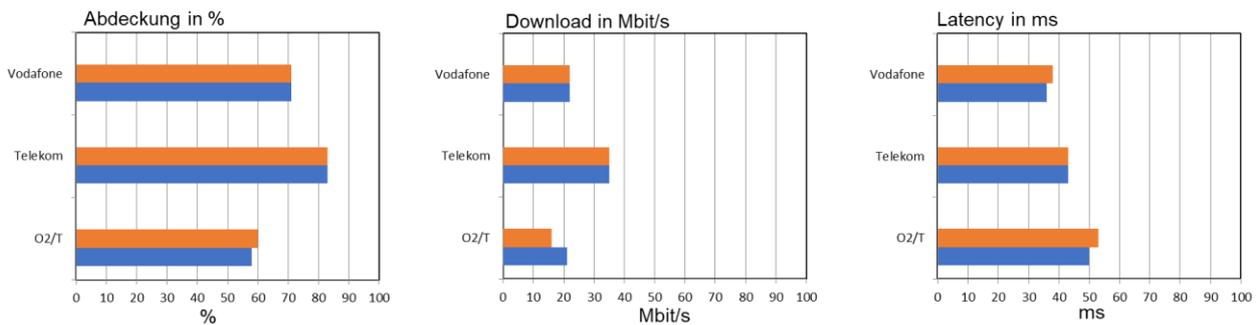
**Bild 10:** Kapazitäts- und Kostenvergleich Makrozellen und Small Cells (Quelle: Detecon)

In der Diskussion über Small Cells wird häufig das Argument einer höheren elektrischen Umweltbelastung als kontraproduktiv ins Feld geführt. Es wird argumentiert, dass durch die höhere Anzahl der Basisstationen der Gesamtwert der elektromagnetischen Belastung unzulässig steigt. Dies ist aber leicht zu widerlegen: die wesentliche elektromagnetische Belastung geht vom Endgerät aus, da dies die geringste Distanz zum Nutzer aufweist. Hier muss streng auf die Einhaltung der Grenzwerte (SAR – Specific Absorption Rate) geachtet werden, der Nutzer kann durch entsprechende Maßnahmen selbst viel zur Minimierung der Belastung beitragen. Es zeigt sich aber, dass in Kleinzellen aufgrund der günstigeren Linkbilanz das Endgerät in der Regel aber mit geringerer Leistung arbeitet als in einer Makrozelle; die Belastung wird also geringer. Natürlich muss auch beim Aufbau einer Mikrozelle auf die Einhaltung der Grenzwerte geachtet werden.

In der Diskussion über Datenraten und Breitbandigkeit wurde dem Problem der Abdeckung (Coverage) zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Da zufriedenstellende Abdeckung nur bei tiefen Frequenzen erreicht werden kann, diese aber durch die Vielfalt der Mobilfunkgenerationen nicht in ausreichender Menge zur Verfügung stehen und entsprechende Lizenzen langfristig gebunden sind, mussten für LTE relativ ungünstige Frequenzbereiche eingesetzt werden. Dies kann sich in Zukunft verbessern, wenn ältere Mobilfunksysteme ihre Frequenzen freigeben. Trotzdem bleibt das ursprüngliche und grundsätzliche Problem der terrestrischen Mobilkommunikation mit all ihren Ausbreitungsproblemen erhalten.

Auch ein Mikrozellenansatz kann das Problem der Abdeckung nicht lösen. In urbanen Bereichen ist die Abdeckung durch Abschattung begrenzt, da die Basisstationen in der Regel unterhalb der Dachniveaus platziert werden, in ruralen Bereichen ist die Verwendung von Mikrozellen prinzipbedingt nicht zielführend und auch nicht wirtschaftlich.

Alle diese Gegebenheiten haben letztendlich zu einem sehr unbefriedigenden Istzustand bei der Funkabdeckung geführt. In der Öffentlichkeit werden zahlreiche Statistiken diskutiert und Prognosen abgegeben, die einen zufriedenstellenden Zustand suggerieren und hinreichende Ausbaupläne für die nahe Zukunft versprechen. Oft wird hier die Prozentzahl angeschlossener Haushalte ins Feld geführt. Für einen Festnetzanschluss mag das ja richtig sein, für Mobilfunk ist diese Zahl definitiv falsch. Die Qualität der Mobilfunkabdeckung kann nur in der Fläche richtig berechnet und gemessen werden. Der Aufwand für derartige seriöse Messungen war in der Vergangenheit hoch, inzwischen können aber über entsprechende Apps direkte Daten von den Endgeräten ermittelt werden. Das Ergebnis ist ernüchternd (Bild 11) und zeigt, dass wir von einem flächendeckenden Ausbau noch weit entfernt sind. Eine weitere Steigerung wird überproportionale und damit ineffiziente Investitionen erforderlich machen.



Source: Opensignal

Zeitraum	Januar - März 2018	Juli – September 2018
Anzahl Endgeräte	70.000	84.000
Anzahl Messungen	850.000	950.000
Funkstandard	4G LTE	4G LTE

**Bild 11:** Benchmark aktueller Mobilfunksysteme in Deutschland (Latency: Gesamtlaufzeit)

Es zeigt sich darüber hinaus, dass im Rahmen der Messgenauigkeit aktuell auch keine Verbesserung zu beobachten ist. Messungen, die innerhalb eines halben Jahres wiederholt wurden zeigen innerhalb der Messungenauigkeit für alle Netzbetreiber ein ähnliches Ergebnis. In diesem Zusammenhang wird oft die Performance in anderen Ländern zum Vergleich herangezogen. Hierbei muss man zwei Aspekte deutlich unterscheiden: Baudichte des Mobilfunknetzes und geografische Gegebenheiten. Vergleichsmessungen zeigen, dass in Ländern mit sehr flachen geografischen Topologien Abdeckungsgrade an die 90% leichter zu erreichen sind. Man findet aber auch Länder mit sehr gebirgiger Geografie (z.B. Österreich, Schweiz) die trotzdem Verfügbarkeiten zwischen 85% und 90% aufweisen. Hier greift eine entsprechend Rolloutstrategie, die letztendlich zu einer erheblich dichteren Basisstationsanordnung führt (in Österreich etwa der Faktor 2,3). In jedem Fall ist aber wohl mit Werten um 90% eine natürliche Grenze erreicht, die nur mit sehr überproportionalem Aufwand weiter geschlossen werden kann. Selbst bei klassischen (2G) Mobilfunksystemen konnte keine 100% ige Abdeckung erreicht werden, sie ist aber höher als bei Breitbandsystemen aufgrund der Gegebenheiten in Kapitel 2.1.

### 2.3.3 5G

Die Notwendigkeit nach einer weiteren Entwicklung der Mobilfunkstandards nach 4G ist im Wesentlichen getrieben durch neue Formen von Diensten und den damit verknüpften Geschäftsmöglichkeiten. Die weiter gesteigerte Übertragungsrate ist dabei eher zweitrangig, da sie nur unter besonderen Bedingungen erreichbar ist. Klassische Mobilfunknetze (incl. 4G) sind heute für mobile Breitbandkommunikation zum Endnutzer ausgelegt, die zugehörigen Dienste müssen mit den Gegebenheiten des Funkkanals auskommen. Diese bestehen darin, dass die Datenrate stark schwanken kann, die Zuverlässigkeit der Verbindung ist endlich und auch die Latenz (Verzögerungszeit) unterliegt starken Variationen. Dies führt wie schon dargestellt (Bild 5) zu einer dynamischen d.h. stark schwankenden „User Experience“ insbesondere auf dem Weg von der Basisstation zum Rand der Zelle.

Mit 5G sollen nun eine Reihe neuer Dienste unterstützt werden (Bild 12) mit Anforderungen, die stark von den klassischen Spezifikationen abweichen. Hierzu gehört vor allem der weite Bereich des „Internet of Things“ (IoT). Neben sehr einfachen IoT Anwendungen wie Abfrage von Sensoren jedweder Art, globales Verfolgen und Tracken von Transporteinrichtungen sind auch infrastrukturkritische Applikationen zu bedienen, die eine extrem hohe Zuverlässigkeit und in einigen Fällen auch eine geringe Latenz der Verbindung zwingend erforderlich machen. Hierzu gehören z.B. alle Anwendungen im Bereich der Energieversorgung, bestimmte Bereiche im Umfeld von Industrie 4.0, Anwendungen im medizinischen Umfeld und insbesondere der intelligenten Verkehrssteuerung (Autonomes Fahren). Es wird also angestrebt, einer viel größeren Nutzeranzahl als bisher in der Zelle ein weitaus konstanteres „Diensteerlebnis“ bereitzustellen. Aufgrund der bisher dargestellten Gegebenheiten des Funkkanals stellt sich natürlich die Frage wie dies mit vertretbarem Aufwand zu realisieren ist. Natürlich spielt auch hier die Abdeckung und damit das Vorhandensein eines ausreichenden Signal-Rauschabstandes die entscheidende Rolle.

Nach der Einführung der 4. Generation in 2010 (LTE, LTE Advanced) haben sich die Standardisierungsgremien ab ca. 2014 mit einem möglichen neuen Standard beschäftigt, der o.g. Anforderungen gerecht werden kann. Aktuell (März 2019) befindet sich 5G in einem bestimmten Release – Zustand (Rel. 15), auf dem die ersten kommerziellen Installationen basieren. Wie bei den früheren Generationen werden weitere Releases folgen (z.B. Rel. 16 ab 2021). Die evolutionäre Entwicklung der Standards ist dadurch gekennzeichnet, dass auch 5G auf einer OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) Luftschnittstelle aufbaut. Im Gegensatz zu 4G ist jedoch die Trägeranordnung weitaus flexibler. Dies ist insbesondere dadurch bedingt, dass 5G in wesentlich mehr Frequenzbereichen eingesetzt werden wird. Dies macht ein breiteres Spektrum von Kanalbandbreiten und Einzelträgerabständen (Subcarrier Spacing) erforderlich (Bild 13). Frequenznutzung und Kanal- bzw. Trägerkonfigurationen können somit flexibel an die jeweilige Situation angepasst werden. Weitere Spezialformen von OFDM sind in Diskussion [7], eine detaillierte Behandlung soll hier nicht vorgenommen werden.

### The 5G Ecosystem

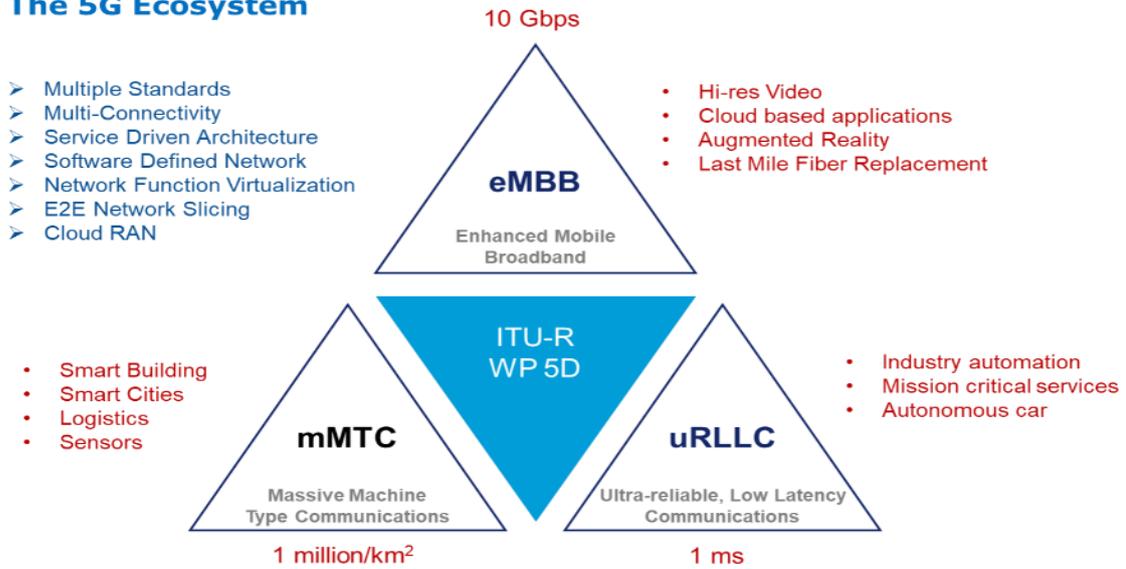


Bild 12: 5G Ecosystem

Outdoor and macro coverage  
FDD/TDD <3 GHz



Outdoor and small cell  
TDD > 3 GHz



Indoor wideband  
TDD e.g. 5 GHz (Unlicensed)



mmWave  
TDD e.g. 28 GHz



Bild 13: Skalierbare OFDM Trägeranordnung bei 5G (Quelle: Qualcomm)

Die Signalstruktur im Zeitbereich (Slot Structure) muss dementsprechend ebenfalls extrem flexibel ausgelegt werden [8]. Radio Frames und Subframes haben eine feste Länge und sind identisch mit LTE um eine bessere Koexistenz von 4G und 5G Systemen zu ermöglichen. Slots und Symbole sind flexibel und hängen vom Subcarrier Spacing ab. Interessant und neu ist die Definition von sog. Mini-Slots, die vor allem für zeitkritische Anwendungen genutzt werden. Wichtig hierbei ist, dass das Endgerät diese Mini-Slots unterstützt.

Wie schon erwähnt ist eine Kanalcodierung bei Funkübertragung zwingend. Wegen der stark schwankenden Anforderungen und Timings mussten die bei 4G eingesetzten Codierungsverfahren überarbeitet werden um eine hohe Signal- und Detektionsqualität zu erreichen. Dies gilt insbesondere für die Signalstrukturen für zeitkritische Anwendungen und Kontrollkanäle. Die Einzelheiten hierzu sind sehr komplex und würden den Rahmen dieses Dokuments sprengen. Für weitergehende Informationen wird [9] empfohlen. Da auch bisherige Codierungsverfahren die Shannonsche Grenze fast erreicht haben, sind die Verbesserungen hinsichtlich der Signalqualität aber eher marginal.

Eine wesentliche Verbesserung der Signalqualität kann wie bei LTE nur über verbesserte Raumfilterverfahren (MU-MIMO, Beamforming) erreicht werden. Dieser Ansatz wird bei 5G konsequent weiter verfolgt. Wie schon in 2.3.2 dargestellt, sind die Antennen auf der Basisstation nicht mehr rundstrahlend oder sektorisiert sondern als aktives Array ausgeführt (Bild 7). Hinter jedem Einzelstrahler befindet sich ein aktiver Sende- Empfangspfad, in dem eine Amplituden- und Phasengewichtung der Signale vorgenommen werden kann. Damit können mehrere dynamisch variierende Antennendiagramme erzeugt werden. Richtet man diese dynamisch auf die in der Zelle sich bewegenden Endgeräte, wird die Signalleistung auf die Einzelteilnehmer gerichtet und nicht ineffektiv in der Zelle verteilt. Dies wirkt (vereinfacht dargestellt) für den einzelnen Teilnehmer wie eine Antenne mit höherem Gewinn, die Gewinnerhöhung kann Werte bis zu ca. 10-15 dB annehmen, dieser Wert kommt direkt dem Signal-Rauschverhältnis zugute. Gleichzeitig ist es bis zu einem gewissen Grade möglich, Störer zu unterdrücken (sog. Interference Cancelling), was eine weitere Verbesserung des S/N Verhältnisses bewirkt. Die mögliche räumliche Auflösung (Anzahl der möglichen Beams, Halbwertsbreite der Beams und Nebenkeulendämpfung) hängen von der Antennengeometrie ab. Es müssen natürlich deutlich mehr Antennenelemente als Nutzer vorhanden sein, um den Effekt ausschöpfen zu können, hier liegt ein begrenzender Faktor. Anschauliche Demonstrationen dieser Verfahren finden sich in [10] und [11].

Neben der geringeren Latenzzeit bleibt als wesentliches Innovationsmerkmal bei 5G nur die Verwendung höherer Frequenzen im mm-Wellen Bereich übrig. Sehr vorteilhaft sind hier die wesentlich größeren verfügbaren Frequenzressourcen (siehe Bild 13). Die Kanalbandbreiten sind bis zu 25-mal höher als bei niedrigen Frequenzen, was natürlich direkt zu einer entsprechenden Vergrößerung der Übertragungskapazität führt. So benötigt man bei einem 500 MHz Kanal lediglich eine Modulationseffizienz von 2 Bit/s/Hz um mit der Zellkapazität in den Gbit/s Bereich

zu gelangen. Problematisch für eine mobile Kommunikation bei höheren Frequenzen sind aber wie schon erwähnt die Ausbreitungsbedingungen: für eine Übertragung ist LOS (Line of Sight) erforderlich. Diese ist in der Regel nur auf kurze Distanzen und bei günstigen Bebauungsbedingungen vorhanden. In allen anderen Fällen wirkt die Bebauung wie ein Schatten, die Signalstärke nimmt im Schattenbereich drastisch ab. Bild 14 zeigt dies in aller Deutlichkeit.



Bild 14: Feldstärkeverteilung in einer urbanen Umgebung bei 28 GHz (Quelle: Atoll)

Trotz der zahlreichen Basisstationen im auszuleuchtenden Bereich ergeben sich nun sehr viel mehr Flächen, die nicht ausgeleuchtet sind. Das Problem der „Funklöcher“ wird damit dramatisch grösser. Untersuchungen zeigen, dass lediglich Zellgrößen von 100 – 150 m Durchmesser bei optischer Sicht erreicht werden können. Für einen Dienst, der auf eine flächendeckende Versorgung angewiesen ist, kann dies keine Lösung sein. Es ist ebenfalls erkennbar, dass aufgrund der geringen Reichweite der Zellen, ein hochfrequentes 5G System keine Lösung für rurale Bereiche darstellen kann. Hier muss wie bei 4G auf niedrigere Frequenzen zurückgegriffen werden, bei denen aber das Problem der weitaus geringeren Kanalbandbreite besteht.

Es gibt nun eine letzte Möglichkeit, die Linkbilanz bei hochfrequenten 5G Lösungen zu verbessern: Reciprocity Based MU-MIMO. Hier wird die oben beschriebene Strategie nicht nur bei der Basisstation sondern auch beim Endgerät verwendet. Hierdurch erhofft man sich, die in einem urbanen Umfeld vorhandenen mehrfach reflektierten Signale mit besserer Bilanz zu empfangen. In einer Laborumgebung sieht das recht beeindruckend aus [10], es ist aber anzunehmen, dass in einer realen Umgebung die Grenzen schnell erreicht werden. Darüber hinaus erfordert die Technik einen hohen Aufwand beim Endgerät und eine entsprechende Kostenerhöhung.

Trotzdem bewerben Hersteller die ersten mm-Wellen Antennenmodule [12], die so kompakt sind, dass mehrere davon in ein Endgerät passen und versprechen Mobilität im mm-Wellenbereich bis 40 GHz. Es wird sich zeigen, ob dies eine realistische Lösung auch außerhalb von Campusnetzen und Fabrikhallen sein wird.

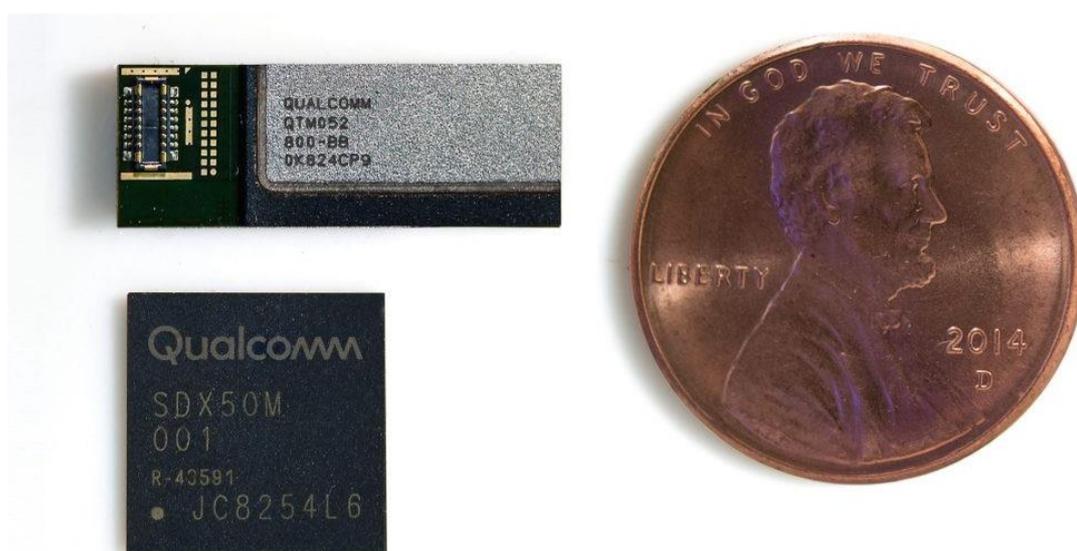


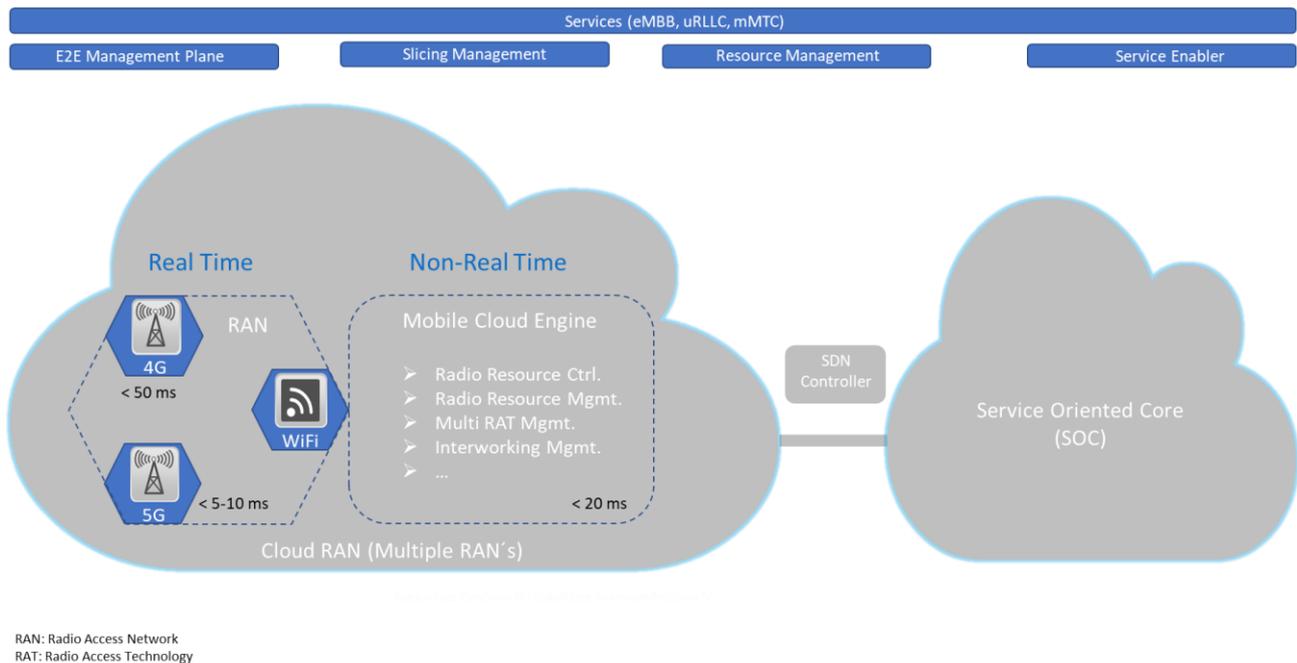
Bild 15: Qualcomm mm-Wellen Antennenmodul

Neben den evolutionären Verbesserungen an der Luftschnittstelle ändert sich bei 5G auch die Netzarchitektur, dies ist eigentlich der größere Fortschritt [13]. Neben einer schon im 4G Umfeld diskutierten auf einer Cloud basierten Netzarchitektur ist bei 5G insbesondere das sog. „Network Slicing“ zu nennen. Grundlage ist eine einheitliche physikalische Netzinfrastruktur (RAN und Core), die es gestattet, die meisten Funktionalitäten zu virtualisieren, d.h. mit Resource-Pools von Hardware zu arbeiten, auf denen eine verteilte Softwarestruktur aufgesetzt ist (Bild 16).

Diese Funktionalitäten erlauben es einem Betreiber, seine Infrastruktur oder Teile davon anwendungsbezogen und auf Abruf bereitzustellen – z.B. als eigenes Netz mit besonderen Eigenschaften wie zugesicherten Ressourcen und Datenraten.

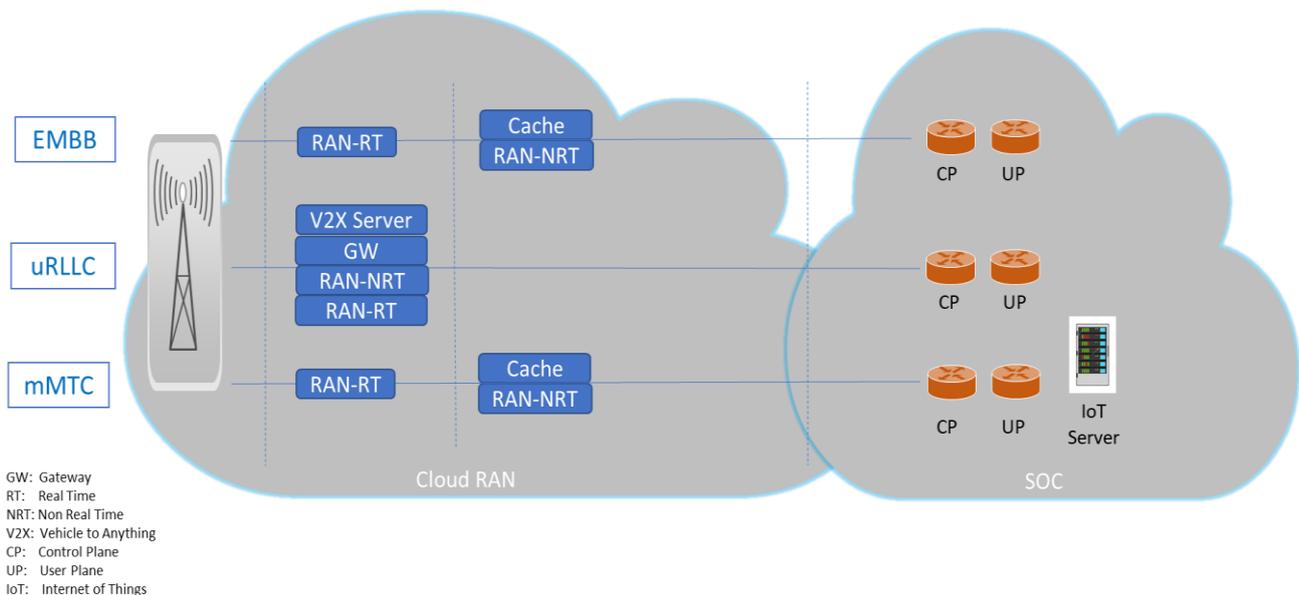
Mit diesem als „Network Function Virtualization“ (NFV) bezeichneten Ansatz lassen sich die bei 5G weiter diversifizierten Dienstanforderungen und ihre zugehörigen Qualitätskriterien flexibel bereitstellen und managen. So besteht etwa das Cloud-RAN aus (physikalisch) vorhandenen Basisstationen verschiedener Art und unterschiedlicher Zugangstechnik sowie sog. „Mobile Cloud Engines“, die die dynamischen Funktionalitäten bereitstellen. Man muss dabei zwischen Echtzeitfunktionen im RAN und Nicht-Echtzeit Funktionen in den Cloud Engines unterscheiden, eine Gegebenheit, die bei der „politischen“ Diskussion über Latenzzeiten und/oder Echtzeitfunktionalitäten von 5G oft übersehen wird.

Das Transportnetz besteht aus SDN (Software Defined Network) Controllern und Knoten. Diese generieren dynamische Datenübertragungswege, die von der aktuellen Netztopologie und den Dienstanforderungen abhängen. Die oberste Netzschicht beinhaltet das Network Slicing und das Resource Management.



**Bild 16:** High Level 5G Netzarchitektur

Der Grundgedanke von Network Slicing besteht darin, für jede Dienstkategorie spezifische Netztopologien und Netzfunctionalitäten (Network Slices) bereitzustellen. Dies geschieht durch Nutzung der Virtualisierungsfunktionalitäten im Netz auf einer einheitlichen Hardwarestruktur. Diese wird damit unabhängig von der Dienstkategorie (eMBB, uRLLC, mMTC) und eröffnet dem Netzbetreiber erhebliche Einsparpotentiale beim Aufbau und Betrieb des Netzes. Man kann damit eine lückenlose Ende-zu-Ende Dienstqualität garantieren und überwachen (Bild 17).



**Bild 17:** Network Slicing (Prinzip)

Network Slicing und die gesamte Netzarchitektur erlauben darüber hinaus eine Konnektivität zwischen verschiedenen Standards und vermeiden somit eine kostentreibende Netzfragmentierung. Mit diesen Technologien werden Übergänge zwischen verschiedenen Luftschnittstellen-Standards (4G, 5G, WiFi) möglich, es können zusätzlich auch Aggregationen verschiedener Standards vorgenommen werden, um die Bandbreite weiter zu erhöhen.

Der Mobile Cloud Engine (MCE) kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Hier werden alle Funktionen des Cloud RAN zusammengefasst und verarbeitet. Die MCE ist dabei vollständig softwarebasiert und wird auf entsprechend leistungsfähigen Rechnerplattformen implementiert. Da die Steuerung derartiger Funktionalitäten extrem komplex ist, müssen zu einem hohen Grad selbst organisierende (SON) Verfahren eingesetzt werden.

#### 2.3.4 Fixed Radio Access

Fixed Radio Access (fester Funkzugang für die letzte Meile, FWA) ist seit Ende der 80er Jahre bekannt. Hierbei handelt es sich um eine Variante des Kurzstreckenrichtfunks in bestimmten Frequenzbereichen (3.5 GHz, 10 GHz, 18 GHz, 24 GHz, 28 GHz, 32 GHz, 38 GHz). Dabei wird wie für den klassischen Richtfunk eine LOS – Verbindung (bei 3.5 GHz auch Near LOS) vorausgesetzt. Die Antennendiagramme sind wie beim Mobilfunk sektorisiert, die Antennen beim (stationären) Endgerät hoch bündelnd (Point – to – Multipoint Richtfunk). Da es sich bei derartigen Anordnungen um „Shared Media“ handelt (die Nutzer teilen sich die Bandbreite eines Sektors), müssen Zugriffsverfahren verwendet werden. Die damaligen Lösungen am Markt verwendeten verschiedene proprietäre Verfahren (TDMA, CDMA, dynamisches FDMA) und konkurrierten stark miteinander. Dies hat wegen der fehlenden Standardisierung zu einer nur mäßigen Marktakzeptanz geführt. Insbesondere die Endgeräte waren vergleichsweise teuer und eher für rein professionelle Anwendungen aber weniger für den Massenmarkt geeignet. Erwähnenswerte Installationszahlen gab es daher hauptsächlich für Zubringerdienste in engmaschigen Mobilfunknetzen.

Dieser Gedanke wird nun bei 5G wieder aufgegriffen. Die Technik ist nun an der Luftschnittstelle weiter verbessert (OFDMA) und standardisiert. Dies führt konsequent zu deutlich niedrigeren Kosten bei den Endgeräten, die Basisstationstechnik ist 1:1 mit dem Mobilfunk identisch. Es ist klar, dass nun bei LOS insbesondere in den höheren Frequenzbereichen außerordentlich leistungsfähige Systeme zur Verfügung stehen. Bei entsprechenden Frequenzkonfigurationen sind Sektorkapazitäten bis in den Gbit/s Bereich erreichbar, wegen der guten und stabilen Linkbilanzen können vermehrt höhere Modulationsstufen eingesetzt werden. Die zugehörige Modulationseffizienz wird dadurch deutlich verbessert. Derartige Lösungen können daher als Erweiterung der Glasfaser im Bereich der letzten Meile angesehen werden. Im Gegensatz zu mobilen Anwendungen sind die höheren Frequenzbereiche viel besser anwendbar. Allerdings erfordert die LOS Bedingung den Einsatz von Außenantennen, inwieweit auch eine Gebäudedurchdringung möglich ist bleibt fraglich und war schon bei PMP Richtfunk nicht durchgängig möglich.

Insgesamt scheint dies aber ein positiver 5G Ansatz zu sein. Bei erfolgreichem Einsatz kann damit das Problem der überproportionalen Kosten beim Glasfaserausbau der letzten Meile teilweise vermindert werden.

## 2.4 Optische Kommunikation

Auch die optische Kommunikation mit geeigneten laserbasierten Systemen ist eine mögliche Alternative für terrestrische Netze. Attraktiv ist hier natürlich die enorme Bandbreite, die wegen der verwendeten Trägersignale vergleichbar mit der Glasfaser ist. In der Vergangenheit wurden einige Systeme am Markt angeboten, haben aber keine weite Verbreitung gefunden. Dies liegt i. W. an 2 Einschränkungen: zum einen handelt es sich um reine Punkt-zu-Punkt Verbindungen, die in direkter Konkurrenz zum Richtfunk stehen, zum anderen erfordert die geringe Strahlbreite eine sehr genaue Ausrichtung und eine hohe Stabilität der Montagestruktur. Natürlich sind auch wegen der atmosphärischen Ausbreitungsbedingungen nur sehr geringe Distanzen überbrückbar, in jedem Fall deutlich geringer als im Richtfunk. Inzwischen verfügbare Lösungen für automatische Acquisition und Tracking sprengen aktuell noch den erforderlichen Kostenrahmen.

## 2.5 Erfolgsfaktoren und ihre Bewertung

### 2.5.1 Übertragungskapazität

Die Übertragungskapazität wird in der Regel bei modernen Systemen immer in den Vordergrund gestellt. Dies ist begründet durch den immer weiter wachsenden Bandbreitebedarf des einzelnen Nutzers und ganzer Subsysteme wie z.B. einer Mobilfunkzelle. Im Laufe der Evolution der verschiedenen Lösungen sind bemerkenswerte Fortschritte erreicht worden, die in den meisten Fällen nahe an die von Shannon vorgegebene Grenze heranreichen. Die grundlegenden Gegebenheiten wurden in Abschnitt 2.1 schon dargestellt.

Man kann davon ausgehen, dass die beim heutigen Stand der Technik erreichbaren Übertragungsraten und Systemkapazitäten insbesondere bei den längerfristig eingesetzten Techniken (Glasfaser und moderne Funktechniken) ausreichend sein werden. Weiter gesteigerte Leistungsfähigkeiten sind theoretisch möglich, bei der Glasfaser durch den Einsatz höherstufiger Modulationsverfahren (die allerdings auf Kosten der Reichweite gehen), bei Funk durch die Verwendung noch höherer Frequenzen mit ähnlichen Konsequenzen.

### 2.5.2 Netzabdeckung und Verfügbarkeit

Wie schon erwähnt, ist die Netzabdeckung, d.h. die Verfügbarkeit einer festen oder mobilen Verbindung mit einer bestimmten Datenrate und Dienstqualität gegenüber der Diskussion über Netzgeschwindigkeiten lange in den Hintergrund geraten. Dies ist i.W. dadurch begründet, dass bislang Kommunikationsdienste genutzt werden, bei denen eine Nichtverfügbarkeit vom Nutzer hingenommen werden kann. Eine Nichtverfügbarkeit ist zwar unschön und führt zu negativen

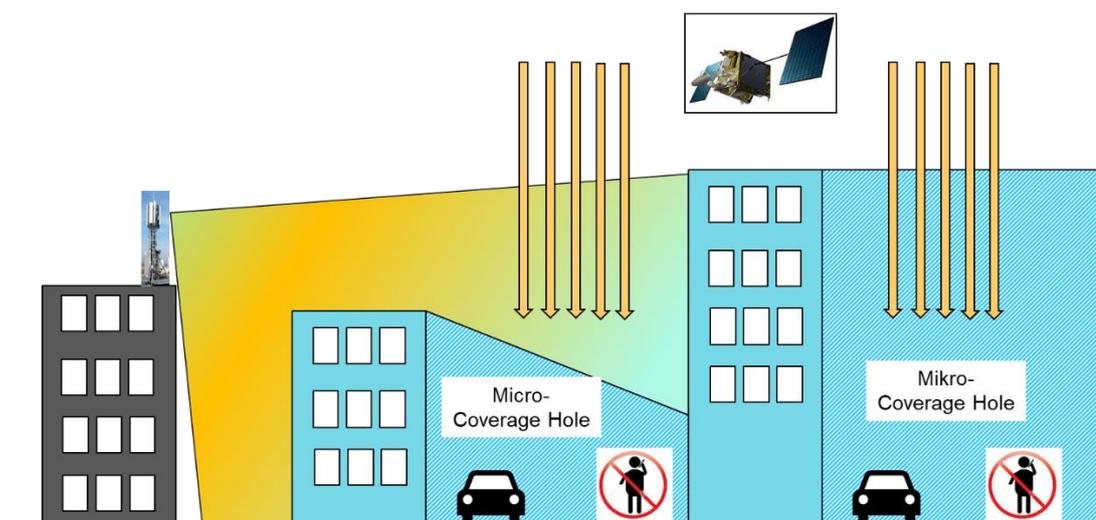
Bewertungen der Technik (siehe die aktuelle Diskussion über Funklöcher) ist aber zunächst nicht systementscheidend. So hat sich in der Vergangenheit eine klar kommerziell ausgerichtete Ausbaustrategie entwickelt. Die Politik hat die Versorgung mit Telekommunikationsinfrastruktur dem freien Markt überlassen, die Netzbetreiber müssen nach streng betriebswirtschaftlichen Gegebenheiten ihre Netze ausrollen und installieren. Festnetze und Mobilfunk natürlich nur in Regionen, in denen ein ROI (Return on Investment) zu erwarten ist. Zusätzlich gibt es einschränkende Randbedingungen seitens der (notwendigen) Regulierung und insbesondere im Mobilfunk extrem hohe Lizenzkosten für die Mobilfunkfrequenzen. Das Problem ist teilweise auch von der Politik erkannt worden, aktuell werden mit beträchtlichen Mitteln des Bundes Aktivitäten für den weiteren Breitbandausbau in den Ländern unterstützt. Dies hat jedoch Grenzen, da die Kosten für eine wirklich vollständige flächendeckende Versorgung exorbitant hoch sind und bei weitem unterschätzt werden.

Dies alles hat zu einer recht fragmentierten Situation geführt, in der es eine sog. „Digitale Dividende“ gibt, d.h. Bereiche, in denen eine ausreichende Versorgung mit moderner Telekommunikationsinfrastruktur vorhanden ist und weiße Flecken, in denen dies nicht der Fall ist. Diese Situation ist aktuell nicht mehr akzeptabel. Zum einen erfordert eine moderne digitalisierte Gesellschaft zur Unterstützung der Digitalisierungselemente (siehe Kap. 1) eine lückenlose Versorgung mit Breitbanddiensten, zum anderen lebt die nächste Mobilfunkgeneration (5G) von systemkritischen Diensten, die eine lückenlose Versorgung zwingend erforderlich machen (IoT in Verbindung mit Energienetzen und Industrieproduktion, autonomes Fahren, etc.). Insbesondere 5G Protagonisten müssen daher besonders auf die Aspekte der flächendeckenden Versorgung achten. Dies ist aber wie wir gesehen haben zunächst kontraproduktiv zu weiter gestiegenen Datenraten unter Nutzung höherer Frequenzen. Diese Erkenntnisse beginnen sich allmählich durchzusetzen, und man kann leicht prognostizieren, dass sie wie immer bei Generationswechseln im Mobilfunk die anfängliche Euphorie in Bahnen lenken werden.

Die Diskussion ist hier aber noch nicht zu Ende. Wenn nun auch 5G das Problem der vollständigen Netzabdeckung nicht lösen kann, wie will man diese überhaupt erreichen? In diesem Punkt müssen grundsätzlich neue Ansätze verfolgt werden. Ein Weg aus dem Dilemma ist durch die Satellitentechnik und neuere Entwicklungen in diesem Bereich möglich. Satellitentechnik heute wird hauptsächlich mit Satelliten für TV-Versorgung (geostationär), Navigation und Erdbeobachtung (geostationär, nicht geostationär) in Verbindung gebracht. Navigation hat es dabei schon in jedes moderne Endgerät und viele andere Anwendungen geschafft, geostationäre Satelliten führen bez. der Breitbandversorgung aber ein Schattendasein. Entsprechende Systeme seien extrem teuer, proprietär, haben lange Bereitstellungszeiten und Signallaufzeiten, die nicht mit den Anforderungen moderner Kommunikation kompatibel sind. Diese Gegebenheiten werden schnell als Killerargumente in Feld geführt und haben bisher eine Erfolgsstory verhindert. Werden vitale Aspekte moderner Kommunikationssysteme wie weit niedrigeres Kostenniveau und Standardisierung besser beachtet, kann sich dies aber schnell ändern.

Die Situation bei der Abdeckung soll an einem einfachen Beispiel erläutert werden. Betrachten wir eine urbane Situation, in der eine 5G Mobilfunkversorgung besteht. Die Basisstationen seien wie in Bild 14 dicht verteilt. Schon aus dem 2D Bild der Feldstärkeverteilung sind Bereiche ohne Versorgung klar zu erkennen. Noch klarer wird dies in einem schematischen Querschnittsbild (Bild 18). Die Mobilfunk-Basisstationen sind (insbesondere bei 5G) dicht verteilt und in der Regel unterhalb des oberen Dachniveaus positioniert, da ja insbesondere die Straßenzüge ausgeleuchtet werden sollen. In der vorliegenden Konfiguration wird schon der zweite und insbesondere die nachfolgenden Straßenzüge nicht ausgeleuchtet. Dies kann zwar durch den Aufbau weiterer Basisstationen verbessert werden, hat jedoch seine Grenzen, die u.A. durch Kosten, Backhaul und Akzeptanz gegeben sind.

Die Situation wird nun deutlich verbessert, wenn man die Basisstation in einer größeren Höhe positionieren kann, im Extremfall senkrecht über dem Ausleuchtgebiet. Eine derartige Situation ist denkbar durch die Verwendung von Satelliten im LEO (Low Earth) Orbit. Bei einer ausreichenden Zahl von Satelliten gibt es immer einen oder mehrere, die senkrecht oder bei hohen Elevationswinkeln sichtbar sind. Eine ähnliche Situation kann man heute bei Navigationssatelliten schon beobachten. Alle modernen Navigationsgeräte erlauben die Anzeige der empfangbaren Satelliten, oft auch mit einer Elevationsanzeige. Natürlich müssen für eine Breitbandversorgung deutlich mehr Satelliten angesetzt werden als bei der Navigation damit immer Satelliten mit hohen Elevationswinkeln in Sicht sind. Niedrige Elevationswinkel sind nicht geeignet und auch nicht kompatibel mit den Latenzanforderungen.



**Bild 18:** Komplementäres Verhalten terrestrische Übertragung – Satellit (hohe Elevation)

### 2.5.3 Latenz

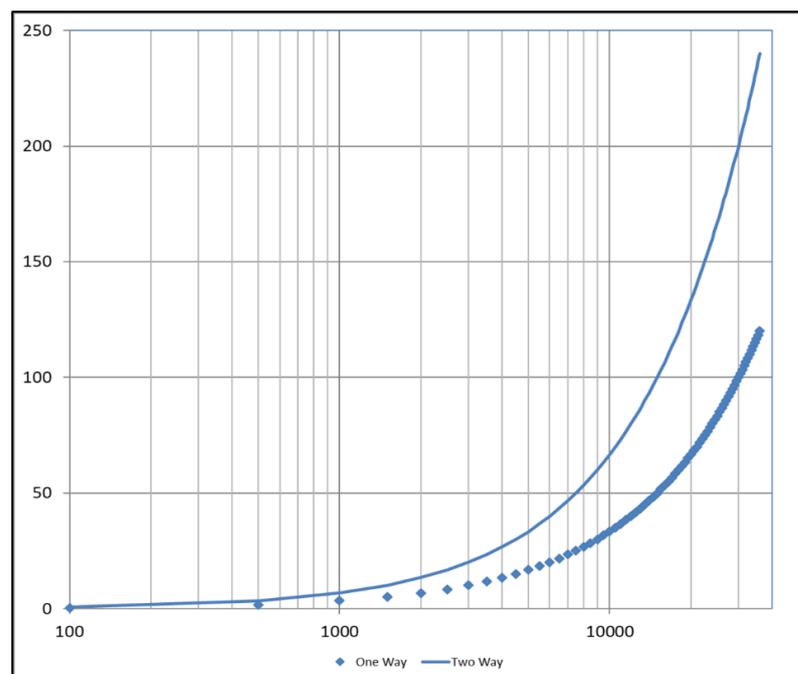
Bei Diskussionen über die Anwendbarkeit von Satellitentechnologie in aktuellen Telekommunikationsnetzen wird oft das Gegenargument „zu große Latenz“ ins Feld geführt. Dies erstickt in der Regel eine weitere Diskussion im Keim, ist aber in dieser Allgemeinheit völlig unberechtigt. Für eine bessere Einschätzung der wirklichen Verhältnisse muss man etwas ins Detail gehen.

Die Übertragungsdauer in Telekommunikationsnetzen ist durch 2 wesentliche Gegebenheiten bestimmt: die physikalische Laufzeit der Signale im jeweiligen Medium und die (zusätzliche) Zeit, die durch Signalverarbeitung (z.B. Protokolle) vergeht. Diese Werte können in realen Netzen weite Bereiche umfassen. So ist z.B. in einem IP basierten Netz die Antwortzeit (Ping) sehr hoch, wenn das Netz ausgelastet ist oder in einer interkontinentalen Glasfaserverbindung hoch, wenn große Entfernungen überbrückt werden müssen. Will man extrem kurze Antwortzeiten erreichen um z.B. Echtzeitbetrieb zu gewährleisten, geht das in der Regel nur in Teilbereichen des Netzes (siehe Bild 16) und unter Verwendung sehr leistungsfähiger Hardware und Protokolle (z. B. Minislots bei 5G, vgl. Abschnitt 2.3.3). Welche Werte für Verzögerungszeiten nun erreicht werden müssen, hängt sehr stark vom jeweiligen Dienst und dem zugehörigen Protokoll ab. So ist z.B. auch bei Internet Browsern eine kurze Antwortzeit anzustreben, da moderne Webseiten viele dynamische Komponenten enthalten, die permanent nachgeladen werden. Eine zu hohe Antwortzeit führt daher zu einem nur mäßigen Surferlebnis,

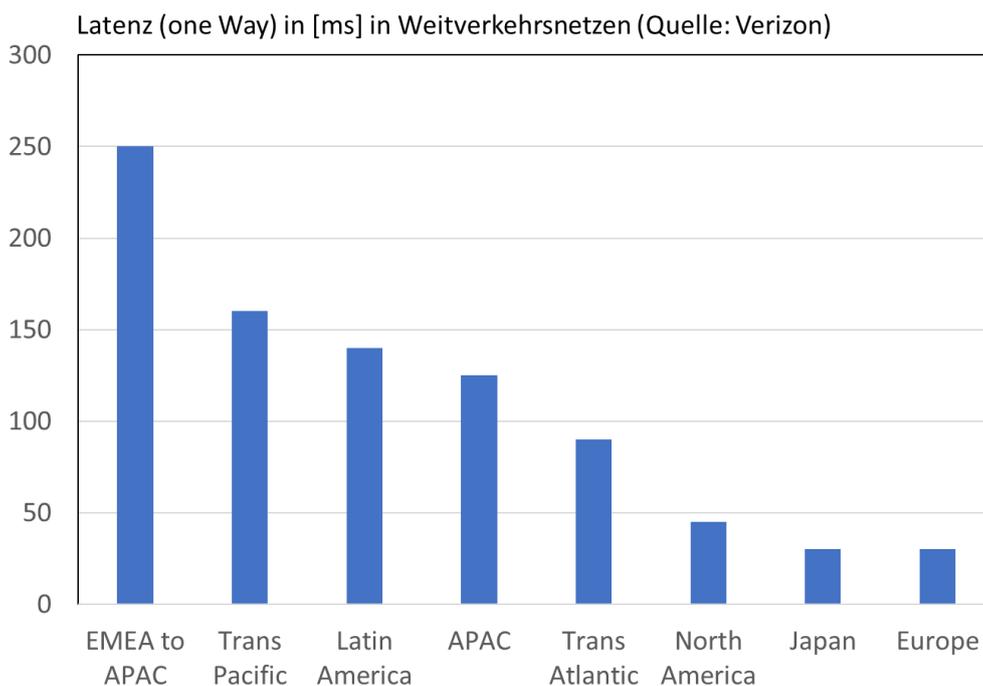
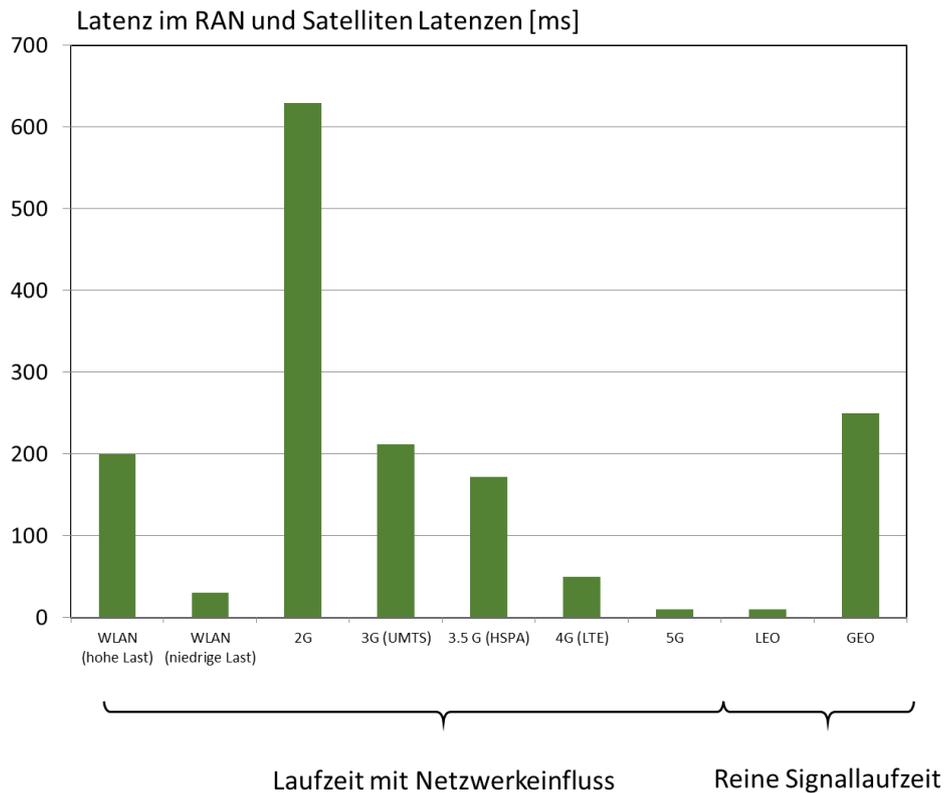
Bei Satellitennetzen bestimmt zunächst physikalisch die Entfernung des Satelliten zur Erdoberfläche die Latenz. Diese lässt sich über die Lichtgeschwindigkeit leicht errechnen (Bild 19). Neben der reinen Signallaufzeit müssen Verzögerungen im Satelliten berücksichtigt werden. Bei transparenten Repeatern ist diese in der Regel zu vernachlässigen, bei Nutzung von OBP (On Board Processing) müssen zusätzliche Verarbeitungszeiten berücksichtigt werden. Bild 20 zeigt deutlich, dass geostationäre Satelliten für ein Zugangsnetz eine Grundlatenz aufweisen, die für latenzkritische Protokolle und Anwendungen eine Einschränkung darstellen kann. Diese sind bei bestimmten Einsatzszenarien zu berücksichtigen und können unter Umständen durch angepasste Protokolle reduziert werden. Satelliten auf niedrigeren Umlaufbahnen sind aber unterhalb einer gewissen Bahnhöhe mit 5G Anforderungen auch ohne Anpassungen vollständig kompatibel. Werden Intersatelliten – Verbindungen verwendet, kommen wie bei einem terrestrischen Backhaul Netz entsprechende Latenzen hinzu. Bei Verbindungen zwischen geostationären Satelliten oder GEO - LEO Verbindungen können diese entsprechend groß werden, für LEO - Konstellationen bleiben die Latenzen der Intersatellitenverbindungen aber gering (siehe Kapitel 6.3).

Die Latenzen terrestrischer Technik im RAN überstreichen sehr weite Bereiche. Hier sind allein die verwendeten Netzwerk- und Zugriffsprotokolle bestimmend. So kann z.B. in einem WLAN die Antwortzeit sehr stark schwanken: ist das Netzwerk nicht ausgelastet, sind die Ping-Zeiten gering, mit wachsender Last werden sie grösser. In Mobilfunknetzen findet in der Regel eine bessere Kontrolle von QoS (Quality of Service) und Antwortzeit durch verbesserte Zugriffsprotolle statt, die Werte sind im Laufe der Evolution der Mobilfunknetze stetig geringer geworden. Rekordwerte bietet naturgemäß der 5G Standard, die üblicherweise vermarkteten Werte von 1 ms werden aber in der Praxis nicht erreicht. Aktuelle Messungen der ersten 5G Installationen (Stand Juni 2019) bewegen sich in der Gegend von ca. 15 ms. Dies ist zwar deutlich besser als 4G aber immer noch weit vom aggressiv vermarkteten und zu optimistischen Minimalwert entfernt.

In Weitverkehrsnetzen sieht das wiederum ganz anders aus. In einer Glasfaser ist die Lichtgeschwindigkeit geringer (ca. 30%) als für Freiraumausbreitung und somit auch die Latenz größer, wenn die Entfernung wächst. Dies führt zu beträchtlichen Latenzen (Bild 20) für Interkontinentalverbindungen. In diesen Fällen sind selbst geostationäre Satelliten durchaus konkurrenzfähig, in bestimmten Fällen sogar überlegen. Das Argument „zu große Latenz“ ist demnach in dieser Allgemeinheit nicht haltbar.



**Bild 19:** Signallaufzeit von Satelliten [ms] in Abhängigkeit von der Bahnhöhe [km]



**Bild 20:** Laufzeiten im Vergleich  
(Satelliten und terrestrische Standards im RAN und in Weitverkehrsnetzen)

#### 2.5.4 Standardisierung

Unter den Kommunikationssystemen mit der größten Erfolgsgeschichte ist mit Sicherheit GSM (Global System for Mobile Communication) zu nennen. Wesentlicher Erfolgsfaktor für einen globalen Einsatz und niedrige Kosten der Endgeräte war die Standardisierung der Technologie. Nicht alle können sich heute mehr an die Zeiten erinnern als man bei Reisen in die USA ein weiteres Mobiltelefon einpacken musste, weil dort ein anderer Funkstandard für die Mobilkommunikation verwendet wurde; das wäre heute undenkbar. Die Erfolgsstory hat sich mit den Nachfolgenerationen fortgesetzt.

In der Satellitentechnik ergibt sich hingegen ein zwiespältiges Bild: die Satellitennavigation hat ebenfalls den Schritt zur globalen Standardisierung geschafft, entsprechende technische Lösungen (Chips) sind heute in jedem mobilen Endgerät vorhanden und eine Selbstverständlichkeit geworden. Einen ähnlichen Erfolg kann die Satellitenkommunikation (und insbesondere die mobile Satellitenkommunikation) noch nicht aufweisen. Klassische Satellitensysteme für die Kommunikation sind in der Regel hochproprietäre Lösungen mit Forderungen und Eigenschaften, die oft an der Grenze des Machbaren liegen, die Stückzahlen in der Infrastruktur sind gering, und die Systeme arbeiten mit spezialisierten Terminals. Ausnahme bildet die TV Übertragung per Satellit (Broadcast), hier ist zumindest ein Teilerfolg zu verzeichnen.

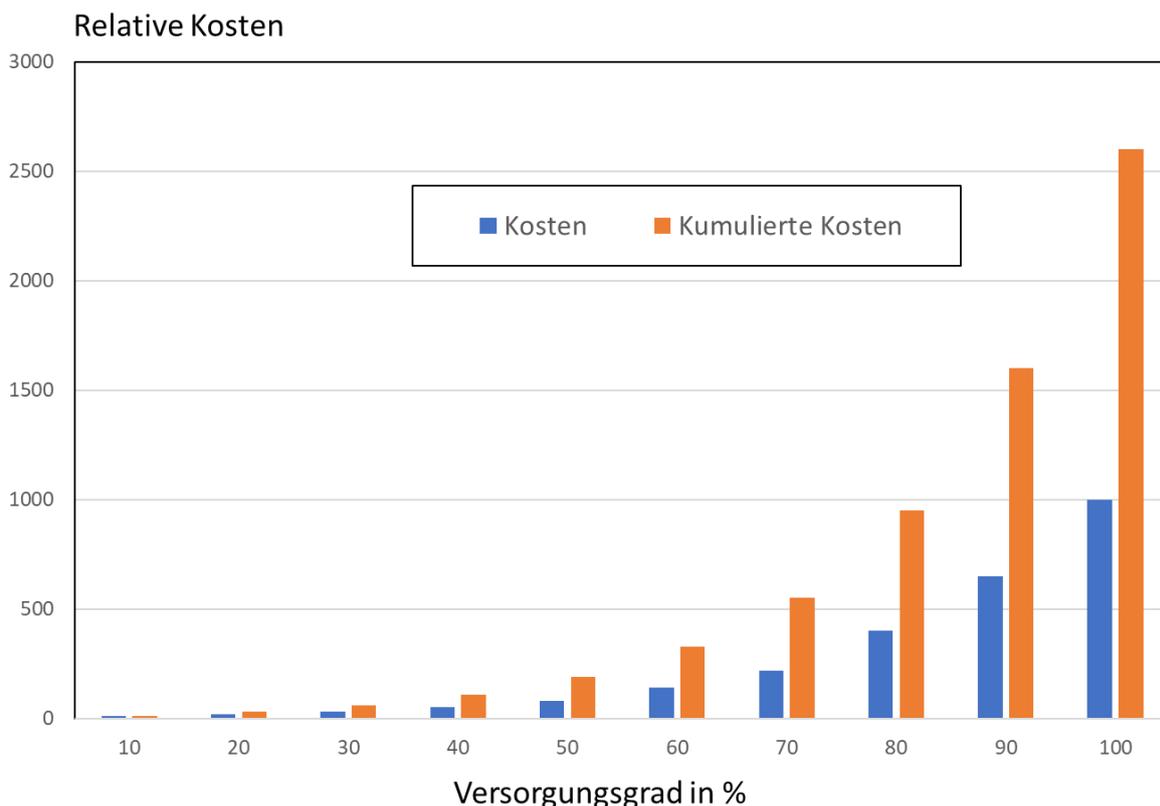
Ein wirklicher Durchbruch kann also nur erzielt werden, wenn auch die breitbandige Satellitenkommunikation den Weg der Standardisierung geht. Dies ist bisher nur ansatzweise geschehen, da die entsprechenden technischen Lösungen deutlich schwieriger zu realisieren sind als bei Navigation und Broadcast. Dies wird aber in naher Zukunft möglich werden. Aktuell befassen sich die Standardisierungsgremien innerhalb 3GPP daher ernsthaft mit der Einbindung von satellitengestützten Lösungen in ein 5G Umfeld [20, 21]. Auch die ESA unterstützt diesen Prozess innerhalb ihrer ARTES-Programme mit entsprechenden Aktivitäten. Diese umfassen zunächst das Projekt ALIX [43], das eine aktive Teilnahme in den 3GPP Standardisierungsprozessen von 5G beinhaltet, sowie die Initiative SATis5G [44], in der eine entsprechende Testumgebung entsteht, die die Möglichkeiten der neuen Technologien im Laufe ihres Entstehungsprozesses demonstrieren soll.

Konsequenzen für die etablierte Satellitenindustrie sind enorm: die bisher sehr abgeschottete Gemeinschaft muss sich diesen Sachverhalten öffnen, die neue Umgebung verstehen und die Chancen einer weitgehenden Wiederverwendung terrestrischer Lösungen und Technologien nutzen. Dies muss zu einer Reihe von Paradigmenwechseln führen, die aber alles andere als selbstverständlich sind. Entsprechende Change-Prozesse müssen daher rechtzeitig eingeleitet werden. Im Erfolgsfall wird sich dann eine komplett neue Welt für die Satellitenkommunikation eröffnen in der die spezifischen Vorteile zum Wohl eines Gesamtsystems auch unter Wirtschaftlichkeitsaspekten genutzt werden können.

### 2.5.5 Wirtschaftlichkeit (Business Case)

Eine leistungsfähige flächendeckende Kommunikationsinfrastruktur ist immer teuer, bei richtiger Auslegung kann sich die Investition aber sehr gut rechnen. Dies gilt insbesondere für Netzbetreiber, wenn sie Dienste und Infrastruktur aus einer Hand anbieten können. Dies wird aber immer schwieriger, da globale Diensteanbieter (sog. OTT – Over the Top – Provider) einen beträchtlichen Teil des Dienstemarktes erobert haben. Viele Netzbetreiber sehen sich daher in der Situation, längerfristig zu einem reinen Anbieter von Infrastruktur zu werden. Mehr noch: die globalen Player streben aktuell auch den Aufbau eigener Kommunikationsinfrastruktur an – z.B. mit Hilfe innovativer Satellitentechnik. Gelingt dies, können insbesondere regionale Netzbetreiber schnell in eine kritische Situation geraten.

Die Wertschöpfungssituation wird also für reine Infrastruktur immer schwieriger. Dies führt zu einer immer kritischeren Situation bei der Netzabdeckung wie schon dargestellt. Darüber hinaus gibt es systembedingte Grenzen für eine Wirtschaftlichkeitsrechnung sowohl für Festnetze (also der Versorgung definierter Orte in einem Gebiet) als auch für den Mobilfunk (vollständige Flächendeckung eines Gebietes). Wie Bild 21 zeigt, wachsen die Investitionen generell überproportional mit dem Abdeckungsgrad.



**Bild 21:** Prinzipieller Kostenverlauf von Infrastrukturinvestitionen (Quelle: Detecon)

Mit wachsender Abdeckung wird die Struktur des Netzes immer komplexer und feinmaschiger (Festnetz) oder es müssen zur vollständigen Abdeckung dichte Netze von Basisstationen und das zugehörige Versorgungsnetz gebaut werden (Mobilfunk). Letzteres macht in urbanen Gebieten durchaus Sinn, ist aber undurchführbar in Bereichen mit geringer Nutzerdichte. Der Kostenverlauf ist daher stark nichtlinear, für die letzten 10% müssen grobgerechnet fast die gleichen Investitionen bereitgestellt werden wie für die ersten 80%. Nicht eingerechnet sind dabei zusätzliche Effekte wie bauliche Probleme, Akzeptanzprobleme und Ressourcenprobleme beim Aufbau.

Aus diesen Gründen sind vielfach prognostizierte Versorgungsvorhersagen mit großer Vorsicht zu genießen und oft einfach nicht korrekt. Die aktuelle Lage von Versprechungen und Realität beweist dies klar (siehe auch Bild 11 und [14]). Vorhersagen und Ziele mussten in der Vergangenheit mehrfach korrigiert werden. Hier muss bei Politik, Netzbetreibern und Verbänden ein Umdenken stattfinden. Infrastrukturinvestitionen müssen zu einem gewissen Grad effizient bleiben. Dies ist insbesondere bei zusätzlichen Investitionen in den Breitbandausbau zu beachten. Es stellt sich nun die Frage, ob alternative, effizientere Strategien zur Verfügung stehen.

Die Ausführungen über die Netzabdeckung in Kapitel 2.5.2 haben schon eine Alternative aufgezeigt. Satellitenkommunikation hat aber bisher bei den Überlegungen zum Breitbandausbau keine Rolle gespielt. In allen bisherigen nationalen Strategiepapieren taucht die Verwendung alternativer Technologien (gemeint ist die Satellitenkommunikation) nicht auf. Dies ist in anderen Ländern (z.B. Frankreich) durchaus anders, auch in anderen Teilen der Welt wird massiv an neuen Lösungen gearbeitet.

Der große Erfolg der Satellitennavigation zeigt hier einen klaren Weg. In jedem modernen Endgerät ist heute ein entsprechender Chipsatz eingebaut, der die Signale von einem (oder mehreren) globalen Satellitensystem (GPS, Galileo, Glonass, Beidou, ...) empfangen und auswerten kann. Diese Möglichkeiten haben eine Reihe von Anwendungen in fast allen Bereichen unseres täglichen Lebens getrieben und sind nicht mehr wegzudenken. Ziel muss sein, für breitbandige und bidirektionale Kommunikation eine ähnliche Entwicklung strategisch zu verfolgen. Hierzu muss aber auch die klassische Satellitenkommunikation neue Wege gehen. Konventionelle Satellitenprogramme sind häufig auf zu lange Zeiträume ausgelegt, zu kostspielig und erfordern hohe Anfangsinvestitionen, die für ein attraktives Geschäftsmodell ungünstig sind. Im Rahmen der sog. „New Space Economy“ gibt es aber eine Reihe von Entwicklungen, die diese ungünstigen Randbedingungen überwinden können. Satelliten werden deutlich kostengünstiger und leistungsfähiger, Systeme und zugehörige Investitionsverläufe werden skalierbar und es besteht wegen der erforderlichen Kompatibilität mit terrestrischen Systemen (speziell 5G) ein hoher Grad an Standardisierung und damit Wiederverwendbarkeit von bestehenden Technologien. Wie solche Lösungen aussehen können, werden wir im Folgenden noch zeigen.

### 3. Kommunikation im erdnahen Raum

#### 3.1 Satelliten

##### 3.1.1 Satellitenbahnen

Satelliten im erdnahen Raum bewegen sich nach den Gesetzen der klassischen Mechanik auf bestimmten ellipsenförmigen ebenen Bahnen (Keplersche Gesetze), [15], die i.W. von der Erdanziehung bestimmt sind. Die wesentlichen Parameter der zugehörigen Bahnen sind die Entfernung von der Erdoberfläche und die Bahnneigung. Aufgrund der weiten Parameterbereiche sind natürlich vielfältige Konfigurationen denkbar, es haben sich jedoch für Kommunikationsanwendungen 4 bestimmte Varianten herausgebildet (Bild 22). Geostationäre Satelliten (GEO: Geostationary Earth Orbit) bewegen sich in einer nahezu kreisförmigen Bahn, deren Bahnebene mit der Äquatorebene zusammenfällt. Erhöht man den Abstand zur Erdoberfläche auf etwa 36.000 km, ist die Umlaufzeit des Satelliten genau ein Erdttag lang. Diese Konfiguration hat den Vorteil, dass der Satellit relativ zu seinem Fußpunkt auf der Erdoberfläche stillsteht. Der Ausleuchtbereich ist somit zeitlich konstant und es genügt zum Empfang eine stationäre Antenne mit immer gleicher Ausrichtung.

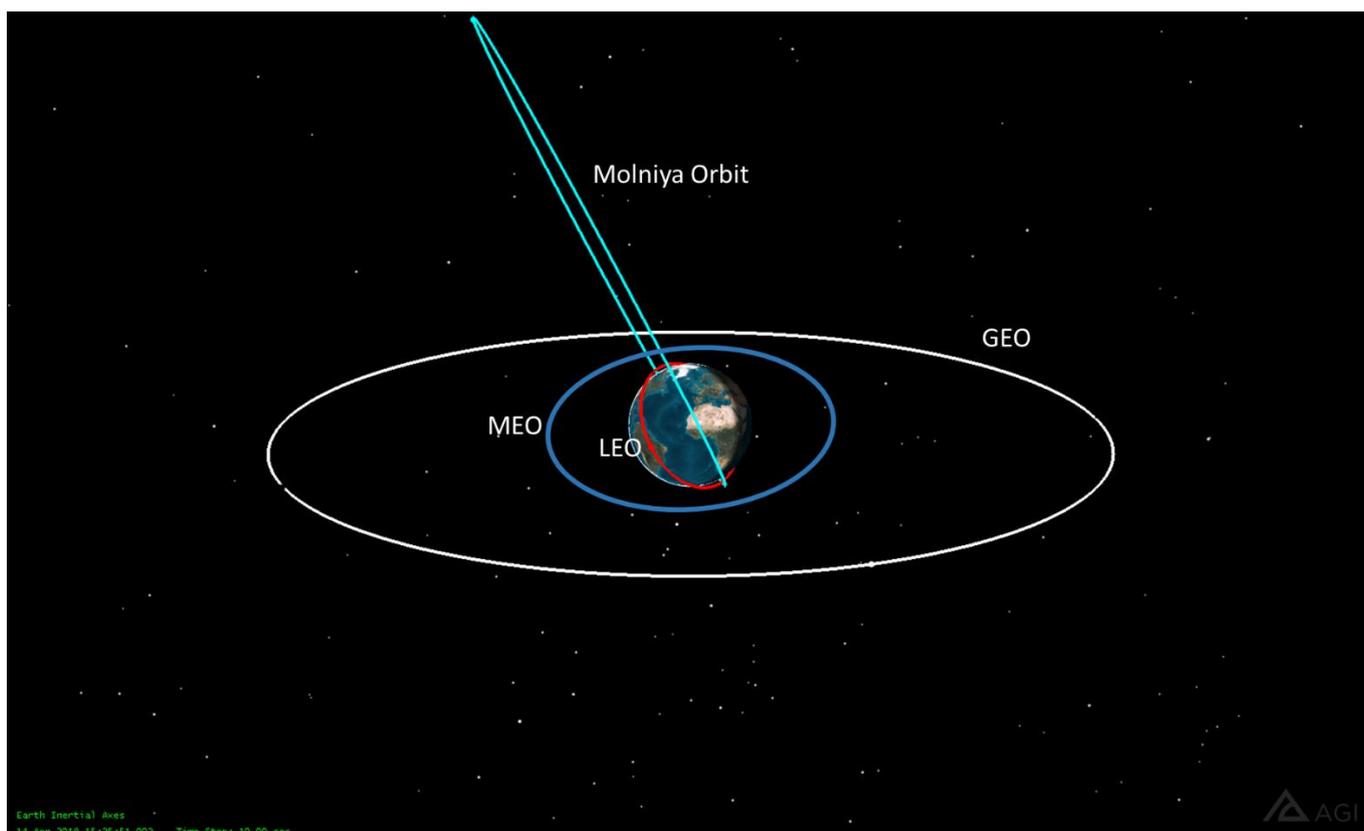


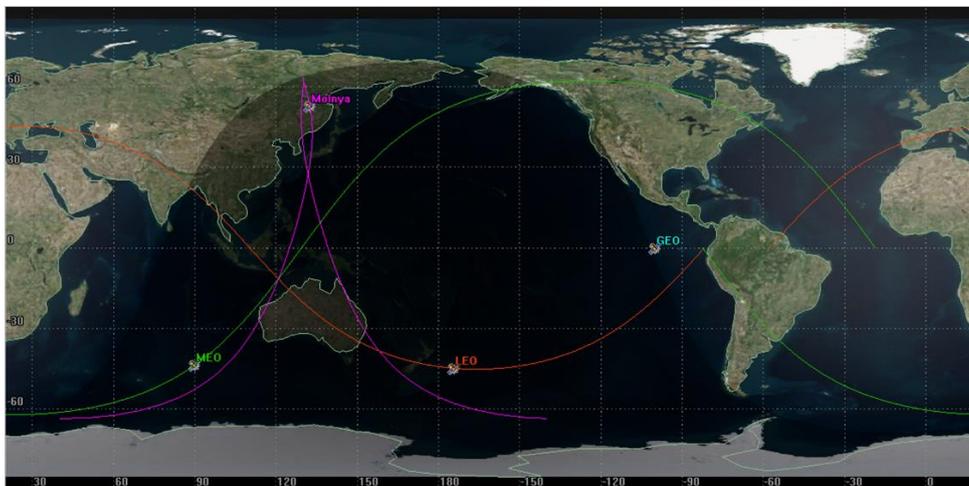
Bild 22: Die wesentlichen Satellitenbahnen für Kommunikationsanwendungen

Einschränkend ist hier wie schon in 2.5.3 ausgeführt die Laufzeit der Signale vom Boden zum Satelliten und zurück, die mit Echtzeitdiensten nicht vollständig kompatibel ist. Für TV Broadcast Anwendungen ist das aber nicht von Belang oder nur mit geringen Einschränkungen verbunden, so dass der GEO hauptsächlich für derartige Dienste eingesetzt wurde und wird.

Verringert man die Bahnhöhe eines Satelliten, wird die Umlaufzeit kürzer als ein Erdtag, der Satellitenfußpunkt bewegt sich daher und hinterlässt eine sog. Bodenspur. Die Geometrie dieser Bodenspur ist wieder von der Bahnhöhe und der Bahnneigung abhängig (Bild 22). Die Bahnhöhe ist dabei ein in weiten Bereichen freier Parameter und kann daher zur Optimierung der Signallaufzeit genutzt werden. Auch hier sind kreisförmige Orbits sinnvoll, sind aber nicht zwingend.

LEO (Low Earth Orbit) und MEO Satelliten (MEO: Medium Earth Orbit) weisen in der Regel kreisförmige Bahnen mit unterschiedlichen Bahnneigungen auf. Bahnhöhen von ca. 400 km bis 2000 km werden dabei als Low Earth Orbit, alle Bahnen mit größerem Radius (bis zum GEO Radius) als Medium Earth Orbit bezeichnet. Die Auswahl der Bahnparameter richtet sich dabei nach dem Anwendungsszenario. Für unsere Betrachtungen konzentrieren wir uns auf Low Earth Orbits wegen der günstigen Linkbilanz und der niedrigen Signallaufzeit.

Zu erwähnen sind auch die sog. Molniya Orbits. Dies sind elliptische Bahnen, deren geringste Entfernung zur Erdoberfläche ähnlich zu LEOs und deren entfernteste Position ähnlich wie bei GEOs ist. Die Bodenspur nimmt nun eine ganz andere Form an und kann so dimensioniert werden, dass nur bestimmte Bereiche auf der Erdoberfläche ausgeleuchtet werden. Zu berücksichtigen sind dabei die stark variierende Signallaufzeit und erhebliche Dopplereffekte durch die stark variierende Relativgeschwindigkeit zum Fußpunkt.



**Bild 23:** Bodenspuren der wesentlichen Satellitentypen.

Aktuell (Januar 2019) befinden sich ca. 2000 aktive Satelliten im Orbit [16], die sich wie in

Bild 24 zeigt auf die verschiedenen Bahnformen aufteilen. Die Satelliten können unterschiedlichste Aufgaben haben (Bild 25), die bekanntesten sind sicher Satelliten für TV Verteildienste (Kommunikation), Wetter- und Erdbeobachtungssatelliten und Navigationssatelliten.

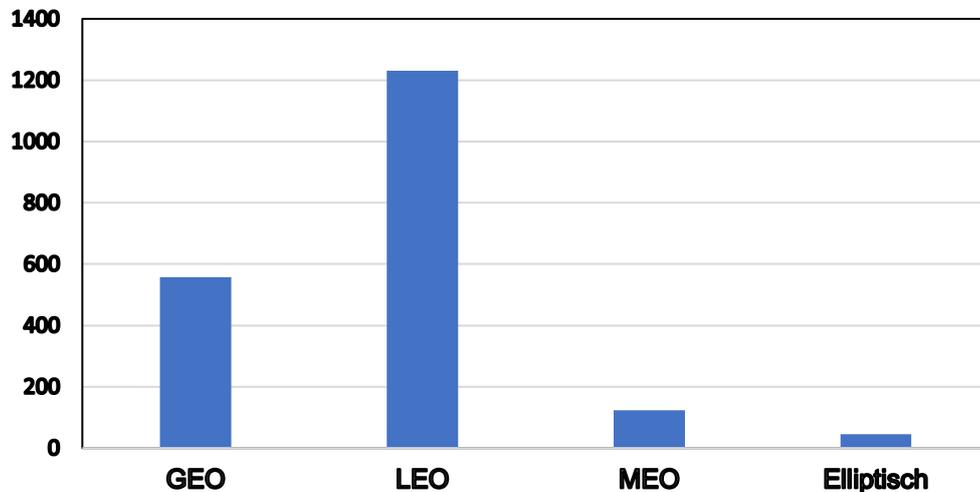


Bild 24: Anzahl Satelliten im Orbit (Stand Januar 2019)

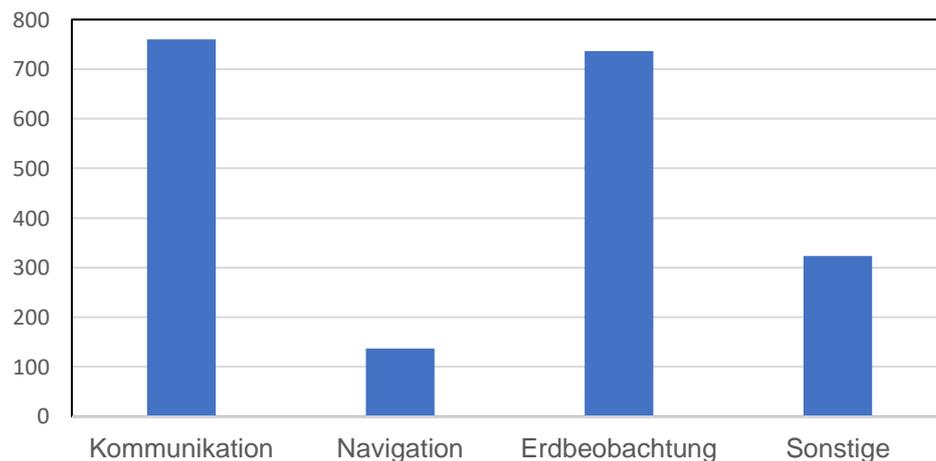
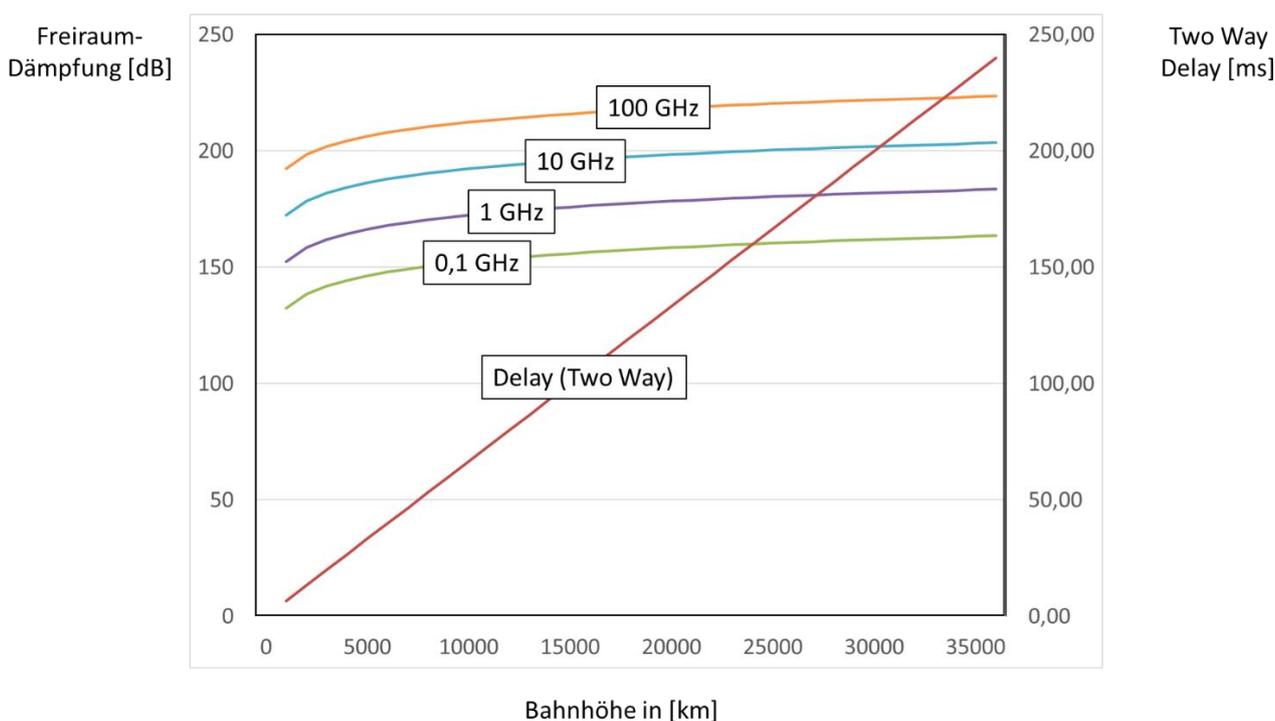


Bild 25: Anzahl Satelliten nach Einsatzgebiet (Stand Januar 2019)

Daneben gibt es noch eine Reihe sonstiger Anwendungen sei es für militärische Zwecke, wissenschaftliche Anwendungen und Technologieentwicklungen um nur die wichtigsten zu nennen.

### 3.1.2 Geostationäre Satelliten

Geostationäre Satelliten werden hauptsächlich (85 %) für Kommunikationsdienste genutzt, weitere 7 % für Erdbeobachtung und 5 % für Navigation. Dem Vorteil einer einfachen Empfangsstation (festausgerichtete Antenne) steht die relativ große Entfernung entgegen, die zu einer beträchtlichen Signalabschwächung und zu hohen Signallaufzeiten führt (Bild 26).



**Bild 26:** Freiraumdämpfung und Latenzzeit als Funktion der Bahnhöhe

Bei den hier üblichen Frequenzbereichen (10 – 30 GHz) beträgt allein die Freiraumdämpfung schon mehr als 200 dB. Hinzu kommen noch Dämpfungen durch atmosphärische Effekte, die von der Frequenz und der Orbitposition abhängen (Wettermodelle). Eine vereinfachte beispielhafte Pegelrechnung zeigt, dass auf beiden Seiten des Links relativ große Antennengewinne angesetzt werden müssen (Bild 27), damit auf der Empfangsseite ein ausreichender Signal-Rauschabstand erreicht werden kann.

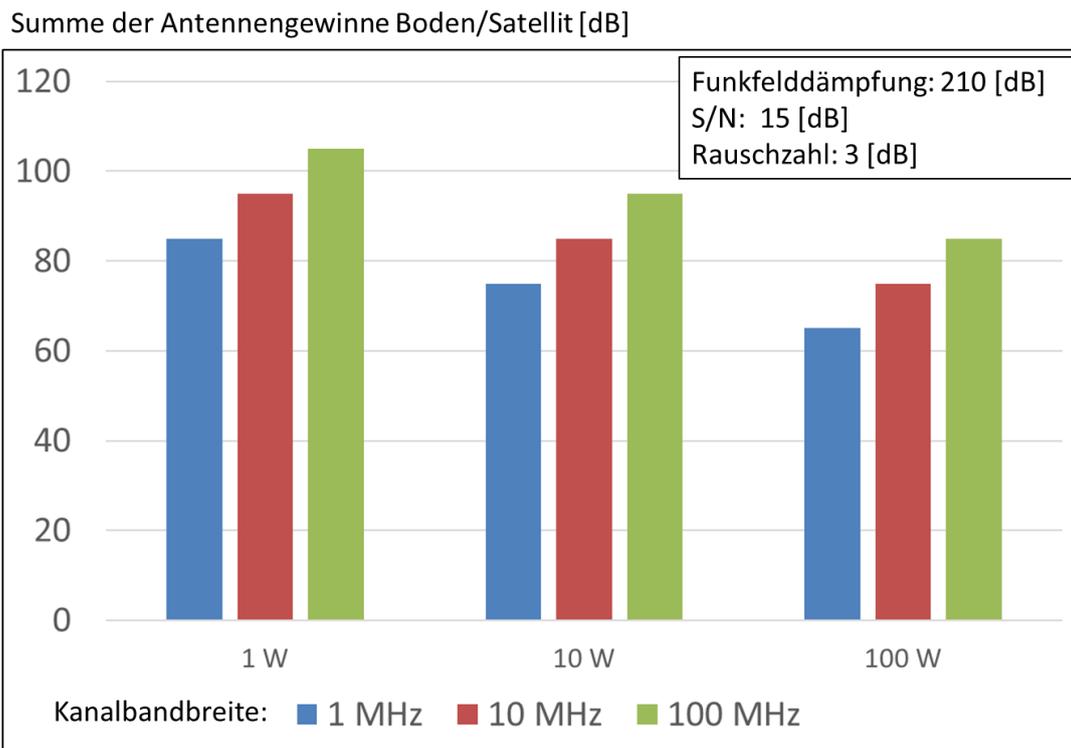
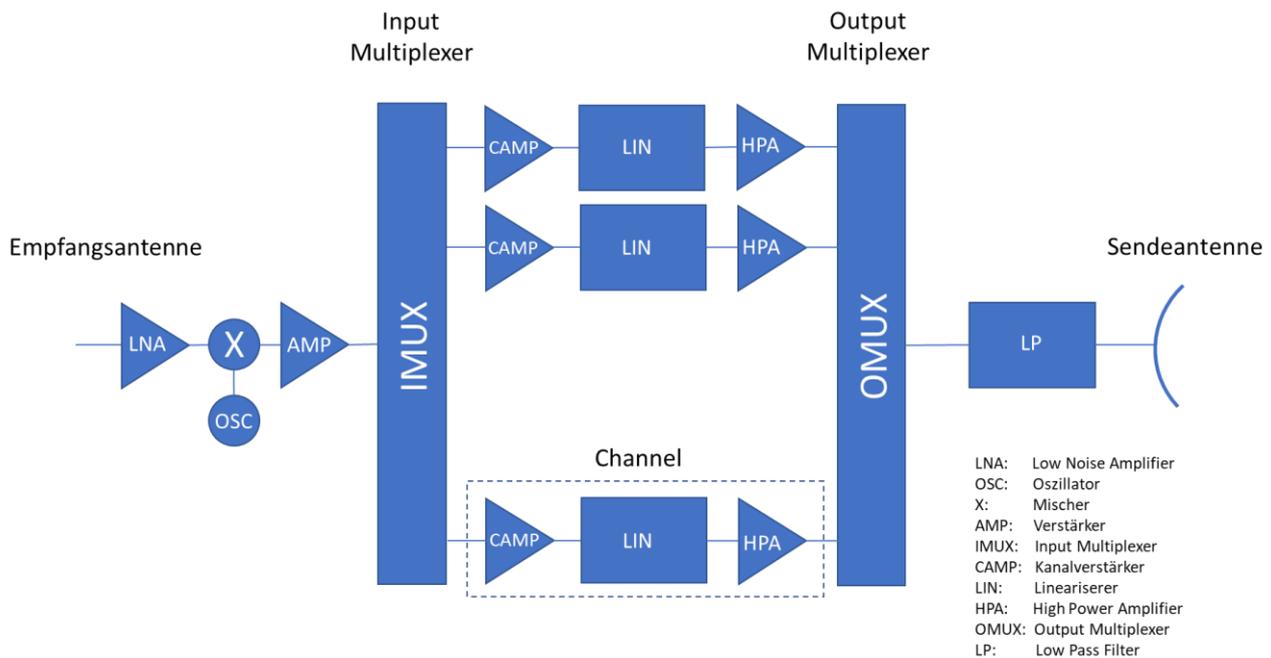


Bild 27: Erforderlicher Gesamtantennengewinn

Die Leistung im Satelliten ist ein weiterer kritischer Parameter. Für Breitbandanwendungen sind hohe Leistungen pro Kanal erforderlich. Diese können in Verbindung mit einem hohen Wirkungsgrad selbst heute nur von Wanderfeldröhrenverstärkern erbracht werden.

Für breitbandige Kommunikationsanwendungen stehen in der Regel mehrere Kanäle zur Verfügung. Diese werden in der klassischen transparenten Repeaterstruktur von einem breitbandigen Empfänger empfangen, auf die Sendefrequenz breitbandig umgesetzt, mit einem Analogmultiplexer (IMUX) auf die einzelnen Kanäle aufgeteilt, verstärkt und am Ausgang in einem weiteren Analogmultiplexer (OMUX) zusammengefasst und auf die Antenne gegeben. Je nach Bandbreite und Kanalzahl können beträchtliche Summenleistungen entstehen, die der Ausgangsmultiplexer verarbeiten muss. Bild 28 zeigt ein stark vereinfachtes Blockschaltbild. In modernen Satelliten finden sich zusätzliche Einrichtungen z.B. zur Verschaltung der Signale auf Mutibeam-Antennen mit mehreren Eingängen, die jeweils einem separaten Antennenbeam zugeordnet sind um flexible Ausleuchtgeometrien zu realisieren.



**Bild 28:** Prinzipschaltbild eines transparenten Repeaters

Die Vorteile eines transparenten Repeaters liegen in der Einfachheit der Struktur und der geringen Anzahl elektronischer Komponenten, die ja für Weltraumanwendungen qualifiziert werden müssen. Auf der anderen Seite steht mangelnde Flexibilität, so dass derartige Lösungen immer Einzelfälle sind, die auf bestimmte Szenarien hin zugeschnitten werden, es werden auch immer nur wenige Satelliten gebaut. Darüber hinaus bestehen wie in der Raumfahrt generell enorme elektrische, mechanische und thermische Anforderungen an die Einzelkomponenten. Für deren Design, Fertigung und Integration gibt es nur wenige spezialisierte Firmen, eine durchgehende Standardisierung ist prinzipiell nicht möglich.

Allein über spezielle Antennenformen (Multibeam – Antennen) besteht eine gewisse Flexibilität, die Diagramme der Antennen an verschiedene Ausleuchtzenarien anzupassen. Dies reicht von einfachen Antennen mit kreisförmiger Apertur für kreisförmige Ausleuchtgebiete über elliptische Ausleuchtgebiete und Gebiete mit (fast) beliebiger Kontur (Contoured Multibeam Antennen, Bild 29). Die Antenne besteht dabei aus einem (großen) Hauptreflektor, ggf. einem Subreflektor und einem Erreger - Array aus mehreren Speisesystemen, deren Konfiguration vom Ausleuchtgebiet abhängt. In einem gewissen Rahmen können diese Antenneneigenschaften auch über spezielle Formung des Haupt- und Subreflektors erreicht werden (Shaped Beam Antenne).

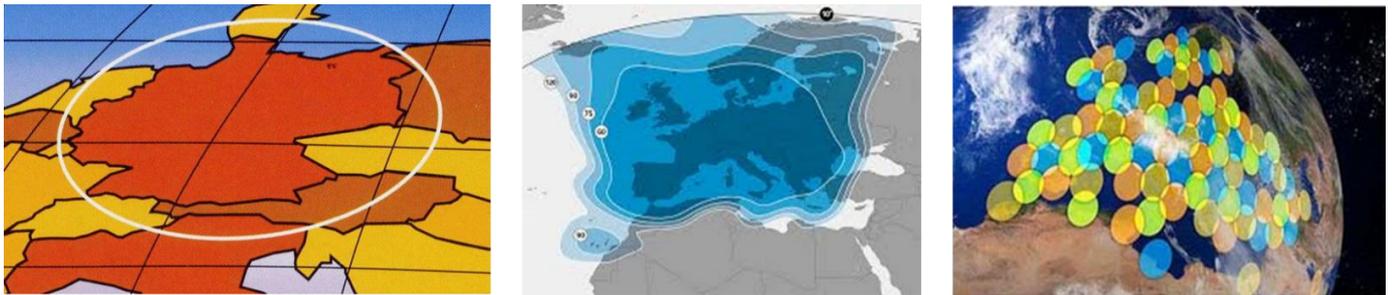


Bild 29: Coverage Geometrien (v.l.n.r: DFS Kopernikus, ASTRA, Eutelsat Ka-Sat)

Bild 30 zeigt als Entwicklungsschritt das Prinzipschaltbild eines regenerativen Transponders. Die Schaltungsauslegung ist von vorneherein auf das Vorhandensein von Multibeamantennen und/oder Antennenarrays ausgelegt. Die Signale werden nicht mehr transparent übertragen, sondern kanalweise demoduliert. Durch den Demodulationsprozess erzielt man einen Gewinn, der der Linkbilanz zugutekommt. Da nach der Demodulation Basisbandsignale vorliegen, ist eine Regeneration der Signale und eine wesentlich flexiblere Signalverarbeitung möglich. Die Schaltungsstruktur wird dadurch natürlich erheblich aufwändiger. In modernen Kommunikationssystemen ist aber ein hoher Integrationsgrad möglich. Dies kann auch für zukünftige Satellitenmissionen eingesetzt werden, wenn es gelingt, die hochintegrierten Schaltungen für Raumfahrtanwendungen zu qualifizieren.

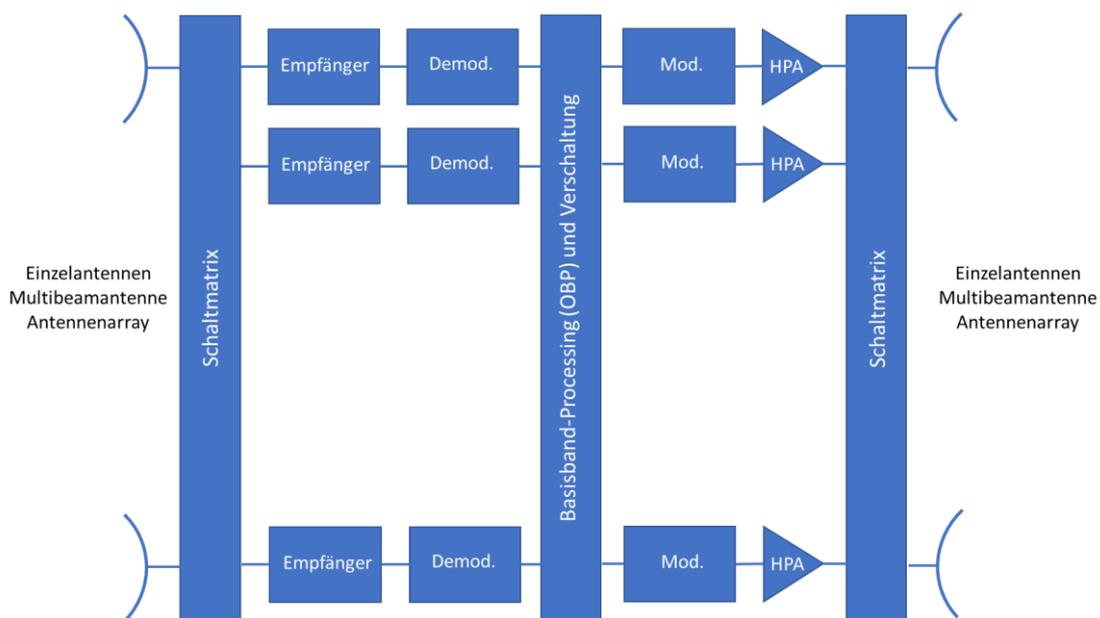


Bild 30: Prinzipschaltbild eines regenerativen Transponders

### 3.1.3 Low Earth Orbit Satelliten

Von der möglichen Vielzahl von Satellitenorbits unterhalb der Bahn geostationärer Satelliten betrachten wir wegen der Kompatibilität mit terrestrischen Standards nur kreisförmige Orbits unterhalb einer Bahnhöhe von 1000 km (LEO). Andere Konfigurationen können in Teilaspekten durchaus günstige Eigenschaften aufweisen, haben aber wegen der größeren Bahnhöhen in der Regel eine zu hohe Latenz und einen zu hohen Dopplereffekt.

Die Bahn solcher Satelliten ist i. W. gekennzeichnet durch die Bahnhöhe und den Winkel der Bahnebene zur Äquatorialebene (Bild 31). Da die Umlaufzeit bei geringerer Höhe deutlich kleiner ist als im geostationären Fall, beschreibt der Satellitenfußpunkt eine Bodenspur auf der Erdoberfläche. Arbeitet man mit hochbündelnden Antennen auf der Bodenseite müssen diese Antennen dem Satelliten nachgeführt werden.

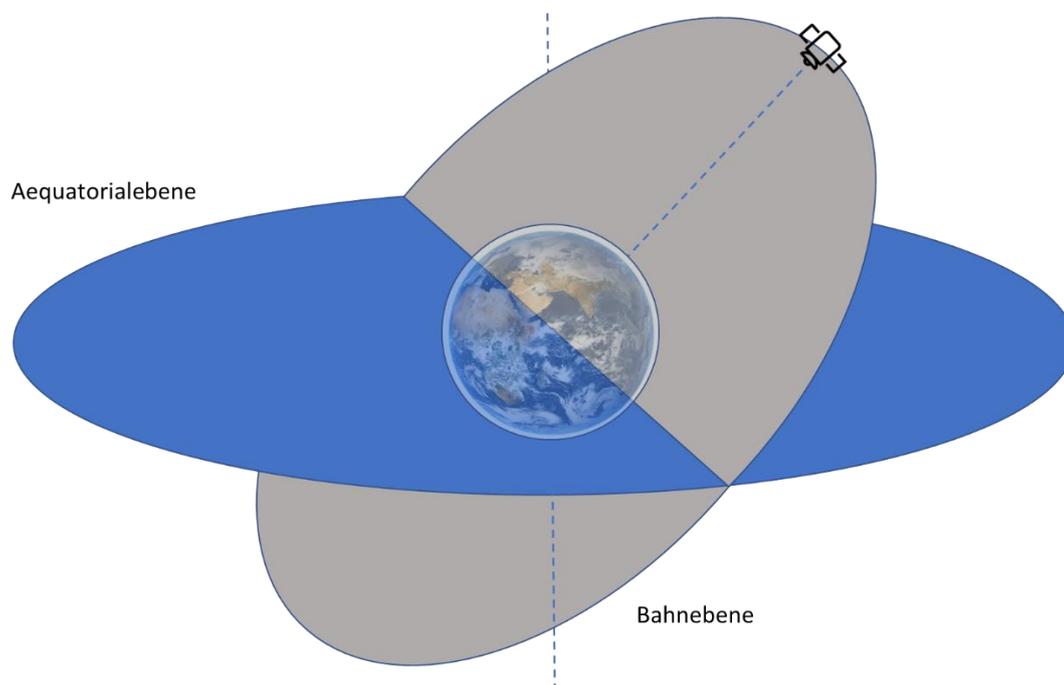


Bild 31: Geometrie kreisförmiger LEO Bahnen (nicht maßstabsgerecht)

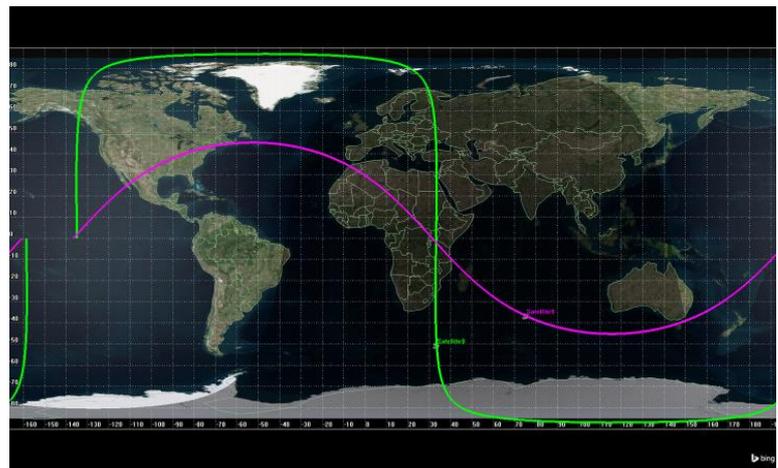
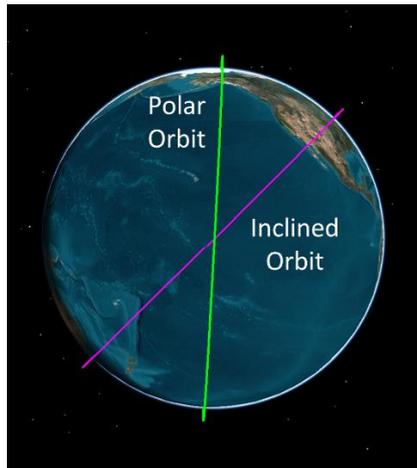
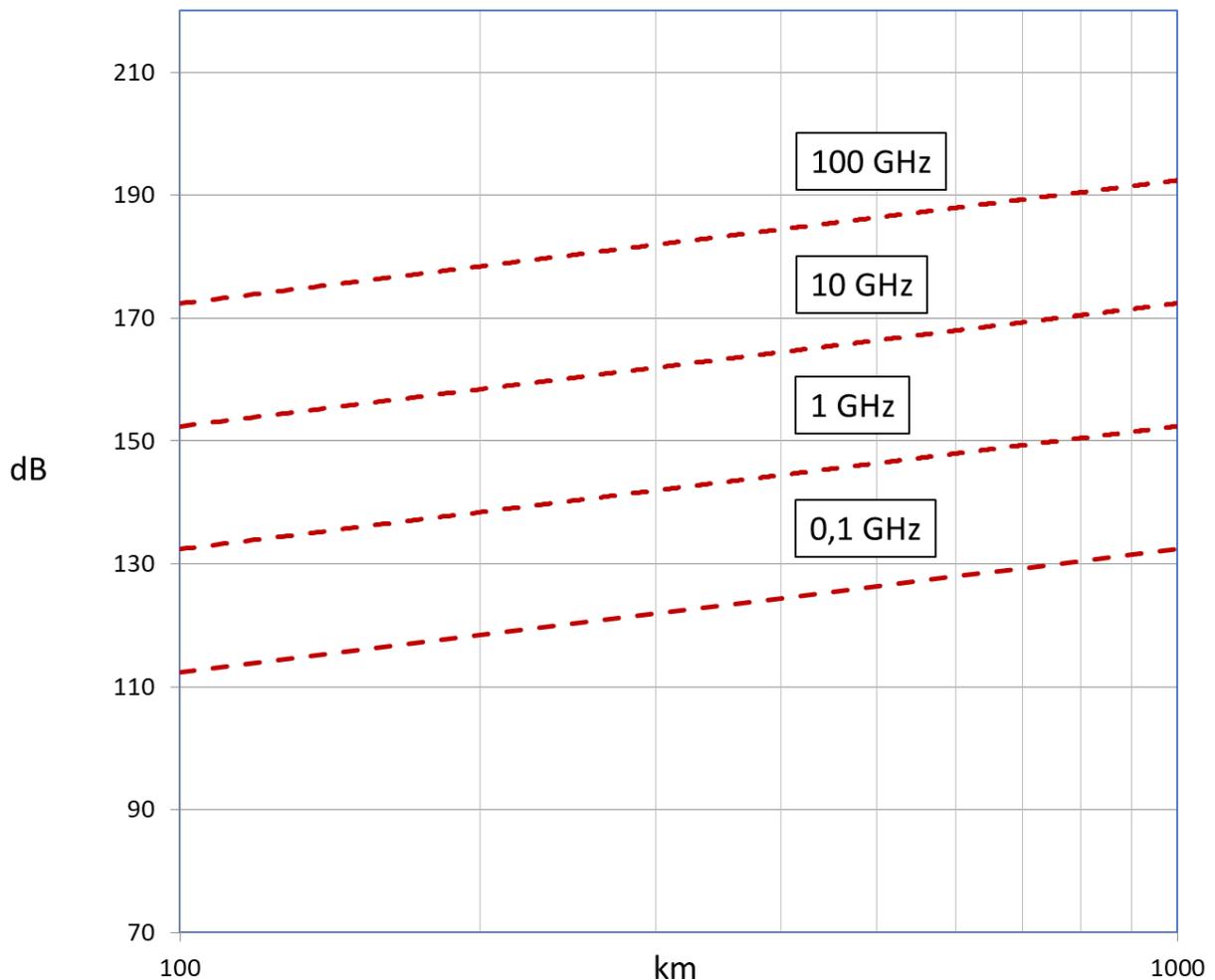


Bild 32: Bahngeometrie und Bahnspur bei verschiedenen Bahnwinkeln

Bei einem Umlauf ergeben sich demnach Bahnspuren wie in Bild 32 für 2 Elevationswinkel gezeigt. Da die Satellitenbahn im Orbit konstant bleibt, dreht sich die Erde unter dem Satelliten weg, und es entsteht bei jedem Umlauf eine neue Bahnspur. Innerhalb einer Erdumdrehung wird somit die gesamte Erde mit Bahnspuren überdeckt. Mit einem LEO derartiger Bahnkonfiguration erhält man also automatisch ein globales Kommunikationssystem, das allerdings nur temporär vorhanden ist, d.h. solange der Satellit von der Erdoberfläche her sichtbar ist.

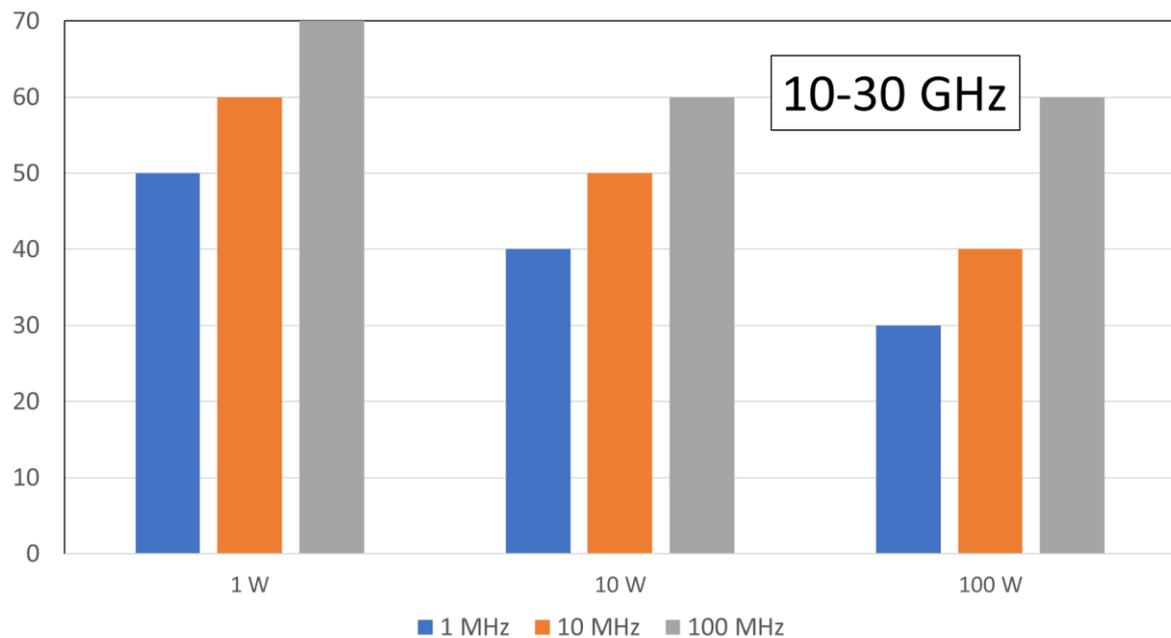
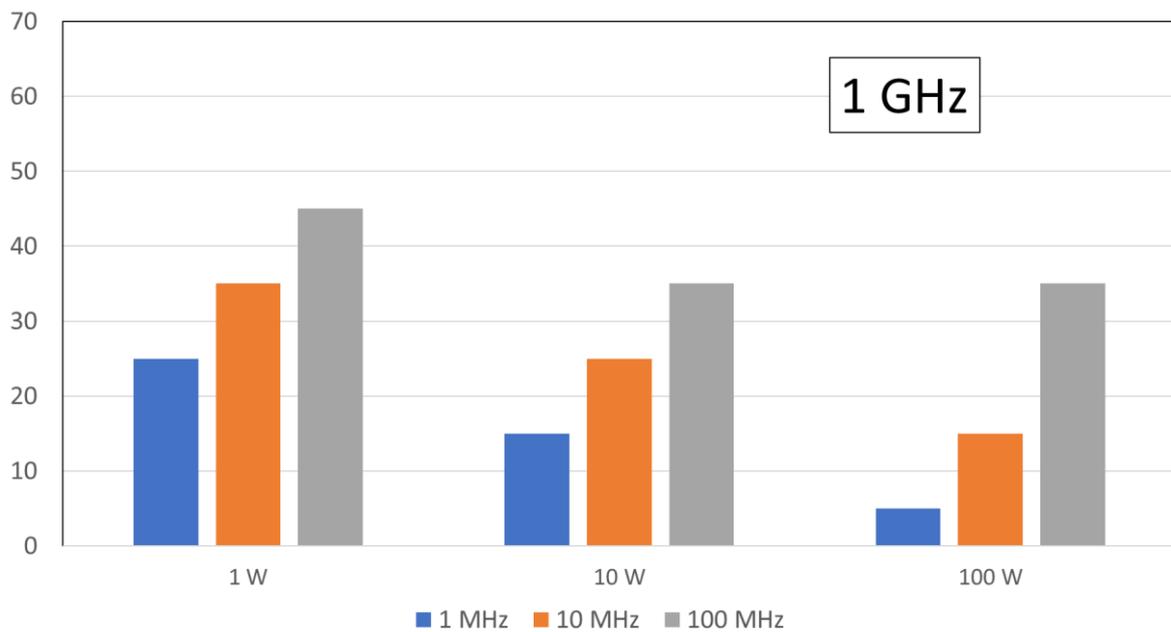


Bild 33: Bahnspur über der Zeit (3 Umläufe)



**Bild 34:** Freiraumdämpfung einer erdnahen Bahn als Funktion der Bahnhöhe

Wie schon in Bild 26 zu sehen, ergeben sich nun deutlich geringere Freiraumdämpfungen, welche sich günstig auf die Linkbilanz auswirken. Bei höheren Frequenzen muss natürlich die zusätzliche Dämpfung durch atmosphärische Effekte hinzugerechnet werden. Unter gleichen Randbedingungen für Satellitenausgangsleistung und Kanalbandbreite sinkt der erforderliche Gesamtantennengewinn (Summe aus Gewinn der Satellitenantenne und Gewinn der Empfangsstation) deutlich. Bei niedrigen Frequenzen kann daher mit mobilen Endgeräten gearbeitet werden, die keinen Antennengewinn aufweisen (Normalfall). Wie die neuesten Entwicklungen im Bereich der terrestrischen Standards aber zeigen (vgl. Abschnitt 2.3.3), ist dies auch in Zukunft bei höheren Frequenzen möglich. Das bedeutet wiederum, dass die Leistungspegel im Satelliten und beim Endgerät durchaus moderat sein können. Dies ist von erheblicher Bedeutung für die Größe der Satelliten und damit die Kostenseite.



**Bild 35:** Abschätzung erforderliche Gesamtantennengewinne in dB (Parameter: Leistung und Kanalbandbreite)

Auch die Latenz ist nun deutlich niedriger als beim GEO. Bild 36 zeigt die Signallaufzeit von der Erde zum Satelliten und zurück für eine Satellitenposition direkt im Zenith des Senders/Empfängers. Dieser Wert ist der minimal mögliche. Für Orte, die außerhalb des Fußpunktes liegen, steigt die Latenz in Abhängigkeit vom Sichtwinkel unter dem der Empfangs-/Sendeort gesehen wird. Für eine genauere Berechnung gehen wir von einer Geometrie wie in Bild 37 gezeigt aus.

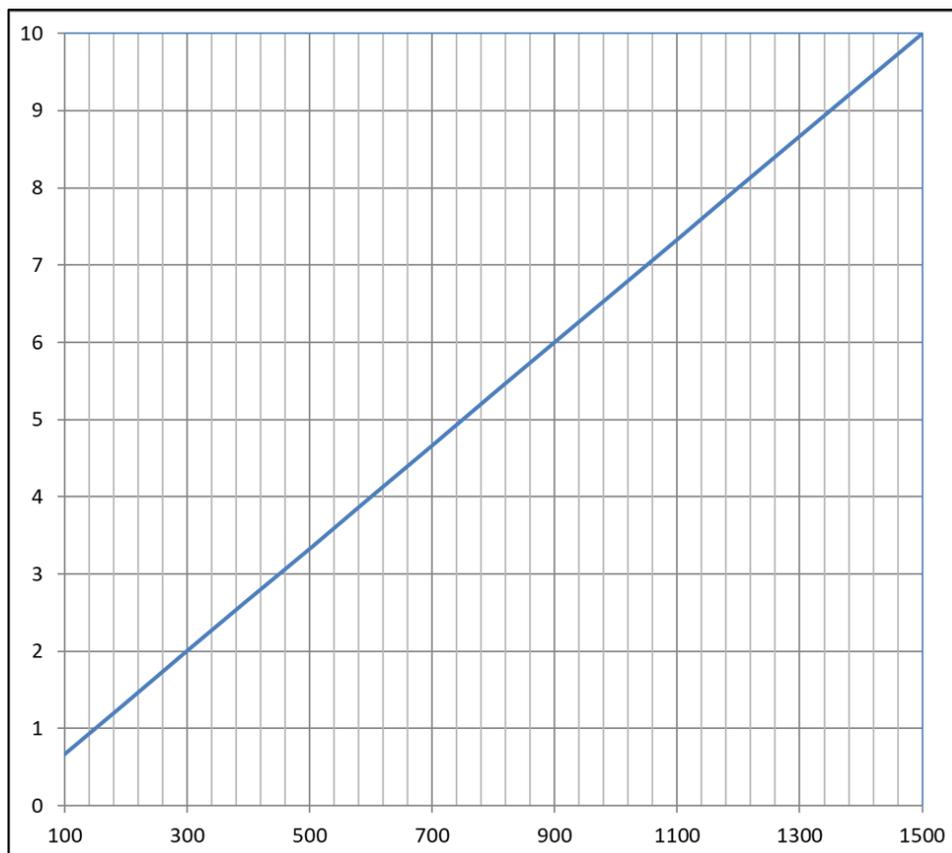
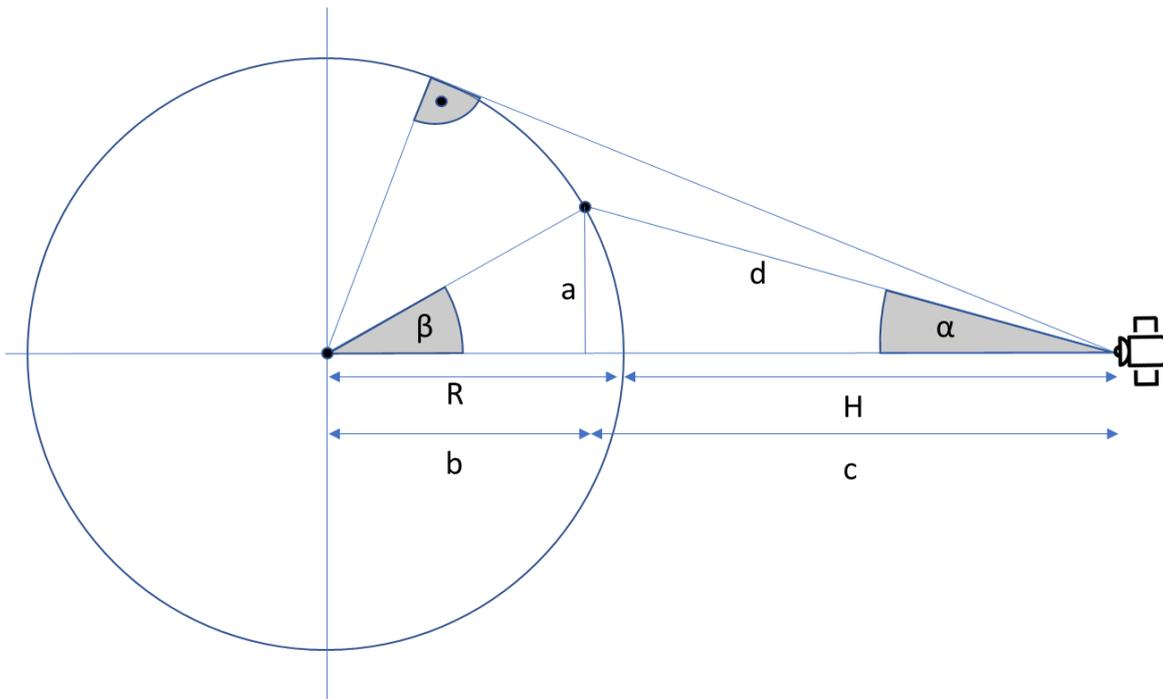


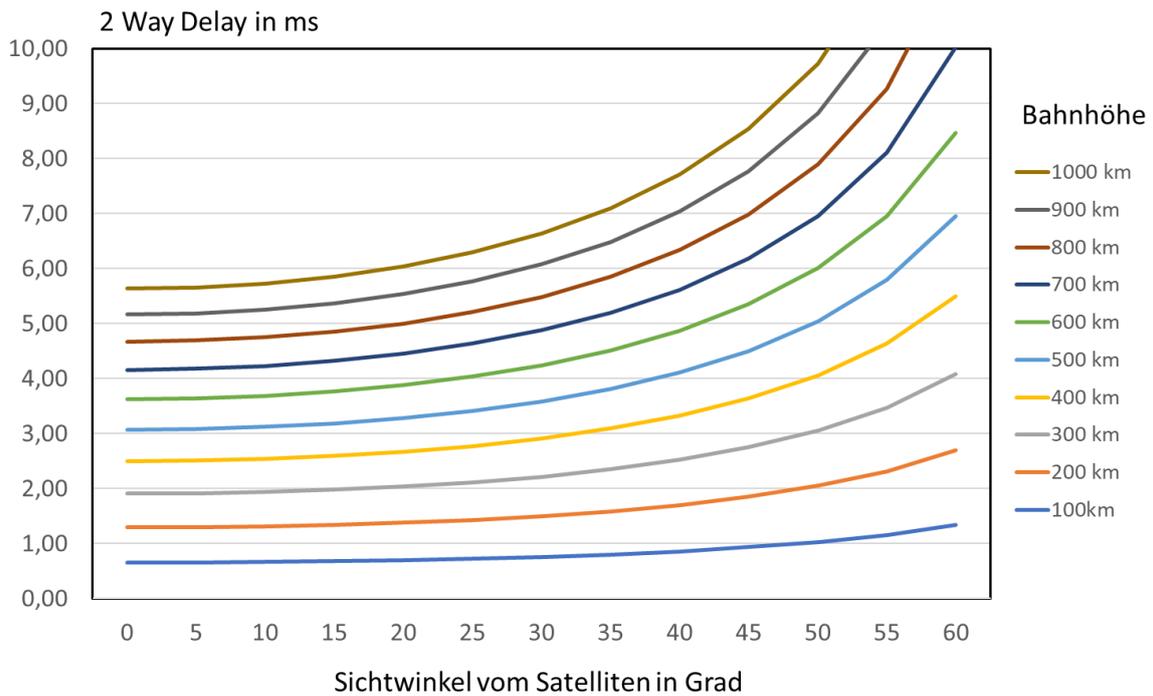
Bild 36: Latenz (2 Way) in ms bei direktem Überflug als Funktion der Bahnhöhe in km

Die Bahnhöhe ist zur besseren Darstellung stark überdehnt. Berechnet wird nun die Entfernung  $d$ , die sich mit wachsendem Sichtwinkel  $\alpha$  vergrößert. Daraus lässt sich die Latenz einfach errechnen (Bild 38). Mit Hilfe des Kosinussatzes und einiger Geometriebetrachtungen ergibt sich:

$$d = (R + H) \cdot \cos \alpha - \sqrt{(R + H)^2 \cdot \cos^2 \alpha - H \cdot (2R + H)} \quad (3)$$



**Bild 37:** LEO Geometrie (Bahnhöhe überhöht gezeichnet)



**Bild 38:** Latenz (2 Way) in Abhängigkeit von Sichtwinkel  $\alpha$  und Bahnhöhe

Es zeigt sich, dass für nicht allzu große Sichtwinkel und LEO Orbits deutlich unter 1000 km die Latenzanforderungen moderner terrestrischer Kommunikationssysteme erfüllt werden können. Die hier berechnete Latenz addiert sich bei Verwendung gleicher Technik natürlich zu der in Bild 16 dargestellten Latenz im RAN.

Für einen bestimmten Winkel als Funktion der Bahnhöhe bildet die Strecke  $d$  eine Tangente an die Erdoberfläche. Die zugehörige Ausleuchtfläche wird als „Footprint“ des Satelliten bezeichnet. Diese geometrische Größe ist für bestimmte Anwendungen die auf eine möglichst hohe Sichtbarkeit zielen von Interesse, für Breitbandanwendungen aber ohne Bedeutung, da die Latenzzeiten zu groß werden und die Kapazität innerhalb des Footprints bei weitem nicht ausreicht.

### 3.1.4 Konstellationen

Für eine durchgehende Kommunikation mit Low Earth Orbiting Satelliten sind daher mehrere Satelliten erforderlich. Abhängig von den Systemanforderungen kann diese Zahl sehr groß werden (vgl. Abschnitt 5). Derartige Anordnungen werden als Konstellationen bezeichnet. Die Bilder 39 und 40 zeigen ein Beispiel einer einfachen Konstellation bei einer Bahnneigung von 60 Grad und Abständen der Bahnen und Satelliten von 20 Grad.

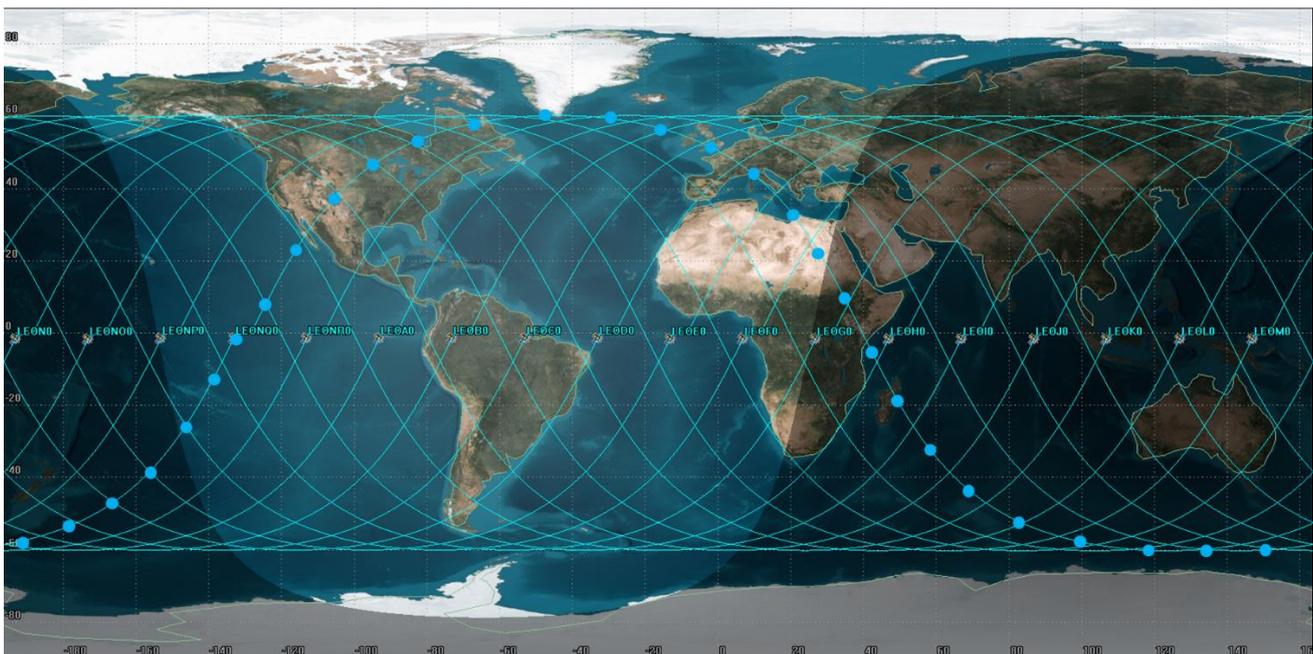


Bild 39: Konstellationsbeispiel (Bahnhöhe 500 km, Bahnneigung 60 Grad)  
(Satelliten nur in einer Bahn gezeichnet)

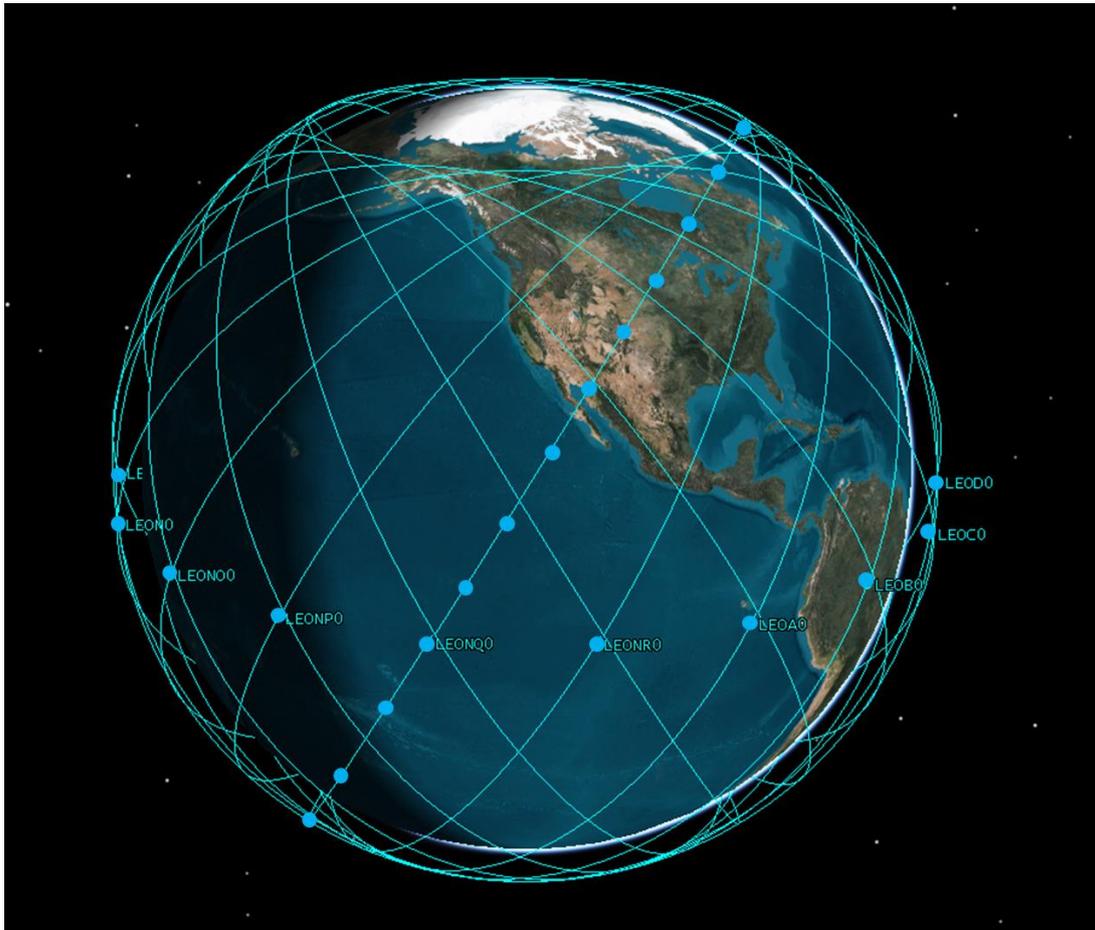


Bild 40: Konstellationsbeispiel (Bahnhöhe 500 km, Bahnneigung 60 Grad)  
(Satelliten nur teilweise eingezeichnet)

Aufgrund der Bahnneigung sind im vorliegenden Beispiel die Polregionen nicht abgedeckt. Für die Optimierung derartiger Konstellationen gibt es eine Fülle von Möglichkeiten, hierfür stehen leistungsfähige Simulationswerkzeuge zur Verfügung (z.B. [17]). Zu den bekanntesten Geometrien gehört die sog. Walker Constellation [18]. Wichtige Eingabegrößen für den Entwurf einer Konstellation sind die abzudeckenden Gebiete und die in den Gebieten zu erreichende Kapazität und Dienstqualität. Wie aus Kapitel 2.5.2 zu erkennen ist, sind für eine ausreichende Breitbandabdeckung in urbanen Gebieten nur Satellitenpositionen einer bestimmten (hohen) Elevation geeignet. Dies ermöglicht nicht nur eine hohe Wahrscheinlichkeit für LOS (Line of Sight) sondern garantiert auch die niedrigste Latenz und bei ausreichender Satellitenkapazität und Anzahl auch die erforderliche Breitbandigkeit.

### 3.2 High-Altitude Platforms

Die Vorteile von Ausleuchtgeometrien mit einer vertikalen Ausrichtung der Funkkommunikation lassen sich schon (im Vergleich zu Satellitenbahnen) ab einer relativ niedrigen Höhe nutzen. Daher werden neben Satelliten auch Flugobjekte betrachtet, die in niedrigeren Höhen fliegen. Dies ist zunächst attraktiv wegen der weiter verbesserten Linkbilanz und der weiter reduzierten Signallaufzeit. Betrachtet werden hier Flughöhen von 15 bis zu 50 km. Grundsätzlich können hier Flugzeuge (Drohnen) und Ballons eingesetzt werden.

Stratosphärenballons sind in einigen Fällen (z.B. Bild 41; [28]) erfolgreich getestet worden. Hier kann direkt kommerziell verfügbare LTE Technik eingesetzt werden, und eine entsprechende Lösung ist schnell verfügbar und kostengünstig und deutlich weniger komplex als Konstellationen von niedrigfliegenden Satelliten. Die Schwierigkeit besteht in der permanenten Kontrolle der Position des Ballons. Ohne stabilisierende Antriebe verändert sich die Ausleuchtzone am Boden permanent. Derartige Lösungen scheinen daher eher geeignet für lokale Ad-Hoc Netze für eine begrenzte Zeit weniger aber für eine permanente überall vorhandene Breitband – Infrastruktur.

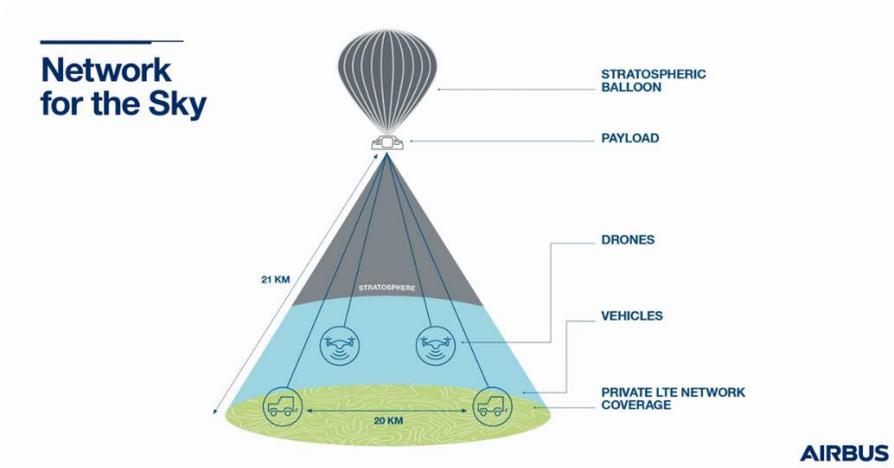


Bild 41: Airbus Stratosphärenballon (Quelle: Airbus)

Weltweite Internet - Konzerne wie Google sind neben der Applikationshoheit an eigener Kommunikationsinfrastruktur interessiert. Hierzu gehören neben Satellitenkonstellationen und Stratosphärenballons auch Lösungen in autonomen Fluggeräten (Drohnen) in großer Höhe. Der Vorteil besteht auch hier in der weitaus geringeren Distanz zwischen Sender und Empfänger, der entsprechend geringen Latenz und der übersichtlichen Komplexität.

Der wohl bekannteste Ansatz kommt von Google (Projekt Sky Bender). Ein Team, das vorher mit Stratosphärenballons experimentierte (Projekt Loon) befasst sich aktuell mit autonomen Drohnen (und deren Vorstufen noch mit Handsteuerung). Hier werden (wie bei 5G) wegen der hohen verfügbaren Bandbreite bevorzugt mm-Wellen eingesetzt. Solara 50 hat dabei eine Spannweite bis zu 50 m um ausreichend Solarenergie zur Verfügung zu haben. Im Gegensatz zu Ballons besteht bei Drohnen eine weitaus bessere Kontrollmöglichkeit der Position durch den verfügbaren Antrieb. Die präzise Steuerung von Drohnen ist seit längerem aus Militäranwendungen bekannt und ausgereift. Google denkt daher nicht nur an einen regional begrenzten Einsatz sondern plant durchaus größere Mengen an Drohnen in bestimmten Gebieten. Diese Konzepte vermeiden den bei Satellitenkonstellationen erforderlichen Anfangsaufwand und können sehr gezielt eingesetzt werden. Inzwischen experimentieren klassische Netzbetreiber ebenfalls mit derartigen Lösungen. Es bleibt zu beobachten wie sich diese Strategien im Praxiseinsatz bewähren und mit der Luftfahrt koordiniert werden können.



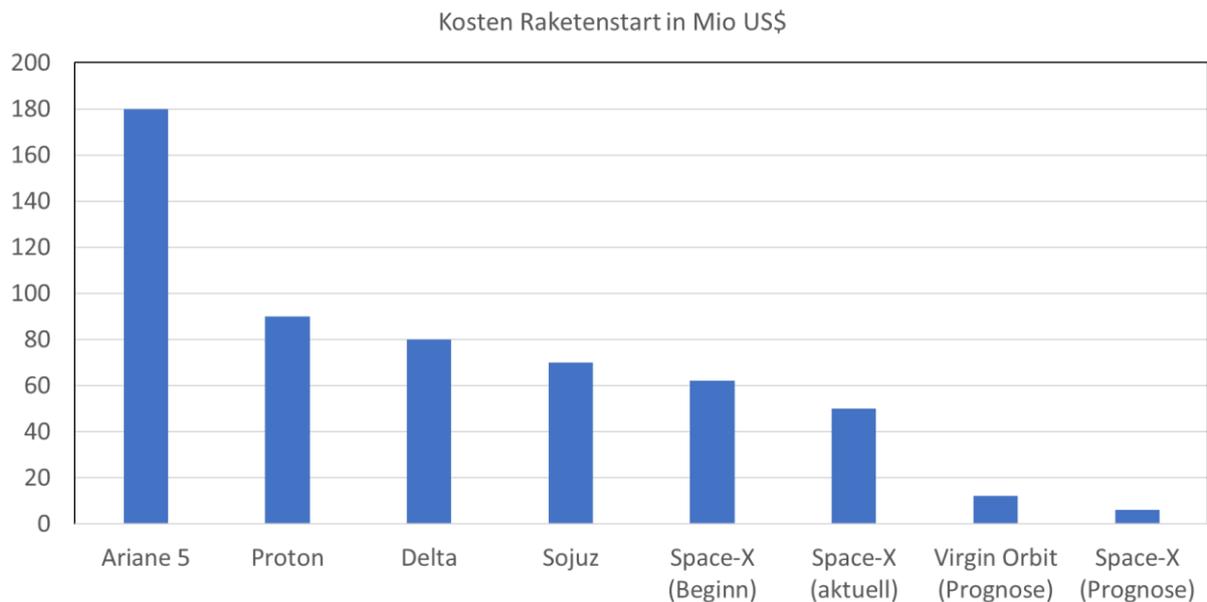
Bild 42: Autonome solarbetriebene Drohne (Google Solara 50)

#### 4. Klassische Satellitentechnik und „New Space Economy“

Der Erfolg von Konstellationen mit niedrigfliegenden Satelliten wird wesentlich davon abhängen, dass die Kosten für den Bau der Satelliten sowie für Start und Betrieb in Dimensionen vorstoßen, die ein attraktives Geschäftsmodell ermöglichen. An diesem Punkt sind frühe Aktivitäten in dieser Richtung (Beispiel: Teledesic [29]) kläglich gescheitert. Die klassische Satellitentechnik ist gekennzeichnet durch hochproprietäre Lösungen und einen enormen Qualifikationsaufwand, der insbesondere für geostationäre Satelliten auch erforderlich ist. In der Regel werden nur wenige Satelliten gebaut, diese sind Einzelstücke und müssen eine sehr hohe Zuverlässigkeit gewährleisten.

In einer Konstellation, die für mobile Breitbanddienste geeignet ist, sprechen wir hingegen von einigen Hundert bis zu einigen Tausend Satelliten. Hier liegt ein ähnliches Problem zugrunde wie wir es von terrestrischen Mobilfunknetzen kennen. Um in terrestrischen Netzen die stetig wachsenden Kapazitätsbedarfe zu bedienen verwendet man neben dem klassischen Netz aus Rural- und Macro- Stationen (grosse Zellen) vermehrt Kleinzellennetze (Micro- und Pico- Basisstationen). Auch hier gab es anfänglich Bedenken, ob die deutlich größere Anzahl an Netzelementen wirtschaftlich sein kann. Man kann leicht berechnen, dass hierfür die Kosten der Kleinzellen inklusive ihres notwendigen Zubringers stärker sinken müssen als ihre Anzahl steigt. Darüber hinaus müssen die Aufwendungen für Installation und Betrieb betrachtet werden. Insbesondere für den Betrieb bieten sich Netzlösungen an, die auf dem Prinzip der Selbstorganisation (SON: Self Organizing Networks) basieren. Diese Vorgehensweise ist erfolgreich, da man zeigen kann, dass bei richtig dimensionierten Kleinzellennetzen die Kapazität stärker steigt als die Kosten. Bei konventionellem Ausbau hingegen steigen die Kosten überproportional zum Kapazitätsgewinn an. Man muss demnach die möglichen Alternativszenarien vergleichen und entsprechend auswählen. Viele dieser Erkenntnisse lassen sich auf zukünftige Satellitenkonfigurationen übertragen.

Wie kann nun der notwendige Paradigmenwechsel bei den Herstellkosten von Bestandteilen einer Konstellation erreicht werden? Hier kommt eine neue Generation von Protagonisten im Raumfahrtbereich ins Spiel, die sich visionär zum Ziel gesetzt haben die klassische Raumfahrt zu revolutionieren (Space-X, Blue Origin). Anfangs belächelt haben diese Protagonisten aber inzwischen einige Erfolge im Bereich der Launcher vorzuweisen, insbesondere was die Wiederverwendbarkeit von teuren Raketensystemen betrifft. Hierdurch lassen sich enorme Kosteneinsparungen beim Raketenstart erzielen. Noch innovativere Möglichkeiten für Satellitenstarts eröffnen weitere Perspektiven. Bild 43 zeigt dies in aller Deutlichkeit. Für eine genauere Analyse muss man natürlich die jeweilige Nutzlastkapazität mit einrechnen (Kosten pro kg), es kommt aber bei diesen Betrachtungen zunächst nur auf die Größenordnung an.



**Bild 43:** Typische Kosten von Launch – Systemen (Stand 2019)

Bei Satellitenkonstellationen müssen wegen der aber weiterhin hohen Kosten eines Launches natürlich mehrere LEO's gleichzeitig gestartet werden. Auch hier gibt es bemerkenswerte Fortschritte. Als jüngste Beispiele sind hier OneWeb und Space-X Starlink zu nennen. Hier werden spezielle Dispenser (Bild 44) verwendet, mit denen 30 - 60 mittelgroße Satelliten mit einem Start in Position gebracht werden können. Die ersten Satelliten der geplanten Konstellationen sind in 2019 erfolgreich gestartet worden.

Die größte Herausforderung liegt aber bei den Konstellationssatelliten selbst. Eine Verfehlung der Zielkosten führt hier durch den Vervielfältigungseffekt zu enormen Auswirkungen auf die Gesamtkosten. Auch in diesem Punkt steht das OneWeb Projekt aktuell unter besonderer Beobachtung. Eine wirkliche Großserienfertigung wie in Bild 45 dargestellt ist aktuell erst in Planung, die ersten Satelliten wurden noch zu großen Teilen konventionell gefertigt und verfehlen daher die publizierten Kostenziele (ca. 0,5 Mio €) noch um den Faktor 2.



Bild 44: Satelliten-Dispenser (OneWeb, links, Starlink, rechts)  
Source: Arianespace, Space-X

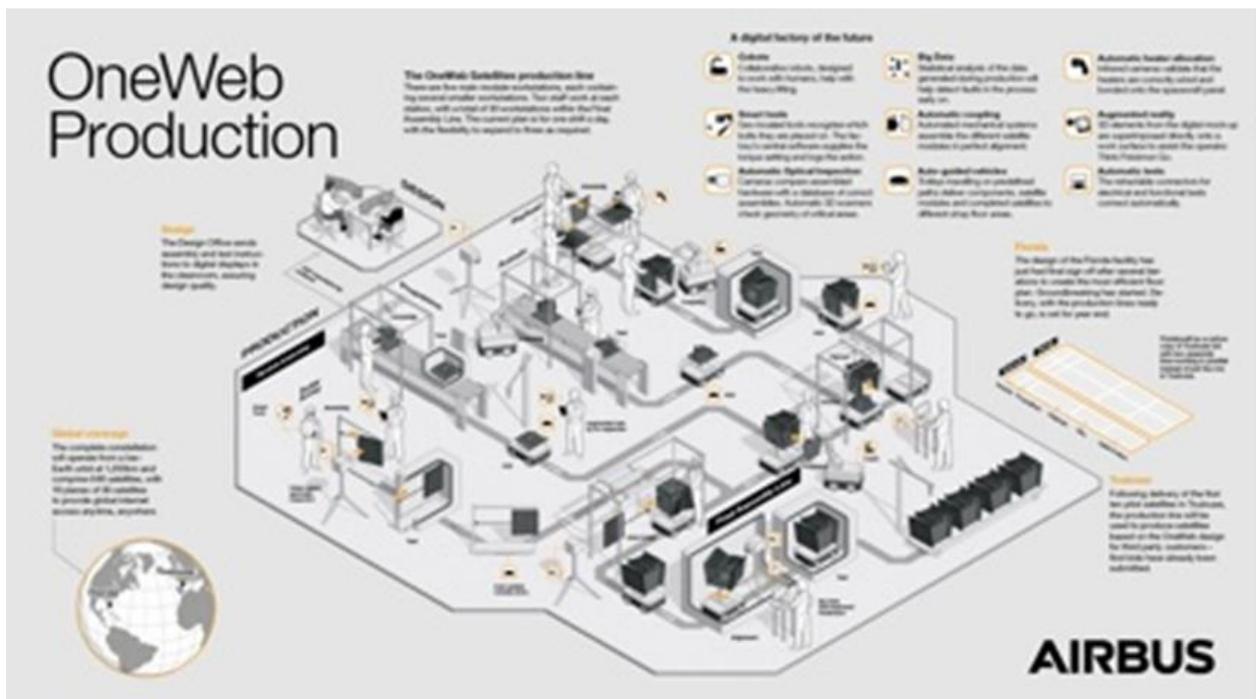


Bild 45: OneWeb Produktion (Artist View); Quelle: Airbus

Weitere enorme Einsparpotenziale liegen in der Wiederverwendung terrestrischer Technik. Wenn übliche mobile Breitband - Endgeräte in Zukunft mit Satellitenkonstellationen über standardisierte Luftschnittstellen kommunizieren können, wird das die Onboard-Elektronik stark beeinflussen. In diesem Fall können viele der Elemente eines terrestrischen RAN's übernommen werden. Dies kann enorme Entwicklungskosten sparen, die Stückzahlen, die in der terrestrischen Technik notwendig sind, können entsprechende Economies of Scale nach sich ziehen.

All dies ist aber (leider) noch nicht selbstverständlich, da es sich um eine ganze Reihe von Paradigmenwechseln handelt, die bekanntermaßen oft zu Widerständen führen. Das Gesamtbild ist jedoch in sich logisch geschlossen und technisch realisierbar. Daher müssen entsprechende Strategien weiterentwickelt werden, die Gegebenheiten und Chancen müssen besser vermarktet werden um die Potenziale besser ausschöpfen zu können und zur Optimierung zukünftiger Kommunikationsnetze beitragen zu können.

## 5. Systembetrachtungen

### 5.1 Elektrische Ausleuchtzonen

Wie schon in Kapitel 3 dargestellt, sind für LEO Konstellationen, die mit modernen Kommunikationssystemen kompatibel sein sollen, nur bestimmte Konfigurationen geeignet. Diese werden wir im Folgenden genauer untersuchen. Wir gehen dabei aus von einer prinzipiellen Anordnung wie sie in Bild 46 dargestellt ist. Um abschätzen zu können, wie viele Satelliten für ein bestimmtes Szenario erforderlich sind, gehen wir nicht mehr von dem geometrischen Footprint aus, sondern betrachten wesentlich kleinere Ausleuchtgebiete. Diese sind durch die Größe der Antennenapertur auf der Satellitenseite gegeben. Zur Vereinfachung beschränken wir uns auf kreisförmige Ausleuchtzonen. Eine frequenz- und größenunabhängige Berechnung des Antennenrandgewinns ist möglich über die zugeschnittene Größengleichung (4).

$$G = \frac{27000}{\theta_{Az} * \theta_{El}} \quad (4)$$

Für kreisförmige Aperturen sind die Halbwertswinkel ( $\theta_{Az}, \theta_{El}$ ) gleich. Vernachlässigen wir die Erdkrümmung, lassen sich die Radien der elektrischen Footprints näherungsweise berechnen.

$$r = H * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (5)$$

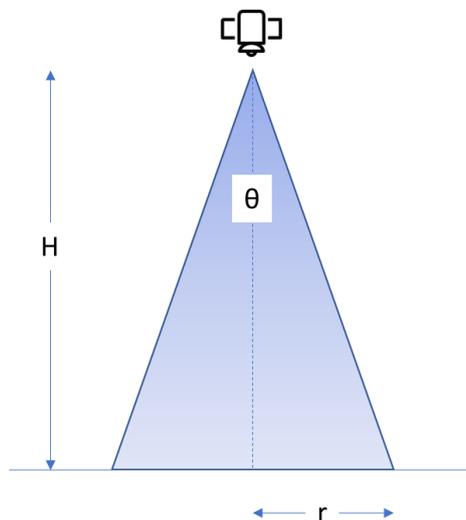
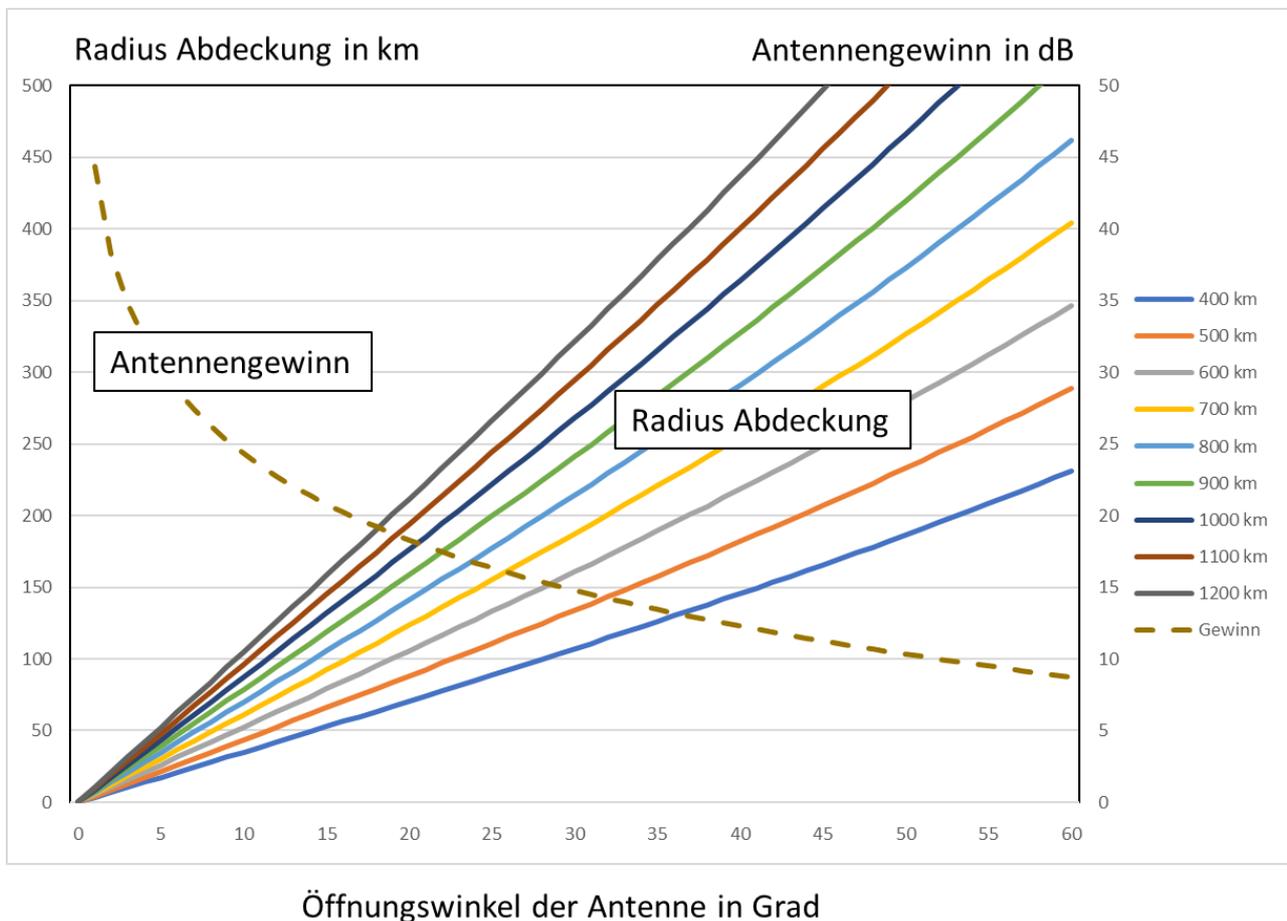


Bild 46: Vereinfachte Bahngeometrie und Antennenausleuchtzone

Hiermit erhalten wir eine erste Abschätzung über die Dimensionierung einer einfachen Konstellation unabhängig von der Frequenz und der Antennengröße. Für eine gewünschte Abdeckung ergibt sich über die Bahnhöhe der resultierende Öffnungswinkel und damit der erforderliche Antennengewinn.



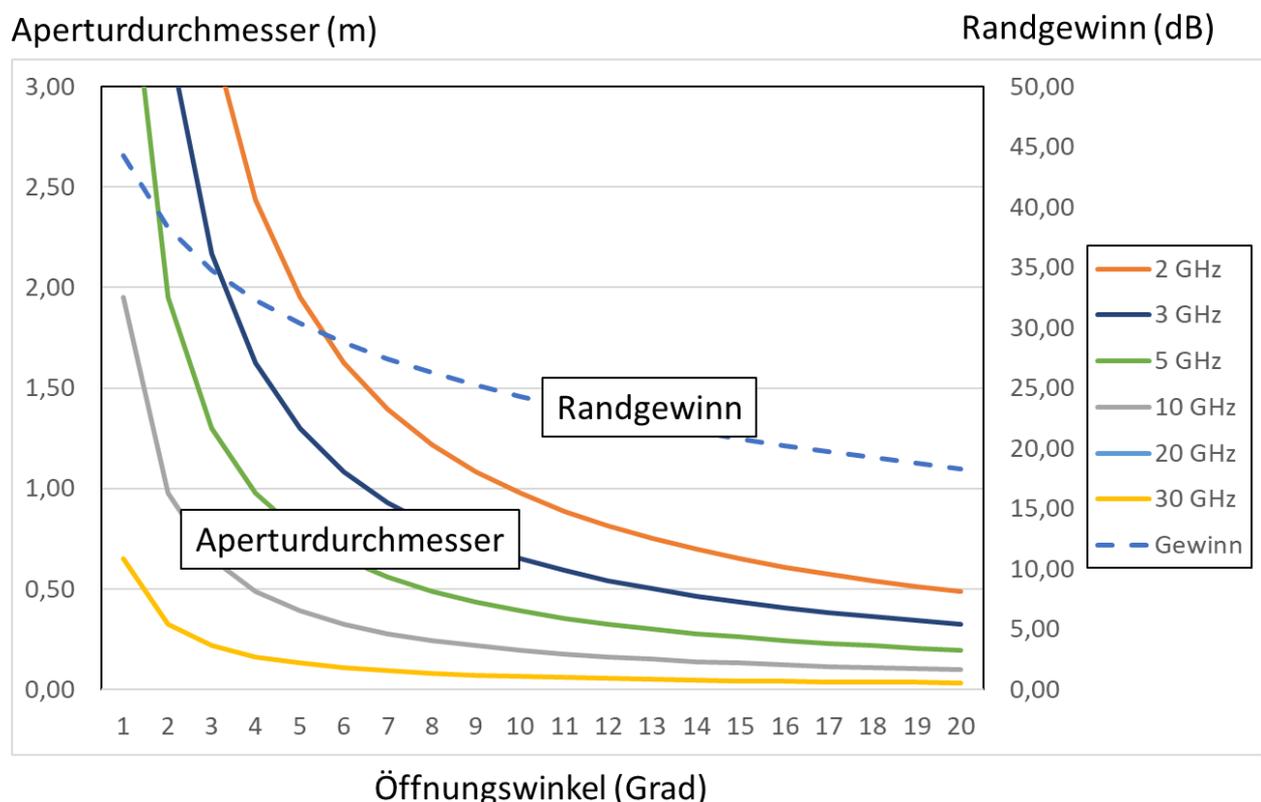
**Bild 47:** Antennengewinn und Ausleuchtzonen (Parameter: Bahnhöhe)

Es zeigt sich deutlich, dass für eine hohe Flächenkapazität (d.h. kleine Funkzellen) niedrige Bahnhöhen und ausreichende Antennengewinne erforderlich sind. Diese Gegebenheiten sind vorteilhaft, da sie auch zu niedrigen Latenzen und günstigen Linkbilanzen führen. Eine leistungsfähige und kompatible Breitbandinfrastruktur über Satelliten ist also nur mit Konstellationen niedrig fliegender Satelliten möglich.

Für die Realisierung entsprechender Antennen im Satelliten muss nun die Frequenz bekannt sein. Daraus und mit dem Öffnungswinkel ergibt sich der Aperturdurchmesser über die Näherungsformel:

$$D = 65 \cdot \frac{c}{f \cdot \left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (6)$$

Es zeigt sich, dass nicht jede Konfiguration in allen Frequenzbereichen zu realisierbaren Antennen führt. Insbesondere bei tiefen Frequenzen werden für kleinere Ausleuchtungswinkel und damit kleineren Coverage – Zonen die Antennen im Satelliten unrealisierbar groß oder zu aufwändig. Dies hat zur Folge, dass hier die Gesamtkapazität einer entsprechenden Konstellation begrenzt bleibt. Höhere Frequenzen sind dagegen in diesem Punkt sehr attraktiv, da sie schon mit kompakten Antennen sehr begrenzte Flächenbereiche ausleuchten können. Als Konsequenz daraus ergibt sich eine mögliche Kombination von regionalen und Spot Beams unter Verwendung eines oder mehrerer Frequenzbereiche.



**Bild 48:** Aperturdurchmesser und Gewinn am Rand der Ausleuchtzone als Funktion des Öffnungswinkels (Parameter: Frequenz)

## 5.2 Linkbilanzen

Für niedrigfliegende Satelliten erscheint der Vorteil der weitaus geringeren Freiraumdämpfung (Größenordnung: 30 - 40 dB) zunächst enorm. Dieser Vorteil wird aber schnell aufgebraucht durch die beschränkten Eigenschaften mobiler Endgeräte. Ohne weitere technische Maßnahmen kann auch bei modernen Endgeräten kein zählbarer Antennengewinn angesetzt werden. Darüber hinaus bleibt die maximal verfügbare Ausgangsleistung aufgrund strenger EMC Forderungen auf die heute vorhandenen Werte beschränkt. Allein diese Einschränkungen brauchen die scheinbare Reserve komplett auf. Hinzu kommt die Forderung nach Breitbandkommunikation wodurch die verfügbare Rauschleistung am Empfängereingang im Downlink und Uplink deutlich steigt. Daher sind Lösungen für mobile Breitbandkommunikation mit einer Infrastruktur, die auf niedrig fliegenden Satelliten basiert nur unter Einschränkungen realisierbar. Dies werden wir im Folgenden in vereinfachter Form untersuchen.

Wir verwenden für unsere Untersuchungen adaptive Codierung und Modulation (ACM) in vereinfachter Form wie sie auch beim terrestrischen Mobilfunk (LTE) angewendet wird. Der resultierende Signal-Rauschabstand am Demodulator-Eingang im Up and Downlink bestimmt die Auswahl des Modulations- und Codierungsverfahrens und damit die spektrale Effizienz.

Modulationsverfahren	Codierung	$E_b/N_0$ in dB (BER 1E-6)	Effizienz (Bit/s/Hz)
QPSK	1/2	5	1
16 QAM	1/2	10	2
16 QAM	3/4	15	3
64 QAM	3/4	23	4

Bild 49: Parameter für adaptive Modulation & Coding (gerundet)

Der resultierende Signal-Rauschabstand am Demodulatoreingang ergibt sich dann für den Downlink vom Satelliten zum Ue (User Equipment):

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{DemUe} = P_{Sat} + G_{Sat} - FSL - ATM + G_{Ue} - F_{Ue} - NPD \quad (7)$$

und in Rückrichtung (Uplink):

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{DemSat} = P_{Ue} + G_{Ue} - FSL - ATM + G_{Sat} - F_{Sat} - NPD \quad (8)$$

Dabei bedeuten:

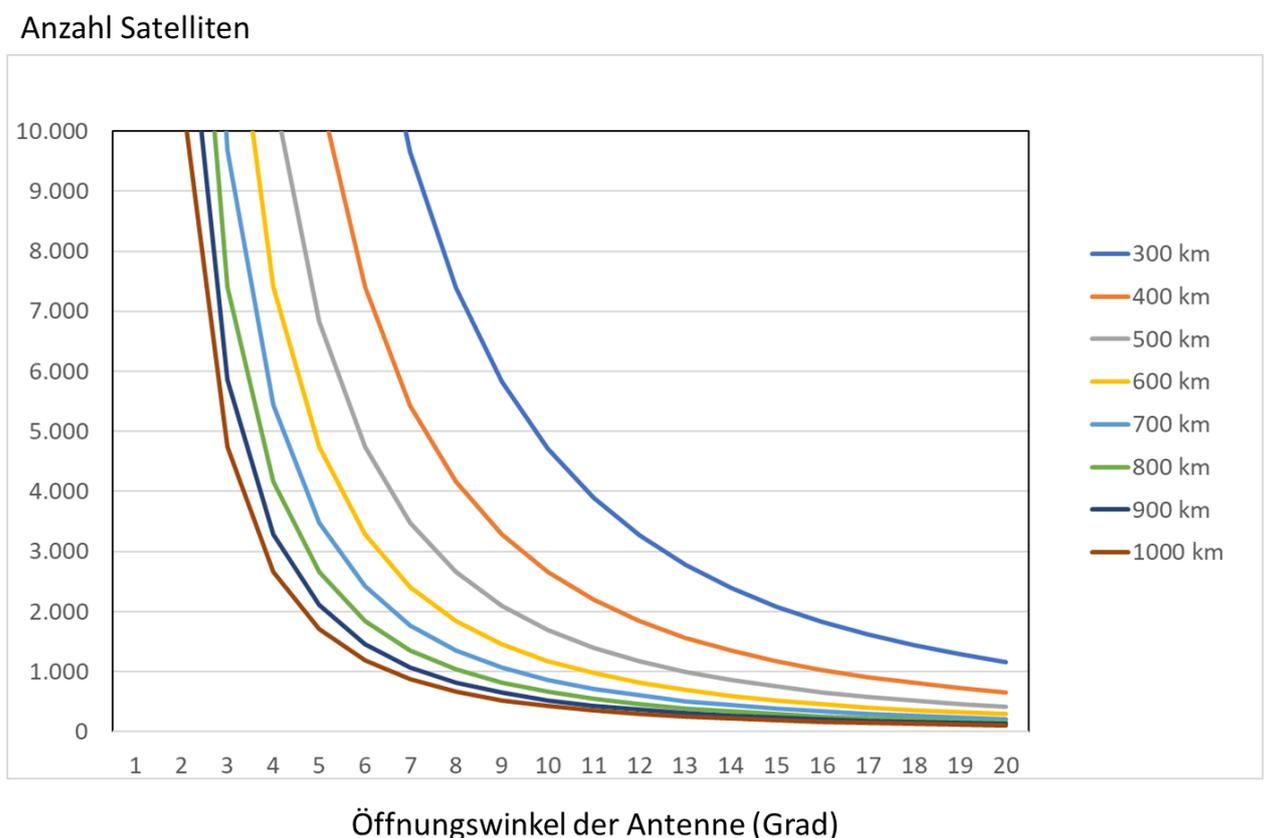
$P_{\text{Sat}}$ :	die RF Ausgangsleistung im Satelliten in dBm
$G_{\text{Sat}}$ :	der Randgewinn der Satellitenantenne in dB
FSL:	die Freiraumdämpfung in dB
ATM:	die Zusatzdämpfung durch atmosphärische Effekte in dB
$P_{\text{Ue}}$ :	die Ausgangsleistung des Terminals am Boden in dBm
$G_{\text{Ue}}$ :	der Gewinn des Terminals am Boden in dB
$F_{\text{Ue}}$ :	die Rauschzahl des Terminals am Boden in dB
NPD:	die Rauschleistung in Abhängigkeit von der Kanalbandbreite in dBm

Im Gegensatz zu geostationären Satelliten mit leistungsfähigen Bodenstationen ist im vorliegenden Fall auch die Bodenseite stark leistungseingeschränkt. Dies gilt insbesondere für den Fall, dass übliche Ue's verwendet werden. Für unsere Betrachtungen gehen wir für den kritischsten Fall mobiler Endgeräte von den in [20,21] vorgegebenen Randbedingungen aus. Hierbei wird für den Normalbetrieb ein Antennengewinn von 0 dB und eine Ue Rauschzahl von 9 dB angesetzt [20]. Diese relativ hohe Rauschzahl ist insbesondere bedingt durch die Verwendung von RF Multiplexern in modernen Breitbandgeräten und kann im terrestrischen Fall hingenommen werden. Für Satellitenanwendungen ist dies natürlich kritischer, wird aber zunächst trotzdem angesetzt um Kompatibilität zu gewährleisten. Inwieweit dies in Zukunft verbessert werden kann, ist noch offen. Ähnliches gilt für den Ue Antennengewinn. Im 5G Umfeld werden aktuell leistungsfähigere Antennenkonzepte mit Strahlformung diskutiert und bald im Markt eingeführt. Inwieweit auch dies berücksichtigt werden kann, ist zu untersuchen. Die im Folgenden dargestellten Linkbilanzen werden aber zunächst ohne diese Effekte ermittelt. Bei Verwendung anderer Endgeräte wie z.B. feste Terminals, Schiffe oder Fahrzeuge können leistungsfähigere Antennen verwendet werden, und die Linkbilanz wird deutlich verbessert.

Die Ausgangsleistung im Satelliten ist weniger kritisch, jedoch auch beschränkt. Dies ist zum einen durch die Gesamtenergiebilanz eines LEO bedingt, zum anderen müssen aufgrund der hohen Satellitenzahlen die Kosten des einzelnen Satelliten drastisch sinken. Darüber hinaus wird für eine Übertragung von Signalen wie sie im 4G und 5G Mobilfunk verwendet werden eine sehr hohe Linearität gefordert. Wir gehen daher von Leistungsklassen der Leistungsverstärker im Bereich 10/30/50 Watt aus. Dies kann heute von SSPA basierten Leistungsverstärkern zumindest bei tieferen Frequenzen erreicht werden. Inwieweit moderne Wanderfeldröhrenverstärker mit höherer Leistung konkurrenzfähig sein können, muss weiter untersucht werden. Für unser Referenzbudget gehen wir zunächst von 10 W Ausgangsleistung aus. Dies ist beim Stand der Technik in allen unseren betrachteten Frequenzbereichen verfügbar.

Ein weiterer Fortschritt ergibt sich durch die Verwendung von aktiven Multibeam Antennen wie sie in Zukunft auch im 4/5G Mobilfunk verwendet werden (siehe Abschnitt 2.3.2). Hier ist nicht mehr die Leistung eines konzentrierten HPA's entscheidend, sondern die EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) der Antennen.

Die Auswahl der geeigneten Aperturgröße ist nun ein Kompromiss zwischen mehreren Parametern. Zum einen ist wegen eines möglichst hohen Gewinns zur Optimierung des Linkbudgets die maximal mögliche technisch realisierbare Größe anzustreben, auf der anderen Seite ergeben sich dadurch aber sehr kleine elektrische Footprints, die zu unrealistisch hohen Satellitenzahlen führen. Dies wird durch Abb. 50 verdeutlicht.



**Bild 50:** Anzahl Satelliten (Multibeam Antenne, 50 Beams /Satellit)

Es zeigt sich, dass nur mit Multibeam – Konzepten eine vertretbar niedrige Gesamtzahl von Satelliten realisierbar ist, dabei muss die Anzahl der Beams pro Satellit hoch angesetzt werden. Für unsere Betrachtungen wählen wir einen Öffnungswinkel von 12 Grad, der zu einer Aperturgröße von ca. 90 cm führt und mit Satellitenplattformen mittlerer Größe kompatibel ist. Nanosatelliten sind für die betrachtete Anwendung nicht geeignet.

Für das Referenz – Linkbudget im Downlink wird zunächst eine niedrige Ausgangsleistung des Satelliten von 10 W (+40 dBm) pro Kanal zugrunde gelegt, um die Grenzen auszuloten. Die atmosphärische Dämpfung wird zunächst vernachlässigt um eine einheitliche Darstellung zu erhalten. Mit den gewählten Werten erhält man eine übersichtliche Darstellung, die aufgrund der gegenläufigen Frequenzabhängigkeit von Antennengewinn und Freiraumdämpfung für alle betrachteten Frequenzbereiche zum gleichen Ergebnis führt (Bild 51).

Parameter	Downlink				
	2	11	14	20	30
Frequenz [GHz]	2	11	14	20	30
Bahnhöhe [km]	400				
Satelliten Ausgangsleistung [dBm]	40				
Öffnungswinkel Antenne [Grad]	12,0	2,18	1,71	1,20	0,80
Antennendurchmesser [m]	0,88				
Randgewinn der Antenne [dB]	22,7	37,5	39,7	42,7	46,3
Satelliten – EIRP [dBm]	63	78	80	83	86
Freiraumdämpfung [dB]	151	165	167	171	174
Atmosphärische Effekte [dB]	vernachlässigt				
Empfangsleistung am Ue [dBm]	-88				
Antennengewinn Ue [dB]	0				
Ue Rauschzahl [dB]	9				
Kanalbandbreite [MHz]	10				
S/N am Demodulatoreingang [dB]	9				
Spektrumeffizienz AMC [Bit/s/Hz]	1				
Datenrate [Mbit/s]	10				

Bild 51: Referenz – Linkbudget Breitband Downlink

Aufgrund der geringen Kanalbandbreite müssen im Satelliten natürlich mehrere Kanäle verwendet werden. Dies hat den Vorteil einer möglichen Frequenzwiederverwendung und bietet die Möglichkeit wie im terrestrischen Fall die Datenrate für das jeweilige Endgerät durch Zusammenfassung von Trägern (Carrier Aggregation) zu erhöhen.

Parameter	Uplink				
	2	11	14	20	30
Frequenz [GHz]	2	11	14	20	30
Bahnhöhe [km]	400				
Ue Ausgangsleistung [dBm]	23				
Ue Antennengewinn [dB]	0				
EIRP [dBm]	23				
Freiraumdämpfung [dB]	151	165	167	171	174
Atmosphärische Effekte [dB]	Vernachlässigt				
Randgewinn der Sat. Antenne [dB]	22,7	37,5	39,7	42,7	46,3
Empfangsleistung am Empfänger [dBm]	-105				
Satelliten Empfängerrauschzahl [dB]	3				
Kanalbandbreite [MHz]	1				
S/N am Demodulatoreingang [dB]	5				
Spektrumeffizienz AMC [Bit/s/Hz]	1				
Datenrate [Mbit/s]	1				

Bild 52: Referenz – Linkbudget Breitband Uplink

Mit den gewählten Werten ergibt sich ein Grenzwert für Linkbudgets bei den gewählten Frequenzen. Eine Zuteilung von Up- und Downlink auf bestimmte Frequenzbereiche wurde dabei zunächst nicht vorgenommen. Die Signal-Rauschabstände am jeweiligen Demodulatoreingang gelten für eine Bitfehlerwahrscheinlichkeit von  $10^{-6}$ , sind also ein absoluter Grenzwert ohne Reserve und nur unter Idealbedingungen in der Atmosphäre und bei reiner LOS – Verbindung ohne Abschattung zu erreichen. Diese zunächst unrealistischen Werte zeigen aber, welche Minimalkonfigurationen und Designregeln für Konstellationen dieser Art gegeben sein müssen, um überhaupt mit aktuell vorhandenem Mobilgeräten und ihren Randbedingungen funktionsfähig sein zu können. Diese kann man wie folgt formulieren:

1. Bevorzugte Bahnhöhen liegen unter 500 km für Breitbandbetrieb
2. Niedrige Elevationswinkel sind ungünstig für Latenz und Sichtbarkeit
3. Die optimale Antennengröße im Satelliten ist ca. 1,00 m
4. Multibeam Antennen sind zwingend
5. Komplexe Diplexernetzwerke am Empfängereingang des Satelliten sind zu vermeiden
6. Kanalbandbreiten sind auf 10 MHz (Uplink) und 1 MHz (Downlink) beschränkt
7. Im Grenzfall einfacher Endgeräte ist kein Vorteil adaptiver Modulation nutzbar

Wesentlich günstigere Verhältnisse erzielt man natürlich bei Ue's (Ue – User Equipment) mit besseren Antenneneigenschaften (stationäre oder quasistationäre Terminals, Fahrzeuge o.ä.) oder bei Szenarien mit geringerer Bandbreite (bestimmte IoT- Anwendungen). Natürlich können die jeweiligen Effekte gegeneinander aufgerechnet werden.

Im Folgenden untersuchen wir daher die Verbesserungen und Verschlechterungen im Linkbudget unter realistischeren Bedingungen. Betrachtet werden Zusatzdämpfungen, die durch atmosphärische Effekte zustande kommen (Wettereinflüsse, Szintillationen), ein geringes Maß an zusätzlicher Abschattung trotz des hohen Elevationswinkels, mögliche Polarisationsverluste, eine höhere Bitfehlerrate nach der Demodulation und ein Implementationsmargin. Für eine Worst Case Analyse wird eine lineare Addition der Beiträge vorgenommen. Im Realfall sind die Werte statistisch verteilt und müssen entsprechend gewichtet aufaddiert werden.

Auf der Seite der möglichen Verbesserungen setzen wir eine noch niedrigere Bahnhöhe an, betrachten eine höhere Satellitenleistung (frequenzabhängig) und eine mögliche zukünftige Verbesserung der Ue Rauschzahl und des Antennengewinns oder (äquivalent) eine Erhöhung der Ue EIRP.

Verschlechterung	Link Budget Parametrisierung				
	2 GHz	11 GHz	14 GHz	20 GHz	30 GHz
Atmosphärische Effekte [dB]	1	2	2	3	3
Zusätzliche Abschattung (hohe Elevation) [dB]	2	2	2	2	2
Polarisationsverluste [dB]	1	1	1	1	1
BER 1E-6 [dB]	3	3	3	3	3
Implementationsmargin [dB]	3	3	3	3	3
Summe [dB]	10	11	11	12	12
<b>Verbesserung</b>					
Bahnhöhe 300 km [dB]	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Sat. Leistung 50W [dB]	7	7	7	7	7
Verbesserung Rauschzahl Ue [dB]	4	4	4	4	4
Verbesserung Antennengewinn Ue [dB]	6	6	6	6	6
Summe [dB]	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
<b>Differenz[dB]</b>	<b>9,5</b>	<b>8,5</b>	<b>8,5</b>	<b>7,5</b>	<b>7,5</b>
Resultierende Spektrumseffizienz [Bit/s/Hz]	3	3	3	2	2

Bild 53: Linkbudget Parametrisierung für Personal Mobile Broadband (Zahlen gerundet)

Für bestimmte IoT Anwendungen kann die Kanalbandbreite deutlich reduziert werden. Dies führt insbesondere im Downlink zu einer besseren Linkbilanz, so dass für reine IoT Anwendungen ggf. auch höhere Satellitenbahnen verwendet werden können. Bild 54 zeigt ein entsprechendes Szenario. Die Spektrumseffizienz spielt hier keine entscheidende Rolle, sie wird als 1 angenommen, die Datenraten können im Up und Downlink bis zu 1 Mbit/s betragen. Bahnhöhen über 1500 km stellen aber auch hier eine Grenze dar bzw. reduzieren die Datenraten weiter.

	Link Budget Parametrisierung				
<b>Verschlechterung</b>	2 GHz	11 GHz	14 GHz	20 GHz	30 GHz
Atmosphärische Effekte [dB]	1	2	2	3	3
Zusätzliche Abschattung [dB]	2	2	2	2	2
Polarisationsverluste [dB]	1	1	1	1	1
BER 1E-6 [dB]	3	3	3	3	3
Andere Bahnhöhe 600/1000/2000 km	2/6/12	2/6/12	2/6/12	2/6/12	2/6/12
Implementationsmargin [dB]	3	3	3	3	3
Summe [dB]	12/16/22	13/17/23	13/17/23	14/18/24	14/18/24
<b>Verbesserung</b>					
Reduktion Kanalbandbreite auf 1 MHz [dB]	10	10	10	10	10
Sat. Leistung 50W [dB]	7	7	7	7	7
Summe [dB]	17	17	17	17	17
<b>Differenz[dB]</b>	<b>5/1/-5</b>	<b>4/1/-6</b>	<b>4/0/-6</b>	<b>3/-1/-7</b>	<b>3/-1/-7</b>

Bild 54: Linkbudget Parametrisierung für IoT Szenarien

	Link Budget Parametrisierung				
<b>Verschlechterung</b>	2 GHz	11 GHz	14 GHz	20 GHz	30 GHz
Atmosphärische Effekte [dB]	1	2	2	3	3
Zusätzliche Abschattung [dB]	2	2	2	2	2
Polarisationsverluste [dB]	1	1	1	1	1
BER 1E-6 [dB]	3	3	3	3	3
Andere Bahnhöhe 600/1000/2000 km	2/6/12	2/6/12	2/6/12	2/6/12	2/6/12
Implementationsmargin [dB]	3	3	3	3	3
Summe [dB]	12/16/22	13/17/23	13/17/23	14/18/24	14/18/24
<b>Verbesserung</b>					
Höherer Ue Antennengewinn [dB]	25	30	30	30	30
Ue Ausgangsleitung 1W [dB]	10	10	7	7	7
Summe [dB]	35	40	37	37	37
<b>Differenz[dB]</b>	<b>23/19/13</b>	<b>27/23/17</b>	<b>24/20/14</b>	<b>23/19/13</b>	<b>23/19/13</b>

Bild 55: Linkbudget Parametrisierung für Szenarien mit höherer Ue EIRP

Für bestimmte Terminalarten können (Phased Array) Antennen mit größerer Apertur und Strahlschwenkung verwendet werden. In diesem Bereich sind in letzter Zeit erhebliche Fortschritte zur Kommerzialisierung erzielt worden (z.B. [25]). Mögliche Anwendungsfälle sind:

- Feste User Terminals für Direktempfang
- Feste Terminals als Backhaul für Mobilfunk (4G/5G) oder WLAN
- Schiffsterminals
- Konforme Antennen in Autodächern (autonomes Fahren)
- Antennen in Hochgeschwindigkeitszügen oder Bussen

Die Antennenaperturen können in diesen Fällen eine bestimmte Größe annehmen, für unsere Parametrisierung gehen wir von einem Randgewinn von 25 – 30 dB aus. Zusammen mit einer geringfügig höheren Sendeleistung, die aufgrund der reduzierten EMC Anforderungen angenommen werden kann, verbessert sich der verfügbare Signal-Rauschabstand in unseren Beispielen um 13 – 27 dB. Das bedeutet, dass höherstufige Modulationsverfahren im Rahmen von AMC verwendet werden können, Modulationseffizienzen können Werte bis zu 4 Bit/s/Hz erreichen und die maximal möglichen Datenraten bewegen sich dann bei den gewählten Kanalbandbreiten in Bereichen bis zu 40 MBit/s im Downlink (ohne Carrier Aggregation) und bis zu 8 Mbit/s im Uplink.

In modernen Mobilfunksystemen (4G/5G) wird MIMO und Massive MIMO (vgl. Abschnitt 2.3.3) zur weiteren Verbesserung der spektralen Effizienz verwendet. Diese Technik ist im Satellitenfunk prinzipiell auch nutzbar. Inwieweit ein Einsatz in Zusammenhang mit Konstellationen möglich ist, muss weiter untersucht werden. Grundsätzlich sind Raumfilterfunktionen (d.h. Mehrelementantennen) ohnehin erforderlich. Die Voraussetzungen sind also günstig. Die Zunahme an Komplexität ist allerdings erheblich.



Bild 56: Mobile Hochgewinn - Antennen mit Strahlschwenkung (Quelle: Kymeta)

### 5.3 Latenzen

Die Latenz in Kommunikationsnetzen ist ein komplexes Thema. Im Rahmen der aktuellen Diskussion über die Nutzung von Satellitenkommunikation in aktuellen und zukünftigen – insbesondere mobilen – Kommunikationsnetzen wird eine zu hohe Latenz oft als Killerargument ins Feld geführt. Dies ist i.A. nicht haltbar und bedarf einer näheren Untersuchung.

Zu große Latenzen in Kommunikationsnetzen haben oft negative Folgen: zum einen ist eine zu hohe Latenz kritisch für Anwendungen, die eine extrem kurze Reaktionszeit erfordern (vgl. hierzu Kapitel 1.3), zum anderen führt eine zu hohe Verzögerung zu Degradationen der Übertragungsrate bedingt durch die Eigenschaften des TCP Protokolls: das Protokoll kann nicht unterscheiden zwischen Fehlern und Verzögerungen, es findet also wie bei Fehlerhäufung eine Zunahme der Retransmissions (erneutes Senden von Datenpaketen) statt, dies führt zu Drosselung der Datenrate und im Extremfall zum Ausfall der Verbindung. Dies ist besonders kritisch bei kleinen TCP Fenstergrößen. Dieses Problem ist aber in vielen Fällen lösbar [26].

Die Ursachen von Latenzen liegen in zwei Bereichen: zum einen in der Signallaufzeit im jeweiligen Übertragungsmedium (leitungsgebunden oder funkgestützt) und in der Verarbeitungszeit in digitalen Netzelementen. Erstere ist abhängig von der Entfernung und vom Medium, die Verarbeitungszeit in Netzelementen hängt von der Komplexität und der Rechenleistung des Netzelements ab. Betrachten wir zunächst nur die entfernungsabhängige Komponente, so sind terrestrische Übertragungssysteme im Zugangsbereich gegenüber einer Satellitenverbindung zunächst im Vorteil, da die Laufwege so kurz sind, dass die (physikalische) Latenz vernachlässigt werden kann. Dies ändert sich aber bei interkontinentalen Verbindungen. Hier kann eine Satellitenverbindung mit Inter-Satelliten Links kürzer sein als eine (leitungsgebundene) terrestrische Verbindung und hat somit die geringere (physikalische) Laufzeit.

Wir betrachten im Folgenden aber nur den funkgestützten Access Bereich, in dem die Latenzen der klassischen Mobilfunkstandards im Bereich von etwa 50 ms (LTE) bis zu 600 ms (GSM) liegen. Diese Latenzzeiten sind ausschließlich durch die Signalverarbeitung gegeben und können demnach durch schnellere Prozessoren deutlich verbessert werden. Benchmark ist aktuell der 5G Standard, bei dem Latenzen um 1 ms (Stichwort „Echtzeitbetrieb“) gehandelt werden. In der Realität gelten aber die Werte wie in Bild 16 dargestellt. Die extrem niedrigen Latenzzeiten gelten also nur für den Real Time Bereich des Cloud RAN. Um dies zu erreichen, musste der LTE Funkstandard erweitert werden (siehe Kap. 2.3.3). Man muss also bei der Diskussion über die Verwendbarkeit von satellitengestützten Lösungen zwischen dem Echtzeit RAN und dem Zubringernetz unterscheiden.

In jedem Fall zeigt sich aber, dass die Latenzen für geostationäre Bahnen so groß sind, dass GEO's nur unter Einschränkungen verwendet werden können. Der GEO hat aber weiterhin einen festen Platz in der Kommunikationslandschaft auch im 5G Umfeld für angepasste Use Cases.

LEO's auf niedrigen Umlaufbahnen haben aber die Chance als voll kompatibler RAN Baustein in einem zukünftigen globalen und breitbandigen Kommunikationsnetz verfügbar zu sein. Eine möglichst niedrige Bahnhöhe vereint alle Vorteile in sich: die Linkbilanz wird besser und die Signallaufzeit sinkt. In den für die Linkbilanz günstigen Bereichen ist der Beitrag durch die Satellitenlaufzeit deutlich unter 10 ms (Two Way). Im Gegensatz zu den Linkberechnungen kann aber der Einfluss einer Bahn außerhalb des Zenits nicht vernachlässigt werden. Der Effekt vergrößert sich mit zunehmender Ordnungszahl der Bahn. Den Einfluss werden wir im Folgenden untersuchen.

Verwendet man nun benachbarte Bahnspuren, bei denen der Satellit bei einem Überflug nicht direkt im Zenit steht, wächst die Latenz wegen der nun längeren Wegstrecke. Um dies abschätzen zu können, betrachten wir die Geometrie in Bild 57. Die Abstände vom Fußpunkt der Referenzbahn in Abhängigkeit von der Ordnungszahl und dem Halbwertswinkel ergeben sich zu:

$$d_n = h * \sqrt{1 + \left(2 * n * \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2} \quad (9)$$

Hieraus lässt sich leicht der Zuwachs in der Entfernung und damit auch in der Laufzeit berechnen (Bild 58). Es zeigt sich, dass für die aus Kapazitätsgründen besonders interessanten Winkelbereiche bis 20 Grad der Zuwachs an Latenz auch für weitere Nebenspuren moderat bleibt. Somit ist auch eine Konstellation, bei der mehrere Bahnen das gleiche Gebiet ausleuchten nicht kontraproduktiv bezüglich der Latenz. Dieser Sachverhalt ist extrem wichtig für die Berechnung der Gesamtkapazität einer geeigneten Konstellation (vgl. Kapitel 5.4). Aus Gründen der Einfachheit sind nichtüberlappende Beams angenommen. Da diese sich in der Realität überlappen können (vgl. Bild 64), ist die Betrachtung konservativ.

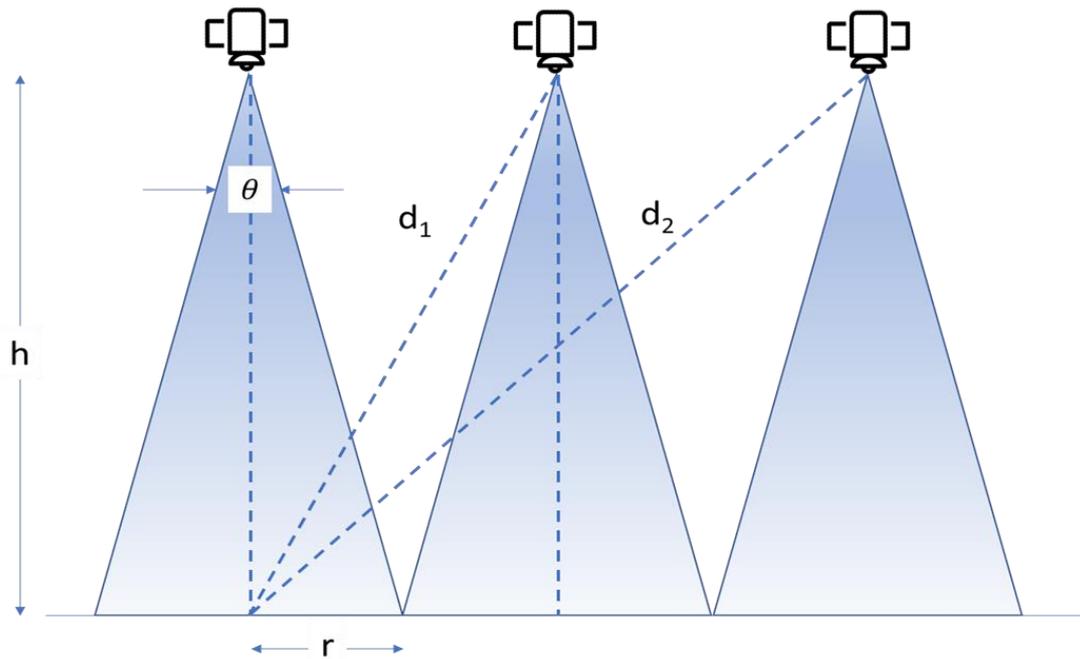


Bild 57: Geometrie der Bahns Spuren zur erweiterten Latenzberechnung

Zunahme der Latenz in %

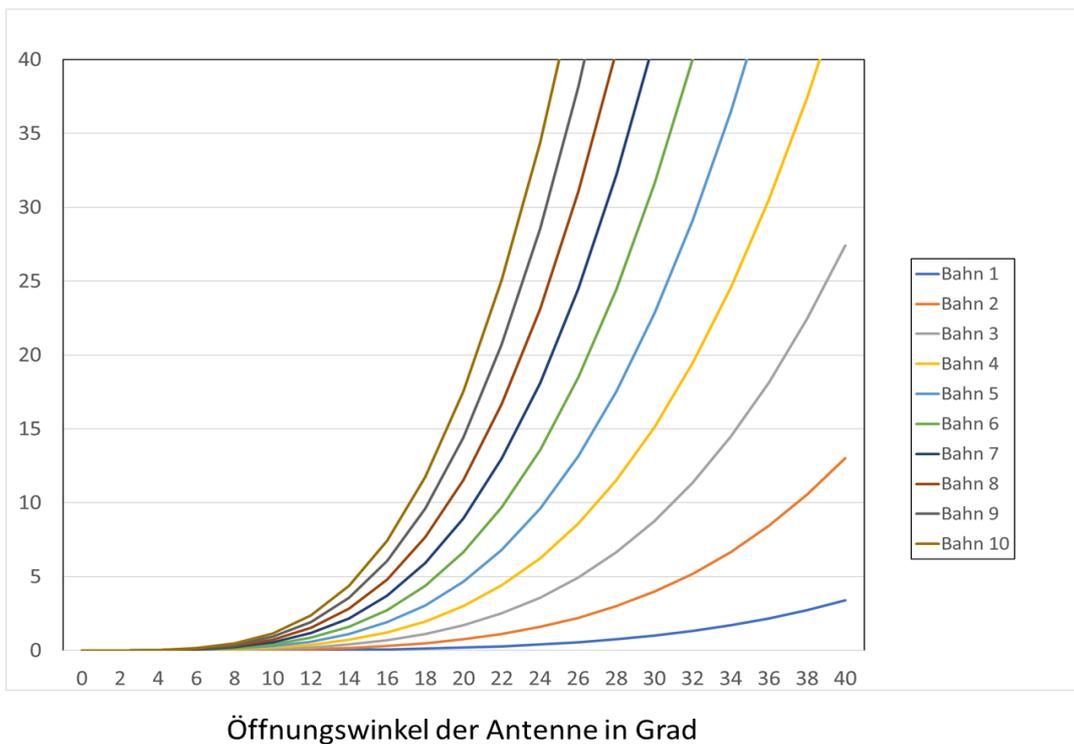


Bild 58: Zunahme der Latenz zu Nachbarbahns Spuren

#### 5.4 Satellitenkapazität

Für die Berechnung der Flächenkapazität einer Konstellation in einem bestimmten Gebiet benötigen wir zunächst die Kapazität eines einzelnen Satelliten. Diese hängt von den verfügbaren Kanälen in den jeweiligen Frequenzbereichen und dem möglichen Gesamtleistungsbudget ab. Für eine Konstellation mit vielen Satelliten gehen wir von einer maximal mittelgroßen Plattform aus, die in der Lage ist Antennen in der angenommenen Größe zu akkomodieren. Hieraus ist zu erkennen, dass die möglichen Satellitenkonfigurationen in der Gesamtleistung deutlich unter aktuell eingesetzten und geplanten HTS/VHTS (High/Very High Throughput Satellite) für geostationäre Anwendungen liegen werden. Andererseits sind Kleinsatelliten aufgrund der beschränkten Leistungsfähigkeit nicht geeignet, die Anforderungen zu erfüllen. Wir gehen daher von einer Klasse mittelgroßer Satelliten aus, die wir als HTS LEO bezeichnen.

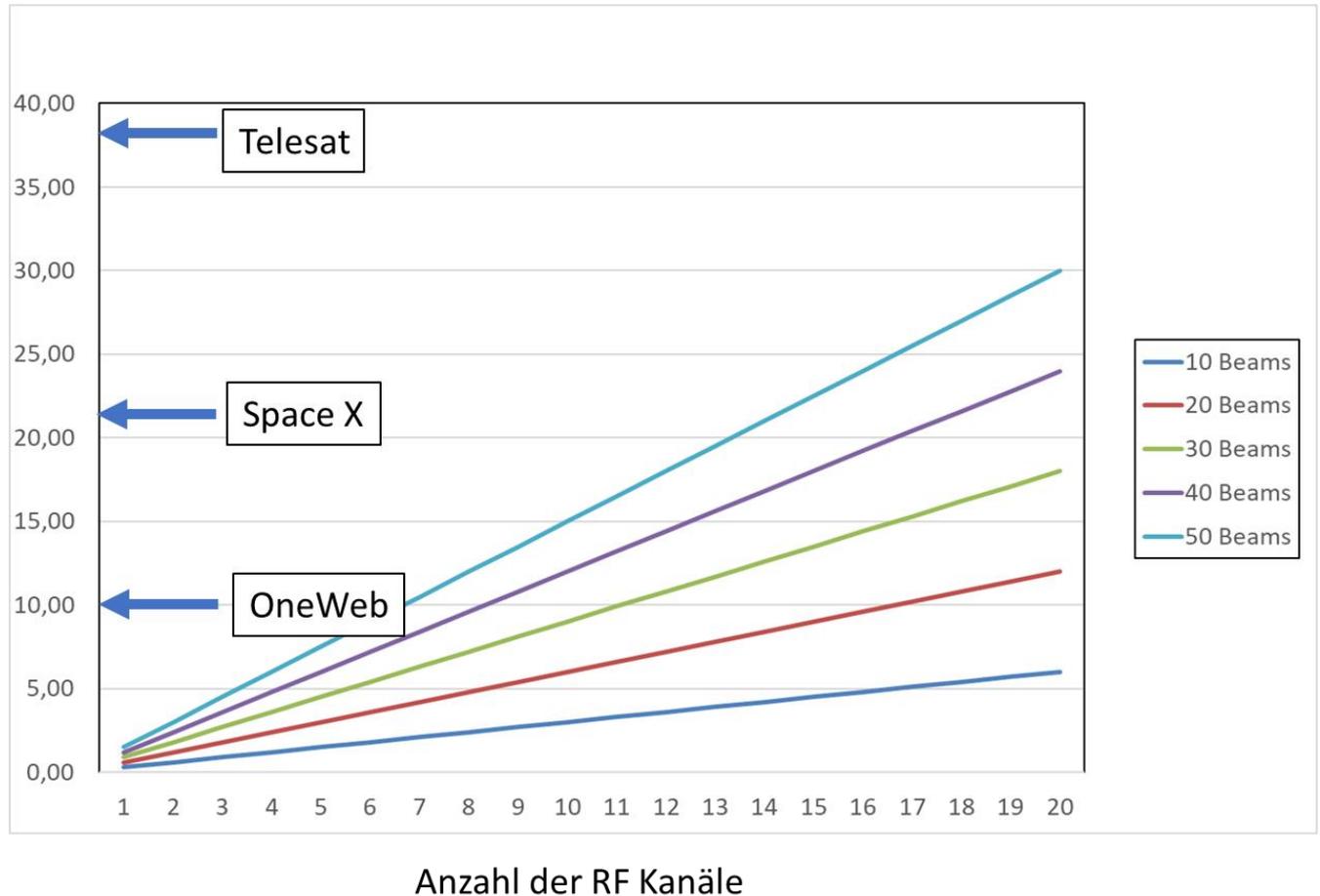
Für die weiteren Berechnungen verwenden wir ein Referenzszenario mit einer Mischung aus verschiedenen Use Cases wie in Bild 59 dargestellt. Diese Annahmen sind willkürlich und können nach Bedarf angepasst werden. Höhere Effizienzen sind bei Terminals mit leistungsfähigen Antennen möglich, werden aber (konservativ) zunächst nicht betrachtet.

Use Case	Anteil in %	Spektrale Effizienz [Bit/s/Hz]	Gewichtete Effizienz [Bit/s/Hz]
Mobile Broadband	40	1	0,4
Fixed High Gain Terminal	30	4	1,3
Mobile High Gain Terminal	30	4	1,3
			3,0
Kanalbandbreite [MHz]			10
Übertragungsrate pro Kanal [Mbit/s]			30

**Bild 59:** Use Cases für Kapazitätsberechnung (Downlink)

Bei der Auswahl an RF Kanalbreiten folgen wir dem Ansatz für die Linkbilanzen. Eine Kanalbandbreite von 10 MHz im Downlink garantiert zum einen den erforderlichen Signal-Rauschabstand am Demodulatoreingang mit einer gewissen Reserve und ermöglicht die Anwendung von Frequency-Reuse Strategien falls dies erforderlich ist. Bei höheren Frequenzen stehen in der Regel größere Kanalbreiten und mehr Kanäle zur Verfügung, dies kann im Einzelfall leicht umgerechnet werden. Die Gesamtkapazität steigt dann linear mit der Kanalanzahl. Die erreichbaren Satellitenkapazitäten liegen in der gleichen Größenordnung wie aktuell geplante oder im Bau befindliche Konstellationen (Bild 60). Im vorliegenden Fall ist aber die Kanalgranularität deutlich kleiner, so dass auch Reuse – Strategien angewendet werden können, wenn erforderlich. Die erforderliche Satellitenkapazität reduziert sich dann entsprechend.

### Gesamtkapazität eines Satelliten in Gbit/s



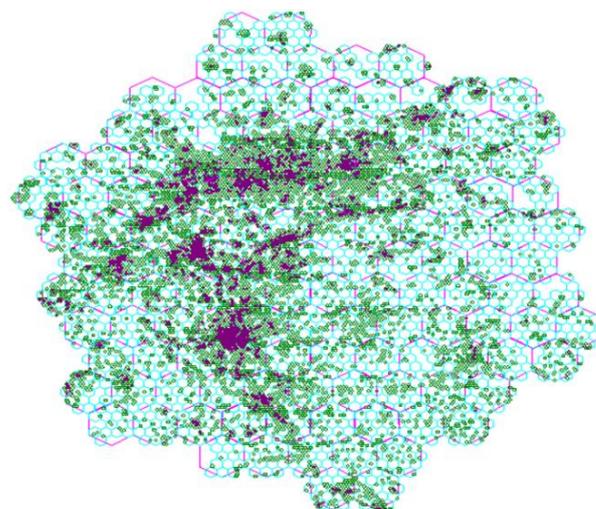
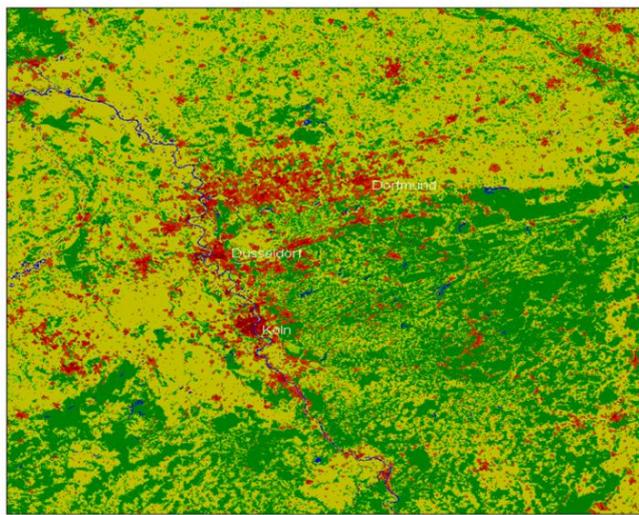
**Bild 60:** Kapazität der Beispielrechnung mit Multibeam-Antenne  
(Kanalbandbreite 10 MHz), ohne Reuse  
Siehe auch: [45]

### 5.5 Systemkapazitäten

Für die Einbindung in ein terrestrisches Mobilfunkszenario gehen wir von einem begrenzten Gebiet aus und ermitteln die Kapazität, die ein angepasstes satellitengestütztes Netz haben muss um den fehlenden Teil der Flächenabdeckung zu versorgen. Natürlich kann ein satellitengestütztes Netzwerk in keinem Falle die Kapazität eines terrestrischen Netzes erreichen, die ja bekanntlich durch Small-Cell Konzepte technisch fast beliebig gesteigert werden kann. Die Satellitentechnik stellt daher keine Konkurrenz zum terrestrischen Netz dar, sondern muss als Ergänzung gesehen werden, die insbesondere helfen kann, ineffiziente Infrastrukturinvestitionen zu vermeiden.

Wir betrachten dazu einen regionalen Bereich von Deutschland (Rhein-Ruhr Gebiet) mit einer Ausdehnung von ca. 18.000 qkm (135x135 km), einer Gesamtbevölkerung von ca. 12 Mio. Gehen wir von einem optimalen technischen Ausbau des Mobilfunknetzes aus, so ist die Zellstruktur und Größe ein direktes Abbild der aus Geodaten gegebenen Bevölkerungsdichte. Derartige Netzstrukturen können mit modernen Netzplanungstools berechnet werden. Im vorliegenden Fall ergibt sich eine Netztopologie wie in Bild 61 dargestellt. Das Netz besteht aus einer angepassten Topologie von Mobilfunk - Basisstationen bestimmter Zellgröße und teilt sich wie folgt auf:

Art der Station	Eigenschaften	Anzahl
Rural	Mehrsektor Basisstation, Turm (Farbe: pink)	150
Macro	Mehrsektor Basisstation, Turm, Gebäude (Farbe: hellgrün)	2000
Micro	Mehrsektor Basisstation, Gebäude, (Farbe: dunkelgrün)	8500
Pico	Einzelsektor Basisstation, unterhalb Dachoberkante (Farbe: violett)	11000



**Bild 61:** Geodaten der untersuchten Region (Rhein/Ruhr) und optimales Mobilfunknetz mit Mengengerüst

Betrachten wir nun das Problem der endlichen Flächenabdeckung (vgl. Abschnitt 2.3.2), so können wir annehmen, dass ein satellitengestütztes Netz ca. 5 – 10% der Gesamtkapazität des oben dargestellten Mobilfunknetzes in der betrachteten Fläche zur Verfügung stellen muss. Legen wir 4G Technologie zugrunde lässt sich die Gesamtkapazität eines solchen terrestrischen Netzes wie in Bild 62 dargestellt abschätzen.

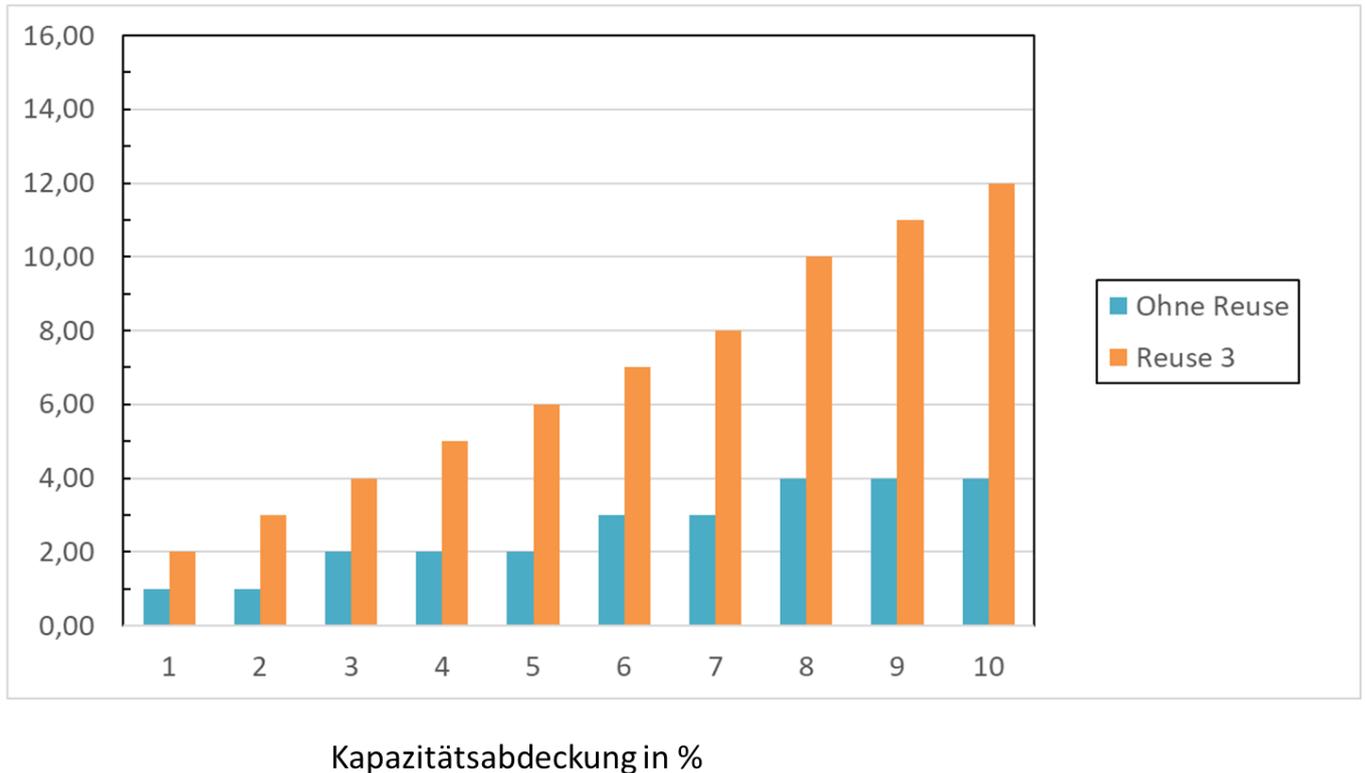
Art	Anzahl	Bandbreite [MHz]	Anzahl Sektoren	Spektrumseffizienz [Bit/s/Hz]	Kapazität [Gbit/s]
Rural	150	20	3	2	18
Macro	2000	20	2	2	160
Mikro	8500	10	2	3	510
Pico	11000	10	1	4	440
Gesamt	21650				1.128

Bild 62: Mengengerüst und Kapazitätsabschätzung des Beispielnetzes

In der Praxis ergeben sich deutlich niedrigere Zahlen [27]. Die Statistik (Stand 10.1.2018) zeigt für ganz Deutschland ca. 89.000 Mobilfunkstandorte, über die Bevölkerungsdichte umgerechnet bedeutet dies für unser betrachtetes Gebiet etwa 13.000, das sind nur 60% der optimalen Planungszahl in Bild 61 und 62. Dies ist natürlich einer der Gründe für die unbefriedigende Abdeckung. Weltweite Statistiken zeigen demnach in ausgewählten Gebieten in der Tat etwa die doppelte Baudichte verglichen mit Deutschland, was die oben dargestellten Zahlen erhärtet.

Für unsere weiteren Betrachtungen rechnen wir aber mit der Zahl in Bild 62. Die Satellitenkonstellation muss nun wie schon erwähnt nicht die komplette Kapazität zur Verfügung stellen, sondern nur den Teil, der durch das terrestrische Netz aufgrund der physikalischen Ausbreitungsbedingungen nicht abgedeckt werden kann. Dieser hängt natürlich von den jeweils gegebenen topografischen Randbedingungen ab. Bild 63 stellt daher die notwendige Zahl an Satelliten in Abhängigkeit von der abzudeckenden Fläche in % ab, diese wird linear in Kapazität umgerechnet. Dies stellt für die Betrachtungen eher einen ungünstigen Fall dar, da die Kapazität in Bereichen mit hoher Basisstationsdichte natürlich höher ist. Auf der anderen Seite wird mit 5G die Wahrscheinlichkeit für Funklöcher mit steigender Frequenz aber größer so dass der Ansatz zunächst gerechtfertigt erscheint.

### Anzahl erforderlicher Satelliten



**Bild 63:** Anzahl erforderlicher gleichzeitig sichtbarer Satelliten zur Abdeckung der Restkapazität im Beispielnetz (Reuse: Grad der Frequenzwiederverwendung)

Die Abschätzung zeigt, dass für prozentuale Abdeckungen bis 2% ein Satellit der Bild 63 entsprechenden Konstellation ausreichend ist (siehe auch Bild 91). Bei höheren Anforderungen können Satelliten auf Nachbarpositionen (dynamisch über Strahlschwenkung) oder LEO Cluster zur Kapazitätserhöhung eingesetzt werden. Die resultierende Anzahl ist abhängig von der geforderten Abdeckung und der Anwendung geeigneter Frequenz-Reuse Verfahren zur Minimierung der Interferenzen. Diese Gegebenheiten werden natürlich günstiger, wenn mehr Frequenzressourcen (Kanäle) oder höhere EIRP Werte als die angenommenen zur Verfügung stehen. Es ist zu berücksichtigen, dass diese Betrachtungen von einem idealen Mobilfunknetz (Bild 61) ausgehen. In einer eher realen Situation verbessert sich die Argumentation entsprechend: es muss eine geringere Kapazität bereitgestellt werden.

Will man Einflüsse auf Latenzerhöhung, Linkbilanzen und Dopplereffekt vermeiden, sind nur direkt benachbarte Bahnen geeignet. Dies würde im angenommenen Fall auf maximal 9 Satelliten im Sichtbarkeitsbereich der Bodenstation führen. Eine höhere Zahl von sichtbaren Satelliten ist aber durchaus denkbar, da die Degradation immer noch beschränkt bleibt. Die Komplexität der Konstellation wird dabei aber deutlich erhöht.

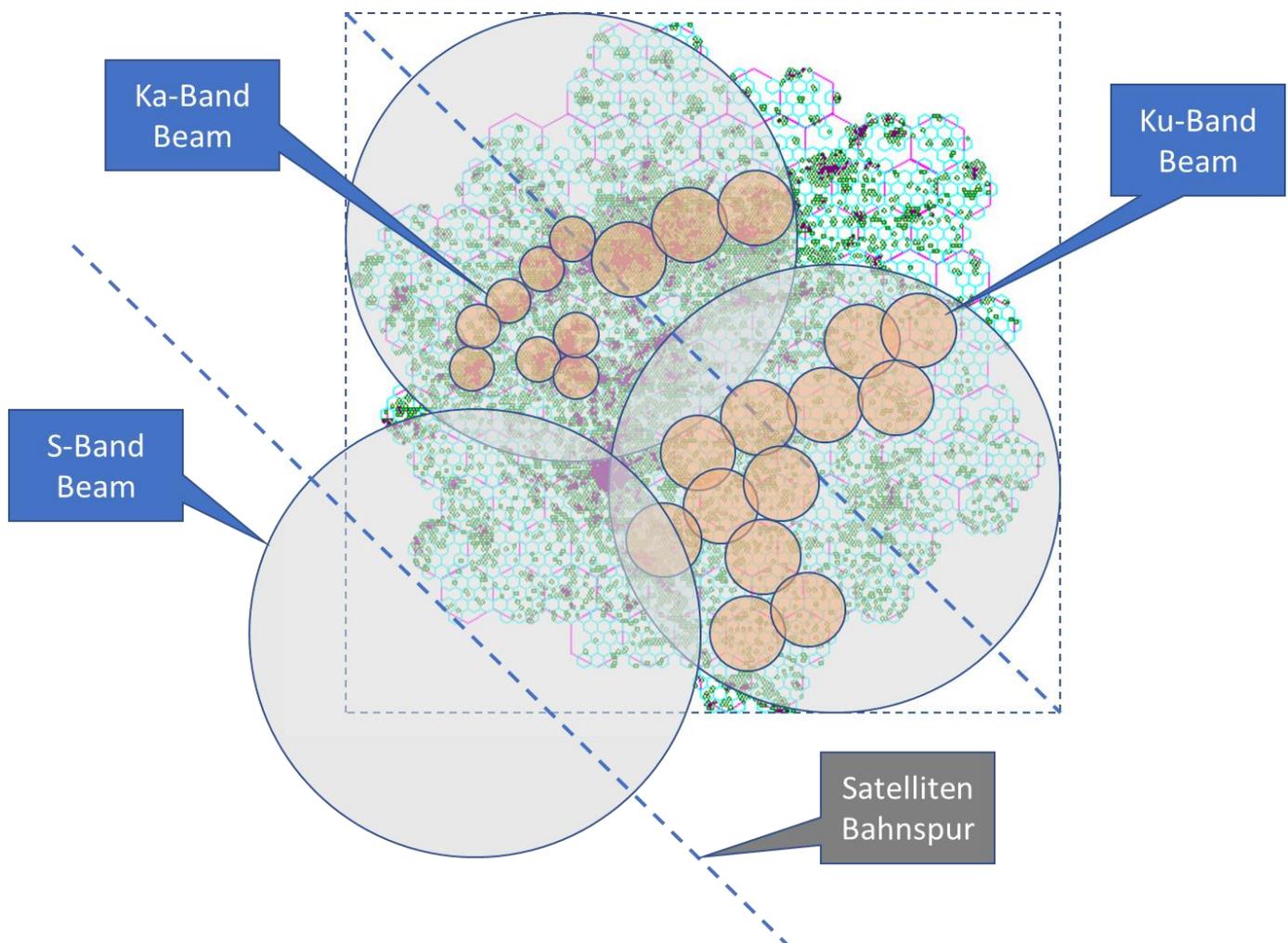


Bild 64: Beispielszenario (Beams nur teilweise gezeichnet)

Bild 64 zeigt ein Beispiel einer möglichen Anordnung. Es sind die (konfigurierbaren) elektrischen Footprints aller hier betrachteten Frequenzbereiche (teilweise) gezeigt. Sinnvoll ist dabei die Kombination einer niedrigen Frequenz (S-Band, X-Band) mit einer höheren (Ku-Band, Ka-Band) um flexibel auf lokale Kapazitätsänderungen reagieren zu können. Inwieweit noch höhere Frequenzen für allgemeine Breitbandanwendungen verwendet werden können, muss sich noch zeigen.

Wenn ein einzelner Satellit so dimensioniert werden kann, dass er die Kapazitätsanforderungen erfüllt, kann auch mit festen Antennenanordnungen gearbeitet werden. Denkbar ist hier z.B. ebenfalls die Verwendung einer Kombination von regionalen und Spot – Beams. Für derartige Anordnungen wird die Management - Komplexität der Konstellation natürlich erheblich reduziert.

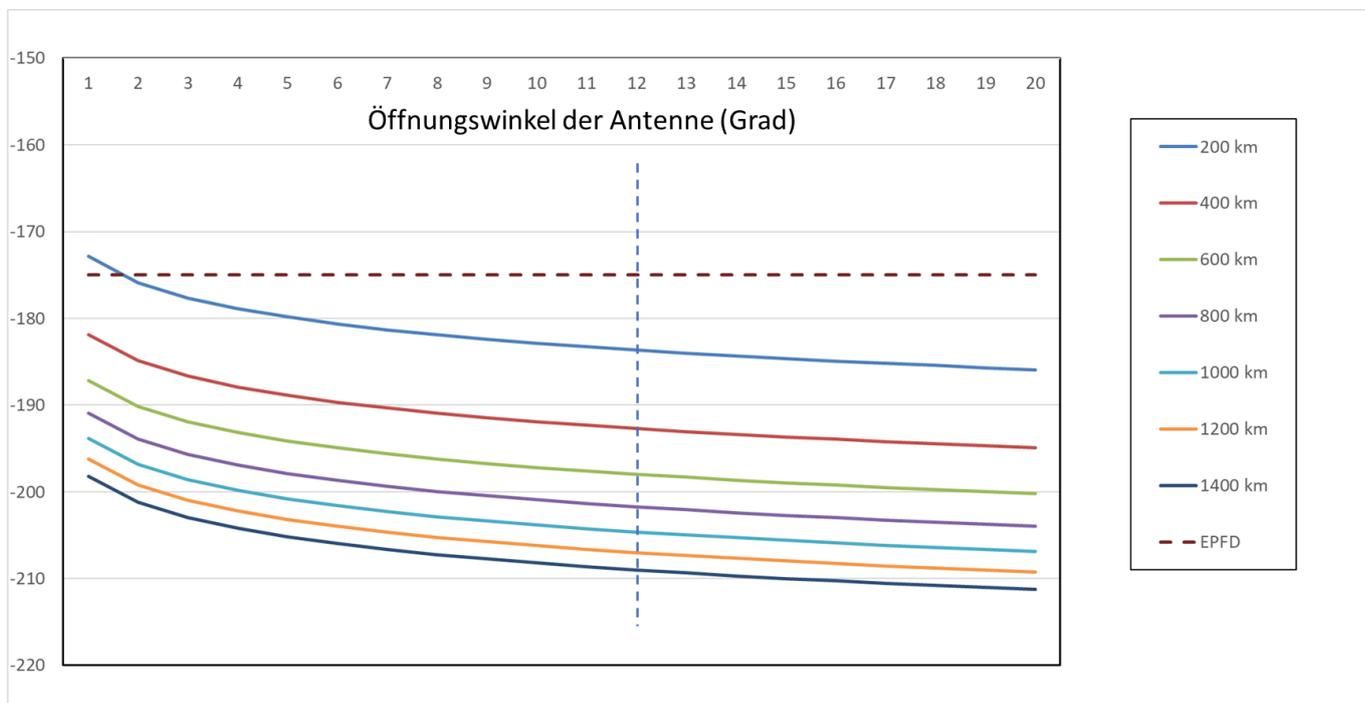
## 5.6 Interferenzen

Durch die dramatische Zunahme an Transceivern innerhalb von Konstellationen stellt sich natürlich sofort die Frage nach möglichen Interferenzszenarien. Auch an solchen Problemen sind frühe Versuche mit Satelliten in den terrestrischen Breitbandmarkt einzudringen gescheitert [31]. In der Regel sind derartige Szenarien von der jeweiligen individuellen Konfiguration des Systems abhängig und im Einzelnen sehr komplex. Um mögliche Koordinationsaktivitäten zu minimieren sind von der ITU für verschiedene Frequenzbereiche Grenzwerte für die sog. Equivalent Power Flux Density (EPFD) von NGSO (Non-Geostationary-Satellite Orbit) auf den Boden festgelegt worden. Werden diese unterschritten, sind Funkdienste am Boden hinreichend geschützt.

Frequenzband (Ghz)	EPFD (dBW/m <sup>2</sup> )	Referenzbandbreite (kHz)
5,925-6,725	183	4
12,50-18,10	160	40
27,5-28,6	160	40
29,5-30	162	40

**Bild 65:** EPFD Grenzwerte [34]

EPFD in dBW/m<sup>2</sup>



**Bild 66:** EPFD Grenzwerte für Linkbudget in Bild 48 (Gesamtflussdichte 10 Satelliten)

In unserem Rechenbeispiel in Bild 51 werden diese Grenzwerte für Orbits oberhalb 400 km mit ausreichendem Sicherheitsabstand eingehalten. Für niedrigere Orbits und höhere EIRP Werte sowie kleinere Öffnungswinkel nimmt die Wahrscheinlichkeit für Störungen zu und es müssen ggf. detailliertere Berechnungen durchgeführt werden.

### 5.7 Doppler-Effekt

Terrestrische Systeme sind für bestimmte Geschwindigkeiten der Ue's ausgelegt. Der resultierende Dopplereffekt führt zu Frequenzverschiebungen im Empfänger, die sich negativ auf die Bandbreitenutzung und die Protokolle bemerkbar machen, wenn sie nicht kompensiert werden. Übliche Maximalwerte für die Dopplerfrequenzverschiebung liegen dabei im Bereich von etwa 1000 Hz für Ue Geschwindigkeiten bis 300 km/h. Die Relativgeschwindigkeit von niedrigfliegenden Satelliten ist deutlich höher und die Stärke des Dopplereffektes hängt von der Frequenz, der Bahnhöhe und insbesondere vom (zeitabhängigen) Sichtwinkel des Satelliten vom Ue aus ab. Die resultierenden Frequenzverschiebungen können leicht berechnet werden [35].

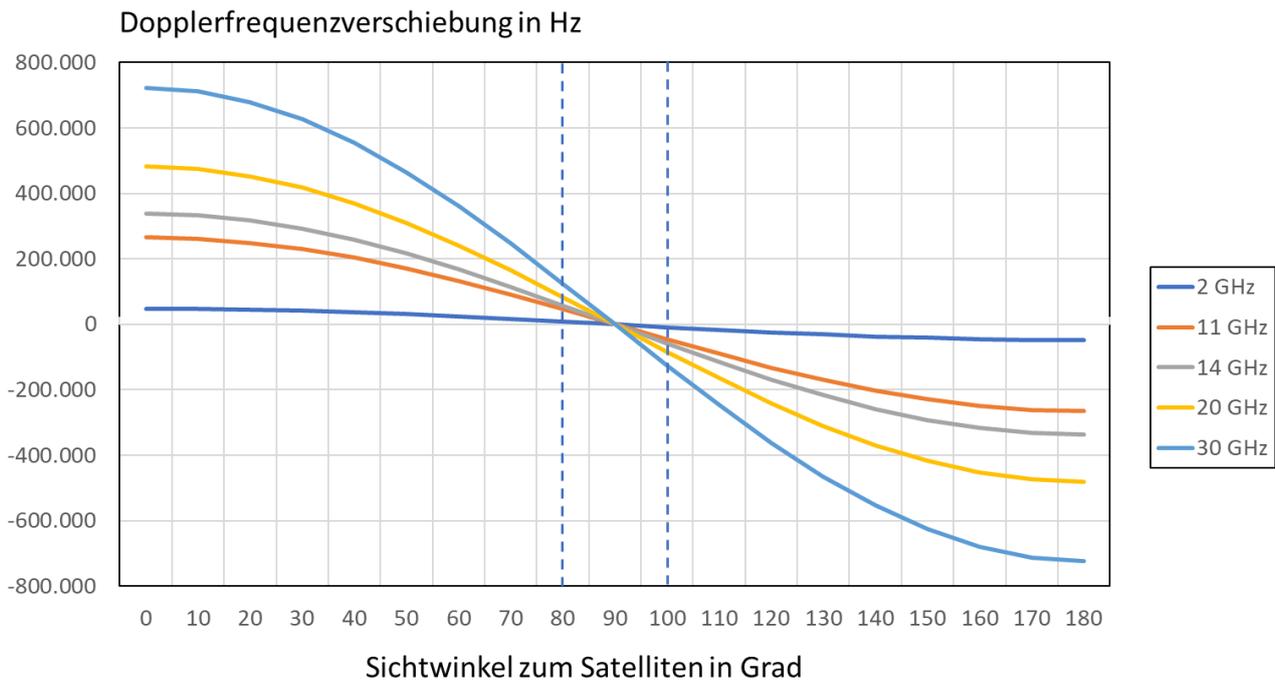
$$f(t) = \frac{f_0}{c} \omega_{\text{sat}} R_E \cos(\theta(t)) \quad (10)$$

$$\omega_{\text{sat}} = \sqrt{gM / (R_E + h)} \quad (11)$$

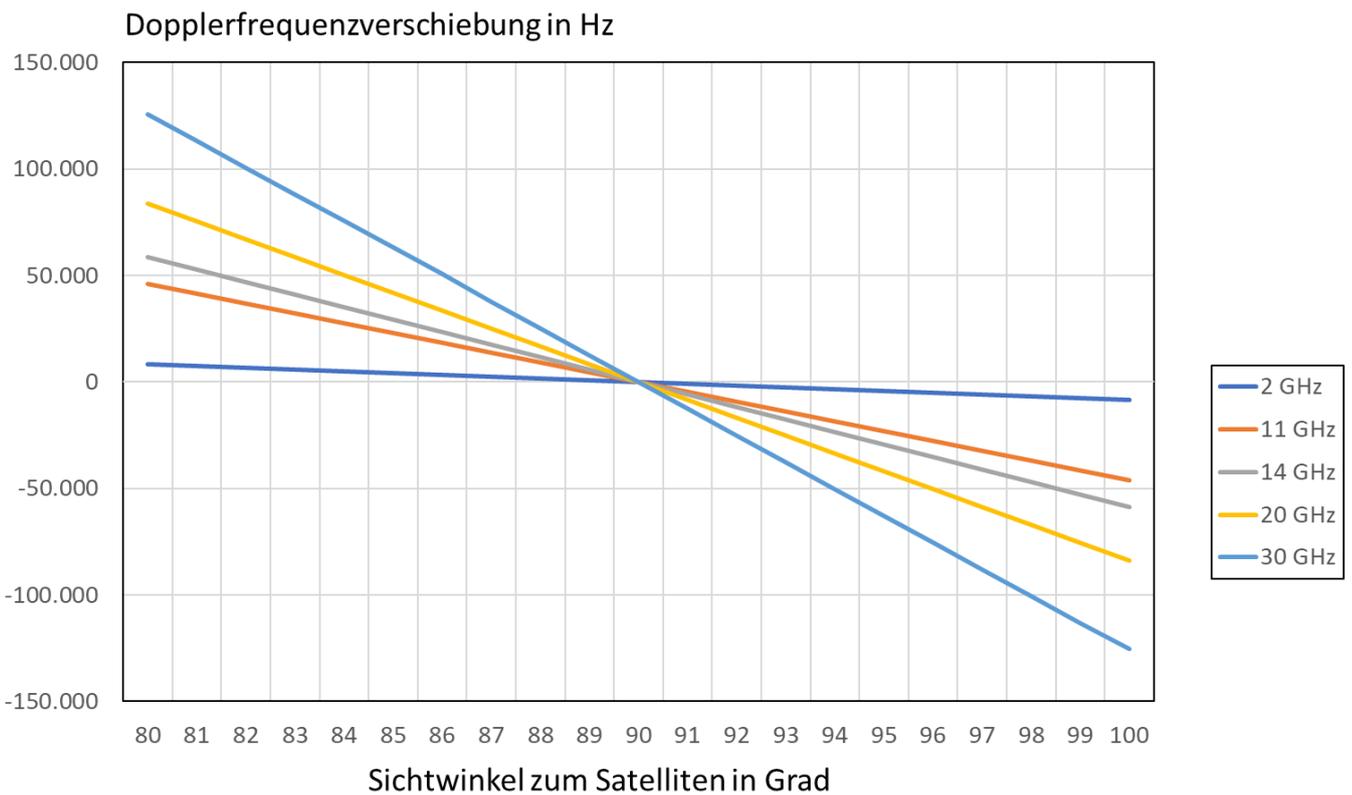
Dabei bedeuten:

- f(t): Zeit (Winkel)-abhängige Dopplerfrequenzverschiebung
- f<sub>0</sub>: RF Frequenz
- c: Lichtgeschwindigkeit
- R<sub>E</sub>: Erdradius
- g: Gravitationskonstante
- M: Erdmasse
- h: Bahnhöhe
- θ(t): Zeitabhängiger Umlaufwinkel

Für eine volle Umlaufbahn eines LEO ergeben sich Dopplerfrequenzverschiebungen, die um Größenordnungen über den für terrestrische Systeme festgelegten Werten liegen (Bild 67). Wir betrachten aber nur Sichtbarkeitswinkel um 90 Grad (Linkbilanz, Latency, LOS), bei denen sich natürlich deutlich günstigere Verhältnisse ergeben (Bild 68). Im Gegensatz zu terrestrischen Ue's ist die Position der Satelliten aber genau vorhersagbar, so dass diese Effekte vollständig kompensiert werden können.



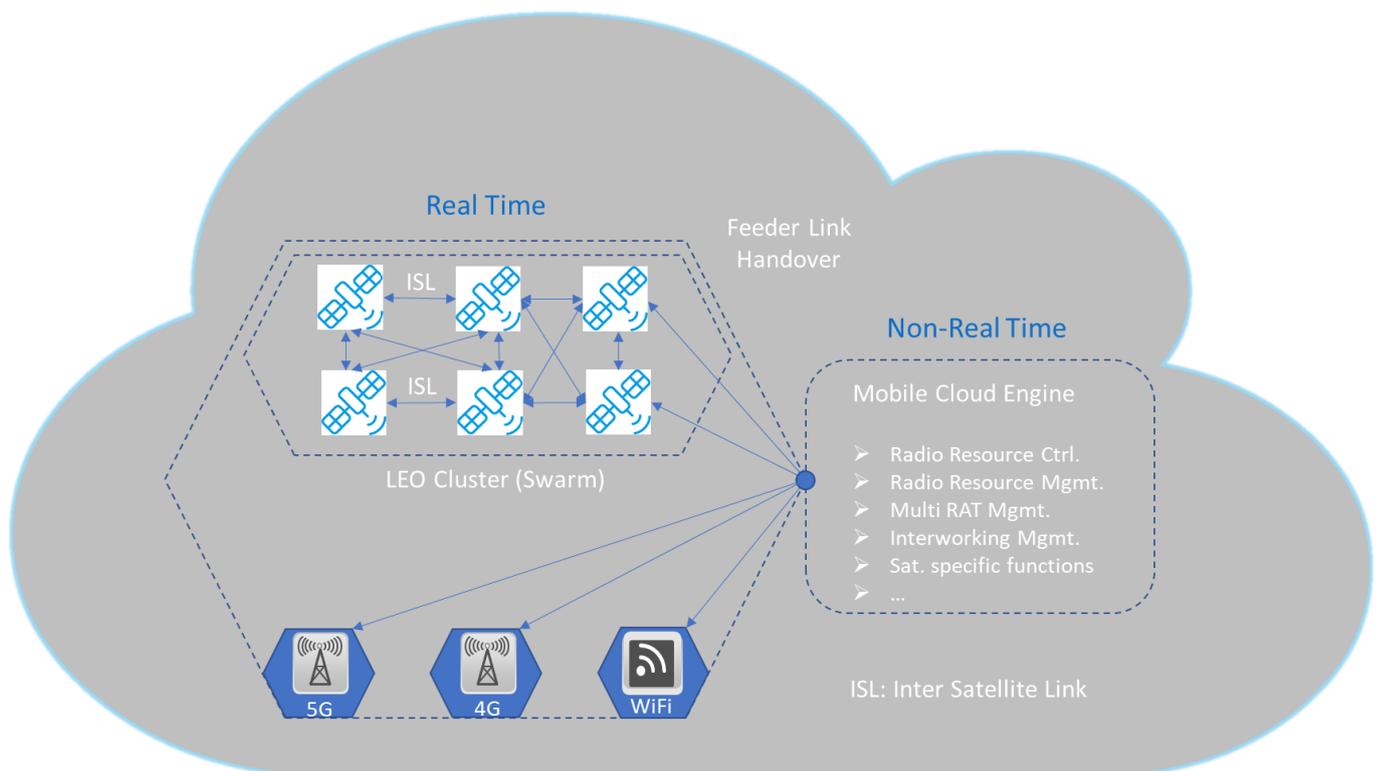
**Bild 67:** Dopplerfrequenzverschiebung (Bahnhöhe 400 km)



**Bild 68:** Dopplerfrequenzverschiebung bei hoher Elevation (Bahnhöhe 400 km)

## 5.8 Netzaspekte

Neben der Ausführung der Luftschnittstelle im Rahmen einer globalen Standardisierung ist die Einbindung in terrestrische Kommunikationsnetze eine der wesentlichen Herausforderungen (vgl. Abschnitt 2.3.3). Betrachten wir Bild 16, so handelt es sich bei einem satellitengestützten Zugangssystem zunächst um ein weiteres RAN, bei 5G mit der zusätzlichen Latenzforderung. Wir betrachten im folgenden nur LEO Konstellationen, da für die in Bild 69 dargestellten Anforderungen der GEO nicht voll kompatibel ist. Lockert man die Latenzanforderungen, kann für eine Anordnung mit GEO's ein entsprechend vereinfacht dargestelltes Schema angegeben werden.



**Bild 69:** RAN mit zusätzlicher Satellitenkomponente

Wegen der Vielzahl der erforderlichen LEO's erhöht sich die Komplexität des Netzes natürlich. Bleibt die MCE (Mobile Cloud Engine) Bestandteil des terrestrischen Netzes würde zunächst jedes Element einer Konstellation einen Feeder-Link benötigen. Da dies aber zu hohen Kosten des Bodensegments führen würde, müssen andere Lösungen gefunden werden. Eine davon ist die Verwendung von Intersatelliten-Verbindungen (ISL). Auf den jeweiligen Satelliten der Konstellation müssen daher zusätzliche Kommunikationseinrichtungen vorhanden sein, die dies möglich machen. Daher scheiden transparente Nutzlasten aus.

Aufgrund der Anzahl der Satelliten ist die Linkdistanz vergleichsweise kurz, eine Linkbilanz also unkritisch. Wegen der ohnehin komplexen Situation mit RF Interferenz scheinen daher optische ISL's eine mögliche Lösung. Reichweite und Linkbilanzen sind unkritisch, Datenraten für die hier betrachteten Satellitenkapazitäten ebenfalls. Entsprechende optische Terminals (LCT's) können daher sehr kompakt und kostengünstig eingesetzt werden. Dies ist ein großer Vorteil, da der gesamte verfügbare Platz für leistungsfähig (RF) Antennensysteme verwendet werden kann. Ob optische Technologien auch für Feeder-Links eingesetzt werden können, ist derzeit in Untersuchung. Hier besteht die Möglichkeit, über redundante Wege Probleme mit Ausbreitungsphänomenen der Atmosphäre zu umgehen.

In terrestrischen Netzen ist die Basisstation ortsfest und das Ue mobil. Mit einer Satellitenkomponente der dargestellten Art erhöht sich hier die Komplexität erheblich. Jetzt sind auch die „Basisstationen“ mobil, die Zeiten zwischen einzelnen Handover-Vorgängen werden verkürzt, und zusätzlich ist ein Handover bei den Feeder-Links erforderlich.

Weiterführende Betrachtungen über den Stand der Standardisierung und allgemeine Referenz-Szenarien finden sich in [21].

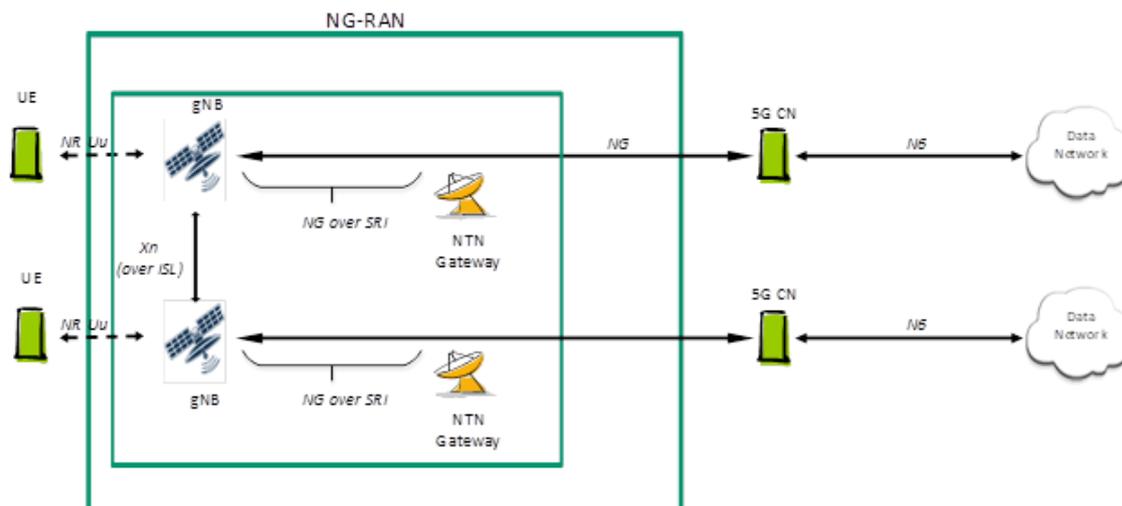


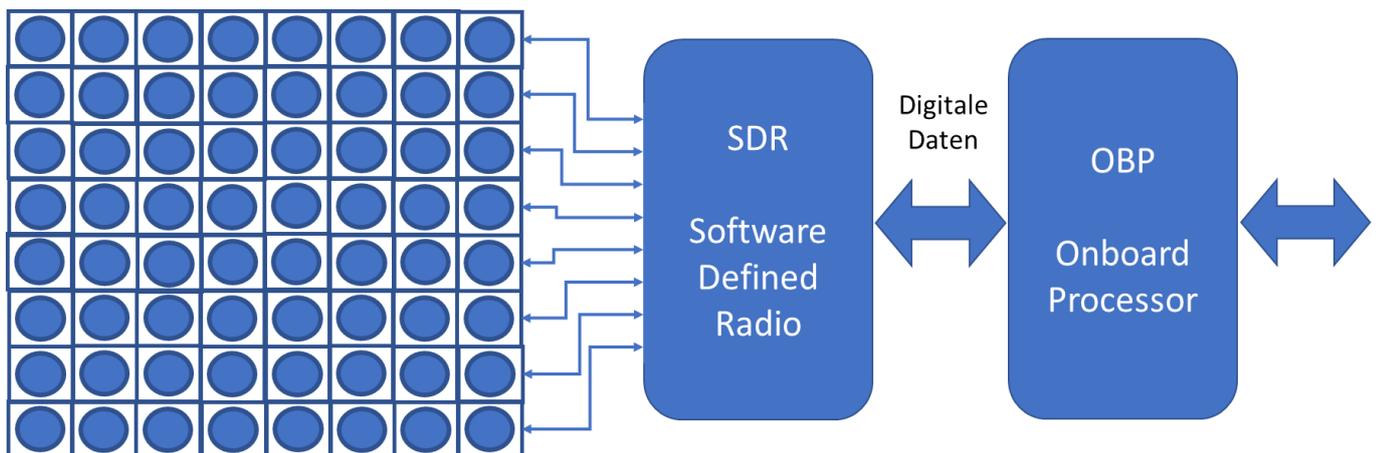
Bild 70: Beispielszenario aus [21] mit regenerativer Nutzlast und ISL-Verbindungen

## 6. Kritische Technologie – Elemente

### 6.1 Antennen

Kapitel 5 zeigt in aller Deutlichkeit, dass mobile Breitbanddienste über Satellit nur mit Hilfe innovativer Antennenkonzepte im Satelliten und im Endgerät am Boden realisierbar sind. Dies gilt insbesondere für den Fall kompakter mobiler Endgeräte (Smartphone, Tablet, o.ä.). Die Reserven für eine Linkbilanz mit einer bestimmten Datenrate sind hier am geringsten, da für derartige Situationen nicht mit einem hohen Antennengewinn im Ue gerechnet werden kann. Das resultierende Antennendiagramm eines solchen Endgerätes wird sehr stark von seiner Umgebung beeinflusst und bleibt i.W. omnidirektional. Gleichzeitig ist die Ausgangsleistung des Endgerätes wegen der Anforderungen an die elektromagnetische Umweltverträglichkeit beschränkt. Dies gilt insbesondere für niedrige Frequenzen. Inwieweit innovative Ansätze [10] für höhere Frequenzen hier eine Verbesserung schaffen können, bleibt abzuwarten.

Da die Anforderungen an Antennen für terrestrische Systeme und Satelliten ähnlich sind, können in Zukunft die gleichen Konzepte verwendet werden. Derartige Antennen bestehen demnach aus einer quadratischen oder rechteckförmigen Anordnung möglichst breitbandiger Strahlerelemente.



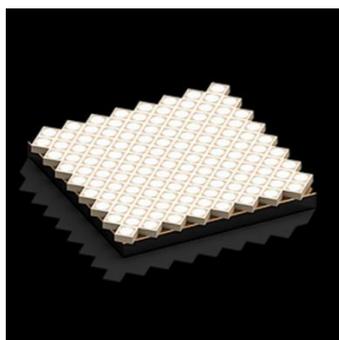
- Frequenzbereich
- Gewinn (Aperturgröße)
- Steuerbare Beams (Amplitude/Phase)
- Tx/Rx Module (Leistung, Rauschzahl)
- EIRP, G/T
- Polarisation

- Repeaterstruktur
- Kanalkonfiguration (Anzahl, Bandbreite)
- Modulation/Codierung
- Verschlüsselung

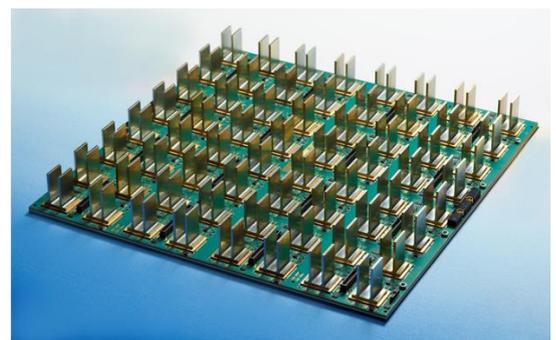
- Kommunikationsschnittstellen
- Radio Resource Control
- Radio Resource Management
- Multi RAT Management
- Interworking Management

**Bild 71:** Prinzipialschaltbild einer modernen Multibeam-Nutzlast und Funktionen

Jedes dieser Strahlerelemente ist mit einem Sende/Empfangszweig integriert, der je nach Anforderung für FDD (Frequency Division Duplex) oder TDD (Time Division Duplex) konfiguriert werden kann. Sind die Strahlerelemente doppelt polarisiert ausgeführt (linear/zirkular), können auch 2 Tx/Rx Module integriert werden. Der erforderliche Antennengewinn kann über die Skalierung der Apertur erreicht werden, insofern sind modulare Konzepte zu bevorzugen. Die Komplexität und die Anforderungen an niedrige Herstellkosten erfordert die vollständige Integration und Massenfertigung. Für Satellitenanwendungen ist zusätzlich eine Raumfahrtqualifikation erforderlich.



Source: Cesium Astro



Source: MACOM

Bild 72: Beispiele integrierter Arrays und SDR (für Satellitenanwendungen)



Bild 73: Beispiele integrierter Massive MIMO Antennen 5G (terrestrisch, Quelle: Ericsson)

Auf der Bodenseite bestehen ähnliche Anforderungen an zukünftige Multibeam Antennen, die entweder rein elektrisch oder elektrisch/mechanisch für Acquisition und Tracking niedrig fliegender oder geostationärer Satelliten verwendet werden können. Die notwendigen Verfahren sind seit langem bekannt, für eine Massenanwendung kommt es daher insbesondere auf niedrige Kosten und ein für Massenfertigung optimiertes Design an. Für die Integration in bewegte Ue's (Fahrzeuge, Flugzeuge, Züge, etc.) ergeben sich darüber hinaus auch Forderungen an bestimmte Formfaktoren (geringe Sichtbarkeit, Integration in nicht ebene Oberflächen), die zu weiteren Herausforderungen führen. Weltweit gibt es daher vermehrt F&E Aktivitäten zur Lösung dieser Problemstellungen.

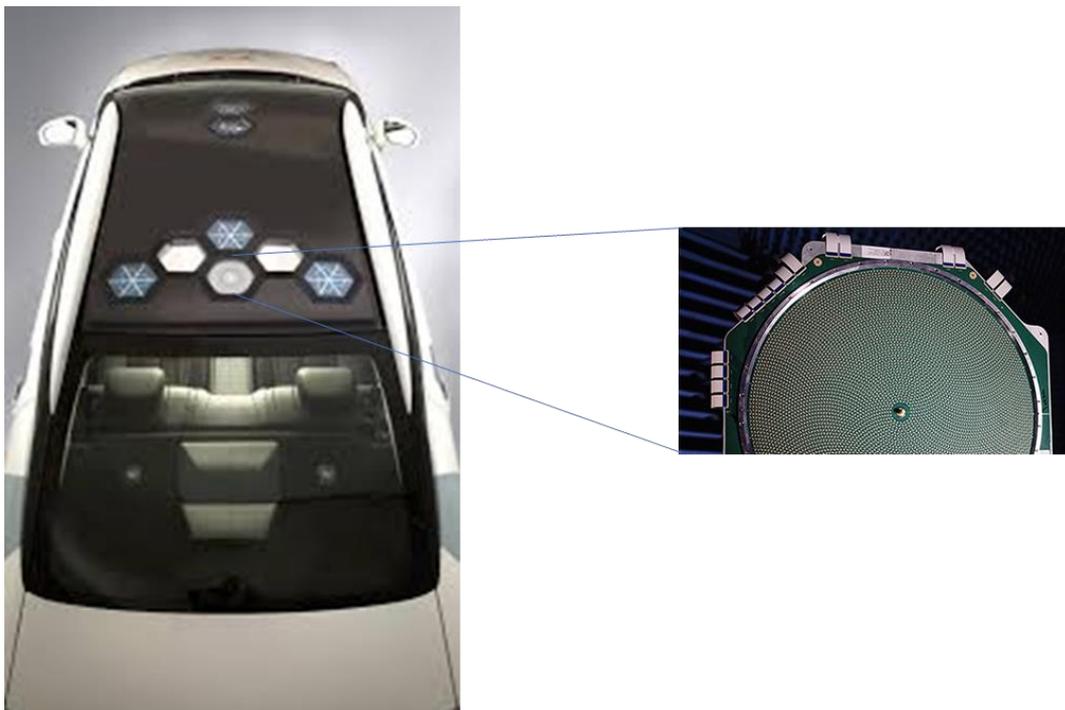
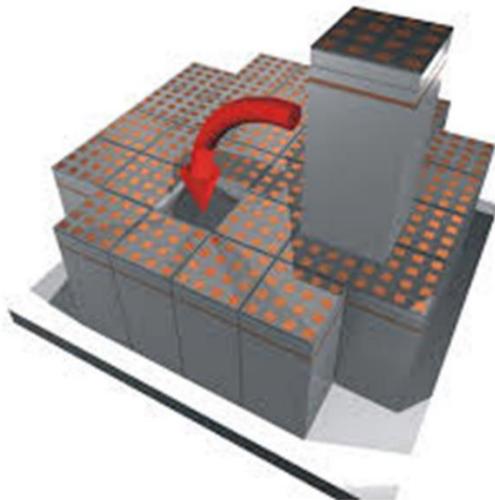


Bild 74: Beispiel einer integrierten Antenne in einem Autodach (Quelle: Kymeta, Toyota)  
Antennenprinzip: Metamaterialien

Ein weiteres interessantes Beispiel für ein modulares Konzept ist das vom DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) geförderte Projekt SANTANA. Die Antennenelemente bestehen hier teils aus Aluminium und teils aus organischem Substratmaterial. Sie sind mit aktiver Elektronik ausgestattet, Verstärker, Elemente für Amplituden- und Phaseneinstellungen sind in das Modul integriert. Die Module sind kompatibel mit FDD und TDD Betrieb, eine Antenne besteht dann aus einer Reihe von Modulen, die wie in einem Baukasten zusammengebaut werden können.



Parameter	Spezifikation
Tx-Modul	
Frequenz	30 GHz
Abmessungen	7x7 cm
Gewinn	25 dBi
EIRP	24 dBW
Rx-Modul	
Frequenz	20 GHz
Abmessungen	10x10 cm
Gewinn	25 dBi
Antenne (Beispiel)	
Anzahl Module	16
Gewinn Tx	37 dBi
EIRP	49 dBW
Gewinn Rx	37 dBi

Quelle: IMST, TU Hamburg

**Bild 75:** Modulares Antennenkonzept im Ka-Band (Projekt Santana) und technische Daten

Weiterführende oder ergänzende Literatur findet sich in [36] - [38]. Aktuell laufen Antennenentwicklungen im Satcom Bereich und für terrestrische 5G Netze noch parallel, es bleibt zu hoffen, dass mit fortschreitender Standardisierung die vorhandenen Synergien noch besser genutzt werden können.

Besondere Bedeutung kommt natürlich den Antennenkonzepten in mobilen breitbandigen Endgeräten zu. Auch hier gibt es eine Reihe von F&E Aktivitäten, die sich diesem Thema gewidmet haben [39]. Die Stoßrichtungen hier sind hauptsächlich die Verbesserung des Antennengewinns unter Beachtung der SAR-Werte und die Verwendung von Mehrelementantennen (insbesondere bei höheren Frequenzen) [12].

Die Vielzahl an möglichen Antennenkonzepten für die unterschiedlichsten Szenarien erfordert zwingend eine weitestgehende Virtualisierung der radiofrequenten Funktionen. Dieses Problem kann in der terrestrischen Welt beim heutigen Stand der Technik als gelöst betrachtet werden. Die entscheidende Komponente ist hier das SDR (Software Defined Radio) mit dem alle wichtigen Funktionen (Kanalkonfigurationen, Kanalbandbreiten, Filterfunktionen, AMC) dargestellt werden können. Alle erforderlichen Funktionen sind heute in entsprechenden Chipsätzen verfügbar und damit auch für Satellitenanwendungen zugänglich.

## 6.2 On Board Processing

Das Blockschaltbild einer modernen LEO Nutzlast (Bild 71) weist als weitere kritische Technologiekomponente den OBP (On Board Processor) aus. Die Architektur und Funktionselemente werden bei Integration in ein 5G Ecosystem von der 3GPP Standardisierung vorgegeben. Hier sind insbesondere die in Bild 16 und 17 dargestellten Funktionalitäten zu berücksichtigen. Für eine tiefergehende Betrachtung muss der Verlauf der Standardisierungsaktivitäten abgewartet werden.

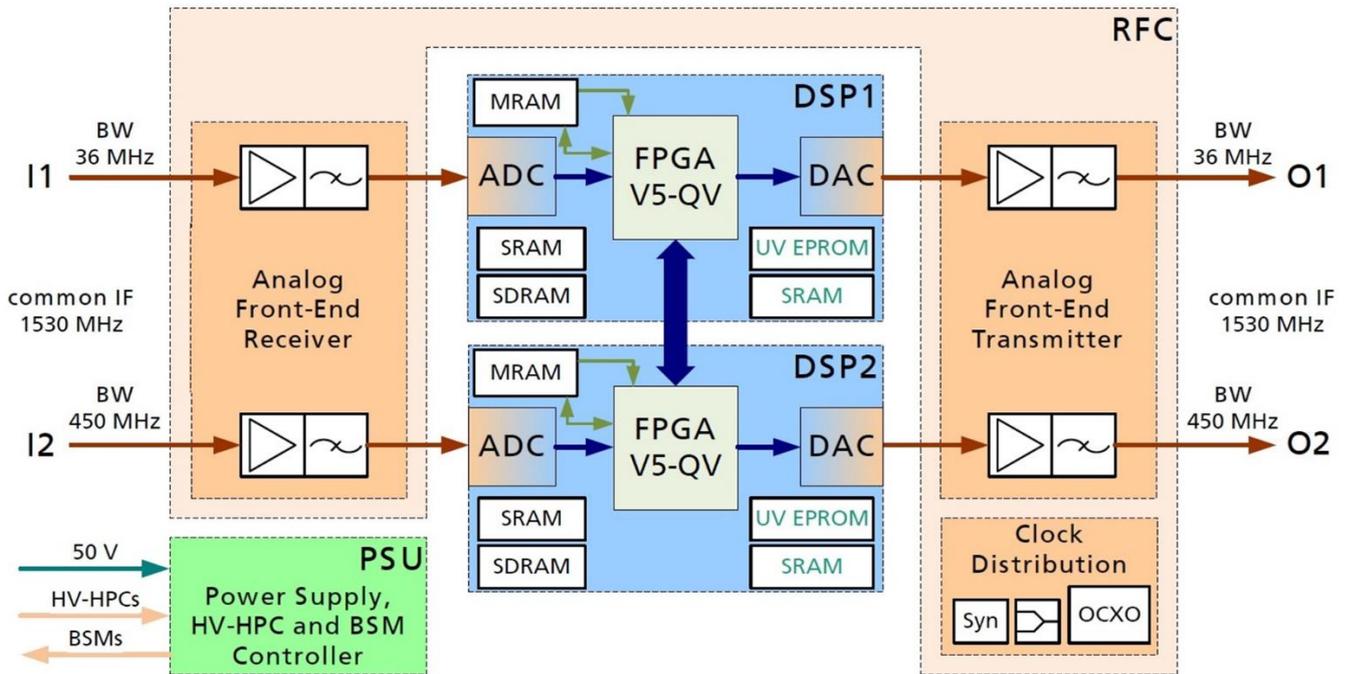
Aktuell gibt es schon eine Reihe von Aktivitäten, derartige Systemelemente für satellitengestützte Systeme zu qualifizieren und anzuwenden. Hierzu sind im Folgenden einige Beispiele angeführt. Innerhalb der deutschen Heinrich Herz Mission (GEO) werden u.a. neuartige Funktionalitäten und Komponenten zukünftiger Satellitensysteme getestet und verifiziert. Hierzu gehört auch ein vom Fraunhofer IIS entwickelter leistungsfähiger On-Board Prozessor mit dem in Bild 76 dargestellten modularen Design. Hiermit können verschiedenste Funktionalitäten dargestellt und getestet werden, eine Adaption für zukünftige Kommunikationsprotokolle und entstehende Standards ist durch flexible Rekonfiguration möglich. Wie das Blockschaltbild zeigt, sind die RFC's noch analog ausgeführt.



Source: Fraunhofer IIS

Main Components/Specs	Mission Requirements
FPGA Virtex-5QV	Testing/Proof of Communication Protocols
2 x DSP (Digital Signal Processing)	Signal regeneration, error correction , AMC, digital filtering
RFC (Radio Frequency Card)	On-Board switching and routing
PSU (Power Supply Unit)	In-Orbit reconfiguration
Space qualified (hard radiation)	Radiation measurement and adaptive mitigation
Total power consumption: approx. 160 W	

Bild 76: Fraunhofer OBP innerhalb der Heinrich Hertz - Mission



**Bild 77:** Fraunhofer OBP Blockschaftbild

Zukünftige OBP Lösungen müssen neben den gezeigten Funktionalitäten auch die Eigenschaften einer MCE (Mobile Cloud Engine, siehe Kapitel 2.3.3) darstellen können. Wie letztendlich die Partitionierung der Funktionalitäten innerhalb eines LEO Schwarms und/oder dem Bodensegment aussieht, muss im Rahmen der laufenden Standardisierung geklärt werden.

Für weniger ressourcenkritische LEO Konfigurationen gibt es entsprechend skalierte OBP Lösungen, die schon heute oder in Kürze am Markt verfügbar sind.

### 6.3 Intersatelliten - Kommunikation

Die Nutzung der besonderen Eigenschaften von niedrigfliegenden Satelliten macht eine nahtlose Integration in ein zukünftiges 5G Ecosystem möglich. Um eine ausreichende Kapazität für eine synergetische Ergänzung des terrestrischen Netzes zu erreichen ist allerdings eine sehr hohe Anzahl von Satelliten erforderlich. Versorgt man diese im Uplink (synonym zu einem Backhaul Netz im terrestrischen Fall) jeweils mit einer Bodenstation, steigen die Kosten einer derartigen Lösung entsprechend. Die Lösung kann daher darin bestehen, dass bestimmte Teile einer Konstellation zu Clustern zusammengefasst werden (siehe Bild 69). Diese Cluster haben jeweils eine Backhaul-Verbindung zu einer Bodenstation. Zur weiteren Kostenoptimierung kann man sich auch eine Bodenstation mit mehreren Beams vorstellen, bei der dann wiederum die schon erwähnten Multibeam-Antennen zum Einsatz kommen können. Da die empfangbaren Satelliten vergleichsweise dicht zusammenstehen, sind die Schwenkwinkel begrenzt und die Anforderungen an die Antennen nur moderat.

Innerhalb des LEO Clusters ist dann zwingend eine Intersatelliten-Kommunikation erforderlich. Diese kann zunächst elektrisch oder optisch realisiert werden. Bei genauerer Betrachtung ist aber der optischen Intersatelliten-Kommunikation der Vorzug zu geben. Zum einen ist die optische Kommunikation wesentlich breitbandiger und damit für weitere Kapazitätssteigerungen geeignet, zum anderen benötigt eine elektrische Intersatelliten-Kommunikation zusätzliche Frequenzbänder mit ausreichender Bandbreite, entsprechende Lizenzen und vergrößert das ohnehin schon nicht triviale Problem von möglichen Interferenzen mit anderen Satellitensystemen. Darüber hinaus entfällt bei optischen Intersatellitenverbindungen die Notwendigkeit, zusätzliche Antennen im Satelliten zu akkomodieren.

Weist ein Element eines LEO Clusters z.B. drei Intersatellitenverbindungen auf, kann ein vollständig vermaschtes Netz innerhalb eines Clusters von 4 Satelliten aufgebaut werden, das dann zwangsweise einen hohen Grad an Redundanz aufweist. Die entsprechende Bodenstation muss dann nur zu einem Satelliten des Clusters eine Verbindung aufbauen. Derartige Konfigurationen befinden sich derzeit schon im Orbit und durchlaufen entsprechende Tests. Als Beispiel ist hier die vom DLR geförderte S-NET Mission zu nennen [40]. Aus Kostengründen erfolgt die Intersatelliten - Verbindung in diesem Demonstrationsprojekt noch elektrisch, alle Missionsanforderungen wie Multipoint – ISL (Intersatellite Link), die hierfür neu entwickelten Protokolle, die Verifikation der Stabilität der Satellitenformation (auch ohne Vorhandensein von Antrieben) und die individuelle Ausrichtung der Satelliten mit Miniatur-Drallrädern konnten inzwischen erfolgreich demonstriert werden.

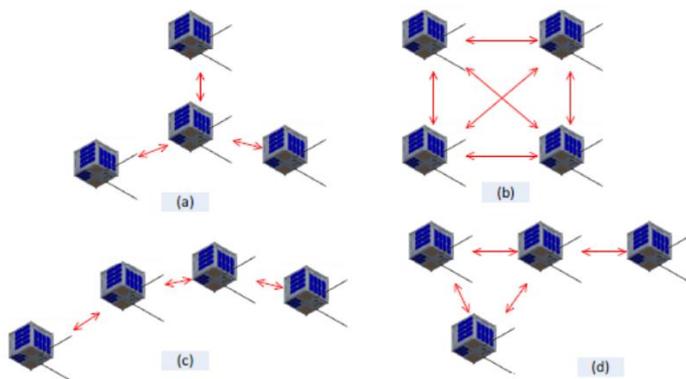
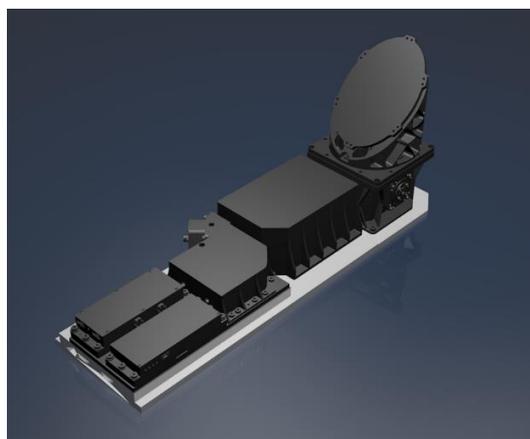


Bild 78: Intersatelliten – Kommunikation Projekt S-NET und mögliche Cluster-Konfigurationen (Quelle: TU Berlin, DLR)

Im Gegensatz zu bereits erfolgreich eingesetzten LCTs (LCT: Laser Communications Terminal) für große Reichweiten und Datenraten im Gbit/s Bereich gelten für LCTs, die für Kommunikationsverbindungen innerhalb von LEO Clustern geeignet sind deutlich reduzierte Anforderungen bezüglich der Reichweite. Preis und Kompaktheit stehen daher im Vordergrund. Sind für Verbindungen zwischen geostationären Datenrelaissatelliten und z.B. Satelliten zur Erdbeobachtung Entfernungen bis zu 45.000 km und Datenraten im Gbit/s Bereich erfolgreich implementiert worden, müssen kompakte LEO LCTs weitaus geringere Entfernungen überbrücken allerdings mit Datenraten, die mit den in Bild 60 gezeigten Parametern kompatibel sind. Wegen der geringen zu überbrückenden Entfernung (Bild 80) sind die Aufwände für Acquisition und Tracking aber deutlich geringer.



Reichweite: bis zu 6000 km  
Datenrate: 10 – 100 Gbit/s

Bild 79: Beispiel für ein kompaktes Laserterminal (Quelle: TESAT Spacecom)

Entfernungen im LEO Cluster in km

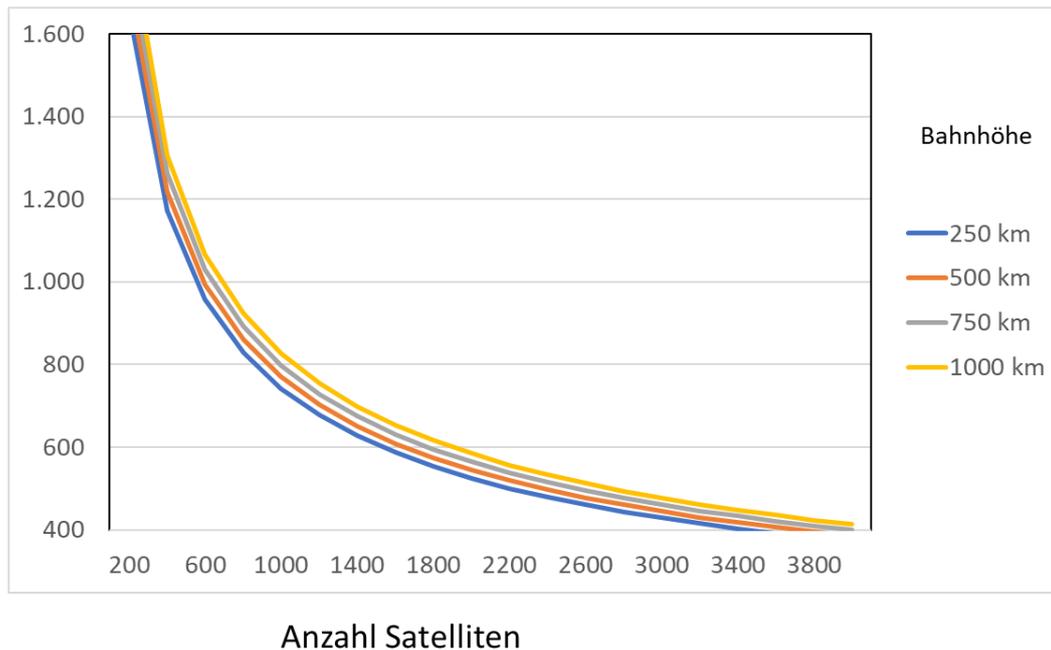


Bild 80: Entfernungen zwischen Satelliten einer Konstellation

Intersatellitenverbindungen mit Hilfe optischer Kommunikation sind bei hohen Kapazitätsanforderungen zwingend. Optische Kommunikation kann aber auch bei möglichen Feeder-Links von LEO Clustern eingesetzt werden. Wegen der Einflüsse durch die Erdatmosphäre ist eine Realisierung aber deutlich schwieriger als bei der Intersatellitenverbindung. In diesem Bereich gibt es zur Zeit intensive F&E Aktivitäten, die zum einen auf die Optimierung der einzelnen Verbindung zielen und zum anderen vernetzte Netzarchitekturen in Betracht ziehen, die die räumliche Korrelation/Dekorrelation von atmosphärischen Ereignissen untersuchen. Hier ist besonders auf die zusätzlich entstehenden Signallaufzeiten zu achten. Im Erfolgsfall ergibt sich allerdings eine vielversprechende Systemvariante.

Eine weitere Alternative ergibt sich durch die Verwendung extrem hoher Mikrowellenfrequenzen im Bereich 35 – 75 GHz (Q/V Band). In diesen Bereichen sind aktuell wenige Kommunikationsdienste allokiert, und die verfügbaren RF Bandbreiten sind hoch. Derartige Lösungen werden sowohl für Intersatellitenverbindungen als auch für Feeder-Links mit optischer Technologie konkurrieren. Entscheidend wird sein, welche Bandbreiten zu welchen Kosten verfügbar sein werden.

#### 6.4 Antriebe und Lageregelung

Die klassische Methode zur Positionsbeeinflussung von Satelliten basieren auf chemischen Triebwerken für deren Betrieb innerhalb der Lebensdauer ein entsprechender Treibstoffvorrat (Masse) bereitgestellt werden muss. Die Energie für den Schub wird direkt über eine chemische Reaktion aus dem Treibstoff gewonnen. Elektrische (Ionen-) Triebwerke benötigen zwar auch Treibstoff jedoch nur als Medium, die Beschleunigung der Treibstoff – Ionen wird durch ein elektrisches Feld verursacht. Der entsprechende Schub ist deutlich geringer, für eine Positionierung müssen entsprechend längere Zeiträume veranschlagt werden. Vorteilhaft ist aber die hohe spezifische Effizienz und die damit verbundene Gewichtseinsparung. Elektrische Antriebe eignen sich daher insbesondere für Konstellationen. So sind auch die kürzlich gestarteten ersten 60 Satelliten der Starlink Konstellation mit derartigen Antrieben ausgestattet, die Praxis wird zeigen, wie lange es dauert bis die gewünschten Positionen der Satelliten erreicht werden. Besonders geeignet sind elektrische Antriebe natürlich für Kleinsatelliten. Die Antriebselemente können derart miniaturisiert werden, dass sie in ein Strukturelement eines Cubesat passen (Bild 81)

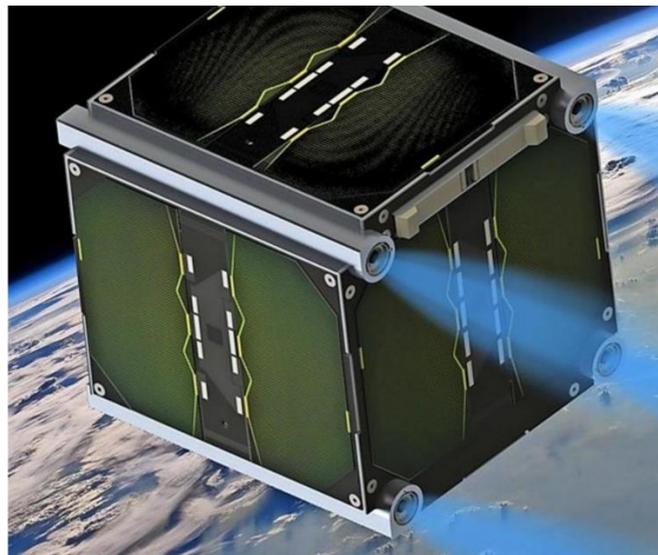
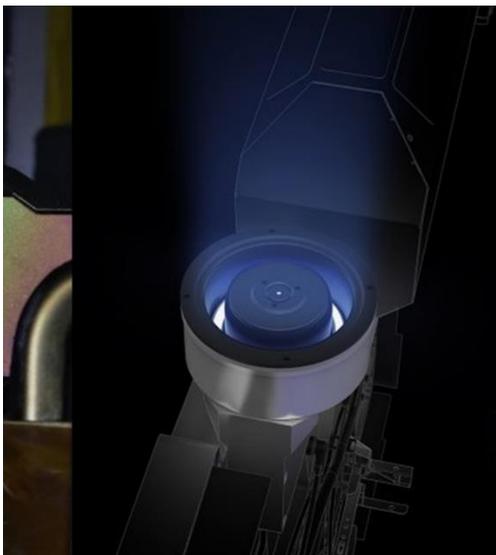


Bild 81: Links: Ionenantrieb der Starlink Satelliten (Quelle: Space-X)  
Rechts: Ionenantriebe in einem Qubesat (Quelle: Universität Würzburg)

Für den Betrieb und das am Ende der Betriebszeit notwendige De-orbiting sind neben Antrieben weitere Steuerungselemente erforderlich, die die Lage des Satelliten im Raum beeinflussen können. Zur Lageregelung und Ausrichtung werden Reaktionsräder verwendet, die bei Bedarf aktiviert werden und nach den Gesetzen der klassischen Mechanik (Drehimpulserhaltungssatz) ein entsprechendes Drehmoment auf den Satelliten ausüben. In der Regel sind 3 Reaktionsräder in den verschiedenen Raumachsen ausreichend. Aus Redundanzgründen werden aber häufig 4 Räder in Tetraederausführung eingesetzt (Bild 82).

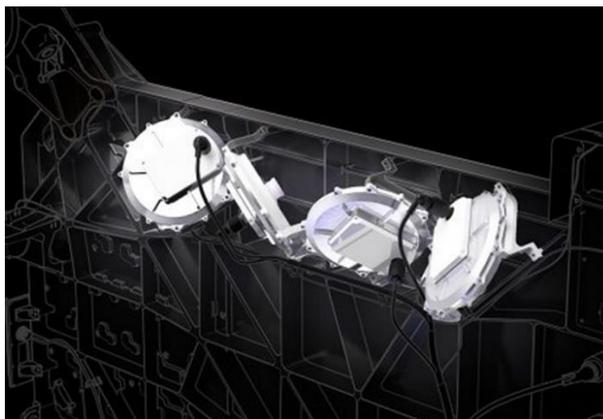


Bild 82: Links: Reaktionsräder der Starlink Satelliten (Quelle Space-X)  
Rechts: Einzelnes Reaktionsrad (Quelle: Astro Feinwerttechnik)

Für bestimmte Missionen kann auf Antriebe verzichtet werden. Hier ist es dann entscheidend, mit welcher Genauigkeit die einzelnen Satelliten nach dem Start ausgesetzt werden. Trotz fehlender Antriebe kann die Position der Satelliten über die Reaktionsräder so verändert werden, dass der Satellit in Flugrichtung der bei niedrigen Orbits vorhandenen Restatmosphäre unterschiedliche Widerstände bietet, so dass sich in gewissen Grenzen auch die Geschwindigkeit verändert. Dies kann dann z.B. dazu genutzt werden, die Entfernung zwischen einzelnen Satelliten zu verändern oder eine notwendige De-Orbit Phase einzuleiten [41].

## 7. Use Cases

### 7.1 Remote Areas

Die Versorgung von Gebieten, die mit terrestrischen Technologien schwer oder überhaupt nicht erreicht werden können ist der klassische Anwendungsfall für die Satellitentechnik. Hierzu gehören insbesondere maritime Anwendungen und Telekommunikationsdienste in Gebieten ohne terrestrische Infrastruktur (z.B. Wüstengebiete, Bergregionen, polare Gebiete). In diesen Bereichen hat sich in der Vergangenheit ein begrenzter Markt etabliert. Dieser Markt wird heute zum großen Teil von geostationären Satelliten bedient und ist relativ fragmentiert, eine Standardisierung hat sich bisher nicht etabliert.

Mit dem Aufkommen leistungsfähiger Konstellationen wird sich dieses Bild grundlegend ändern. Dimensioniert man eine Konstellation für Breitbandkommunikation wie in Kapitel 5 dargestellt, sind Anwendungen der oben genannten Art automatisch mit abgedeckt. Gebiete, in denen die Konstellation das terrestrische Breitbandnetz vervollständigt, fallen naturgemäß nicht mit unversorgten Gebieten zusammen. Eine Konstellation ist damit naturgemäß global und die Systemkapazität für Breitbanddienste in den ansonsten nicht versorgten Regionen mehr als ausreichend.

Die erreichbaren Datenraten hängen dabei wie schon in Kapitel 5 dargestellt i.W. von der Leistungsfähigkeit der Antenne des Nutzers ab. Auch für entlegene Gebiete nehmen wir den ungünstigsten Fall eines standardisierten Endgerätes an. Wie in der Vergangenheit ist die Annahme von speziell adaptierten und optimierten Endgeräten (Antenne, Rauschzahl) zulässig.

Sind größere Aperturantennen anwendbar, steigt die Leistungsfähigkeit enorm (Bild 83). Für kostengünstige Anwendungen und/oder Anwendungen, in denen die Ue Antenne in planare oder konforme Strukturen eingebaut werden kann (Fahrzeuge, Flugzeuge), kommen bevorzugt planare Array Antennen zur Anwendung, die entweder passiv oder aktiv ausgeführt werden können. Für maritime Anwendungen kommen heute schon Reflektor oder Array Antennen zum Einsatz, die in der Lage sind, elektronisch oder mechanisch Wellenbewegungen auszugleichen. Derartige Antennen sind leicht auf die (vergleichbar geringe) Dynamik von Konstellationssatelliten anzupassen. Sie werden in der Regel in Radomen untergebracht, eine gewisse Platzbeschränkung beschränkt dabei auch den möglichen Gewinn.

Den optimalen Fall erreicht man mit nachführbaren größeren Reflektorantennen, bei denen die möglichen Datenraten bis in den Gbit/s Bereich vorstoßen können. Derartige Lösungen sind z.B. geeignet, hochbitratige Punkt-zu-Punkt Verbindungen bereitzustellen, die als generelle Transportlösung oder als Backhaul zu Breitband Mobilfunknetzen genutzt werden können.

Terminal Typ	Frequenz Band	Downlink			Uplink		
		Antennen Gewinn [dBi]	Max. Kanal Bandbreite [MHz]	Maximale Datenrate [Mbit/s]	EIRP [dBm]	Kanal Bandbreite [MHz]	Maximale Datenrate [Mbit/s]
Handheld standardisiert	C	0	10	10	23	1	1
Handheld optimiert (Gain, Rauschzahl)	C	6	20	20	29	3	3
Small Terminal Array Antenna (steerable)	Ku/Ka	20	100	400	50	20	80
Medium Terminal Array Antenna (steerable)	Ku/Ka	30	200	800	60	100	400
Large Terminal Reflector Antenna (steerable)	Ku/Ka	40	500	2000	70	500	2000

**Bild 83:** Mögliche Terminalkonfigurationen und Leistungsdaten für remote Areas (nicht gezeigte Parameter wie in Bild 50 – 54)



**Bild 84:** Mögliche Hardware für remote Areas  
Quellen: Apple, Iridium, OneWeb, Gilat, Epak, ND Satcom

## 7.2 Backhaul

Wie schon in 7.1 dargestellt, können mit Hilfe geeigneter Terminalantennen hochbitratige Punkt-zu-Punkt Verbindungen bereitgestellt werden. Dies kann in bestimmten Anwendungsfällen auch in Gebieten mit ansonsten guter Versorgung zu attraktiven Lösungen führen. Hierzu zählen Backhaul Verbindungen für lokale WiFi oder WiMax Lösungen sowie für isolierte Mobilfunknetze für 4G und 5G. Derartige Situationen werden in der Regel durch terrestrischen Richtfunk bedient. Es kann aber Situationen geben, in denen eine Richtfunklösung nicht anwendbar ist oder eine schnelle z.T. temporäre Lösung gesucht ist.

Derartige Anwendungen stellen natürlich eine sehr begrenzte Marktnische dar. Bei einer vorhandenen entsprechend leistungsfähigen Konstellation ist aber die Hürde für eine Anwendung gering, entsprechende Terminals müssen aber aufgrund der Zellkapazitäten von WiFi, WiMAX oder 4G/5G Aperturgrößen aufweisen, die mit den entsprechenden Datenraten bis in den Gbit/s Bereich kompatibel sind (vgl. Bild 83).

## 7.3 BOS

Ähnliche Anforderungen bestehen an BOS Netze. Neben einer durchgehenden flächendeckenden Versorgung mit begrenzter Bitrate sind in Einsatzfällen häufig temporäre lokale Netze erforderlich. In beiden Fällen hat eine entsprechend leistungsfähige Konstellation erhebliche Vorteile gegenüber einem terrestrischen Netz. Insbesondere im Rahmen von zukünftigen 5G Systemen können auch die erhöhten Sicherheitsanforderungen über Network Slicing effizient dargestellt werden. Dies gilt im übrigen auch für militärische Anwendungen mit ähnlichen Anwendungsfällen.

Bei den Endgeräten muss man zwischen 2 Fällen unterscheiden. Zum einen ist es durchaus denkbar, dass für derartige Spezialanwendungen mobile Endgeräte zur Anwendung kommen, die eine verbesserte Leistungsfähigkeit (Antennengewinn, Rauschzahl) aufweisen (vgl. Bild 83). Hiermit werden dann auch breitbandigere mobile Dienste möglich. Im Fall der Integration von Terminals in Einsatzfahrzeuge oder bei Bereitstellung spezialisierter Einsatzfahrzeuge mit größeren Antennen (Bild 83/84) ist das Spektrum möglicher Datenraten nach oben offen, es können daher auch lokale Mobilfunknetze mit hoher Kapazität versorgt werden.

## 7.4 IoT

Der Markt für Kommunikationssysteme für das Internet of Things stellt ganz besondere Anforderungen. Dies ist dadurch begründet, dass ein breitgestreutes Portfolio an Anwendungen existiert, deren technische Herausforderungen weit über die der „normalen“ mobilen Kommunikation hinausgehen. Hier sind insbesondere die folgenden zu nennen:

- IoT ist in der Regel global, man benötigt demnach ein globales Netz
- Globale Mobilität ist für die meisten innovativen 5G Anwendungen zwingend
- Lücken in der Netzabdeckung sind noch kritischer als im Falle der individuellen Breitbandkommunikation
- Datenraten können einen sehr weiten Bereich überstreichen (NB IoT, High Rate IoT)
- Es wird eine Vielzahl von möglichen Terminalkonfigurationen geben müssen mit teilweise extrem geringen Kosten für die Hardware
- Die funktechnischen Parameter werden für kostengünstige IoT Endgeräte (z.B. Tags) noch mehr beschränkt sein als bei Standard - Endgeräten
- IoT Endgeräte werden häufig innerhalb von Gebäuden eingesetzt werden. Für derartige Anwendungen sind nur bestimmte (tiefere) Frequenzen geeignet, und es muss eine Reserve in der Linkbilanz für die zusätzliche Dämpfung eingeplant werden, wenn die Kommunikation über ein Außennetz erfolgen soll (Deep Indoor Coverage).

Mit terrestrischen Lösungen (z.B. 5G) lassen sich natürlich eine Reihe von IoT Szenarien gut abdecken, auch höhere Datenraten sind leicht zu erreichen. Dies gilt insbesondere für Anwendungsfälle im industriellen Umfeld, bei denen ein lokales 5G Netz (Campus, Fabrikhalle etc.) aufgebaut werden kann. Für derartige Anwendungsfälle gibt es auch spezielle Frequenzbereiche, die industriellen Anwendern zugänglich sind. Erste 5G Anwendungen im IoT Bereich werden sich daher auch in diesem Rahmen etablieren.

Für eine möglichst flächendeckende und regionale insbesondere aber eine globale IoT Anwendung enden wir aber wieder beim gleichen Problem wie in klassischen Fall der mobilen Breitbandkommunikation. Terrestrische Netze sind hier weniger geeignet, da sie nur lokale Bereiche überstreichen und auch in Gebieten mit scheinbar ausreichendem Ausbau die wohlbekannten Funklöcher aufweisen. Für extrem einfache Endgeräte (z.B. für Container Tracking o.ä.) können wegen der Kosten und des Leistungsverbrauchs auch keine Roaming-Verfahren eingesetzt werden. Daher werden Satellitenanwendungen auf LEO Basis (Konstellationen) große Chancen eingeräumt, dieses Problem zufriedenstellend zu lösen. Es ist daher nicht erstaunlich, dass aktuell sogar speziell für IoT ausgelegte Konstellationen aufgebaut

werden (z.B. Kepler). Derartige Konstellationen haben den Vorteil, dass schon von Anfang an mit wenigen Satelliten ein Teilbetrieb möglich ist. Viele IoT Sensoren benötigen keine durchgehende Kommunikation, sondern es reicht, wenn mehrmals am Tag Daten übertragen werden. Mit wachsender Konstellation kann dann die Übertragungsrate erhöht werden. Dies sind günstigere Voraussetzungen für einen Business Case im Vergleich zu einer „großen“ Konstellation, die zunächst eine globale Abdeckung (mit einer gewissen Anfangskapazität) benötigt.

Bild 85 zeigt mögliche Leistungsparameter für derartige IoT Konstellationen, bei denen zwischen NB (Narrow Band) IoT und WB (Wide Band) IoT sowie zwischen Indoor und Outdoor Betrieb unterschieden wird. Für die Abschätzung eines möglichen Indoor Betriebs haben wir eine Zusatzdämpfung von 20 dB angesetzt. Die verfügbaren Datenraten sinken natürlich, da die Kanalbandbreite entsprechend reduziert werden muss. Hier liegt die Grenze des Machbaren. Für größere Indoor-Dämpfungen ist weder mit Satellitentechnik noch terrestrischer Technik ein Betrieb möglich.

Terminal Typ	Frequenz Band	Downlink			Uplink		
		Antennen Gewinn [dBi]	Max. Kanal Bandbreite [MHz]	Maximale Datenrate [Mbit/s]	EIRP [dBm]	Kanal Bandbreite [MHz]	Maximale Datenrate [Mbit/s]
NB IoT Outdoor	C oder niedriger	0	1	1	23	0,1	0,1
NB IoT Indoor	C oder niedriger	0	0,1	0,01	23	0,01	0,01
WB IoT Outdoor	C, Ku/Ka	0	10	10	23	1	1
WB IoT Indoor	C	0	0,5	0,5	23	0,01	0,01

**Bild 85:** Mögliche Leistungsparameter für IoT Anwendungen  
(Reserve für Deep Indoor Coverage: 20 dB)



**Bild 86:** Beispiele von IoT Terminalkonfigurationen  
Quellen: L33Tech, Myriota, Satixfy, HiSky, Kepler

## 7.5 Autonomes Fahren

Wie schon in Kapitel 1.3 dargestellt gehört die Anwendung „autonomes Fahren“ zu den anspruchsvollsten Anwendungen für mobile Breitbandkommunikation. Die Akzeptanz derartiger Innovationen wird wesentlich vom realistisch erreichbaren Sicherheitslevel abhängen. Dieser muss deutlich über dem liegen, der heute bei individueller Fahrzeugsteuerung erreicht wird. Systemtheoretisch ist klar, dass dies mit vertretbarem Aufwand nur über mehrfach abgestützte Systeme erreichbar ist. Hier liegt eine weitere Chance für innovative Satellitenkommunikation, die deutlich über den Aspekt „nice to have“ hinausgeht. Hierzu sind politisch/strategisch allerdings holistische Ansätze erforderlich, die vorhandene Investitionen sinnvoll auf die jeweiligen Systeme verteilen und damit optimieren anstatt Einzelsysteme unzulässig asymptotisch zu „tunen“. Eine derartige Vorgehensweise ist aber leider noch nicht die Regel.

Günstig ist dabei die Tatsache, dass sich bei vorhandener Satellitenempfangstechnik im Automobil der Zukunft weitere Anwendungsfälle ergeben, die z.B. auch für terrestrische Netzbetreiber interessant sein können. Hierzu gehört der lückenlose Breitbandzugang im Fahrzeug oder die Verwendung des Fahrzeuges als lokaler Hotspot. Dies ist nicht nur für Privatkunden von Interesse, sondern birgt auch zusätzliches Geschäftsoptimierungspotenzial für Industriebetriebe und Speditionen.

Im Gegensatz zu mobilen Endgeräten und IoT Terminals bieten Fahrzeuge einen weitaus größeren Spielraum für technische Verbesserungen insbesondere im Bereich der Antennen. Verschiedene Flächen der Automobilkarosserie gestatten die Verwendung mittelgroßer Aperturantennen, die allerdings in die Fahrzeuggeometrie integriert werden müssen. Hierbei handelt es sich dann um sog. konforme Antennen, d.h. Antennen, die keine planare sondern eine leicht gekrümmte Apertur aufweisen. Wir untersuchen aber auch den Fall einfacherer Antennen mit entsprechend niedrigerem Gewinn. Für Nutzfahrzeuge gilt das gleiche wie in Abschnitt 7.3.

Terminal Typ	Frequenz Band	Downlink			Uplink		
		Antennen Gewinn [dBi]	Max. Kanal Bandbreite [MHz]	Maximale Datenrate [Mbit/s]	EIRP [dBm]	Kanal Bandbreite [MHz]	Maximale Datenrate [Mbit/s]
High Gain Konform Array, steerable	(C) Ku, Ka	30	500	2000	53	100	200
Medium Gain Konform Array, steerable	(C) Ku, Ka	20	100	400	43	20	20
Low Gain	(C) Ku/Ka	6	20	40	29	1	1
Nutzfahrzeuge Planar, steerable	(C) Ku, Ka	30	500	2000	53	100	200

**Bild 87:** Mögliche Leistungsparameter für Fahrzeuganwendungen



**Bild 88:** Beispiele von Hochgewinn Terminalkonfigurationen in Fahrzeugen  
Quellen: Phasor, Isotropic, Kymeta

## 7.6 Broadband Mobile Access

Wie schon dargestellt stellt dieser Anwendungsfall die größten Anforderungen an ein innovatives Satellitensystem, welches auf einer LEO Konfiguration aufsetzt. Ein Zugang zu diesem Massenmarkt ist nur dann möglich, wenn eine vollständige Kompatibilität zu Standard-Endgeräten aus dem 4G und 5G Umfeld besteht. Wie die Rechnungen in Kapitel 5.2 zeigen, sind die Linkbilanzen für aktuell standardisierte Endgeräte knapp. Dies ist bedingt durch SAR Forderungen, fehlenden Antennengewinn und eine sehr hohe Rauschzahl, die durch die erforderliche Breitbandigkeit der Endgeräte gegeben ist.

Im Rahmen von 5G und der Verwendung von MIMO Verfahren sind hier Verbesserungen zu erwarten [43]. Diese sind aber zunächst nur theoretisch oder für Laborumgebungen nachgewiesen. Wie sich diese Technologien in der Praxis bewähren muss sich noch zeigen. Die erreichbaren Datenraten liegen daher unter denen, die für terrestrische Systeme aktuell vermarktet werden. Die Realität zeigt aber, dass eine durchgehende Abdeckung mit den genannten Leistungsdaten (10 Mbit/s Downlink, 1 Mbit/s Uplink) eine dramatische Verbesserung der Nutzer-Akzeptanz bedeuten würde. Derartige Datenraten sind für die meisten Anwendungen völlig ausreichend, häufig werden diese heute in 4G Netzen deutlich unterschritten. Darüber hinaus besteht immer noch die Möglichkeit einer Carrier Aggregation. Inwieweit eine leichte Erhöhung der EIRP des Endgerätes tolerierbar ist, muss weiter untersucht werden ist aber eher unwahrscheinlich.

Terminal Typ	Frequenz Band	Downlink			Uplink		
		Antennen Gewinn [dBi]	Max. Kanal Bandbreite [MHz]	Maximale Datenrate [Mbit/s]	EIRP [dBm]	Kanal Bandbreite [MHz]	Maximale Datenrate [Mbit/s]
Standard Ue (3GPP)	C, und niedriger	0	10	10	23	1	1
Enhanced Ue Gain, Noise Figure	C und niedriger	6	20	40	29	2	2
MIMO Ue	C, Ku/Ka	offen	offen	offen	offen	offen	offen

Bild 89: Mögliche Leistungsparameter für Mobile Broadband

## 8. Wirtschaftlichkeit

### 8.1 Vorbemerkungen

Der Ansatz, mit Hilfe von LEO Konstellationen weltumspannende Netze aufzubauen ist nicht neu (vgl. [18], [29]). Frühe Projekte sind aber ausnahmslos gescheitert oder müssen subventioniert werden. Dies liegt i.W. an zwei Aspekten: breitbandige Konstellationen erfordern einen enormen Anfangsaufwand (ein generelles Problem einer satellitengestützten Infrastruktur). Die Systeme sind erst ab einem bestimmten Füllungsgrad operationell und erst ab diesem Zeitpunkt skalierbar. Zum anderen waren satellitengestützte Lösungen bisher proprietär und für den jeweiligen Anwendungsfall spezifisch ausgelegt. Mit den Randbedingungen der „New Space Economy“ kann sich das ändern. Aktuelle Konstellationsprojekte [45] haben die technischen Möglichkeiten schon teilweise demonstriert. Ihre Zielwerte für Hardware- und Launch-Kosten müssen noch nachgewiesen werden, in Teilbereichen (vgl. Abschnitt 4) sind aber bereits erhebliche Reduktionen zu erkennen.

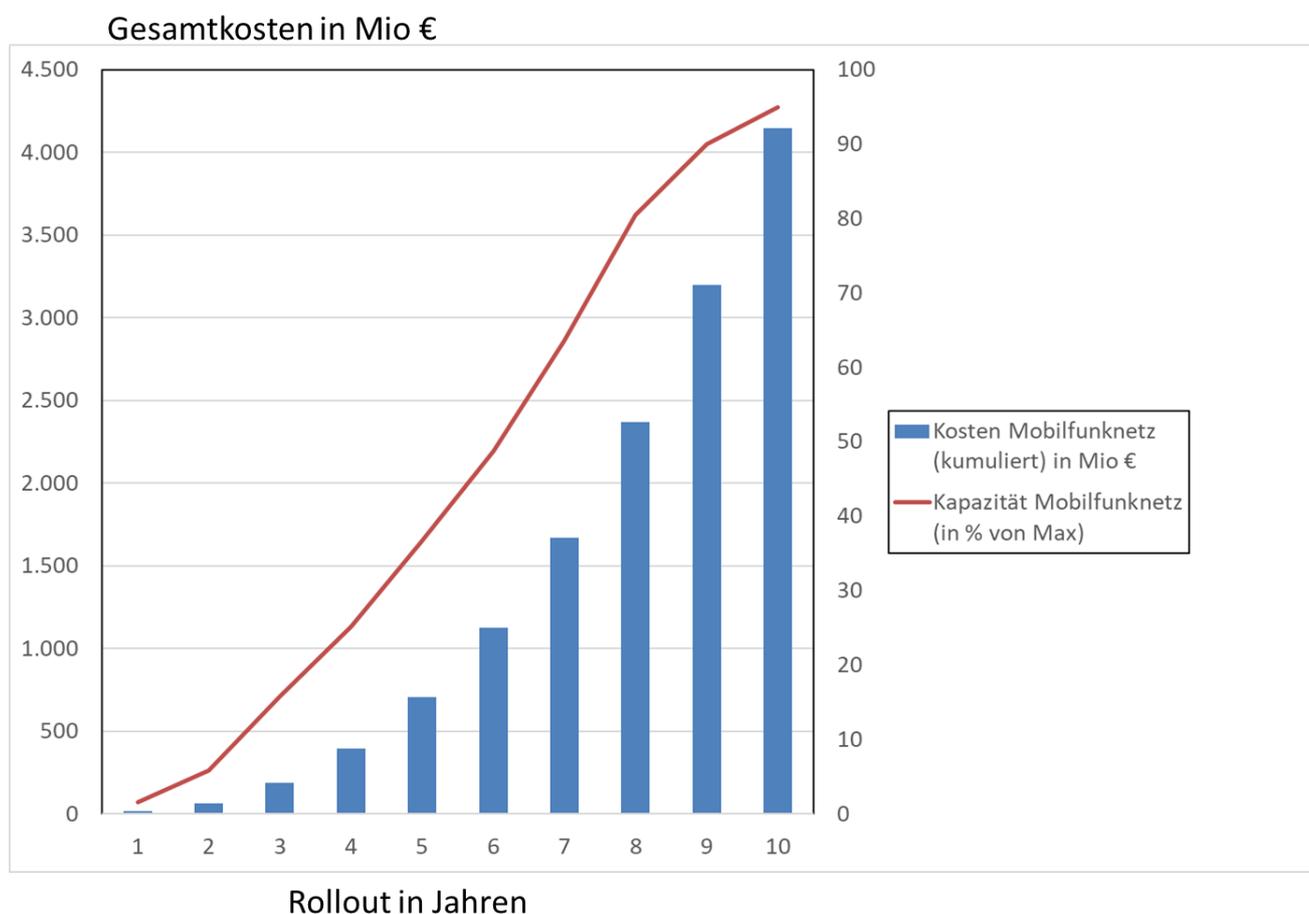
Auf der Habenseite steht natürlich im Erfolgsfall ein gigantischer Markt. Zum ersten Mal wird es möglich, dass auch nicht lokale Diensteanbieter eine eigene Infrastruktur anbieten können. Der Preis hierfür ist hoch, die Chancen aber enorm. Dies stellt für klassische terrestrische Netzbetreiber eine mögliche Bedrohung dar, die noch nicht hinreichend erkannt worden ist. Im Erfolgsfall werden diese neuen Betreiber (sog. OTT's – Over The Top Provider) nicht nur wie heute schon das weltweite Dienstspektrum beherrschen, sondern auch die Infrastruktur. Offensichtlich ist man bereit, dafür auch gigantische Summen vorab zu investieren.

Ob sich dies letztendlich rechnet, ist schwer vorherzusagen. Die übliche Vorgehensweise bei der Abschätzung von Business Cases hat dafür noch zu viele Unbekannte. Trotzdem müssen zur Beurteilung der Chancen dieser neuen Ansätze zumindest einige Aussagen getroffen werden können, die eine Beurteilung der Wirtschaftlichkeit zulassen.

Für eine entsprechende Abschätzung gehen wir daher von einem anderen Ansatz aus. Wir folgen unserem Beispiel für die Kapazitätsberechnung aus Abschnitt 5.5. und betrachten zunächst die Kosten für das optimale Mobilfunknetz, die sich aus dem erforderlichen Mengengerüst und zugehörigen Marktpreisen über den Aufbauzeitraum für die Netzkomponenten und den Betrieb ergeben. Das Mobilfunknetz wird dabei für einen bestimmten Abdeckungsgrad (kleiner als 100 %) dimensioniert. Wie schon dargestellt, kann eine entsprechend dimensionierte Konstellation nur einen geringen Prozentsatz der Kapazität des terrestrischen Netzes abdecken (z.B. genau den, der zur Erreichung einer vollen Abdeckung notwendig wäre). Mit Hilfe aktueller Kostenschätzungen im Rahmen der New Space Economy und ihrer weiteren zeitlichen Entwicklung kann dann ein zugehöriger Systemansatz abgeschätzt werden, der natürlich nicht nur für das betrachtete Gebiet gilt, sondern global verfügbar ist.

## 8.2 Kosten terrestrischer Infrastruktur

Die Abschätzung der Kosten der terrestrischen Infrastruktur kann wegen der Erfahrung mit dem Rollout von Mobilfunknetzen und den aktuellen Daten der Netzbetreiber ziemlich genau erfolgen. Die Infrastrukturkosten setzen sich aus den Hardware- und Installationskosten der Basisstationen, der Zubringerlinks (Glasfaser oder Richtfunk) und der Betriebskosten zusammen. Die Kosten für die Frequenzlizenzen sind dabei noch nicht eingerechnet. Das Hardware-Mengengerüst der Basisstationen ergibt sich aus den Kapazitätsberechnungen wie in Bild 61 und 62 dargestellt. Die Kosten für den Backhaul werden nach Benchmarks von Netzbetreibern als gewichteter Mittelwert einer Glasfaser oder Richtfunkverbindung angenommen. Die Betriebskosten sind für die verschiedenen Zelltypen ebenfalls gut bekannt. Für alle Kostenbeiträge werden über eine Installations- und Betriebsdauer von 10 Jahren marktgängige Kostensenkungen angenommen. Insbesondere die Betriebskosten sinken dabei stärker als die Hardwarekosten; dies ist durch die fortschreitende Automatisierung (Selbstorganisation) der Netze bedingt.



**Bild 90:** Kosten und Kapazitätsverlauf terrestrischer Mobilfunkinfrastruktur (Beispielnetz)

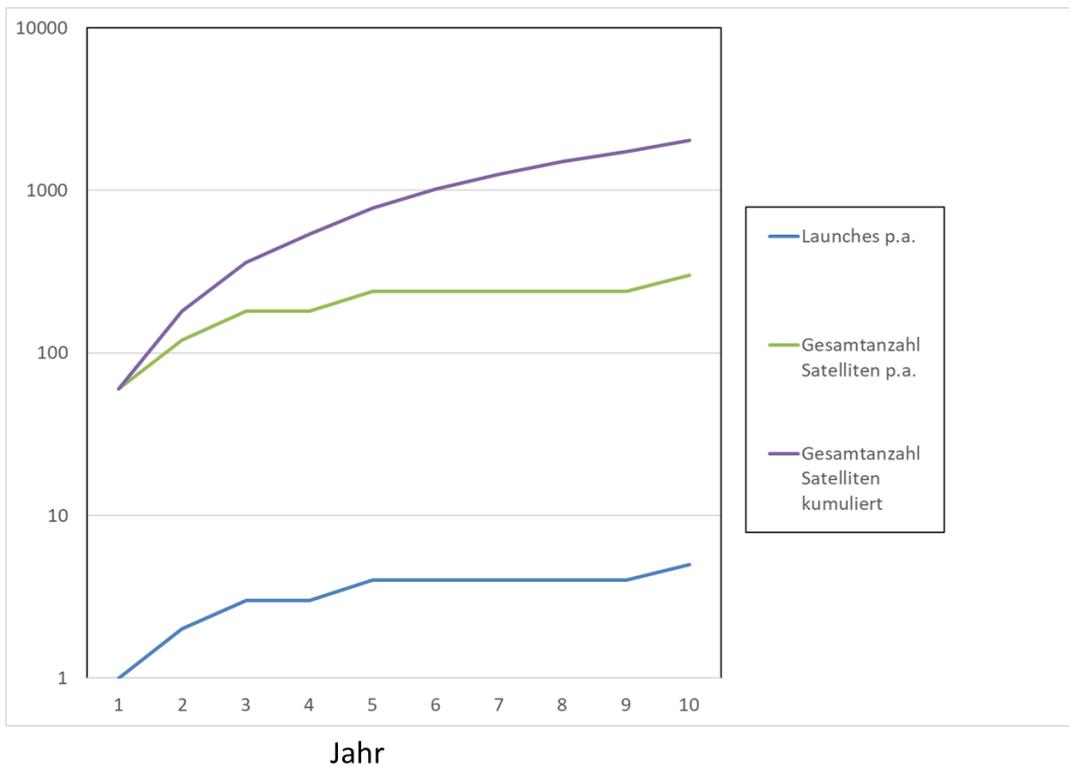
Für unser Beispielnetz im Rhein-Ruhr Gebiet ergeben sich dann bei optimalem Ausbau wie in Bild 61 angedeutet kumulierte Gesamtkosten wie in Bild 90 dargestellt. Für einen Vergleich mit realen Investitionen von Netzbetreibern muss berücksichtigt werden, dass der Ausbau aus wirtschaftlichen Gründen in der Regel suboptimal erfolgt, die Investitionen demnach unter diesem Wert liegen, was zu der bekannten Kundenunzufriedenheit führt. Klar zu erkennen ist in jedem Fall, dass selbst bei Verwendung von Mikrozellenkonzepten die Kapazität ab einem bestimmten Ausbaugrad nicht mehr mit den Investitionen wächst wie in der ersten Phase des Rollouts sondern in eine Sättigung geht. Dieser Effekt in Zusammenhang mit den durch die Ausbreitungsbedingungen gegebenen Gebieten ohne Signal (Funklöcher) ist ein klarer Hinweis darauf, dass das Schließen von letzten Versorgungslücken mit terrestrischer Technik sehr unwirtschaftlich ist. Es ist zu erkennen, dass ein Mobilfunkausbau mit hohem Abdeckungsgrad auf Deutschland hochgerechnet, in ähnliche Kostenregionen vorstößt wie sie vom leitungsgebundenen Ausbau her bekannt sind. Es gibt dabei einen gewissen Synergieeffekt, da der Glasfaserausbau gleichzeitig als Backhaul für die Mobilfunkstationen genutzt werden muss. Dieser ist aber beschränkt, da die Standorte für Mobilfunkstation in der Regel nicht mit Hausanschlüssen zusammenfallen. Daher ist es interessant, zu untersuchen, wie sich ein innovatives Satellitenkommunikationssystem hier einordnet.

### 8.3 Konstellationen und Skalierbarkeit

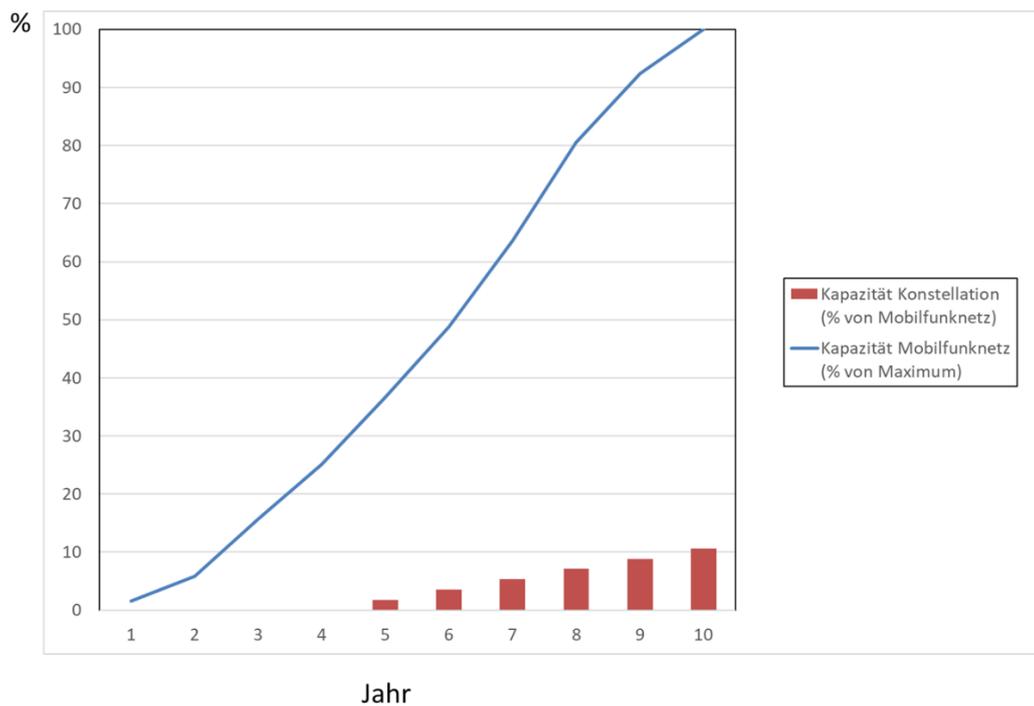
Konstellationen und insbesondere große Konstellationen haben eine ähnliche Komplexität wie ein terrestrisches Kommunikationsnetz. Die Systeme sind skalierbar, die zugehörigen Kosten können daher einen weiten Bereich überstreichen. Für unsere Betrachtungen gehen wir wieder von einer Beispielkonfiguration aus, die bei optimaler Abdeckung ca. 5 – 10 % der Kapazität des terrestrischen Netzes bereitstellen kann (siehe Kapitel 5.5). Auch hier betrachten wir einen Berechnungszeitraum von 10 Jahren.

Referenzszenario	Parameter
Gesamtanzahl Satelliten	2040
Satelliten pro Launch	60
Anzahl Launches p.a.	1 - 5
Kapazität pro Satellit [Gbit/s]	20
Max. Anzahl sichtbarer Satelliten	6

Bild 91: Grundannahmen Beispielkonfiguration



**Bild 92:** Rollout der Beispielkonfiguration



**Bild 93:** Kapazitätsverlauf bei zeitlich parallelem Ausbau

Aufgrund der Eigenschaften einer Konstellation ist ein lückenloser Betrieb mit einer reduzierten Kapazität in etwa nach der Hälfte der Ausrollzeit zu erwarten. In unserem Beispiel ergibt sich dieser Wert aufgrund der gewählten Rolloutstrategie, ein früherer Einsatzbereich kann natürlich durch eine entsprechend aggressivere Strategie erreicht werden. Ein wichtiger Parameter für Rollout und Gesamtkosten ist die Anzahl der Satelliten, die mit einem Start in den Orbit gebracht werden können. Hier orientieren wir uns an dem kürzlich gesetzten Benchmark für die Starlink Konstellation.

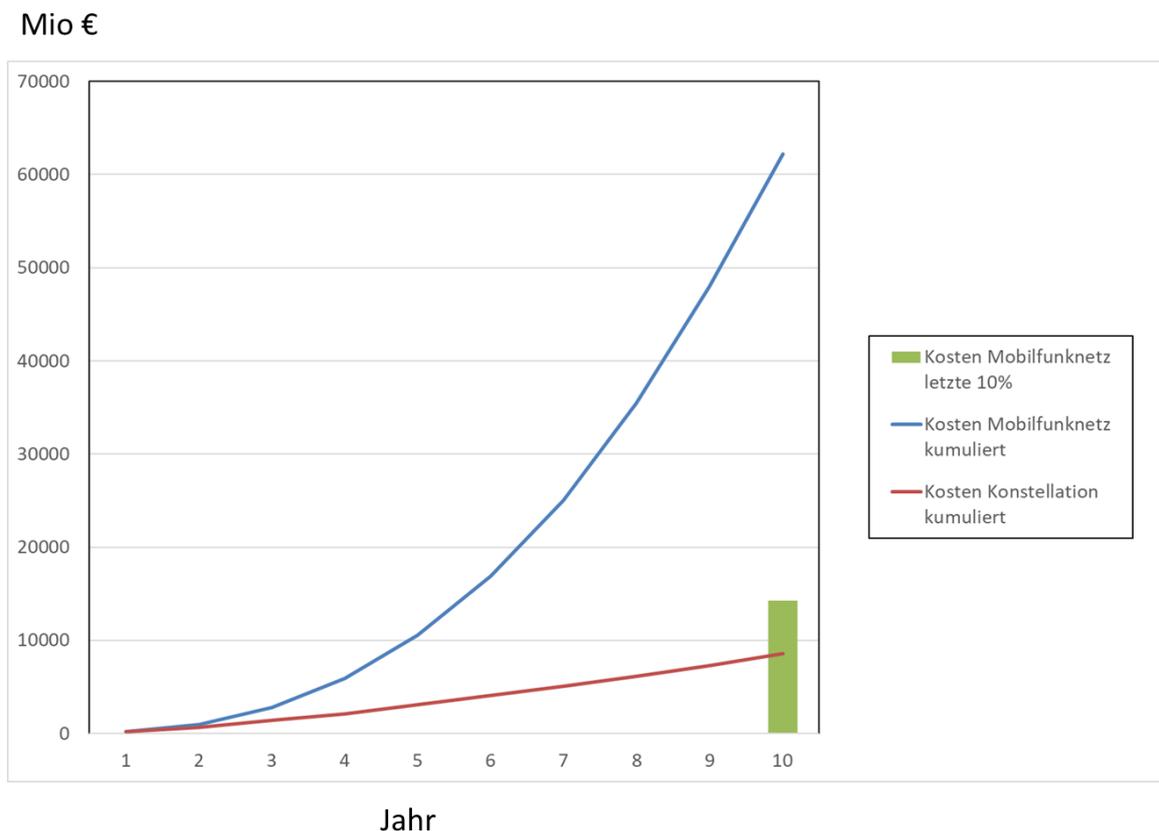
Basierend auf diesem Mengengerüst können nun (konservative) Abschätzungen für den Kostenverlauf und die Gesamtkosten einer Konstellation gemacht werden, die die angegebene Kapazität bereitstellen kann. Wir verwenden hierfür einen entsprechend dimensionierten HTS LEO wie in den Abschnitten 5.4 und 5.5. dargestellt. Für die Intersatellitenverbindungen und die Feederlinks verwenden wir optische Technologien. Die benötigte Anzahl wurde über die Kapazitäten im Netz abgeschätzt. Für Betriebskosten werden feste Prozentwerte, für Kostenreduktion der Hardware und Launches konstante prozentuale Reduktionen pro Jahr angesetzt.

Parameter	Referenzszenario
Kosten einzelner Satellit [Mio €] (incl. 3 ISL)	2
Kostenreduktion p.a. [%]	5
Kosten einzelner Launch [Mio €]	40
Kostenreduktion p.a. [%]	5
OPEX Gesamtsystem [% von Hardware]	30
Anzahl Satelliten pro Cluster	5
Anzahl Feeder Links pro Cluster	1
Kosten Feeder Link [Mio €]	2
Kostenreduktion p.a. [%]	5

Bild 94: Annahmen für Kostenrechnungen

Die Gesamtkosten einer Konstellation mit den genannten Parametern können nun den Kosten eines terrestrischen Mobilfunkausbaus direkt gegenübergestellt werden. Hierbei ist natürlich zu berücksichtigen, dass die Konstellation nicht nur das ausgesuchte Teilgebiet abdeckt, sondern global verfügbar ist. Für unsere Betrachtungen konzentrieren wir uns nur auf eine national verfügbare Konstellation und rechnen das betrachtete Gebiet auf die gesamte Bundesrepublik hoch. Rein flächenmäßig ergibt sich dabei ein Faktor von 28, wir verwenden aber einen geringeren Faktor (15), da nicht alle Regionen die gezeigte Bevölkerungsdichte aufweisen. Der Ansatz ist aber in jedem Fall konservativ.

Es zeigt sich auch schon in diesem rein nationalen und konservativen Fall, dass die Gesamtkosten einer passenden Konstellation zur Abdeckung von bis zu 10% des verfügbaren Mobilfunknetzes deutlich geringer sind, als eine entsprechende terrestrische Ergänzung. Die Relationen werden naturgemäß noch deutlich attraktiver, wenn globalere Anwendungen und zusätzliche Use Cases betrachtet werden. Die notwendigen Investitionen in unserem Fall bewegen sich dabei in den gleichen Größenordnungen, wie sie für aktuelle Großkonstellationen kommuniziert werden. Dies zeigt erneut die Attraktivität derartiger Lösungen für globale Akteure (OTT – Provider). Gleichzeitig bedeutet dies aber auch, dass terrestrische Mobilfunknetze nicht obsolet werden, sondern vorteilhaft mit Satellitenkommunikation ergänzbar sind.



**Bild 95:** Vergleich Infrastrukturinvestitionen (hochgerechnet auf Deutschland)

In unserer Rechnung zeigt sich eindrucksvoll, dass die Gesamtkosten der angenommenen Konstellation nur in etwa die Hälfte eines Mobilfunknetzausbaus oberhalb von 90% ausmachen. Eine Ergänzung des terrestrischen Netzes mit Satellitenkommunikation trägt also nicht nur zu einer besseren Kundenzufriedenheit bei, sondern ist auch wirtschaftlicher.

## 9. Zusammenfassung, Schlussfolgerungen

Innovative Lösungen der Satellitenkommunikation haben ein enormes Potenzial, das noch nicht hinreichend auf allen gesellschaftlichen Ebenen erkannt wird. Insbesondere Konstellationen niedrigfliegender Satelliten mit hoher Kapazität sind eine perfekte Ergänzung zu bestehenden und weiter auszubauenden Mobilfunknetzen. Sie ermöglichen aus offensichtlichen physikalischen Gründen eine sehr viel bessere Flächenabdeckung. Diese ist für alle Anwendungen der Mobilkommunikation höchst wünschenswert und in einigen Fällen sogar zwingend. Ohne eine nahtlose Abdeckung werden nicht alle modernen Anwendungen in der Form realisierbar sein, wie sie aktuell vermarktet werden.

Derartige Lösungen sind definitiv kein Ersatz für terrestrische Netze sondern eine höchst sinnvolle Ergänzung. Für die hierzu erforderlichen zusätzlichen Infrastrukturinvestitionen sind keine zusätzlichen Mittel erforderlich. Der Aufwand ist wie wir gezeigt haben geringer als der geplante und versprochene höchst ineffiziente Ausbau der terrestrischen Netze für die letzte Meile. Dies gilt schon auf nationaler Ebene. Da Konstellationen aber global verfügbar sind, ergeben sich darüber hinaus weitere Anwendungsfälle, die die Investitionen zusätzlich rechtfertigen können.

Diese Gegebenheiten sind weltweit erkannt worden und entsprechende Aktivitäten wurden gestartet. Dies sind zum einen privat finanzierte Initiativen, die einen globalen Bypass zu terrestrischen Netzen anstreben. Zum anderen sieht auch die Politik in manchen Ländern die enormen Chancen alternativer Technologien. Hierdurch können zum einen innovative digitale Technologien besser und effizienter realisiert werden, zum anderen entstehen neue Wertschöpfungsketten für Unternehmen, die die neuartige Infrastruktur entwickeln und aufbauen.

Dieser Beitrag will zum besseren Verständnis und zu einer besseren Akzeptanz für die neue Satellitentechnik beitragen. Wie immer bei Paradigmenwechseln sind die Hürden für ein entsprechendes Umdenken hoch – man denke nur an eine ähnliche Problematik wie bei der Entwicklung alternativer Antriebe in der Automobilindustrie. Zum Umdenken gibt es aber keine andere Alternative als das Zurückfallen hinter andere Wirtschaftssysteme, die die Zeichen der Zeit besser erkannt haben.

## 10 Literaturnachweise

- [1] BMVI, Bericht der Ethik – Kommission Autonomes und vernetztes Fahren [www.bmvi.de](http://www.bmvi.de), Juni 2017
- [2] NTT Data: Wenn das Auto die Kontrolle übernimmt – Ein Blick in die Zukunft des Autonomen Fahrens, [www.nttdata.de](http://www.nttdata.de)
- [3] NTT Data: Autonomes Fahren – Technische Voraussetzungen, [www.nttdata.com](http://www.nttdata.com)
- [4] C. E. Shannon, A Mathematical Theory of Communication  
Bell System Technical Journal, October, 1948
- [5] NASA/TP-2018-220027; Small Spacecraft Technology State of the Art  
Small Spacecraft Systems Virtual Institute, Ames Research Center, 2018
- [6] Panter, P.F., Modulation, Noise and Spectral Analysis; McGraw Hill, 1965
- [7] 5G Waveform Candidates; Application Note 6.2016-1MA271\_Oe, Rohde&Schwarz
- [8] Nomor Research; 5G Frame Structure; Application Note, August 2017
- [9] Onurcan Iscan et. al.: A Comparison of Channel Coding Schemes for 5G Short Message Transmission; Conference Paper GLOCOMW, 2016
- [10] Qualcomm Beamforming Demo; <https://www.youtube.com/watch?v=WKY9zOY1aH4>
- [11] Remcom Beamforming Demo; <https://www.youtube.com/watch?v=LAsQXBXrviQ>
- [12] Qualcomm: Introducing the QTM052 Antenna Module (online)
- [13] 5GPP Architecture Working Group; View on 5G Architecture; V 2.0, Dec. 2017 (online)
- [14] Breitbandverfügbarkeit in Deutschland (Stand Mitte 2018); TÜV Rheinland/BMVI
- [15] Udo Backhaus; Newton und die Keplerschen Gesetze; Vorlesung Himmelsmechanik, Vorlesungsskript Universität Duisburg (2003), Online

- [16] UCS Satellite Database;  
<https://www.ucsusa.org/nuclear-weapons/space-weapons/satellite-database>
- [17] STK Fundamentals, Analytical Graphics Inc., [www.agi.com](http://www.agi.com)
- [18] Dr. Lloyd Wood, Introduction to Satellite Constellations, Cisco Guest Lecture, ISU Summer Session 2006 (online).
- [19] Harri Saarnisaari; Integration of 5G and Satcom; 6G Wireless Symposium IEEE 5G Summit; Levi, Finland, March 24-26, 2019
- [20] 3GPP TR 38.811 (V15.0.0), June 2018  
Technical Specification Group Radio Access Network  
Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN)  
(Release 15)
- [21] 3GPP TR 38.821 (V0.4.0), March 2019  
Technical Specification Group Radio Access Network  
Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN)  
(Release 16)
- [22] Emil Björnson, Jakob Hoydis and Luca Sanguinetti (2017), “Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency”, Foundations and Trends® in Signal Processing: Vol. 11: No. 3-4, pp 154-655. <http://dx.doi.org/10.1561/20000000093>
- [23] ETSI Technical Report ETR 093, September 1993, Ref.: DTR/SES-05007  
Possible European standardization of certain aspects of Satellite Personal Communications Networks (Phase 1 Report)
- [24] William P. Osborne, Yongjun Xie; Erik Jonsson School of Engineering and Computer Science; University of Texas, Dallas, IEEE 0-7803-5554-7/99
- [25] Kymeta Corporation; SkyWay Data Sheet (online)
- [26] Doreet Oren; Gilat Satellite Networks; Satellite Based Cellular Backhaul: Myths and Facts; White Paper Gilat, May 2018 (online)
- [27] <http://www.informationszentrum-mobilfunk.de/artikel/statistik-zur-zahl-der-funkanlagenstandorte-in-deutschland>

- [28] <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/de/2018/09/Network-for-the-Sky-Airbus-successfully-tests-stratospheric-4G-5G-defence-communications.html>
- [29] Lim et al.: Good Technology, Bad Management: A Case Study of the Satellite Telephone Industry; Journal of Information Technology Management, Vol XVI, No. 2, 2005
- [30] Onireti, O., Imram, M.A.; Role of Satellite Communication in 5G Ecosystem; Perspectives and Challenges; Satellite Communications in the 5G Era; The Institution of Engineering and Technology; University of Glasgow, ISBN 9781785614279, August 2018
- [31] LightSquared: A Bitter Bankruptcy, A Case Study; 2016 TMA Distressed Investing Conference, Las Vegas (online)
- [32] CEPT-ECC Report SE(18)040A2; Compatibility and sharing studies related to Space-X NGSO satellite system operating in the FSS bands 10.70 - 12.75 GHz and 14.00 – 14.50 GHz (online)
- [33] Mihai Albulet; Space-X V-Band NGSO Satellite System, Attachment A; Space Exploration Technologies Group, March 2017 (online)
- [34] Hans Dodel, Rene Wörfel; Satellitenfrequenzkoordinierung: Regelungen – Linkdesign – Systemtechnik; Springer-Verlag, ISBN 978-3-642-29203-3
- [35] A. Guidotti et. al.; Satellite-enabled LTE systems in LEO Constellations; IEEE ICC 2017; 1<sup>st</sup> International Workshop on Satellite Communications; Paris, France
- [36] Remcom Electromagnetic Simulation Software; Design and Simulation of 28 GHz Beamforming Systems and Antenna Arrays for 5G Network Base Stations
- [37] Divaydeep Sikri, Rajanik Mark Jayasuriya; Satixfy UK Ltd, Farnborough UK Multi-Beam Phased Array with Full Digital Beamforming for Satcom and 5G, April 2019 (online)
- [38] Irfan Ahmed et.al.; A Survey on Hybrid Beamforming Techniques in 5G: Architecture and System Model Perspectives; IEEE Journal of Latex Class Files, Vol XX, NO. X, August 2018 (online)
- [39] James R. Johnson; Vortis Technology, Inc. San Carlos USA, ANSYS Inc. More gain Less Pain, Ue Antenna Design.

- [40] Yoon, Zizung; System Design of Inter-Satellite Communication Mission “S-Net”  
ITU Workshop 2015, Prague
  
- [41] Yoon, Zizung; Frese, Walter; Briess, Klaus; Voigt, Siegfried  
Kleinsatellitennetzwerk S-Net, Verifikation und Flugergebnisse der Intersatelliten-  
Kommunikation  
6. Nationale Konferenz Satellitenkommunikation; Bonn, Mai 2019
  
- [42] Yoon, Zizung; Betz, Dilara  
S-NET – Wenn Satelliten miteinander reden  
Raumfahrt Concret, No. 107, 2/2019, S. 35 ff; Verlag Iniplu 2000, Neubrandenburg
  
- [43] Yiming Huo et al.  
Cellular and WiFi Co-design for 5G User Equipment  
Proc. IEEE 5G World Forum, July 2018, pp. 256-261
  
- [43] <https://artes.esa.int/projects/alix>
  
- [44] <https://artes.esa.int/projects/satis5-0>
  
- [45] Inigo del Portillo, Bruce G. Cameron, Edward F. Crawley  
Dept. of Aeronautics and Astronautics, MIT, Cambridge, USA  
A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to  
Provide Global Broadband  
69<sup>th</sup> International Astronautical Congress (IAC), Bremen, Germany, 1-5 Oct- 2018  
IAC-18-B2.1.7