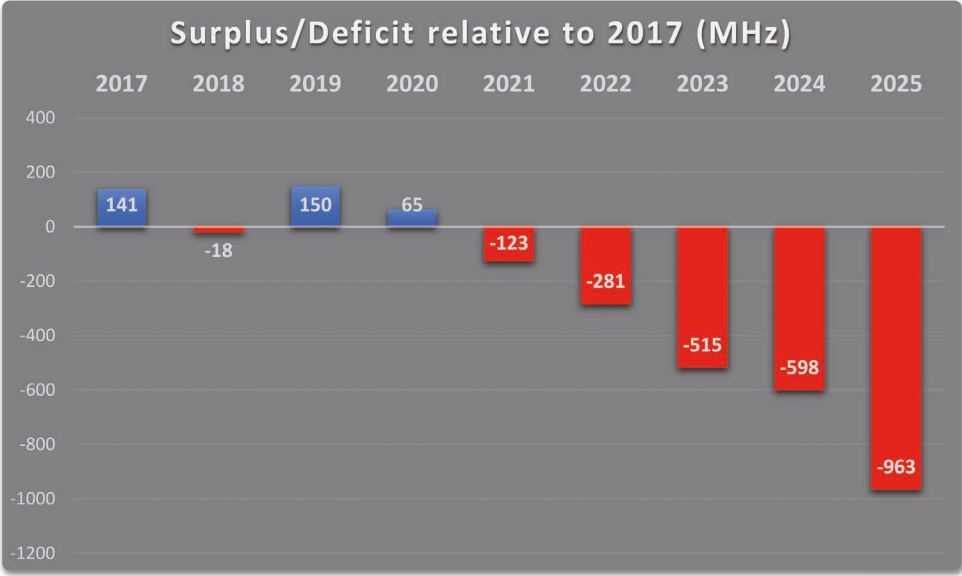


Maximierung der Spektraleffizienz bei 5G



Frequenzsituation im Rückblick (Überschuss und Defizit)

Quelle:
White Paper „Maximizing Spectral
Efficiency to Overcome A Spectrum
Deficit in a 5G World“
Resonant
www.resonant.com

übersetzt und gekürzt von FS

Es gibt eine Reihe von Techniken und Technologien, mit denen sich die Netzwerkkapazität besser verwalten und das Problem durch eine Steigerung der Spektraleffizienz verbessern lässt. Die Spektraleffizienz ist ein Maß dafür, wie effektiv die nutzbare Bandbreite, die aus einem bestimmten Frequenzband gewonnen wird, genutzt wird. Ihre Verbesserung ist eine Funktion des Funkprotokolls und verschiedener HF-Technologien, darunter auch HF-Filter.

Die Bedeutung von Frequenzen

Mobilfunkbetreiber erwerben die Lizenz für die Übertragung von Funksignalen über bestimmte Frequenzen und hindern andere Betreiber oder Unternehmen daran, diese Frequenzen in einem bestimmten geografischen Gebiet zu nutzen.

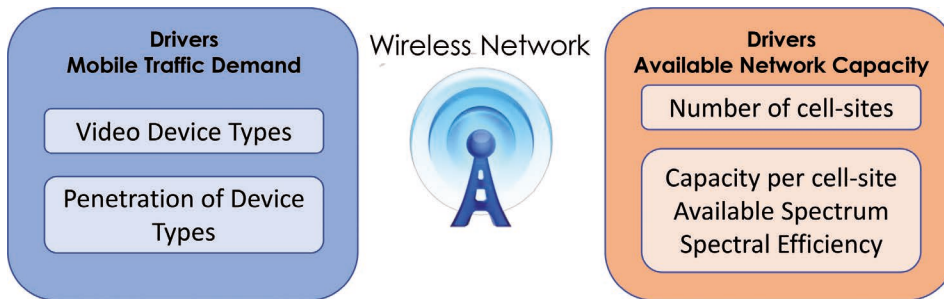
Die Lizenzen werden in einem Auktionsverfahren vergeben, das dem Staat Einnahmen in Milliardenhöhe beschert. Diese Auktionen brachten meist Einnahmen weit über den optimistischsten Schätzungen. Bezieht man die Kosten auf 1 MHz, so kommt man auf mehr als 65 Millionen US-Dollar pro MHz (Bild 1). Die extrem hohen Kosten bedeuten, dass die entgangenen Opportunitätskosten einer einprozentigen Verschlechterung der Frequenzeffizienz aufgrund schlechter Filterung und erhöhter Interferenzen Bandbreite im Wert von über 1 Milliarde US-Dollar verschwenden würden.

Prognose eines Frequenzdefizits

Der zukünftige Frequenzbedarf und die Trends lassen sich als Funktion der aktuellen/vergangenen Frequenznutzung für mobiles Breitband verstehen. Resonant hat ein Modell entwickelt, das die Netto-Frequenzverfügbarkeit auf der Grundlage des Wachstums des globalen drahtlosen Datenverkehrs prognostiziert. Dieser Bericht sagt einen rasch steigenden drahtlosen Datenverbrauch voraus, was eingetreten ist.

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Data Growth (Exabytes/month)	12	19	29	41	57	77	102	135	175
Data Growth (Proportional)	100%	158%	242%	342%	475%	642%	853%	1122%	1459%
Cell Sites (US)	323,448	349,344	395,562	416,762	436,762	456,762	476,762	496,762	516,762
Traffic per site growth	100%	147%	198%	265%	352%	454%	579%	731%	913%
Average Spectral Efficiency (bps/Hz/sector)	1.89	1.87	2.04	2.39	2.49	2.55	2.68	2.83	2.88
Adjusted Growth	100%	99%	108%	127%	132%	135%	142%	150%	153%
Spectral Efficiency Adjusted Traffic per site	100%	148%	183%	209%	267%	336%	407%	487%	599%
Cellular Spectrum Required (2017 start)	328.3	487	602	687	875	1103	1337	1600	1965
Licensed Spectrum Available (excl mmWave)	469	469	752	752	752	822	822	1002	1002
Surplus/Deficit relative to 2017 (MHz)	141	-18	150	65	-123	-281	-515	-598	-963

Bild 1: Resonanzmodell der Bandbreitenverfügbarkeit bis dato



Die Netzwerkkapazität hängt von der Spektraleffizienz der Mobilfunktechnologien ab, die, wie in Bild 3 und der folgenden Formel ausgedrückt, von neuen Funktechnologien abhängt:

$$\text{Spectral efficiency} = \frac{\text{Throughput, bps}}{\text{Channel (Band) Bandwidth, Hz}}$$

Es ist klar, dass angesichts der erheblichen Kosten für den Erwerb von Frequenzen und des Anstiegs des Datenverbrauchs eine möglichst effiziente Nutzung der Frequenzen von entscheidender Bedeutung ist. Wie Bild 4 zeigt, sind die Kosten für den Erwerb lizenzierten Frequenzen in den letzten Jahren dramatisch gestiegen.

Die Spektraleffizienz ist für Mobilfunkbetreiber von entscheidender Bedeutung, um ihre Frequenzen möglichst kosteneffizient zu nutzen. Die Spektraleffizienz definiert, wie effektiv eine bestimmte Frequenz ein Datenpaket transportiert (Bits pro Sekunde pro Hertz), und hängt von neuen Funktechnologien ab, die von 3GPP und anderen Normungsgremien definiert sind.

Zu den technologischen Innovationen für eine verbesserte Spektraleffizienz von 5G gehören bessere HF-Filter, mMIMO und eine skalierbare Frequenzstruktur zur Optimierung der „Packung“ in das verfügbare Spektrum. Diese Technologien verbessern die Spektraleffizienz, indem sie die Verarbeitung deutlich größerer Bandbreiten über dieselbe Infrastruktur ermöglichen und so die Bereitstellungskosten für Mobilfunknetzbetreiber senken.

$$\text{Network Capacity} = \frac{\text{Spectral Efficiency Multiplier}}{\text{New Radio technologies eg massive MIMO, coding schemes}} + \frac{\text{Spectral Capacity Multiplier}}{\text{More spectrum: Licensed, Unlicensed, Shared}} + \frac{\text{Spectral Reuse Multiplier}}{\text{Densification, including small cells}}$$

Bild 3: Netzwerkkapazität als Summe dreier Komponenten

Das Modell wurde angepasst, um die prognostizierte zusätzliche Netzwerkkapazität durch den Ausbau der Mobilfunkstandorte und technologische Verbesserungen, die zu einer höheren Spektraleffizienz führen, zu berücksichtigen. Es handelt sich hierbei jedoch um eine Makrobetrachtung des Frequenzbedarfs, der je nach Standort, Netzwerkkapazität, Datenübertragungsgeschwindigkeit und Tageszeit erheblich variieren kann. Dieses Modell zeigt jedoch deutlich den dramatischen Anstieg des Frequenzbedarfs aufgrund des Wachstums des drahtlosen Datenverkehrs.

mmWave-Frequenzen werden in kritischen Engpässen in dicht besiedelten städtischen Gebieten sicherlich helfen, aber die extremen Abdeckungsbeschränkungen schränken natürlich einen flächendeckenden Einsatz ein.

Die entscheidende Gleichung, die Netzbetreiber sowohl kurz- als auch langfristig ausbalancieren müssen, ist die Nachfrage nach Netzwerkkapazität (Bild 2). Die Anzahl der Mobilfunkstandorte ist ein entscheidender Faktor für die Gesamtkapazität des Netzwerks.

Verfügbares Spektrum/ Spektrale Effizienz

Die spektrale Wiederverwendung kann durch eine Verdichtung des Netzes, beispielsweise durch den Einsatz kleiner Zellen, verbessert werden, wodurch dasselbe Spektrum in immer kleineren Bereichen genutzt werden kann. Letztendlich nimmt

die Kapazität ab, da die Interferenzen zwischen benachbarten Standorten mit abnehmender Reichweite zunehmen.

Das löst aber das Problem des gewachsenen Spektrumdefizits nur teilweise. Folglich müssen Mobilfunkbetreiber dringend andere Möglichkeiten finden, um die gesamte drahtlose Datenkapazität zu erhöhen, z.B. durch höhere Investitionen zur Beschleunigung des Ausbaus von Basisstationen und Small Cells, die Auslagerung des Datenverkehrs in unlizenzierte Frequenzbereiche und den Einsatz von Technologien zur Steigerung der Spektraleffizienz wie Massive MIMO (mMIMO) und unlizenzierte 5G-HF-Bänder (5G NR-U), während gleichzeitig die HF-Filterung verbessert wird, um vor zunehmenden Interferenzrisiken zu schützen.

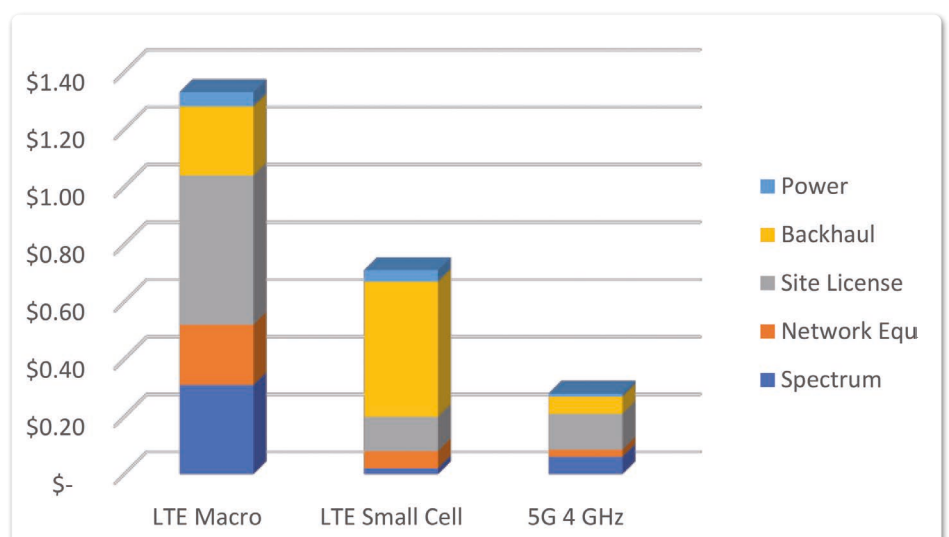


Bild 4: Kostendarstellung

Technologien für Spektraleffizienz

1. mMIMO-Netzwerkausrüstung

mMIMO ist ein Antennensystem mit vielen Antennen an einer Basisstation – von Dutzenden bis zu 100 Antennen. mMIMO bietet eine verbesserte Abdeckung und Kapazität, da mehrere Antennen zu mehreren gerichteten Strahlen kombiniert werden können, die hohe Datenraten ermöglichen. mMIMO verbessert die Spektraleffizienz durch die Verwendung von Raummultiplexverfahren

2. HF-Filter

Für die Realisierung der von 5G- und Enhanced Mobile Broadband (eMBB) Diensten versprochenen Kapazitäts- und Geschwindigkeitsgewinne ist es von entscheidender Bedeutung, das gesamte den Mobilfunkbetreibern zur Verfügung stehende Spektrum mit maximaler Spektraleffizienz zu nutzen. HF-Filter schützen das gesamte Frequenzband vor potenziellen Störsignalen. Für 5G gelten jedoch ganz andere Filteranforderungen als für 4G. Zu diesen neuen Filteranforderungen gehören:

- große Bandbreite (>500 MHz und bis zu 2 GHz)
- hohe Frequenzen (>3 GHz)
- hohe Leistung (zum Ausgleich der schlechten Ausbreitung bei hohen Frequenzen mehr als 30 dBm am Rand des Bandes)

3. Lizenzierte vs. unlizenzierte Frequenzen

Unlizenzierte Frequenzen sind zwar keine Technologie zur Verbesserung der Frequenzeffizienz, erweitern jedoch das für Mobilfunknetzbetreiber verfügbare Frequenzspektrum. Derzeit bilden nicht-lizenzierte Frequenzen die Grundlage für eine Reihe von LANs, wissenschaftliche Anwendungen und Kurzstreckenanwendungen für Verbraucher (WiFi, Bluetooth, Ultra Wideband usw.). Sie haben den Vorteil, dass sie für alle kostenlos nutzbar sind, aber im Vergleich zu lizenzierten Technologien eine begrenzte Reichweite haben, um Interferenzprobleme zu minimieren (Bild 5). Es gibt keine Garantien für die Dienstqualität und Sicherheit.

Mit 3GPP Release 16 wurde 5G NR-U eingeführt, das die Implementierung von 5G in unlizenzierten Frequenzen ermöglicht und damit den Zugang zu deutlich mehr Frequenzen eröffnet. 5G NR-U kann als eigenständige Konfiguration eingesetzt oder „verankert“ werden, wobei die niedrigere Frequenz als „Anker“ eine Abdeckung insbesondere für wichtige Overhead-Signale gewährleistet.

Zusätzliche Frequenztechnologien für 5G-Implementierungen

Neben den Technologien zur Spektrumseffizienz stehen weitere Techniken zur Verfügung, mit denen Netzbetreiber Dienste für Nutzer bereitstellen und ihre wertvollen Frequenzressourcen verwalten können:

Carrier Aggregation (CA)

Da die Gesamtfrequenz die Datenübertragungsrate für Nutzer bestimmt, können Frequenzteile aus verschiedenen Bändern aggregiert oder kombiniert werden, um die Datenübertragungsrate zu erhöhen (Bild 6). Diese Technik wurde in 4G bereits in großem Umfang eingesetzt, um die Datenübertragungsraten zu erhöhen und sollte in 5G noch stärker zum Einsatz kommen.

Dynamische Frequenzfreigabe (DSS)

DSS ist eine Übergangstechnologie, die zwar keine Kapazitätssteigerung bewirkt, aber das Problem der 5G-Abdeckung mit niedrigen Frequenzen löst, die auch für 4G genutzt werden und damit 5G beschleunigt. Auch hier werden Funkzugangstechnologien auf separaten Frequenzblöcken bereitgestellt – wie dies bei 2G, 3G und 4G der Fall war.

Die Umnutzung von Frequenzen mit DSS ist über Nacht möglich. DSS ermöglicht den Einsatz von 4G und 5G im gleichen Frequenzband und verteilt die Frequenzressourcen dynamisch zwischen 4G und 5G je nach Nutzerbedarf.

Zeitduplexverfahren (TDD)

Um die Flexibilität zu erhöhen und die Frequenznutzung effizienter zu gestalten, wird in 5G das TDD-Verfahren verwendet im Gegensatz zum alternativen Frequenzduplexverfahren (FDD), bei der für jeden Kanal völlig unterschiedliche Frequenzen verwendet werden. Durch Ändern der Zeitschlitzdauer kann die Netzwerkleistung an unterschiedliche Anforderungen und Anwendungsfälle angepasst werden.

Die Verwendung derselben Frequenzen hat jedoch Auswirkungen auf das Interferenzmanagement zwischen benachbarten Standorten. Um das Spektrum möglichst effizient zu nutzen, müssen daher TDD-Netzwerke, die im gleichen Frequenzbereich arbeiten, synchronisiert werden. Basisstationen müssen zu festen Zeitpunkten senden, und alle Geräte sollten nur in festgelegten Zeiträumen senden.

Breitbandfilter

5G und WiFi in Koexistenz ist in der Geschichte der Drahtlostechnologie beispiellos. Die 5G-Bänder n77 und n79 sowie das 5-GHz- und nun auch das 6-GHz-WiFi-Band liegen nahe beieinander. RF-Filter für 4G-Anforderungen sind nicht geeignet. Ein neues Filterdesign ist erforderlich. Sie basieren z.B. auf akustischen Volumenwellen (BAW) oder bestehen aus einer piezoelektrischen Schicht aus einem einzigen Kristall mit einem interdigitalen Wandler aus Metall (IDT) auf der Oberseite. ◀

Unlicensed Spectrum		Licensed Spectrum	
Pros	Cons	Pros	Cons
Easy and quick to deploy	Others can use same frequency	Ability to manage quality of service	Limited spectrum for each operator
Low cost hardware	Difficult to provide widescale coverage	Scalable for nation-wide coverage	Expensive infrastructure

Bild 5: Lizenzierte vs unlizenzierte Bänder

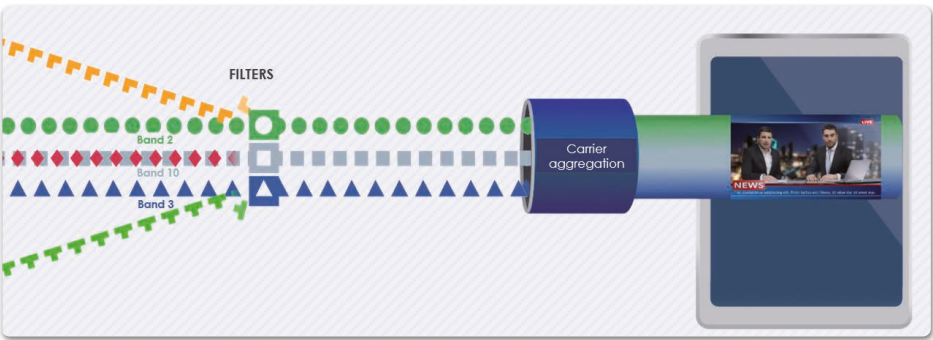


Bild 6: Aggregation mehrerer Frequenzbänder zur Erhöhung der Datenübertragungsraten