Wo liegen die Grenzen der mobilen Kommunikation?

Autor(en): **Hofstetter, Rolf / Tanner, Rudolf**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **103 (2012)**

Heft 7

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-857318

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Wo liegen die Grenzen der mobilen Kommunikation?

Beschränkende Faktoren und technologische Entwicklungen

Die Schweiz hat eine grosse und kontinuierlich wachsende Smartphone- und Tablet-Dichte. Der Bedarf an zusätzlicher Kapazität lässt sich daher gut abschätzen [1]. Um die Smartphone-Nutzer mit einer akzeptablen Datengeschwindigkeit bei Laune zu halten, müssen zusätzliche Basisstationen aufgestellt werden. Da stellt sich auch die Frage nach der höchstmöglichen Datenrate bei mobiler Funkübertragung, die hier für die Übertragung von der Basisstation zum Mobilgerät (Downlink) erörtert wird.

Rolf Hofstetter, Rudolf Tanner

Momentan wird in vielen Ländern das neuste Mobilkommunikationssystem Long Term Evolution (LTE) eingeführt. LTE arbeitet mit verschieden grossen Übertragungsbandbreiten. Die physikalisch unterschiedlich grossen Datenraten werden oft bezüglich ihrer spektralen Effizienz η verglichen. Diese gibt an, wie viele Bits pro Sekunde (bit/s) und pro Herz (Hz) Bandbreite übertragen werden können und hat deshalb die Einheit bit/s/Hz.

Die Leistungsfähigkeit bezüglich der Übertragungsrate kann bei Mobilkommunikationssystemen mit zwei Werten der spektralen Effizienz beschrieben werden:

- spektrale Effizienz η unmittelbar bei der Sendeantenne (Spitzeneffizienz).
- spektrale Effizienz η am Zellenrand (Zellenrandeffizienz).

Die spektrale Spitzeneffizienz ist ein Mass für die maximale Datenrate eines Systems, während die Zellenrandeffizienz aufzeigt, welche Datenrate ein Benutzer am Zellenrand im Durchschnitt erwarten kann. Die Zellengrösse wird entsprechend geplant. Bei LTE beträgt die Spitzeneffizienz 5 bit/s/Hz und die Zellenrandeffizienz 0,05 bit/s/Hz. Die Datenrate beträgt somit am Zellenrand 1 % der maximalen Datenrate. Wie später noch gezeigt wird, ist die Datenrate am Zellenrand immer nur ein Bruchteil der Spitzeneffizienz.

Die schnelle Zukunft

Die nächste Generation der Mobilkommunikationssysteme ist schon in der Vorbereitung. Die International Telecommunication Union (ITU) hat 2008 weltweit die Standardisierungsorganisationen aufgerufen, Entwürfe für ein schnelleres Mobilkommunikationssystem der 4. Generation (IMT-Advanced) einzureichen [2]. Die Standardisierungsorganisation 3GPP arbeitet daher schon am Nachfolger von LTE. Das Ziel von LTE-Advanced ist eine Spitzeneffizienz von 30 bit/s/Hz und eine Zellenrandeffizienz von 0,07 bit/s/Hz [4]. In unmittelbarer Nähe zur Basisstation wird die Datenrate dementsprechend 6-mal und am Zellenrand 1,4-mal grösser sein als bei LTE. Aber ist das schon die Grenze des Möglichen?

Die Grundlagen

Claude E. Shannon hat 1949 die Grenze der Kanalkapazität für eine fehlerfreie Übertragung bestimmt, die sogenannte Shannon-Grenze:

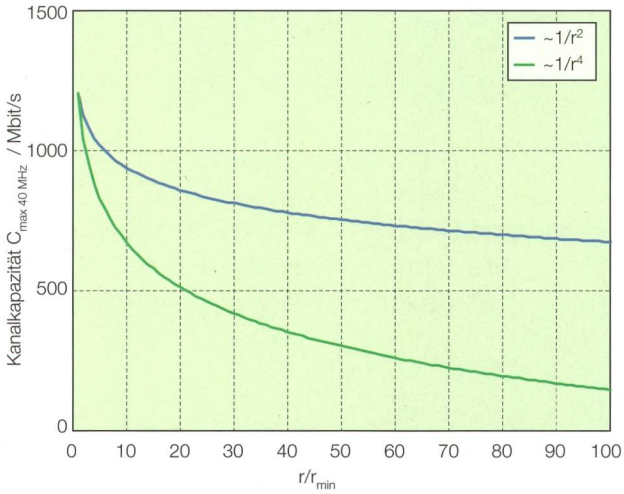
$$C_R < C = B \cdot \log_2\left(1 + \frac{P}{N_0 \cdot B}\right)$$

C_R: Datenrate vom realen System (bit/s),
C: Kapazitätsgrenze nach Shannon (bit/s),
B: Übertragungsbandbreite (Hz),
P: Signalleistung beim Empfänger (W) und
N_0: Rauschleistung pro Hertz (W/Hz).

Für den Funkkanal bedeutet dies, dass die Datenrate zur fehlerfreien Übertragung mit einem Funksystem immer kleiner als die Kapazitätsgrenze nach Shannon ist. Gemäss der Shannon-Grenze ist die Kanalkapazität C durch die Empfangsleistung P und die Bandbreite B bestimmt. Dadurch ist auch die theoretisch erreichbare spektrale Effizienz $\eta = C/B$ bestimmt.

Davon ausgehend, dass die Antenne des Mobilgeräts keine Richtwirkung hat und die Strahlenabsorption durch den menschlichen Körper hier vernachlässigt wird, kann die Empfangsleistung eines Funkempfängers über das beim Empfänger vorhandene Strahlungsfeld berechnet werden.

Die Schweizer NIS-Verordnung legt die maximalen Strahlenbelastungen in der Nähe von Sendeantennen fest. Bei Frequenzen von 2 GHz und mehr (ein typisches LTE-Band liegt bei 2,6 GHz) beträgt



Hofstetter, Tanner

Bild 1 Maximale Kanalkapazität $C_{max\,40\,MHz}$ in Abhängigkeit vom Abstand zur Basisstation.

Hofstetter, Tanner

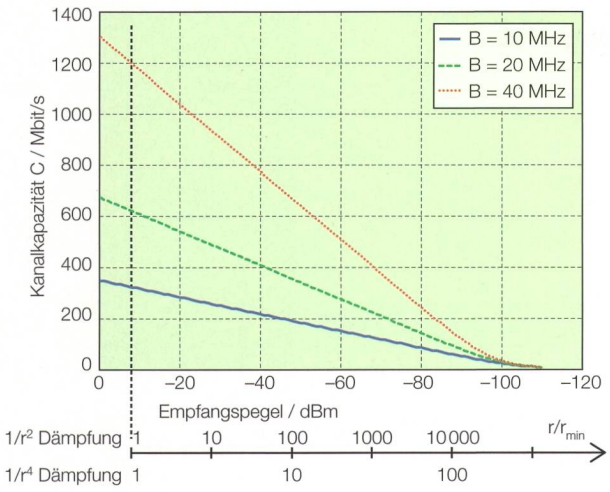


Bild 2 Maximale Kanalkapazität gemäss der Shannon-Grenze für verschiedene Bandbreiten in Abhängigkeit vom Empfangspegel L_e.

der Anlagegrenzwert für die Strahlenbelastung E = 6 V/m bzw. S = 0,096 W/m². Bei tieferen Frequenzen zwischen 10 MHz und 2 GHz ist der Grenzwert kleiner. Sendeanlagen müssen ihre Leistung anpassen, um den entsprechenden Grenzwert nicht zu überschreiten.

Falls nur ein Funksystem am Standort ist, d.h. keine Co-Location mit 3G-Basisstationen, kann damit die maximale Empfangsleistung von $P_{max} = 171\ \mu W$ berechnet werden. Zusammen mit einer angenommenen Übertragungsbandbreite von B = 40 GHz und dem kleinsten (thermischen) Rauschen $N_0 = 4 \cdot 10^{-21}$ W/Hz ergibt sich aus der Shannon-Grenze theoretisch eine maximale Kanalkapazität von $C_{max\,40\,MHz} = 1200$ Mbit/s. Diese Kanalkapazität wird zwischen allen Teilnehmern innerhalb einer Zelle aufgeteilt.

Die maximale Empfangsleistung P_{max} ist jedoch nur in unmittelbarer Nähe (d.h. Distanz r_{min}) zur Basisstation vorhanden. Bei Funksystemen nimmt P_{max} mindestens proportional zu $1/r^2$ ab. Bei Mehrwegausbreitung (z.B. in städtischen Gebieten) erfolgt die Abnahme sogar mit $1/r^4$ oder noch stärker.

Die Kanalkapazität wird somit bei grösseren Distanzen zur Sendeantenne wegen der kleineren Empfangsleistung geringer. **Bild 1** zeigt das Verhalten der maximalen Kanalkapazität $C_{max\,40\,MHz}$ in Abhängigkeit vom Abstand zur Basisstation. Bei 100-fachem Abstand zur Basisstation (verglichen mit dem Minimalabstand r_{min}) beträgt $C_{max\,40\,MHz}$ nur noch 671 Mbit/s (–44 % bei $1/r^2$) bzw. bei Mehrwegausbreitung 144 Mbit/s (–88 % bei $1/r^4$). Für IMT-Advanced werden für verschiedene Zellen unterschiedliche minimale Distanzen vorgegeben: $r_{min} = 3$ m, 10 m, 25 m und 35 m [3]. Dies sind daher beachtliche Kapazitätsverluste, die nur durch die Länge des Funkkanals diktiert werden.

Die maximale Kanalkapazität von $C_{max\,40\,MHz} = 1200$ Mbit/s in unmittelbarer Nähe der Sendeantenne entspricht der vorher erwähnten Spitzeneffizienz von $\eta_{max\,40\,MHz} = 30$ bit/s/Hz.

Die ITU verlangt für das nächste Mobilkommunikationssystem eine Spitzeneffizienz von mindestens 15 bit/s/Hz, was unter dem obigen Wert liegt. Hingegen peilt 3GPP für LTE-Advanced 30 bit/s/Hz an, was unter Berücksichtigung des Schweizer NIS-Grenzwertes der Shannon-Grenze entspricht.

Bild 2 stellt die Kanalkapazität gemäss der Shannon-Grenze für verschiedene Bandbreiten in Abhängigkeit vom Empfangspegel L_e, bzw. in Abhängigkeit vom Abstand r zur Basisstation dar. Die maximale Empfangsleistung $P_{max} = 171\ \mu W$ entspricht einem Empfangspegel von $L_{max} = -7{,}5$ dBm bei minimalem Abstand r_{min}.

Aus **Bild 2** ist ersichtlich: Je weiter wir uns von der Sendeantenne entfernen, desto kleiner ist der Empfangspegel und desto mehr nimmt die maximale Kanalkapazität C_{max} ab.

Leider verringert sich der Empfangspegel nicht langsam und gleichmässig, wenn wir uns von der Sendeantenne entfernen. Vielmehr unterliegt der Pegel starken Schwankungen, deren Änderungsgeschwindigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit abhängt **(Bild 3)**.

Die Pegeländerungen können langsam oder schnell sein, je nachdem, wie schnell sich der Empfänger (Nutzer) bewegt. Aus **Bild 3** ist ersichtlich, dass der Kanal meistens als konstant betrachtet werden kann, wenn sehr kurze Datenpakete gesendet werden (z.B. 2 ms bei HSDPA). Dies bedingt jedoch, dass man den Zeitpunkt kontrollieren kann, wann ein Paket ge-

Hofstetter, Tanner

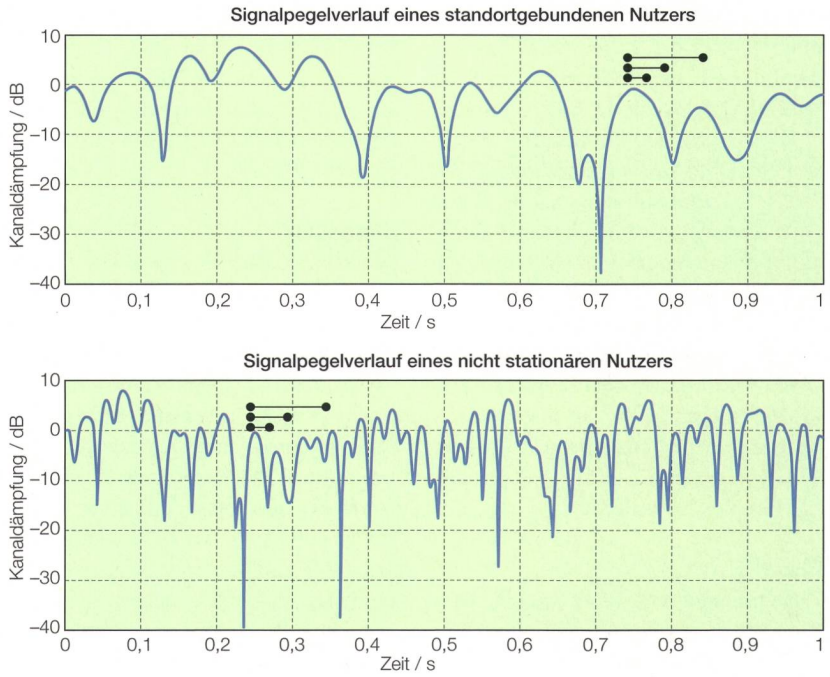


Bild 3 Änderungen des Empfangspegels L_e bei bewegtem Empfänger. Die zwei Beispiele zeigen den Einfluss von Fading auf die Datenpakete verschiedener Dauer auf (100 ms, 50 ms und 25 ms, dargestellt als drei schwarze Balken).

sendet wird. Diese Funktion wurde schon mit UMTS HSDPA eingeführt.

Bei der optimierten Kanalnutzung geht es darum, mittels adaptiver Modulation und Kanalkodierung sowie der MIMO-Technologie möglichst nahe an die Shannon-Grenze heranzukommen [5]. Die adaptive Modulation und Kanalkodierung (Adaptive Modulation & Coding, AMC) ist ein Verfahren, bei dem der Sender (die Basisstation) das Modulationsverfahren und die Fehlerkorrekturmethode regelmässig dem jeweiligen Zustand des Funkkanals zum Gerät anpasst. Dies setzt voraus, dass leistungsstarke Prozessoren in den Empfängern vorhanden sind und ein nicht unerheblicher Teil der übertragenen Bits für die Funkkanalschätzung sowie den Kontrollmechanismus verwendet werden kann. So benötigt man z.B. für eine 4-fache Kanalschätzung bei einem LTE-System mit 2x2 MIMO, 64-QAM, 10 MHz je nach gewähltem Empfängeralgorithmus zwischen 500 und 1500 MIPS [6]. LTE nutzt nicht nur die oben genannten zwei Parameter, sondern auch noch das Frequenzspektrum des Funkkanals, um die Zellenkapazitätsausbeute weiter zu erhöhen.

Massgebend für die theoretisch erreichbare maximale Datenrate bei der Übertragung ist somit das Mittel aus den Kanalkapazitäten (gemäss Shannon-Grenze), die bei der Übertragung der Datenpakete bei den entsprechenden Empfangspegeln vorhanden sind.

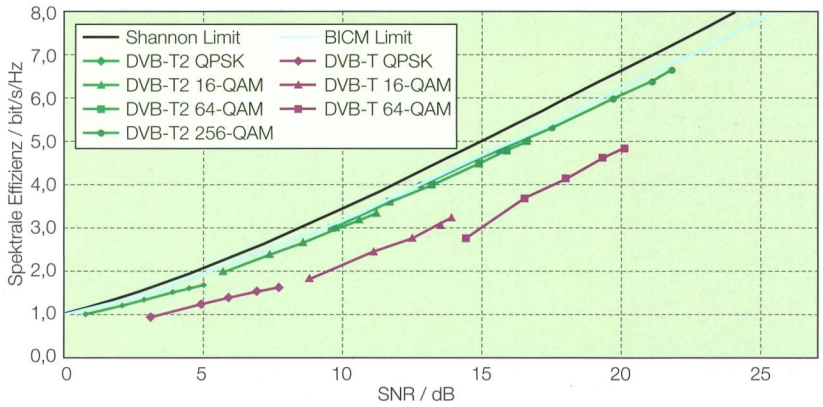
Die heute bekannten Empfängeralgorithmen sind in der Lage, die Shannon-Kapazität fast zu erreichen, was die exemplarische Grafik in **Bild 4** anhand des DVB-Terrestrial-Standards veranschaulicht. DVB-T2 (veröffentlicht 2009) und LTE basieren auf dem gleichen Fehlerkorrekturprinzip und den gleichen Modulationsmethoden – ein Vergleich ist somit naheliegend. Ein DVB-T2-Empfänger erreicht den technisch-theoretischen Grenzwert, der durch ein Bit-Interleaved-Coded-Modulation-Referenzsystem (BICM) vorgegeben ist. Der ältere DVB-T-Standard (veröffentlicht 1997) war diesbezüglich noch 3–4 dB von diesem BICM-Grenzwert entfernt.

Fazit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der schweizerische NIS-Grenzwert der technologischen Entwicklung nicht im Wege steht. Diese erste Analyse basierend auf der Shannon-Grenze zeigt, dass die von der ITU und von 3GPP angepeilten Kanalkapazitäten für das Mobilkommunikationssystem der 4. Generation die Shannon-Grenze fast erreichen. Eine weitere Erhöhung der Datenrate ist nur möglich, wenn der Funkkanal innerhalb der Übertragungsbandbreite mehrfach genutzt wird (z.B. mit MIMO) oder eine höhere Strahlung zugelassen wird. Nur schon durch das Ausnutzen der Polarisationsdiversität (2x2-MIM0) ist fast eine Verdopplung der Spitzeneffizienz möglich.

Aufgrund der Leistungsabnahme mit grösserer Distanz ist die Datenrate am Zellenrand immer nur ein kleiner Bruchteil von derjenigen in unmittelbarer Nähe der Antenne.

Damit die Benutzer die hohen Datenraten in Sendernähe ausnutzen können, müssen die Zellen kleiner werden. Der Trend geht hin zu vielen kleinen Zellen, sogenannten Small-Cells oder Femtozellen, wo die Basisstationen mit ähnlich schwachen Sendeleistungen arbeiten wie heutige WLANs.



N. Wells, BBC R&D

Bild 4 Spektrale Effizienz von DVB-T/T2.

Referenzen

[1] Weissbuch 2011 – Der ICT-Marktreport Schweiz.
[2] Report ITU-R M.2134, 2008.
[3] Report ITU-R M.2135, 2008.
[4] Agilent: Introducing LTE-Advanced (Application Note, 5990-6706EN), March, 2011.
[5] R. Tanner, R. Hofstetter: LTE, der nächste Mobilfunkstandard, Teil 2: Die Luftschnittstelle, Bulletin SEV/VSE, 08/21, 2008.
[6] J. Berkman et al.: On 3G LTE Terminal Implementation – Standard, Algorithms, Complexities and Challenges, 2008.

Angaben zu den Autoren

Prof. Dr. **Rolf Hofstetter** ist Dozent an der Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Chur. Neben der Lehre bearbeitet er Projekte im Zusammenhang mit Netzwerken, mit leitungsgebundenen und drahtlosen Nachrichtenübertragungssystemen sowie mit Signalverarbeitung.

HTW Chur, 7000 Chur, rolf.hofstetter@htwchur.ch

Dr. **Rudolf Tanner** arbeitete in der Entwicklung von Mobilfunkempfängern bei 3 Start-ups und leitete zuletzt ein DVB-SoC-Projekt. Er befasst sich intensiv mit technologischen und kommerziellen Trends, aber auch mit der Umsetzung von Ideen zur Serienreife und bietet F&E-Beratungsdienste für Start-ups und KMUs an.

iCloudius GmbH, 9478 Wartau, rt@icloudius.ch

Résumé **Quelles sont les limites de la communication mobile ?**

Facteurs limitants et développements technologiques

En Suisse, la forte densité de smartphones et de tablettes connaît une croissance continue. Pour stimuler la bonne humeur des utilisateurs de smartphones en leur offrant un débit acceptable, des stations de base supplémentaires sont nécessaires. Cet article étudie les limites des débits de données lors de la transmission mobile par onde radio de la station de base à l'appareil mobile (downlink). L'analyse montre que les capacités du canal du système de communication mobile de 4e génération visées par l'ITU et le 3GPP s'approchent fortement de la limite de Shannon. Une augmentation supplémentaire du débit est possible uniquement si le canal radioélectrique est utilisé plusieurs fois dans une même largeur de bande de transmission (exemple : avec MIMO) ou si une émission supérieure est permise. En raison de la baisse progressive des performances avec l'éloignement, le débit en bordure de cellule n'est jamais qu'une fraction du débit à proximité directe de l'antenne. Pour permettre aux utilisateurs de profiter des débits élevés à proximité de l'émetteur, les cellules doivent être plus petites. La tendance est à la multiplication des petites cellules ou femtocell avec des stations de base fonctionnant à des puissances d'émission aussi faibles que les WLAN actuels. No