

Bild: Henning Rathjen

# Fabrikfunk

## Mobilfunk-Campusnetze: Entscheidungsfindung, Planung, Betrieb

**Erstmals können Fabriken und Institute ihre WLAN-gestützten Infrastrukturen mit einem lokalen Mobilfunknetz ergänzen und so ihre Produktion optimieren. Doch wer braucht ein solches Campusnetz und wie konzipiert man es?**

**Von Torsten Musiol,  
Dušan Živadinović**

Jahrelang haben vor allem große Unternehmen ein separates Funkband für die Vernetzung ihrer Produktionsanlagen gefordert. Im Herbst 2019 hat die Bundesnetzagentur endlich einen 100 MHz breiten Block zwischen 3,7 bis 3,8 GHz speziell für Campusnetze reserviert. Firmen, die ein solches Band schon länger gefordert hatten, planen längst, ihre Produktion damit aufzurüsten.

Vielen Unternehmen ist aber noch unklar, worin genau die Vorteile eines Mobilfunk-Campusnetzes liegen, denn sie verwenden für viele Prozesse schon längst das etablierte und preisgünstige WLAN als Campusnetz. Je nach Anwendung kann man mit WLAN aber schnell an Grenzen stoßen.

Wir fassen daher zunächst die prinzipbedingten WLAN-Nachteile zusammen, damit Sie anhand Ihrer Anforderungen entscheiden können, ob Ihnen ein mobilfunkgestütztes Campusnetz weiterhilft. Anschließend beschreiben wir Planungsstrategien für den Aufbau sowie grundlegende Alternativen zur Verwaltung des Netzes.

### Ausgangspunkt WLAN-Schwächen

Die WLAN-Konzepte sind einige Jahrzehnte alt. Ursprünglich ging es den Entwicklern nur darum, IP-Pakete über ein von Ethernet abgeleitetes Funkmedium zu übertragen. Das erkennt man daran, dass ein WLAN-Access-Point wie eine Ethernet-Bridge arbeitet und besonders, weil der Zugriff der Geräte auf den Funkkanal zufallsgesteuert erfolgt (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance, CSMA/CA).

Das hat weitreichende Folgen:

- WLAN-Geräte können Pakete nicht innerhalb fester Fristen zustellen. Diese sind zum Beispiel für die Steuerung von Fertigungsrobotern erforderlich, etwa um sie umgehend anhalten zu können,

falls ein Mensch einen Gefahrenbereich betritt.

- Man kann unterschiedlichen WLAN-Geräten keine festen, aber unterschiedlichen Geschwindigkeiten zuweisen (z. B. 30 MBit/s für einen USB-Stick und 50 MBit/s für ein Tablet). Allenfalls lassen sich Datenpakete von bestimmten IP-Diensten bevorzugt gegenüber anderen behandeln (zum Beispiel Voice-over-IP vor Webzugriffen). Aber das schließt nicht aus, dass mit WLAN das eine oder andere Paket zu spät oder gar nicht am Ziel ankommt. Beides sind Ausschlusskriterien für Prozesse mit harten Anforderungen an Übertragungsfristen und hohe Zuverlässigkeit.
- WLAN-Geräte funken generell munter durcheinander, so wie sie gerade eine freie Sendelücke erwischen. Je mehr WLAN-Geräte im Netz sind, desto wahrscheinlicher sind Kollisionen von Datenpaketen und desto länger muss jedes einzelne warten, bis es eine Lücke findet – die Effizienz lässt also umso stärker nach, je mehr Nutzer eine Basisstation versorgen soll.
- Ein nahtloser Zellenwechsel ist mit WLAN grundsätzlich nicht möglich (seamless handover). Das verhindert auf großen Geländen beispielsweise den Einsatz in autonomen Fahrzeugen.

Diese konzeptionellen Nachteile ziehen sich bis hin zur heute verbreiteten WLAN-Spezifikation IEEE 802.11ac durch. Hinzu kommen regulatorische Grenzen: Aufgrund der Sendeleistungsbestimmungen ist für die vollständige Abdeckung großflächiger industrieller Bereiche (mehrere Quadratkilometer) oft eine Vielzahl von WLAN-Access-Points erforderlich, denn

sie dürfen nur mit Sendeleistungen bis 0,1 Watt (100 mW) funken und decken so bei Sichtverbindung rund 300 Meter ab, in Gebäuden nicht mehr als 40 bis 50 Meter.

Die Reichweite von Mobilfunkbasisstationen ergibt sich aus diversen Parametern. Zunächst setzt die Bundesnetzagentur (BNetzA) in ihrer Verwaltungsvorschrift keine Obergrenze für die maximale Sendeleistung von Campusnetzen – abgesehen von den gesetzlichen Grenzwerten zum Schutz von Personen. Nur für den Fall, dass sich Nachbarn nicht einigen können (Verhandlungsgebot für Betreiberabsprachen) wird pragmatisch ein Feldstärkegrenzwert festgelegt (32 dBµV/m/5 MHz in 3 Meter Höhe gemäß ECC/REC (15) 01).

### Mobilfunkvorteile

Während der Verkehr in den öffentlichen Netzen durch die häufigste Anwendung – den Internetzugang – klar Downlinkdominiert ist, ist das bei vielen industriellen Anwendungen nicht der Fall. Zum Beispiel werden auf autonomen Fahrzeugen oft mehrere HD-Kameras installiert. Der Verkehr ist dann stark Uplink-lastig. Dabei spielt die Sendeleistung der Basisstation eine untergeordnete Rolle, sodass man keine teuren Macro Base Stations wie in öffentlichen Netzen braucht, sondern mit kostengünstigeren Small Cells auskommt.

Diese arbeiten typisch mit Sendeleistungen von 0,25 bis 1 Watt pro Antenne. Teilnehmergeräte wie Modems, Router oder USB-Sticks senden meist mit 200 Milliwatt Leistung. Da auch die Eingangsempfindlichkeiten der Empfänger und die Ausbreitungseigenschaften von 3,7-GHz-

Signalen etwas besser sind als bei 5-GHz-WLANs, erzielt selbst ein Small-Cell-Campusnetz bei Sichtverbindung zwischen Basisstation und Teilnehmergerät oft Reichweiten bis 1000 Meter. In günstigen Feldversuchen wurden auch schon mal 3 Kilometer gemessen, natürlich mit eingeschränkter Datenrate.

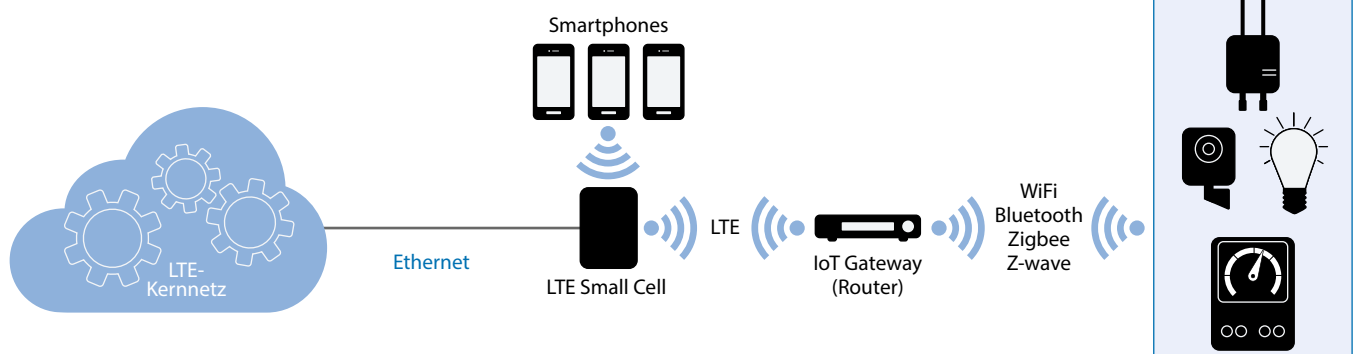
Ein letzter WLAN-Nachteile: Funksysteme, die wie WLAN auf unlizenziierten Bändern arbeiten, eignen sich für unternehmenskritische Anwendungen nur bedingt. Denn Störungen des Netzbetriebs durch standardkonforme, aber systemfremde Geräte lassen sich prinzipiell nicht ausschließen. Beispielsweise können benachbarte WLANs stören; das trifft besonders auf den Betrieb im 2,4-GHz-Band zu, weil die Frequenzen weiter reichen als die des 5-GHz-Bands und die Störreichweite sogar noch etwas größer ist als die Nutzreichweite.

Auch beim wesentlich breiteren 5-GHz-Band muss man Abstriche hinnehmen, denn nur die ersten vier 20-MHz-Kanäle sind für WLAN reserviert. Auf den übrigen 80 MHz haben Wetterradare Vorrang, und WLAN-Access-Points müssen weichen, wenn sie ein Radarsignal detektieren. Das ist für Industrieanwendungen mit hohen Anforderungen an die Verfügbarkeit und harten Anforderungen an Paketlaufzeiten ein K.o.-Kriterium.

Mobilfunkgestützte Campusnetze verwenden hingegen grundsätzlich eigene Frequenzen. Deshalb lassen sich störende Nachbareinstreuungen durch simple Netzplanung minimieren. Die Funkressourcen verwalten das Kernnetz und die Basisstationen. So kann der Betreiber QoS-Merkmale wie Datendurchsatz oder Zu-

## Campus-Netze

Für selbstständig betriebene Mobilfunk-Campusnetze braucht man Geräte, die im Band 3,7-3,8 GHz arbeiten. Zu den Herstellern gehört beispielsweise die Firma Sercomm.



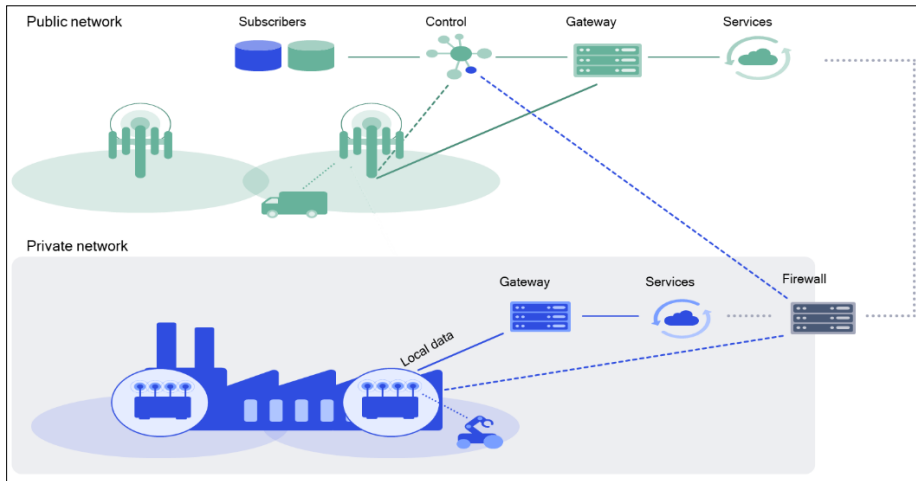


Bild: Qualcomm

Bei Campusnetzen (private network), die Betreiber wie Vodafone aufsetzen, verbleiben zwar die Kundendaten wie gewünscht auf dem Campus, aber die Firma hat keine Kontrolle über das Verkehrsmanagement.

stellungssicherheit nach den Erfordernissen seiner Anwendungen einstellen. Unter Strich ist die Effizienz weit besser als beim WLAN, denn durch die zentrale Verwaltung der Ressourcen kann schon eine LTE-Basisstation leicht tausende Geräte zuverlässig versorgen; 5G-Basisstationen sind noch um Größenordnungen effizienter.

Doch wie findet eine Firma heraus, ob ihr ein Mobilfunk-Campusnetz überhaupt helfen kann? Dazu orientiert man sich am besten an WLAN. Grundsätzlich bettet man kritische Anwendungen, bei denen WLAN an Grenzen stößt, auf LTE oder 5G um (z. B. fahrerlose Transportfahrzeuge). Oder man entwickelt sie überhaupt erst, weil sie mit WLAN nicht umzusetzen sind.

Für die Entscheidungsfindung erfasst man zunächst, welche Prozesse von WLAN abhängen und welche davon durch WLAN eingeschränkt sind. Wenn zum Beispiel eine Fabrik WLAN nutzt, um Software in die produzierten Autos zu übertragen, kann das je nach Art und Umfang der Software eine Weile dauern. Beispielsweise können Betriebssysteme und Navigationskarten mehrere GByte groß sein. Entstehen Warte- oder Ausfallzeiten bei der Software-Betankung etwa durch Störungen des WLANs? Bremsen die Wartezeiten andere Produktionsschritte nennenswert, muss gar im Fehlerfall die Fertigung angehalten werden? Wenn auf mehrere Fragen die Antwort ja lautet, dürfte ein Mobilfunk-Campusnetz helfen.

Alle übrigen Anwendungen, die so robust sind, dass sie trotz der Konzept-

schwächen funktionieren, verbleiben auf dem preisgünstigen WLAN; die Prozesse sind ja eingespielt und es gibt keinen Grund, etwas zu ändern, wenn sie zur Zufriedenheit funktionieren.

### Kalkulation

Wenn klar ist, dass sich ein Campusnetz technisch lohnt, muss jede Firma individuell kalkulieren, ob sich die Investition für sie auch rechnet. Wenn zum Beispiel die WLAN-Betankung als Bremspunkt in der Produktion gilt und ein Mobilfunk-Campusnetz zum Beispiel in Feldversuchen deutlich besseren Durchsatz zeigt, dürfte es sich für einen Autohersteller lohnen, der mehr Fahrzeuge in der gleichen Zeit vom Band rollen lassen will.

Aber auch Sicherheitsaspekte können den Ausschlag geben. Gemeinsam mit WLAN haben Campusnetze, dass vertrauliche Firmendaten nur bis zum Server im eigenen Netz laufen. Das ist bei heute verbreiteten Cloud-Diensten nicht der Fall. Weitere Auswahlkriterien für ein Campus-

netz können sein: viele gleichzeitig anzusteuern Maschinen, viele auszulesende Sensoren oder auch harte Anforderungen an Übertragungsgeschwindigkeiten und Signallaufzeiten.

Zu beachten ist aber, dass die aktuellen LTE/5G-Implementierungen noch nicht die versprochenen ultrakurzen Laufzeiten erreichen (1 ms und weniger). Lange Signallaufzeiten sind aber für manche industrielle Prozesse problematisch, weshalb diese seit jeher verkabelt laufen (Industrial Ethernet). Mit Campusnetzen kann man sie erst dann entkabeln, wenn Basisstationen und Endgeräte erhältlich werden, die ebenso robuste Zustellungen gewährleisten wie Industrial-Ethernet-Geräte.

### Zwei Wege zum Campusnetz

Beim Aufbau eines Mobilfunk-Campusnetzes kann eine Firma zwischen zwei Wegen wählen: Sie kann es in Eigenregie aufsetzen oder einen Netzbetreiber wie O2, Telekom oder Vodafone beauftragen. Dann schnürt der Netzbetreiber ein Angebot mit bestimmten Hard- und Software-Komponenten und legt die Frequenzen für das Campusnetz fest.

Dabei handelt es sich meist um Frequenzen, die er im Rahmen von Auktionen ersteigert hat. Prinzipiell kann er aber auch das den Bereich von 3,7 bis 3,8 GHz nutzen, wenn der Kunde dafür eine Genehmigung von der Bundesnetzagentur erhalten hat. In den wenigen Installationen, die Netzbetreiber bisher aufgebaut haben, ist davon allerdings keine Rede. Stattdessen zwacken sie von ihren Frequenzen Ressourcen per Network Slicing ab. Zum Beispiel knapst Vodafone für den Aachener Autohersteller e.Go Ressourcen von seinem 3,5-GHz-Band ab.

Wenn heute von 5G die Rede ist, dann ist die Non-Standalone-Infrastruktur gemeint (NSA), bei der 5G-Basisstationen

### Campusnetzbeispiele

Die ersten Campusnetze gründen auf der LTE-Technik. Beliebte Demo-Objekte sind Häfen und Autofabriken, weil dort viele autonome Fahrzeuge unterwegs sind – im Hafen braucht man sie beim Umschlagen von Waren, etwa für den Containertransport. Der Autohersteller braucht sie in den Produktionsstraßen. Bei Autoherstellern

kommen viele koordinierte Warenflüsse hinzu, sodass Gewinne aus der digitalisierbaren Inventur zu erwarten sind. Weitere Optimierungen verspricht man sich von der Robotersteuerung und Werkzeugkonfiguration aus der Ferne. Und natürlich von der robusteren und schnelleren Firmware- und Softwareübertragung in die Autos.





Bild: Jan Brandes/Lufthansa Technik AG

**Inspektion von Triebwerksbauteilen per Videostream: Mittels hochauflösender Live-Bilder lassen sich ausgebaute Teile aus der Ferne begutachten. Dafür setzt Lufthansa im eigenen 5G-Campusnetz deutlich höhere Uplink-Datenraten ein als sie bei Internet-Zugängen üblich sind.**

auf LTE-Kernnetze angewiesen sind. Ein 5G-Endgerät muss dabei zusätzlich eine Verbindung zum LTE-Netz aufbauen, um Steuerinformationen auszutauschen. Nur die Nutzerdaten gehen über das 5G-Interface. Um Nutzerdaten lokal zu halten, ist auf dem Campus eine Mobile Edge Cloud erforderlich.

Per Network Slicing kann der Betreiber die für die Firma erforderlichen festen Latenzen einhalten und Verkehrsmanagementkonzepte der Firma umsetzen, also

etwa bedarfsweise die Paketzustellung bestimmter Gerätegruppen bremsen (z. B. Push-To-Talk von Mitarbeitern) oder beschleunigen (Positionsmeldungen von autonomen Fahrzeugen, Robotersteuerung). Auch ist das Angebot an Endgeräten für etablierte LTE-Bänder größer als für das LTE-Band 43.

Jedoch kann der Kunde nicht bestimmen, an welchem Funkband er teilhaben kann und welchen Anteil er daran nutzen darf – in der Regel muss er nehmen, was

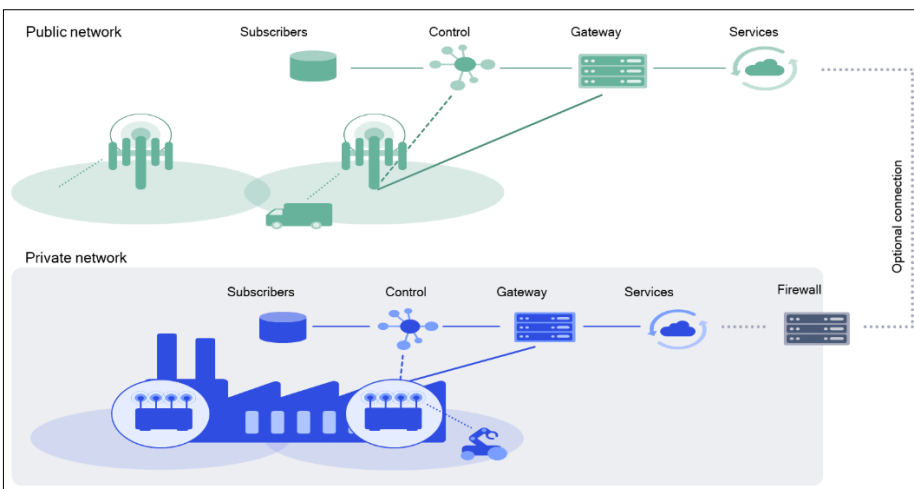


Bild: Qualcomm

**Campusnetze (private network), die Firmen selbstständig im LTE-Band 43 betreiben, sind losgelöst von öffentlichen LTE- oder 5G-Netzen, und der Betreiber kontrolliert sämtliche Elemente. Den korrekten Betriebsablauf muss er aber auch selbst gewährleisten.**

ihm der Netzbetreiber anbietet. Das kann ein Entscheidungskriterium sein, wenn man Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Geschwindigkeit hat, denn von der Breite des Funkbands hängt die maximale Geschwindigkeit wesentlich ab. Auch wird in einer solchen Infrastruktur nur der User-Traffic lokal geroutet (Data Plane). Die Steuerungsdaten kommen hingegen aus dem öffentlichen Netz des Betreibers (Control Plane). Das ist für Unternehmen, die völlige Eigenständigkeit beim Campusnetzbetrieb anstreben, ein Ausschlusskriterium.

Betreibt man ein Campusnetz in Eigenregie, kann man alle Parameter selbst kontrollieren: die Frequenznutzung, das User-Management, die Dienste, das User-Equipment und das Verkehrsmanagement. Eine Verbindung zum öffentlichen Mobilfunknetz ist nicht erforderlich. Allerdings braucht man dann auch eigene Support-Mitarbeiter, die es durchgehend am Laufen halten.

### Start mit Formularen

Die Bundesnetzagentur teilt die Campusnetzfrequenzen auf Antrag zu. Sie geht zunächst von einem 10 MHz breiten Band im Bereich von 3,7 bis 3,8 GHz aus. Wenn man den Bedarf belegen kann, genehmigt sie auch breitere Bänder. Die Formulare finden Sie über [ct.de/yc9q](http://ct.de/yc9q).

Die Zuteilung erfolgt grundsätzlich technik- und diensteneutral. Entsprechend eignet sich das bisher für den Campus reservierte 3,7-3,8-GHz-Band sowohl für LTE als auch für 5G. Allerdings hat die ITU für 5G weltweit eine separate Nomenklatur und Aufteilung eingeführt. Demnach ist für 5G-Netze der Bereich von 3,3 bis 3,8 GHz gedacht (Band n78). Dennoch kann der Campusnetzbetrieb mit LTE-Geräten starten und später bei Bedarf mit 5G-Geräten erweitert werden. Nur die Breite des Funkbands bleibt auf den Bereich von 3,7 bis 3,8 GHz begrenzt.

Die Bedingungen wie auch die Kosten für die Zuteilung sind in einer Verwaltungsvorschrift spezifiziert. Beispielsweise belaufen sich die Kosten für eine Grundstücksfläche von 500 × 200 Metern (0,1 km<sup>2</sup>) und eine Bandbreite von 60 MHz (3 Basisstationen mit je 20 MHz) bei einer Zuteilungsdauer von 10 Jahren auf 2800 Euro oder jährlich 280 Euro. Dasselbe zahlt ein landwirtschaftlicher Betrieb mit 60 Hektar Nutzfläche. Im 5G-Campusnetzplaner der TU Dortmund können Sie Ihre Eckwerte in einem interaktiven Web-

interface zur Überprüfung eingeben (siehe [ct.de/yc9q](http://ct.de/yc9q)).

## Start ohne Mobilfunk-Know-how

Die meisten industriellen Anwender haben keine Mobilfunkexpertise; die Einarbeitung ist schlicht zu aufwendig und lohnt sich bestenfalls für Konzerne. Das wird leicht anhand der Abbildung „IP-versus Mobilfunkadministration“ ersichtlich. Dort haben wir eine kleine Auswahl von Abkürzungen der Mobilfunkadministration zusammengefasst (grün: LTE, rot: 5G). Demgegenüber ist die Zahl der Methoden, mit denen man in der IP-Administration täglich umgehen muss, weit kleiner. Im Umkehrschluss bedeutet das aber: Wenn man es schafft, die Mobilfunkfunktionen auf bekannten Netzwerktechniken abzubilden, kann man sich Investitionen in Mobilfunk-Know-how sparen.

Ein Weg dahin besteht darin, ein schlüsselfertiges Mobilfunksystem mit samt einem Servicevertrag zu bestellen – also den Dienst unter den Bedingungen von Vodafone, Telekom oder O2 einzukaufen. Eine Firma verlässt sich dann darauf, dass der Dienstleister alle Funktionsebenen in ihrem Sinne administriert. Je nach Engagement des Dienstleisters kann das schnell oder langsam gehen, die Firma ist jedenfalls abhängig von ihm. Vorteilhaft daran ist allerdings, dass der Dienstleister jederzeit für die Funktion des Mobilfunknetzes verantwortlich ist; der Kunde hat im besten Fall keine Arbeit mit dem Netz und es läuft trotzdem rund um die Uhr.

## Netzplanung

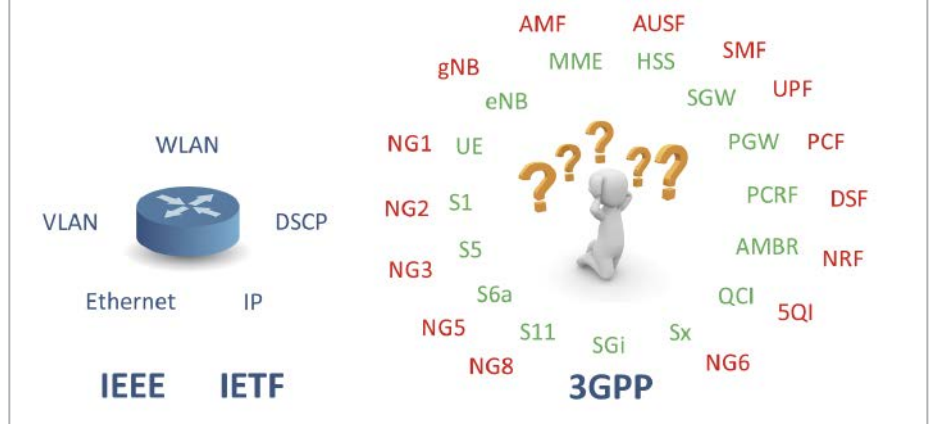
Ein anderer Weg besteht darin, ein System zu verwenden, das die Mobilfunkkomplexität verbirgt und dem Nutzer nur die üblichen IP-Schnittstellen und -Protokolle zur Konfiguration überlässt (IP, Ethernet, Routing, Switching et cetera).

Sollten aber bei einem solchen System auf Mobilfunkebene Probleme auftauchen, braucht sie den Support des System-Herstellers. Zu den Auswahlkriterien gehören somit auch Fragen nach der Ausfallsicherheit, Verfügbarkeit im Jahresmittel und der Reaktionsgeschwindigkeit des Supports.

Prüfen Sie zunächst, welche Elemente der Kommunikationstechnik für Ihre Prozesse von elementarer Bedeutung sind und über welche davon Sie die vollständige Kontrolle brauchen. Dabei sollte man diese Funktionsebenen unterscheiden:

## IP- versus Mobilfunkadministration

Campusnetze gründen auf hochkomplexer Mobilfunktechnik. Sie lässt sich nicht mit gängigem Know-how administrieren.



- Funkressourcen (Standorte der Basisstationen, Frequenzen, Sendeleistung)
  - Dienste, Ende-zu-Ende-Verbindungen, Quality-of-Service, Netzsicherheit
  - Netzelemente (Basisstationen, Server, Clients)
  - Authentifizierung und Autorisierung der Endgeräte (SIM-Karten, Subscriber Profiles)
  - Auswahl und Management der Endgeräte (Smartphones, LTE- oder 5G-Router, USB-Sticks, PCIe-Module et cetera)
- Wenn Sie auf die ersten vier Punkte prinzipiell verzichten können, haben Sie die Wahl zwischen einem schlüsselfertigen System eines Dienstleisters und einem in Eigenregie aufgesetzten. Wenn hingegen für Ihre Betriebsabläufe alle Punkte essenziell sind, müssen Sie alles in Eigenregie erledigen.

Im Prinzip sollten IT-Abteilungen, die bisher WLAN geplant und implementiert haben, in der Lage sein, auch ein privates Mobilfunknetz aufzusetzen und zu beherrschen, wenn es soweit abstrahiert ist, dass man sich nur noch um die IP-Funktionsebenen kümmern muss. Einfache Netze mit wenigen Basisstationen kann man komplett vorkonfiguriert vom Hersteller erhalten. Bei der Funkplanung und dem Betrieb komplexer Netze wird allerdings Spezialwissen benötigt. Damit sollte man typischerweise einen Dienstleister beauftragen. Da gibt es mittlerweile eine ansehnliche Auswahl, darunter [umlaut.com](http://umlaut.com) oder [triopt.de](http://triopt.de), um nur zwei zu nennen.

Weil das Frequenzband 3,7-3,8 GHz weltweit noch wenig in Gebrauch ist, eignen sich dafür bisher nicht viele Geräte. Neben Deutschland wird es auch in Schweden verwendet, außerdem angrenzende

oder überlappende Frequenzbereiche in Finnland, den USA und in Großbritannien. Aber die wichtigsten Produkte gibt es bereits. Es handelt sich um Basisstationen, Router, Modems, USB-Sticks und dergleichen, die per LTE kommunizieren.

## Ausblick

Zuletzt haben die Chip-Hersteller die Entwicklung und Produktion intensiviert. Manche beliefern nicht nur den freien Markt, sondern fertigen auch Chips für Prototypen im Rahmen von Projektgeschäften. Seit einiger Zeit engagiert sich auch der Chip-Riese Qualcomm im Campusnetzbereich, allerdings mit dem Fokus auf 5G-Chips.

Generell besteht keine Eile, ein Campusnetz aufzusetzen – wann und wie man startet, hängt von den jeweiligen wirtschaftlichen Szenarien ab. Zu beachten ist lediglich, dass die Frequenzen im 3,7-GHz-Band zunächst für zehn Jahre freigegeben sind. Vor Ablauf der Frist wird die Behörde den Bedarf erneut prüfen. Für den Fall, dass es keinen Nachschlag gibt, fährt man also besser, wenn man die Anschaffungen möglichst vom ersten Tag an nutzt.

(dz@ct.de) **ct**

**Campusnetzplaner, Band-43-Produkte:**  
[ct.de/yc9q](http://ct.de/yc9q)

## Literatur

- [1] Dusan Zivadinovic, Fehlstelle mit Potenzial, LTE-Campusnetze vor dem Start, c't 2/2020, S. 144
- [2] Dusan Zivadinovic, Stapellauf, Testbetrieb für Campusnetze, c't 23/2019, S. 122