

Die Rolle von HAPS für die Breitbandversorgung im ländlichen Raum

Autoren:

Dr. Thomas Plückebaum
Dr. Christian Wernick

WIK-Consult GmbH
Rhöndorfer Str. 68
53604 Bad Honnef

Bad Honnef, Mai 2021

Impressum

WIK-Consult GmbH
Rhöndorfer Str. 68
53604 Bad Honnef
Deutschland
Tel.: +49 2224 9225-0
Fax: +49 2224 9225-63
E-Mail: info@wik-consult.com
www.wik-consult.com

Vertretungs- und zeichnungsberechtigte Personen

Geschäftsführerin	Dr. Cara Schwarz-Schilling
Direktor	Alex Kalevi Dieke
Direktor Abteilungsleiter Netze und Kosten	Dr. Thomas Plückebaum
Direktor Abteilungsleiter Regulierung und Wettbewerb	Dr. Bernd Sörries
Leiter der Verwaltung	Karl-Hubert Strüver
Vorsitzende des Aufsichtsrates	Dr. Daniela Brönstrup
Handelsregister	Amtsgericht Siegburg, HRB 7043
Steuer-Nr.	222/5751/0926
Umsatzsteueridentifikations-Nr.	DE 123 383 795

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangssituation	1
2	Funkbasierte Breitbandversorgung durch fliegende Antennen	2
3	Nutzungsbezogene Aspekte	4
4	Nutzungsaspekte des Erd-Orbits	6
5	Technologischer Ausblick zu Trends im Mobilfunk	6
6	Multi-Operator Umgebung	7
7	Fazit	8

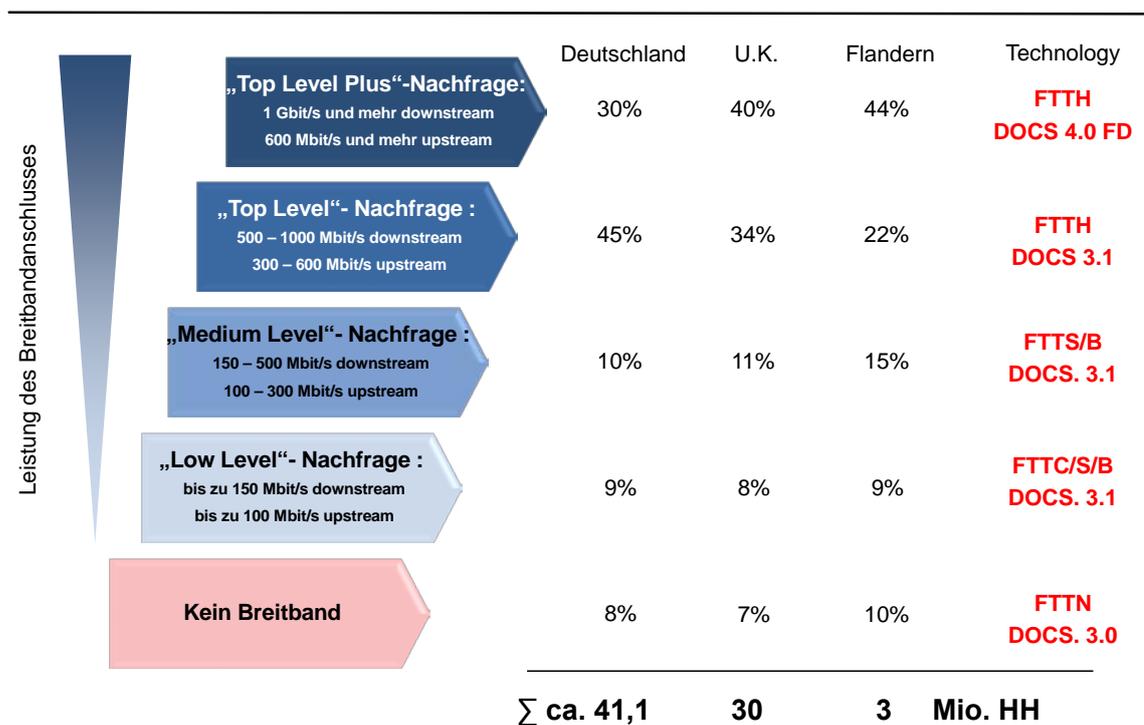
Abkürzungen:

CO ₂	Kohlendioxid
DOCS.	Data over Cable Service Interface Specification (volle Abkürzung: DOCSIS)
EU	Europäische Union
FTTB	Fibre to the Building
FTTC	Fibre to the Curb/Cabinet
FTTH	Fibre to the Home
FTTS	Fibre to the Street
FWA	Fixed Wireless Access
Gbit/s	Gigabit pro Sekunde
GEO	Geostationary Earth Orbit
HAPS	High Altitude Platform Systems
HH	Haushalte/Households
Km	Kilometer
LEO	Low Earth Orbit
Mbit/s	Megabit pro Sekunde
MEO	Medium Earth Orbit
Ms	Milisekunde
NFV	Network Function Virtualisation
OAM	Operation, Administration and Management
RAN	Radio Access Network
SDN	Software Defined Networking
U.K.	United Kingdom
VDSL	Very high speed Digital Subscriber Line

1 Ausgangssituation

Die Nachfrage nach breitbandigen Telekommunikationsverbindungen steigt kontinuierlich an. Studien des WIK prognostizieren bereits für das Jahr 2025 für mehr als 30% der bundesdeutschen Haushalte eine Nachfrage von mehr als einem Gbit/s downstream und mehr als 600 Mbit/s upstream.¹ Die Bandbreitennachfrage wird dabei einerseits durch die parallele Nutzung verschiedener Anwendungen getrieben und andererseits dadurch, dass die Anwendungen selbst in zunehmenden Maße höhere Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der zugrundeliegenden Infrastrukturen stellen. Diese Bandbreiten sind mit dem klassischen Kupferanschlussnetz auch mit Hilfe hochwertiger Übertragungstechniken wie VDSL Supervectoring oder G.fast nicht mehr bereitzustellen. Dazu werden Glasfasernetze oder Kabel-TV Netze mit DOCSIS 4.0 benötigt, die wiederum Glasfasern bis kurz vor das Haus erfordern.

Abbildung 1-1: Prognose der Bandbreitennachfrage 2025



Quelle: WIK.

¹ Für diese Prognose wurden die Haushalte nach Größe und Nutzertypen differenziert und eine parallele Nutzung des Anschlusses und mehrerer Anwendungen je Person durch bis zu 4 Personen unterstellt. Das Modell basiert auf der Annahme, dass die Verfügbarkeit von Bandbreite keinen Engpass darstellt. Vgl. Strube Martins, S.; Wernick, C. (2020): Regional differences in residential demand for very high bandwidth internet in 2025, in: Telecommunications Policy, Volume 45, Issue 1, February 2021.

Der Ausbau von Glasfasernetzen ist in dünn besiedelten Gebieten mit hohen Leitungslängen je zu erschließendem Haushalt erheblich teurer als in dicht besiedelten Gebieten.² Gerade für dünn besiedelte Gebiete werden daher leistungsfähige und preiswerte alternative Anschlusstechniken gesucht, die hinreichende Bandbreiten unterstützen. Diese müssen zudem weitere qualitative Aspekte im Hinblick auf die Laufzeit/Verzögerung des Signals und der damit übertragenen Informationen (Delay, Jitter), die Schwankungen in der Laufzeit (Jitter) und der Datenverlustrate (Paket Loss Ratio) befriedigen. Je niedriger diese Werte, desto besser ist die diesbezügliche Qualität.

In Frage kommen daher primär Anschlusstechniken, die keine oder nur geringe entfernungsabhängige Ausbaurkosten aufweisen. Hier bieten sich funkbasierte Lösungen an. Einerseits können bestehende oder noch auszubauende Mobilfunkantennen über sogenannte Fixed Wireless Access Lösungen (FWA) für stationäre Anwendungen mitgenutzt werden, andererseits können fliegende Antennen größere Gebiete aus der Luft abdecken als dies mit dem Mobilfunk möglich ist. Sie eignen sich daher besonders für dünn besiedelte Gebiete. Derartige Ansätze stehen im Fokus dieses Beitrages.

2 Funkbasierte Breitbandversorgung durch fliegende Antennen

Unter fliegenden Antennen verstehen wir Telekommunikationsantennen, die aus einer Höhe von mehreren Kilometern ein größeres Gebiet ausleuchten, in aller Regel unbeeinträchtigt von Abschattungen.³ Derartige Systeme auf der Basis von Satelliten gibt es schon seit einigen Jahrzehnten. Diese wurden stetig weiterentwickelt, auch bedingt durch erhebliche Leistungssteigerungen in den Übertragungssystemen, den Kodierungstechniken und den Antennen, die ihre Leistung durch sogenannte Beams (Funkkeulen) auf bestimmte voneinander separierbare Gebiete fokussieren können.

Unter den Satellitenlösungen können GEO (geostationary earth orbit), MEO (medium earth orbit) und LEO (low earth orbit) unterschieden werden. GEO Satelliten stehen in einer Höhe von 36.000 km fest über dem Äquator. Die in geringerer Höhe (ca. 10.000 km) fliegenden MEO Satelliten kreisen in Bahnen um die Erde und sind nicht geostationär. Sie benötigen einige Partner MEO Satelliten, um ein Gebiet permanent versorgen zu können.⁴ Bei den in elipsoiden Bahnen um die Erde kreisenden LEO

² Die Kosten streuen in der Regel zwischen < 500 €/Haushalt und > 125.000 €/Haushalt. Vgl. exemplarisch für das Gebiet der deutschsprachigen Gemeinschaft in Ostbelgien Wernick, C. et al. (2020): Ansätze und Kosten einer flächendeckenden Glasfasererschließung im Gebiet der Deutschsprachigen Gemeinschaft in Belgien, Studie im Auftrag des Ministerium der Deutschsprachigen Gemeinschaft, Bad Honnef, 29.04.2020, elektronisch verfügbar unter: https://www.wik.org/fileadmin/Studien/2020/Glasfasererschliessung_in_der_DG_Belgien.pdf.

³ Abschattungen in enger Bebauung, z. B. durch Straßenschluchten, können vorkommen, sind in dünn besiedelten Gebieten jedoch irrelevant.

⁴ Ein typisches MEO System ist das europäischer Galileo Navigationssystem mit ca. 30 Satelliten in einer Flughöhe von 23.222 km.

Satelliten variiert die Höhe aufgrund der Flugbahn u.U. zwischen ca. 300 und 2.000 km während eines Umlaufs. Bevor ein LEO während seines Umlaufs um die Erde hinter dem Horizont verschwindet muss ein anderer LEO aufgetaucht sein, um die Funkverbindung zu übernehmen und damit einen Abbruch zu vermeiden. Lösungen mit LEOs setzen daher immer eine größere Gruppe gleichartiger Satelliten voraus, die parallel und aufeinander abgestimmt betrieben werden.⁵ LEOs decken wegen der niedrigen Flughöhe zudem immer nur einen verhältnismäßig schmalen Streifen ab.

Ein qualitatives Problem der Kommunikation über Satelliten ist die Signallaufzeit, die von der zu überbrückenden Entfernung dominiert wird. Die Signalübertragung selbst erfolgt mit Lichtgeschwindigkeit, der oberen Schranke des physikalisch Möglichen. Die elektronische Signalbearbeitung im Satelliten selbst spielt dagegen inzwischen eine eher vernachlässigbare Rolle. Die niedrig fliegenden LEOs haben zwar eine deutlich kürzere Signallaufzeit. Diese schwankt aber, weil sich der Satellit im Vorbeiflug im Abstand zum Teilnehmer stetig verändert, ihn erst verkürzt und dann wieder verlängert. Zusätzliche Schwankungen ergeben sich aus der elipsoiden Flugbahn sowie durch die Signalübergabe beim Wechsel von einem Satelliten zum ihn ablösenden nächsten Satelliten. Laufzeitschwankungen sind somit systemimmanent. Puffer können diese zwar ausgleichen, fügen aber eine konstante Verzögerung ein.

HAPS (High Altitude Platform Stations) sind in der Stratosphäre (ca. 20 km) fliegende Flugobjekte, Drohnen nach dem Konstruktionsprinzip von Segelflugzeugen, die geostationär gehalten werden und mit ihren Antennen ein Gebiet mit einem Durchmesser von 100 – 200 km abdecken. Aufgrund der im Gegensatz zum Satelliten kurzen Entfernungen zwischen Boden und Antenne ergeben sich im Vergleich mit allen anderen Lösungen quasi terrestrische Laufzeiten. Die Energieversorgung der HAPS kann entweder (wie bei Satelliten) über Solarzellen oder über Wasserstoff-Brennstoffzellen erfolgen. Letztere ermöglichen die Gewinnung von mehr Energie, erfordern jedoch, dass die Drohnen ungefähr im Wochenrhythmus zur Erde zurückkehren, um aufgetankt zu werden. Um den Weiterbetrieb zu ermöglichen, wird die jeweilige Drohne durch eine andere an der Position abgelöst. Dieser Ansatz hat den großen Vorteil, dass quasi serienmäßig die leistungsfähigste Mobilfunktechnik auf den HAPS eingesetzt werden kann, die mit den terrestrischen Mobilfunkgeräten im klassischen 4G/5G Protokoll kommunikationsfähig ist.⁶ Im Gegensatz zu Satelliten ermöglicht dies auch die unproblematische Durchführung von Wartungs- und Upgradearbeiten.

⁵ LEO-Lösungen wie beispielsweise das europäische OneWeb Projekt kommen mit ca. 650 Satelliten aus; das Starlink-Projekt von Elon Musk strebt mehr als 1.600 Satelliten an, die die besiedelten Erdteile abdecken.

⁶ Vgl. Kickert, R. (2021): High Altitude Platform Stations (HAPS), Luft- und Raumfahrt, 2/2021.

Tabelle 2-1: Terrestrische Telekommunikation über Satelliten und HAPS

Flugkörper	Höhe/Länge [km]	Signallaufzeit 1 Weg Up/Down [ms]	Anzahl Flugkörper* [Anzahl]	Antennen- abdeckung
GEO	36.000	500 – 700	1	Kontinente
MEO	10.000	125 - 250	1	Teilkontinente
LEO	300 - 2.000	20 - 50 (variierend)	40-1.680	Elipsoid-Streifen (Länder)
HAPS	12-20	<5	80	Regionale Kreise

* zumindest für die Abdeckung Deutschlands

Quelle: WIK.

Für eine gute Sprachkommunikation sollte die Laufzeit der Signale Ende – Ende 100 ms nicht überschreiten. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die hier diskutierten Lösungsansätze nur die Lösung eines Netzzugangs umfasst. In der Praxis verlängert sich die zu überwindende Strecke unter Umständen in beträchtlichem Umfang, da Verbindungen in weitere Netze geführt und terminiert werden müssen. Dies ist besonders bei internationalen Verbindungen oder im Extremfall bei der Beteiligung weiterer fliegender Antennen von Relevanz.

Dies unterstreicht, dass GEO und MEO Lösungen kaum für den breiten Endkundenmarkt infrage kommen, sondern eher als Kompromiss in Fällen, in denen terrestrische Lösungen zu teuer wären. Auch bei Lösungen über LEOs liegt die Signallaufzeit deutlich über der von terrestrischen Lösungen - einzig HAPS kommen diesen sehr nahe und lassen sich in z. B. in Mobilfunklösungen integrieren.

3 Nutzungsbezogene Aspekte

Die Kapazität einer fliegenden Lösung bestimmt sich zum einen durch den Footprint, den die Antenne abdeckt. Dieser beschreibt den mit der Antenne ausgeleuchteten Raum (Zelle). Die sich dort befindenden Nutzer können adressiert werden. Sie teilen sich jedoch die Kapazität des Funkkanals zwischen Endgerät und fliegender Antenne.⁷ Die Kapazität, die pro Nutzer zur Verfügung steht, nimmt somit proportional mit der Anzahl der versorgten Nutzer je Zelle ab.

Dieser Sachverhalt macht deutlich, dass hochfliegende Antennen nicht auf den Massenmarkt der Individualkommunikation abzielen können, sondern Sonderlösungen

⁷ Diese wird bestimmt durch die Breite des nutzbaren Frequenzbandes, die verwendete Signalkodierung und die Leistungsfähigkeit (Kapazität) der fliegenden Elektronik sowie deren Energiebedarf.

für dünn besiedelte Gebiete darstellen oder auf Expeditionen oder die Seefahrt abzielen. Je breitbandiger die Kommunikationsbedürfnisse werden, desto knapper werden die für jeden zur Verfügung stehenden Kapazitäten. Zwar kann ggf. über Beamforming der Frequenzraum in Unterräume geteilt werden, so dass es zu weniger Übertragungskollisionen kommt, der Frequenzraum bleibt jedoch beschränkt.

Je kleiner der Footprint der Antenne bei im Prinzip gleichbleibender Kapazität, desto mehr Kapazität steht den einzelnen Kunden zur Verfügung, oder desto mehr Kunden können (mit konstanter Kapazität) bedient werden. Hochrechnungen für LEO-Lösungen für die Individualkommunikation schätzen den adressierbaren Markt in Deutschland aufgrund der benötigten Kapazitäten auf <200.000 Kunden ab.

Die satellitenbezogenen Dienste benötigen empfindliche Empfangsanlagen. Für GEO und MEO sind dies die bekannten Empfangsschüsseln mit sperriger Handlichkeit bis zu stationären Lösungen. Die Antennen müssen ausgerichtet oder nachgeführt werden. Bei LEOs ist das Nachführen nicht unbedingt erforderlich und wäre auch sehr aufwändig, insbesondere beim Wechseln des Satelliten. Hier gibt es für die verschiedenen Systeme i. d. R. spezielle Handsets mit Rundstrahlantennen,⁸ die jedoch nichts mit den bekannten Mobiltelefonen gemein haben. HAPS arbeiten dagegen mit den normalen Mobilfunkendgeräten und sind damit komfortabel und für den Endkunden preiswert und unkompliziert in die alltägliche Nutzungsumgebung integrierbar.

HAPS-basierte Telekommunikationsangebote sind wie Mobilfunknetze uneingeschränkt mobil oder auch geostationär als Fixed Wireless Access (FWA) nutzbar. GEO und MEO erlauben allenfalls eine nomadische Nutzung, verbunden mit der Neuausrichtung der Bodenantenne. LEOs sind, abhängig vom Anbieter, in der Regel mobil einsetzbar.

Telekommunikationstechnik veraltet verhältnismäßig schnell. Regelmäßig kommen neue Übertragungsverfahren und Kodierungstechniken auf den Markt. Die Antennentechnik und die elektronischen Systeme werden leistungsfähiger, und die Funktionalität der Software verbessert sich. In der Regel sind daher Software-Upgrades erforderlich, die sich z. T. nur vor Ort am System ausführen lassen. Während es bei HAPS in der Bodenphase diesbzgl. keine Einschränkungen gibt, geht dies bei satellitengestützten Systemen nicht.

Da HAPS mit Mobilfunktechnik ausgerüstet werden können, sind sie in der Lage zur Erfüllung von Versorgungsaufgaben der Mobilfunkbetreiber in dünner besiedelten Gebieten beizutragen. Im besten Falle könnte dadurch eine flächendeckende Mobilfunkabdeckung erreicht werden, ohne das Fördermittel erforderlich sind. Dies setzt jedoch voraus, dass die HAPS rechtzeitig genug an den Start gehen können. HAPS können zudem eher punktuell eingesetzt werden, nämlich dort, wo sie ihre Vorteile ausspielen können, und müssen nicht ganze Regionen oder Staaten mit

⁸ Starlink hat anstelle der Handsets flache Antennen, die sich automatisch nachführen.

möglichen verbundenen Streuverlusten abdecken. Damit ist eine zielgenaue ökonomische Optimierung möglich.

4 Nutzungsaspekte des Erd-Orbits

Die satellitenbasierten Lösungen benötigen entweder eine geostationäre Position im Orbit (GEO) oder gar ganze Umlaufbahnen (MEO), quasi als breiter Streifen oder als Schale, die ggf. nur an den Polen offen bleibt (LEO). Es muss zudem überwacht werden, dass es nicht zu Kollisionen der kreisenden Satelliten kommt. HAPS hingegen benötigen eine jeweils feste Position in der nationalen Stratosphäre und bewegen sich dort nicht vom Fleck. Während die Satelliten also eine Koordination innerhalb der internationalen, ggf. gar globalen Sphäre benötigen, unterliegen HAPS der nationalen, in der EU ggf. auch europäischen Luftraumkoordination.

Alle satellitenbezogenen Lösungen arbeiten über speziell für die Satellitenkommunikation reservierte Frequenzen. Während geostationäre Satelliten die Frequenzrechte nur in ihrem Footprint benötigen, sind MEOs und LEOs im Prinzip rund um den Globus aktiv und blockieren den Frequenzraum entsprechend global. HAPS nutzen den regulären Frequenzbereich des Mobilfunks mit, der typischerweise national bewirtschaftet wird.

Der Weltraumschrott aus den vergangenen 50 Jahre Raumfahrt belastet den Erd-Orbit schon in erheblichen Ausmaß und führt durch Kollisionen auch immer wieder zu Schäden. Mit Abstand nicht aller Schrott sinkt zu Erde und verglüht in der Atmosphäre. Manches sinkt zur Erde, verglüht jedoch nicht vollständig. Die sich daraus ergebenden Problematiken verschärfen sich mit dem zusätzlichen Einsatz satellitenbasierter Lösungen zunehmend. HAPS hingegen kehren regelmäßig zu ihrem Ausgangspunkt zurück und werden dort gewartet, bis sie wieder neu starten.

5 Technologischer Ausblick zu Trends im Mobilfunk

Im Mobilfunk gibt es lebhafte Entwicklungstrends im Hinblick auf Kapazität, Qualität und Anwendungsbereiche. Zu nennen sind hier schlagwortartig

- Network Sharing
- Software Defined Networking, Network Function Virtualisation (SDN/NFV) mit seiner wesentlichen Ausprägung im Network Slicing
- OPEN RAN (Offenes Radio-Zugangsnetz).

An diesen Entwicklungen kann eine HAPS-basierte Lösung unmittelbar teilhaben, indem sie am Innovationspool der Lösungen für den Mobilfunk-Massenmarkt

partiziert. Für die satellitenbasierten Systeme sind derartige Lösungen zwar theoretisch denkbar, weil es sich jedoch um Sondersysteme – im Prinzip um Einzelentwicklungen oder Entwicklungen in geringer Stückzahl - handelt, sind sie in der Realisierung teuer und nur insoweit umsetzbar, wie sie auf Software-Upgrades basieren. Die Hardware eines Satelliten kann man nicht einfach tauschen.

Im Fall der HAPS bieten diese Ansätze Optionen der Mitnutzung durch andere Netzbetreiber, die die fliegende Plattform gemeinsam nutzen und finanzieren.

6 Multi-Operator Umgebung

Im Grundsatz können HAPS ähnlich wie Mobilfunktürme durch mehrere Telekommunikationsanbieter gemeinsam parallel genutzt werden. Begrenzend wirken hier jedoch die Energieversorgung und ggf. die Platzkapazitäten an Bord. U.U. müsste die Ablösung des HAPS in deutlich kürzeren Abständen erfolgen. Effizienter erscheinen daher Ansätze, die vorsehen, die installierte elektronische Plattform gemeinsam zu nutzen.

In diesem Sinne vorstellbar sind im Fall des Network Sharing Lösungen über Roaming, bei denen andere Netzbetreiber die Plattform des HAPS und seiner Sendeanlage mitnutzen. Ggf. könnte auch der Frequenzraum zusammengelegt und gemeinsam genutzt werden. Derartige Lösungen sind heute in Mobilfunknetzen bereits technisch umgesetzt.

In der Implementierung von Network Slicing im Mobilfunk wird der kapazitative Raum in Kapazitätsbänder (Schichten) unterteilt, denen qualitativ verschiedene Nutzungsklassen zugeordnet werden können und/oder die verschiedenen Nutzern im Wholesale oder Retail Geschäft überlassen und gemeinsam kapazitativ optimiert werden. Derartige Lösungen sind im Mobilfunknetz derzeit in der Implementierung bzw. bereits verfügbar.

OPEN RAN ist hingegen heute noch Zukunftsmusik. Im Prinzip werden sogenannte White Boxes als allgemeine Übertragungssysteme standardisiert, die, verbunden mit Network Slicing, von mehreren Betreibern aus deren individuellen Netzsteuerungssystemen (OAM, Operation, Administration und Management) angesteuert werden. Unterstellt, die fliegende Antenne stellt mit ihrem Übertragungssystem im HAPS eine sogenannte White Box dar, könnten mehrere Betreiber im Rahmen abgestimmter Nutzung der Gesamtkapazität der White Box deren Nutzung aus dem eigenen Netz betreiberindividuell steuern. Dies setzt voraus, dass die fliegende White Box über ausreichend standardisierte Schnittstellen verfügt, und die Betreiber diese bedienen können. Um eine ausreichende Implementierungsreife zu erlangen, benötigt diese Vision noch viel Standardisierungsarbeit im Kontext Open RAN.

7 Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Lösung, HAPS als Plattform für fliegende Antennen einzusetzen, gegenüber den satellitenbasierten Lösungen deutliche Vorteile hinsichtlich Kapazität und Qualität bietet. Ihr punktueller Einsatz bietet die Option einer ökonomischen Optimierung. Bei Verwendung als Mobilfunk-Basisstation sind sie einfach in bestehende und zukünftige Mobilfunk-Infrastrukturen integrierbar und können deren feste und mobile Terminals nutzen, ohne dass gesonderte Geräte, Adapter oder gar Antennen benötigt werden. Im Prinzip eignen sie sich auch für die Nutzung durch mehrere Netzbetreiber, so dass sie gerade in dünn besiedelten Gebieten sehr kosteneffizient eingesetzt werden könnten.

Die Energieversorgung durch Wasserstoff und Brennstoffzellen ist CO₂-neutral. Da die HAPS zur Betankung immer zur Erde zurückkehren belasten sie den Orbit nicht mit Weltraumschrott. Während ihrer Bodenaufenthalte können sie jederzeit an den technischen Fortschritt im Mobilfunk angepasst werden.

HAPS sind schließlich in der Lage, bei der Erfüllung von Versorgungsaufgaben der Mobilfunkfrequenznehmer im ländlichen Raum zu unterstützen und können ggf. auch den Bedarf staatlicher Fördermittel für die Versorgung von weißen Flecken, die von den Versorgungsaufgaben nicht umfasst sind, verringern oder gar erübrigen. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass sie rechtzeitig für diese Zwecke einsatzbereit sind.