

Funkwende – Eine Denkschrift

Wilfried Kühling

Aus sehr verschiedenen Gründen steht die heutige mobile Kommunikationsinfrastruktur (MKIS) bei Verwendung nicht-ionisierender Strahlung (NIS) im Widerspruch zu den Anforderungen eines ausreichenden Gesundheits-, Klima- und Umweltschutzes. Insbesondere trägt die bisherige Regulierung der NIS den bekannten Wirkungen auf Lebewesen nicht genügend Rechnung. Diese Denkschrift konzentriert die im „Weißbuch Elektromagnetische Felder“⁷ entwickelten Ansätze hinsichtlich einer neuen Ausrichtung der Mobilfunk-Infrastruktur. Die Emissionen und Immissionen der Anlagen und Geräte des Mobilfunks bedürfen einer intelligenten Bewirtschaftung, um die Auswirkungen auf die Schutzgüter der Umwelt zu begrenzen. Dies ergibt sich nicht zuletzt aus der Erfüllung der Betreiberpflichten gemäß § 22 Abs. 1 Satz 1 BImSchG, wonach schädliche Umwelteinwirkungen aus Sendeanlagen gemäß 26. BImSchV zu verhindern bzw. auf ein Mindestmaß zu beschränken sind. Das Problem zeigt sich heute insbesondere bei Sendeanlagen in relativ großräumigen Zellen, die mit hoher Sendeleistung über große Entfernungen und tief in Gebäude hinein alle Funktionalitäten mehr als ausreichend sichern wollen. Dies ist nicht mehr zeitgemäß. Innovative intelligente Kommunikationstechniken und Verfahren können eingesetzt werden, um unter anderem die folgenden, hier aufgezeigten Nachteile zu beheben:

- gesundheitliche Effekte beim Menschen und Auswirkungen auf Flora und Fauna,
- hoher und ansteigender Energieverbrauch mit Auswirkungen auf den Klimawandel,
- mangelnde Datensicherheit bei Funkanwendungen z. B. beim WLAN,
- unzureichende Übertragungs-Bandbreiten und andere negative Effekte bei stark erhöhten Anwendungen und Leistungssteigerungen.

Da sich durch technische Möglichkeiten bzw. alternative Technologien Weiterentwicklungen bei der mobilen Kommunikation erzielen lassen, ohne Qualitätseinbußen oder Versorgungslücken befürchten zu müssen, ist das Ziel dieser Denkschrift, ein Umdenken und Umsteuern zu initiieren. Die Zeit scheint für einen solchen Prozess reif zu sein.

Schlüsselwörter: Elektromagnetische Felder, Klimawandel, Energieeinsparung, Gebäudedämmung/Schirmwirkung, Datenschutz

Keywords: Electromagnetic fields, climate change, energy savings, data privacy

1. Grundzüge einer innovativen mobilen Kommunikation

Ausgangspunkt einer intelligenten MKIS ist einerseits die Abkehr von der bisher intensiven Durchstrahlung von Gebäudehüllen und andererseits der Einsatz von Frequenzen des sichtbaren Lichts/Infrarot für mobile Anwendungen innerhalb von Gebäuden. Damit kann die Exposition durch hochfrequente NIS auf ein Mindestmaß verringert werden und erlaubt so eine weitgehende Vorsorge vor gesundheitlichen Effekten.

Da NIS zu den schädlichen Umwelteinwirkungen gemäß BImSchG zählen, kann ein rechtliches und fachliches Schutzkonzept analog zur schädlichen Umwelteinwirkung „Lärm“ entworfen werden. Beim Lärm werden seit geraumer Zeit die Innenräume gemäß städtebaulicher Schutzkategorien durch einen begrenzenden Außenpegel geschützt. So gilt zum Beispiel in Wohngebieten nachts ein Außenpegel, der auch bei einem zur Lüftung geöffneten Fenster einen nächtlichen, erholsamen Schlaf innen



Abb. 1: Immissionsschutzrechtliche Betrachtung der Indoor- und Outdoor-Exposition. Rechenbeispiel zur Verdeutlichung: Gilt als noch schlafgünstiger Bereich ein Wert von < 30 dB(A) und beträgt die Dämpfung durch das geöffnete Fenster etwa 10 – 15 dB(A), dann kann der Außenpegel bei Verkehrslärm nachts für Wohngebiete (WR/WA) mit 40 – 45 dB(A) gemäß DIN 18005 angesetzt werden.

ermöglicht. Der Außenlärm wird also aufgrund des Schutzanspruches für Wohnqualität innen und der Dämpfung durch die Gebäudehülle zugrunde gelegt (s. linker Teil in Abb. 1).

Ebenso kann ein Schutz- bzw. Vorsorgekonzept bei NIS entwickelt werden, das sich am Prinzip der Unverletzlichkeit der Wohnung bzw. einem hohen Schutzanspruch vor NIS orientiert: belegbare Richtwerte für innen in Höhe von $1 \mu\text{W}/\text{m}^2$ (angegeben als Leistungsflussdichte) bzw. als Feldstärke $0,02 \text{ V}/\text{m}$ und ein solcher für außen in Höhe von $100 \mu\text{W}/\text{m}^2$ ($0,2 \text{ V}/\text{m}$)^{1,2,3} wären praktikabel, wenn man eine mittlere Dämpfung durch die Gebäudehülle in Höhe von etwa 20 dB ansetzt (Schirmwirkung von Leichtbeton).⁴

Ein solcher Schutz- bzw. Vorsorgeanspruch ließe sich analog zum Lärm als Immissionsrichtwert festlegen. Alle emittierenden Anlagen außerhalb wären gehalten, Immissionen von $100 \mu\text{W}/\text{m}^2$ insgesamt vor den Gebäuden einzuhalten. Da die Schirmwirkung bzw. Dämpfung der unterschiedlichen Baumaterialien höchst unterschiedlich ist, kann nur ein mittleres Maß angesetzt werden. Die Leistungsflussdichten innen und außen in Höhe von 1 bzw. $100 \mu\text{W}/\text{m}^2$ können also nicht als exakt einhaltbare Werte verstanden werden. Es geht um die Definition einer Größenordnung als Richtwerte, nicht als Grenzwerte. Solch operationalisierbare Zahlenangaben sind allerdings zur Planung und Kontrolle unentbehrlich.

Bei einem Innenpegel von $1 \mu\text{W}/\text{m}^2$ ist ein ausreichender Sicherheitsabstand in Höhe von 30 dB (Faktor 1.000) zum Mindestversorgungspegel durch NIS gegeben. Dieser Wert erlaubt auch ergänzende, weitgehend effektive Abschirmmaßnahmen bei empfindlichen Personen. Wird im Innenbereich bei individuellen Ansprüchen eine höhere Leistung durch NIS gewünscht, stehen technische Möglichkeiten bereit (z. B. Repeater, 5G-Booster).⁵

Soll eine gesundheitsverträglichere mobile Kommunikation innen ermöglicht werden, lassen sich anstatt der heutigen WLAN-Funkfrequenzen nun Lichtfrequenzen (Li-Fi – Light Fidelity) einsetzen, wenn eine ausreichende leitungsgebundene Versorgung ins Haus hinein besteht. Es kommt eine drahtlose Technologie zur Datenübertragung in einem lokalen Übertragungsnetz zum Einsatz, die das Spektrum des sichtbaren Lichts oder Infrarotlichts verwendet. Eine direkte Funkverbindung mit dem Mobilfunknetz wäre nicht mehr nötig, wenn der Zugang beim Provider über ein entsprechendes Internetgateway realisiert wird. Allenfalls verbliebe ein schwaches Signal für den Notruf.

Ergänzend wird inzwischen ein verbindlicher Schutz- bzw. Vorsorgestandard auch für die mit NIS relativ körpernah betriebenen Endgeräte erforderlich. Zum einen, da die bisher angesetzte Schutznorm (SAR-Wert) aufgrund verschiedener Mängel unzureichend ist, zum anderen können sich vielfältig betriebene Endgeräte ohne eine begrenzende Schutznorm zu einer Gesamtmission summieren. Hinzu kommt, dass zukünftig hohe Steigerungsraten funkender Geräte und Systeme zu erwarten sind (Smart Home, IoT – Internet of Things etc.). Ein besonderes Problem stellen die oft vielfältig und gleichzeitig betriebenen Geräte und Netze in Miethäusern dar. Analog zum Lärm, wo bei ruhestörendem Lärm aus der Nachbarwohnung eingeschritten werden kann, bedarf es auch bei NIS einer entsprechenden Interventionsmöglichkeit.

Grundsätzlich lassen sich die Rahmenbedingungen für ein solches Konzept (lediglich für einzelne, näher bestimmte Wohngebiete) bereits planungsrechtlich einführen, wenn eine Gemeinde diesem Qualitätsanspruch folgt.⁶ Am Beispiel Verkehrslärm wird gezeigt, dass mit dem Bauplanungsrecht der Anspruch an Lärmschutz für Wohngebiete um 9 dB(A) strenger gegenüber dem gesetzlich vorgeschriebenen Lärmschutz beim Aus- oder Neubau von Straßen (16. BImSchV) verwirklicht werden kann. Das entspricht etwa einem Zehntel der zugestandenen Lautheit gemäß 16. BImSchV. Über solche „Insellösungen“ hinaus dürften zur Verwirklichung einer generellen „Funkwende“ jedoch bundeseinheitliche Schritte bzw. Vorgaben nötig werden.

2. Begrenzung der gesundheitlichen Wirkungen auf Lebewesen

Das zentrale Dilemma der heutigen MKIS zeigt sich in der mangelhaften rechtlichen Regulierung. NIS dürfen verwendet werden, ohne dass die verschiedenen biologischen Prozesse und Wirkungen auf Organismen angemessen berücksichtigt werden. Denn eigentlich ist bekannt, dass lebende Organismen sich über schwache Energieströme organisieren und biologische Prozesse wie Zellteilung, Zelldifferenzierung etc. stattfinden, die selbst durch geringe Energieströme gestört werden können. So hat sich die gesamte Entwicklung des Lebens und der biologischen Artenvielfalt vor dem Hintergrund natürlicher elektromagnetischer Felder vollzogen und wurde durch sie entscheidend gestaltet.⁷ Eine neue Mobilfunkinfrastruktur wird insbesondere aufgrund der Tatsache erforderlich, dass bei der Ableitung der bisher geltenden Schutznormen diese Vorbedingungen und Lebensprozesse in keiner Weise berücksichtigt wurden und die technischen Feldstärken nun weitgehend unbegrenzt diese natürlichen Voraussetzungen und Prozesse überlagern.

Die daraus folgenden gesundheitlichen Auswirkungen beim Menschen sowie Effekte bei Tieren und Pflanzen sind inzwischen vielfältig erfasst. Neben anderen Wirkungen ist die Störung der primären Entwicklungsprozesse in Organen und Zellen heute prinzipiell verstanden, was insbesondere bei Individuen mit Vorschädigungen gesundheitliche Effekte erwarten lässt.⁸ Die Krebspromotion im Tierversuch ist bestätigt⁹ und auch die Krebsentstehung im Tierversuch weitgehend belegt.¹⁰ Wobei die Notwendigkeit einer Übertragung von Erkenntnissen aus dem Tierversuch auf den Menschen außer Frage steht.^{11, 12} Schließlich wurde die Übereinstimmung dieser Erkenntnisse beim Menschen auch epidemiologisch festgestellt.¹³

Aus diesen Tatsachen heraus widerspricht ein ungeregeltes „Weiter so“ beim Ausbau der MKIS durch NIS der Fürsorgepflicht des Staates und verschiedenen grund- und fachgesetzlichen Vorgaben.¹⁴ Ein Schutz vor gesundheitlichen Wirkungen folgt hierzulande in rechtlicher Hinsicht lediglich einem eingeschränkten Gefahrschutz und nicht der Vorsorge. Der rechtliche Schutzgrundsatz macht bei den zu begrenzenden Wirkungen lediglich an der schädlichen Erwärmung durch Mikrowellen fest (physikalische, thermische Wirkung). Die um viele Größenordnungen unterhalb dieser Werte beobachtete biologische Wirksamkeit der NIS steht – wie dargestellt – außer Frage, findet aber keinerlei Entsprechung in den einzuhaltenden Schutznormen. Auch werden keine vulnerablen Gruppen wie Föten, Schwangere, Kinder, immungeschwächte Personen etc. beachtet. So konnte sich eine weitverbreitete Grundbelastung mit zum Teil hohen Immissionen durch NIS insbeson-

dere in Städten, in der Nähe von Sendeanlagen und bei der körpernahen Anwendung von Endgeräten einstellen; der weitere Anstieg lässt sich bereits ermitteln bzw. wird prognostiziert.¹⁵

Eine sehr weitgehende Begrenzung und Minimierung der NIS ist technisch – wie oben angerissen – jedoch ohne weiteres möglich und vor allem rechtlich geboten, ohne dass deutliche Einbußen bei einer MKIS zu besorgen wären. Es käme allein auf den gesellschaftlich-politischen Willen an.

3. Energieeinsparung und Klimaschutz

Der Energie- und Ressourcenbedarf digitaler Infrastrukturen steigt stetig, obwohl Potentiale zur Energie- und Ressourceneinsparung auch in der Modernisierung der Mobilfunknetze liegen. Der sogenannte Rebound-Effekt entsteht insbesondere durch immer mehr internetfähige Geräte und immer längere Nutzungszeiten bei datenintensiven Anwendungen, was den Energieverbrauch steil nach oben treibt – weniger direkt bei den Nutzer:innen, sondern vor allem in den Rechenzentren dieser Welt. Wäre das Internet ein Land, dann hätte es im Jahr 2020 bereits den sechstgrößten CO₂-Ausstoß der Welt gehabt.¹⁶ Schuld daran ist auch der weltweite Datenrausch der Handynutzer.

Ergebnisse des UBA-Forschungsprojektes „Green Cloud-Computing“ warnen gerade im Hinblick auf deutlich effizientere kabelgebundene Netzwerke: „Der Mobilfunk ist für den Hausanschluss ungeeignet und aus Sicht des Umwelt- und Klimaschutzes nicht tragfähig.“¹⁷ Diese Einschätzung erfährt eine noch wesentlich höhere Bedeutung, wenn die für die Durchstrahlung der Gebäudehüllen aufgewendete Energie entfallen kann (etwa um den Faktor 100 erhöhte Strahlungsleistung, siehe Punkt 2) und weitere Verbesserungen erzielt werden können (z. B. lokales Roaming).

Ein Umdenken/eine Verhaltensänderung hinsichtlich übertragener Datenvolumina (z. B. beim Streaming auf dem Handy in HD-Qualität) kann nicht nur allein den Nutzer:innen überlassen sein, es bedarf auch rahmensetzender Anreize oder Vorgaben zur Steuerung (z. B. die Vorgabe einer automatisch reduzierten Bildqualität beim Abspielen auf dem Handy). Die Aufgaben für den Gesetzgeber wären zwar vielfältig, aber ein Aussitzen nötiger Veränderungen verlagert Probleme lediglich in eine Zukunft, in der heute noch leichte und kostengünstige Maßnahmen dann meist viel schwerer und teurer umzusetzen sind (Vorsorge statt späterer Sanierung und möglicher Entschädigung). Eine Reduzierung der Sendeantennen („ein Netz für alle“, Roaming), was weitere Energieeinsparungen ermöglichen würde, wäre ebenfalls mit den Anforderungen des § 22 Abs. 1 Satz 1 BImSchG begründbar.

4. Leistungssteigerungen durch Verwendung von Lichtfrequenzen

Bei einer Funkwende ist der Blick vor allem in die Zukunft bzw. auf die zukünftigen Erwartungen zu richten. Begrenzungen des Einsatzes bei Funkanwendungen werden heute bereits sichtbar. Das Spektrum der drahtlosen Datenübertragung durch das sichtbare Licht/Infrarotlicht dagegen ist ca. 2.600 mal größer als das Spektrum der bisher verwendeten Mikrowellen und besitzt eine Bandbreite von ca. 780 THz.¹⁸

Die technologischen Weiterentwicklungen (Smart Home, Internet der Dinge etc.) benötigen in der Zukunft immer höhere Bandbreiten, um die steigenden Datenmengen übertragen zu

können. Erwartet wird, dass in 20 Jahren eine Bandbreite von 6 THz benötigt wird, die damit weit über der Kapazität des Spektrums der Mikrowellen (0,3 THz) liegt.¹⁸ Wobei 6 THz nur etwa 0,8 % des Licht-Spektrums ausmachen. Li-Fi verfügt also über eine enorme Kapazität und wird an Bedeutung stark zunehmen. Entsprechende Komponenten sind bei verschiedenen Anbietern bereits verfügbar und in ersten Projekten erprobt.¹⁹

Ein weiterer Vorteil der Indoor-Versorgung via Lichtfrequenzen zeigt sich auch aus Gründen des Datenschutzes. Die bisherige Anbindung aller Lebens- und Arbeitsbereiche durch NIS (über WLAN etc.) erlaubt es in zu vielen Fällen, von außerhalb der Gebäude auf Accesspoints, Alexa etc. unbemerkt zuzugreifen. Da Lichtfrequenzen Körper (wie z. B. Wände) nicht durchdringen, kann ein Zugriff von außen unterbunden werden. Allein aus diesen Gründen gilt die Einführung und Verbreitung von Li-Fi als Gebot der Stunde.

5. Forschung

Im Sinne einer intelligenten Begrenzung der NIS, des Einsatzes der gesundheitlich unbedenklicheren Licht-Technologie (Li-Fi) vor allem in Räumen und hinsichtlich weiterer Fragen wird begleitend eine gezielte Forschung zur Klärung noch offener Fragen einer Funkwende erforderlich.

6. Fazit

Die hier auf zentrale Aspekte begrenzte Argumentation für eine dringend anzustrebende Funkwende zeigt im Grunde auf eine Entwicklung, in der es weitgehend Gewinner gibt oder positive Erwartungshorizonte entstehen:

- Lebewesen, insbesondere Menschen, können vor allem in Innenräumen, die dem Aufenthalt dienen, weitestgehend vor NIS geschützt werden.
- Der Datenschutz kann deutlich verbessert werden.
- Die skizzierte Funkwende kann durch erhebliche Energieeinsparungen einen deutlichen Beitrag zum Klimaschutz leisten und zur energetischen Souveränität unseres Landes beitragen.
- Steigerungsraten beim Datenverkehr und Anwendungsvielfalt können durch höhere Bandbreiten bei LiFi ermöglicht werden. Gerade die Anwendung der innovativen Lichttechnologie bietet eine Entwicklung, die nicht nur viele Vorteile vereint, sondern in wirtschaftlicher Hinsicht den Technologie- und Wirtschaftsstandort Deutschland noch konkurrenzfähiger machen könnte.

Danksagung

In diese Denkschrift sind neben eigenen Arbeiten auch Ideen, Anregungen und Gespräche eingeflossen, die sich kaum mehr einzelnen Personen oder Quellen zuordnen lassen. Gleichwohl soll an dieser Stelle ein ausdrücklicher Dank all denen ausgesprochen werden, die an diesem Ergebnis Anteil haben.

Autor:

Prof. Dr.-Ing. habil. Wilfried Kühling
Institut für Geowissenschaften und Geographie,
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
E-Mail: w.kuehling@web.de

Quellen

- 1 Belyaev I, Dean A, Eger H et. al: (2017): EUROPAEM EMF-Leitlinie 2016 zur Prävention, Diagnostik und Therapie EMF-bedingter Beschwerden und Krankheiten. Übersetzung aus: Reviews on Environmental Health 31 (3): 363-397. DOI 10.1515/revh-2016-0011; <https://europaem.eu/bibliothek/artikel/europaem-emf-leitlinie-2016>
- 2 BUND – Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (2008): Für zukunftsfähige Funktechnologien. BUND Position 46. Berlin. <https://www.bund.net/service/publikationen/detail/publication/fuer-zukunftsfaeihige-funktechnologien/>
- 3 Kühling W, Hornberg C (2014): Nichtionisierende Strahlung. In: UVP-Gesellschaft e.V., AG Menschliche Gesundheit (Hrsg.): Leitlinien Schutzgut Menschliche Gesundheit, Hamm. 137-152 https://uvp.de/_openaccess/leitlinien/LL_SG_Mensch_2020.pdf
- 4 Bayerisches Landesamt für Umwelt (2008): Schirmung elektromagnetischer Wellen im persönlichen Umfeld <https://www.informationszentrum-mobilfunk.de/mediathek/broschueren/schirmung-elektromagnetischer-wellen-im-persoelichen-umfeld>
- 5 Mehr 5G für drinnen mit dem 5G Booster der Telekom <https://www.telekom.com/de/medien/medieninformationen/detail/mehr-5g-fuer-drinnen-mit-dem-5g-booster-der-telekom-639646>
- 6 Kühling W (2021): 5G/Mobilfunk durch Gesamträumliche Planung steuern. H. 13 der Schriftenreihe „Wirkungen des Mobil- und Kommunikationsfunks“, Saarbrücken: Kompetenzinitiative zum Schutz von Mensch, Umwelt und Demokratie e.V.; <https://kompetenzinitiative.com/broschuerenreihe/>
- 7 Kühling W, Ludwig P (2022): Weißbuch Elektromagnetische Felder. Impulse für die gesundheits- und umweltverträgliche Gestaltung des technologischen Fortschritts im Bereich Mobilfunk/5G. H. 15 der Schriftenreihe „Wirkungen des Mobil- und Kommunikationsfunks“, Saarbrücken: Kompetenzinitiative zum Schutz von Mensch, Umwelt und Demokratie e.V. <https://kompetenzinitiative.com/broschuerenreihe/>
- 8 Mevissen M, Schürmann D (2021): Gibt es Hinweise auf vermehrten oxidativen Stress durch elektromagnetische Felder? Eine Zusammenfassung neuerer relevanter Tier- und Zellstudien in Bezug auf gesundheitliche Auswirkungen. Newsletter-Sonderausgabe Januar 2021. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektrosmog/newsletter.html>; 14.01.2022
- 9 Lerchl A, Klose M, Grote K et al. (2015): Tumor promotion by exposure to radiofrequency electromagnetic fields below exposure limits for humans. Biochem Biophys Res Commun 2015; 459 (4): 585-590 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25749340/>
- 10 EPRS – Wissenschaftlicher Dienst des Europäischen Parlaments, Panel for the Future of Science and Technology (STOA), Belpoggi, F. (2021): Health impact of 5G. PE 690.012. [https://www.europarl.europa.eu/stoa/en/document/EPRS_STU\(2021\)690012](https://www.europarl.europa.eu/stoa/en/document/EPRS_STU(2021)690012)
- 11 ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (1998): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz), Health Physics 74 (4): 494-522 Deutsche Übersetzung, in: Berichte der Strahlenschutzkommission Heft 23. <http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdlger.pdf>
- 12 BERENIS – Beratende Expertengruppe nicht-ionisierende Strahlung (2018): Newsletter-Sonderausgabe November 2018 <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/elektrosmog/fachinfo-daten/Newsletter%20BERENIS%20-%20Sonderausgabe%20November%202018.pdf.download.pdf/Newsletter%20BERENIS%20-%20Sonderausgabe%20November%202018%20-%20DEUTSCH.pdf>
- 13 Hardell L, Carlberg M, Hedendahl (2018): Kommentar zu technischen Berichten des National Toxicology Program (NTP) zu Untersuchungen über die Toxikologie und Karzinogenese bei einer Ganzkörperexposition von Ratten und Mäusen mit Mobiltelefonstrahlung. <https://www.emfdata.org/de/dokumentationen/detail?id=216>
- 14 Kühling W (2020): Wissenschaft verkehrt, oder: Wie Gesetzgebung und Vollzug wissenschaftliche Erkenntnisse missbrauchen. Dargestellt am Beispiel elektromagnetischer Felder. In: umwelt medizin gesellschaft 33 1/2020: 11-18. <https://www.diagnose-funk.org/download.php?field=filename&id=1020&class=NewsDownload>
- 15 Koppel T, Ahonen M, Carlberg M, Hardell L (2022): Very high radiofrequency radiation at Skeppsbron in Stockholm, Sweden from mobile phone base station antennas positioned close to pedestrians' heads, Environ Res 2022; 208: 112627 <https://www.emf-portal.org/de/article/46486>
- 16 <https://de.statista.com/infografik/26873/co2-vergleich-dsl-und-glasfasernetz/>
- 17 UBA – Umweltbundesamt (2020): Energie- und Ressourceneffizienz digitaler Infrastrukturen; https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/politische-handlungsempfehlungen-green-cloud-computing_2020_09_07.pdf
- 18 Haas H: LiFi is a paradigm-shifting 5G technology. In: Reviews in Physics 3 (Nov. 2018), S. 26–31. Doi: 10.1016/j.revip.2017.10.001. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405428317300151>
- 19 Siehe z. B.: <https://www.oledcomm.net/product-range/> <https://www.signify.com/de-de/innovation/trulifi>; <https://purelifi.com/lifi-technology/>