

Knieps, Günter

**Article**

## Internet der Dinge und die Zukunft der Netzökonomie

Wirtschaftsdienst

*Suggested Citation:* Knieps, Günter (2019) : Internet der Dinge und die Zukunft der Netzökonomie, Wirtschaftsdienst, ISSN 1613-978X, Springer, Heidelberg, Vol. 99, Iss. 5, pp. 348-354, <https://doi.org/10.1007/s10273-019-2455-3>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/213731>

**Standard-Nutzungsbedingungen:**

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

**Terms of use:**

*Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.*

*You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.*

*If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.*

Günter Knieps\*

# Internet der Dinge und die Zukunft der Netzökonomie

Das Internet der Dinge wäre undenkbar ohne den rapiden technologischen Fortschritt in der Telekommunikation während der vergangenen Jahrzehnte von spezialisierten schmalbandigen Netzen hin zu All-IP-Breitbandnetzen. Dadurch wird ein hochvolumiger Transport von Datenpaketen für ein großes Spektrum von Anwendungsdiensten möglich. Die Entwicklung des Internets der Dinge hängt entscheidend von den Qualitätsanforderungen bei der Datenpaketübertragung ab, damit Sensornetze, Adaptern oder intelligente Regler ein zeitkritisches Management in stationären und mobilen Netzen umsetzen können. Von entscheidender Bedeutung für die Entwicklung von intelligenten Netzen ist die Verknüpfung der physischen Welt mit komplementären virtuellen Netzen.

Wettbewerb in Netzen setzt eine umfassende Marktöffnung voraus. Die institutionelle Arbeitsteilung zwischen sektorspezifischer Regulierung und allgemeiner Wettbewerbspolitik stellt ein zentrales Forschungsgebiet in der Netz- und Wettbewerbsökonomie dar. In diesem Zusammenhang wurde der disaggregierte Regulierungsansatz entwickelt, dessen Kernanliegen die Lokalisierung netzspezifischer Marktmacht und eine disaggregierte Zugangs- und Preisregulierung ist.<sup>1</sup>

Dabei müssen verschiedene Facetten des Wettbewerbs unterschieden werden, die nicht nur auf atomistischen Märkten mit einer großen Zahl aktiver Anbieter, sondern auch bei Vorliegen von Größenvorteilen aufgrund hoher Fixkosten relevant sind. Zu den Facetten zählen der potenzielle Wettbewerb als Substitut für mangelnden Wettbewerb zwischen aktiven Anbietern, monopolistischer Wettbewerb bei Marktzutritt mit innovativen Produktqualitäten sowie der dynamische Wettbewerb. Le-

diglich diejenigen Netzbereiche, in denen weder aktiver noch potenzieller Wettbewerb möglich ist, müssen über die allgemeine Wettbewerbspolitik hinausgehend ex ante reguliert werden. Netzinfrastrukturen wie Schienentrassen, Flughäfen, Elektrizitäts- oder Wassernetze, deren Zugang unbedingt erforderlich ist, um komplementäre Netzdienstleistungen bereitstellen zu können, und die ökonomisch nicht sinnvoll dupliziert werden können, erfordern eine Ex-ante-Regulierung. Nur so kann der diskriminierungsfreie Zugang zu „angemessenen“ Zugangstarifen sichergestellt werden, sodass sich der Wettbewerb auf den Märkten für Netzdienstleistungen voll entfalten kann.

Die Netzökonomie hat sich kontinuierlich entwickelt und kann durch zwei sich gegenseitig ergänzende Entwicklungen charakterisiert werden. Zum einen die Beschäftigung mit unterschiedlichen Netzsektoren: Sukzessive erweiterten sich die Arbeitsfelder auf Verkehrsmärkte, Energiemärkte, Postsektor, Kabelfernsehen, Internet, Wassernetze und andere Sektoren. Zum anderen wurde es dadurch möglich, die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der verschiedenen Netzsektoren aus der Perspektive der Allokations- und Wettbewerbsökonomie und der Regulierungstheorie zu untersuchen. Die Arbeitsteilung zwischen allgemeiner Wettbewerbspolitik und sektorspezifischer Regulierung ist dabei von aktueller wirtschaftspolitischer Relevanz.

## Telekommunikationssektor als Vorreiter

Bereits zu einer Zeit, als noch sämtliche Netzsektoren als wettbewerbspolitische Ausnahmebereiche angesehen wurden und sich fest in der Hand staatlicher Monopolun-

\* Dieser Beitrag ist eine revidierte Fassung meiner Abschiedsvorlesung vom 8.2.2019 an der Wirtschafts- und Verhaltenswissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

<sup>1</sup> G. Knieps: Phasing out Sector-Specific Regulation in Competitive Telecommunications, in: *Kyklos*, 50. Jg. (1997), H. 3, S. 325-339.

**Prof. Dr. Günter Knieps** ist Professor an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Abteilung für Netzökonomie, Wettbewerbsökonomie und Verkehrswissenschaft.

ternehmen befanden, gewann die ökonomische Analyse des Wettbewerbs in der Telekommunikation an Bedeutung.<sup>2</sup> Wichtige Impulse für die institutionelle Umsetzung in Deutschland gingen dabei von einem Sondergutachten der Monopolkommission aus.<sup>3</sup> Auch wenn damals der technische Fortschritt, insbesondere die Konvergenz von Telekommunikation und elektronischer Datenverarbeitung, einen essenziellen Treiber für den enormen institutionellen Reformbedarf darstellte, war unvorhersehbar, welche ungeheure Dynamik der Telekommunikationssektor in der Folgezeit entfalten würde.

### Qualitätsdifferenzierte All-IP-Breitbandnetze

Seit den 1990er Jahren hat die Dynamik des Telekommunikationssektors rapide zugenommen. Während in den Anfangszeiten das Internet lediglich für E-Mails und den Versand kleiner Dateien über das schmalbandige Telefonnetz genutzt wurde, ermöglichen inzwischen breitbandige Netzinfrastrukturen einen hochvolumigen Datenpakettransport für ein großes Spektrum von Anwendungsdiensten. Anstelle der herkömmlichen Spezialinfrastrukturen wird im All-IP-Internet auf sämtlichen Breitbandnetzen weltweit das gleiche Grundprinzip der Datenpaketübertragungslogistik angewendet, das auf Fragmentierung der Datenpakete und Adressierung im Datenpaket-Header beruht. Die IP-basierte Übertragung ermöglicht es den Netzbetreibern, eine Kombination von fixen und mobilen Breitbandinfrastrukturen für eine Vielzahl von heterogenen Anwendungsdiensten mit sehr unterschiedlichen Anforderungen an das Datenpaketvolumen einzusetzen. So zeigt der BitTorrent Case der Federal Communications Commission in den USA aus dem Jahre 2008<sup>4</sup> die Gefahr einer systematischen Übernutzung der Netzkapazitäten etwa in Form von Tauschringen für Videofilme, solange keine auslastungsabhängigen Benutzstarife erhoben werden. Das traditionelle Best-Effort-Prinzip im Internet, das allen Datenpaketen gleiche Priorität zuordnet, stößt an seine Grenzen.<sup>5</sup> Um ad hoc intransparente Rationierungsverfahren zu vermeiden, wird ein aktives Staumanagement beim Datenpakettransport im Internet erforderlich. Ein aktives Staumanagement, das alle Datenpakete mit einem einheitlichen

Stautarif belegt, wurde, basierend auf früheren Arbeiten über Stautarife auf Autobahnen, bereits von MacKie-Mason und Varian<sup>6</sup> entwickelt.<sup>7</sup> Falls ein Netz stark ausgelastet ist, sind die Stauexternalitäten, die ein zusätzliches Datenpaket für alle anderen Datenpakete verursacht, hoch und folglich ist auch der sozial optimale Stautarif für alle Datenpakete hoch.

Allerdings löst ein einheitlicher Stautarif nicht das Problem, dass unterschiedliche Anwendungsdienste sehr heterogene Anforderungen an die Qualitätsparameter der Datenpaketübertragung hinsichtlich Verzögerung, Varianz der Verzögerung (jitter) und Datenpaketverlust stellen. So sind etwa E-Mails, Dokumententransfer, Video-on-Demand verzögerungstolerante Anwendungen, dagegen haben Echtzeitanwendungen wie Voice-over-IP oder interaktive Computerspiele eine geringe Verzögerungstoleranz. Standardkomitees, insbesondere die Internet Engineering Task Force, entwickelten unterschiedliche Standards für die Qualitätsdifferenzierung mittels aktiven Verkehrsmanagements, indem Datenpakete priorisiert oder Bandbreitenkapazitäten reserviert werden. So kann der Datenpakettransport innerhalb verschiedener Qualitätsklassen mit unterschiedlichen Qualitätsgarantien bezogen auf Qualitätsparameter wie zulässige Verzögerung, Varianz der Verzögerung oder Paketverlust bereitgestellt werden, sodass die heterogenen Anforderungen von unterschiedlichen Kommunikationsanwendungen erfüllt werden können.<sup>8</sup>

### Aktives Staumanagement und Qualitätsdifferenzierung

Während die Entwicklung von Standards innerhalb von offenen Komitees in nicht kommerzieller Form realisierbar ist, müssen die Investitionen in Netzkapazitäten durch marktbasierter unternehmerische Entscheidungen von den All-IP-Netzbetreibern getroffen werden. Aktives unternehmerisches Verkehrsmanagement basiert auf den Opportunitätskosten der Kapazitätsnutzung. Falls jede Anwendung die Opportunitätskosten der von ihr benötigten Übertragungskapazitäten trägt, verschwinden die Anreize, zwischen Anwendungen mit unterschiedlichen Qualitätsanforderungen zu diskriminieren, das Prinzip der marktbasierter Netzneutralität ist folglich erfüllt.<sup>9</sup>

2 G. Knieps, J. Müller, C. C. von Weizsäcker: Die Rolle des Wettbewerbs im Fernmeldebereich, Baden-Baden 1981.

3 Monopolkommission: Die Rolle der Deutschen Bundespost im Fernmeldewesen, Sondergutachten, Bd. 9, Baden-Baden 1981.

4 Federal Communications Commission (FCC): In the Matter of Formal Complaint of Free Press and Public Knowledge against Comcast Corporation for Secretly Degrading Peer-to-Peer Applications, File Nr. EB-08-IH-1518 (FCC 08-183), Memorandum Opinion and Order 2000, Adopted: 1.8.2008.

5 G. Knieps: Network neutrality and the Evolution of the Internet, in: International Journal of Management and Network Economics, 2. Jg. (2011), H. 1, S. 27-28.

6 J. K. MacKie-Mason, H. R. Varian: Pricing congestible network resources, in: IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 13. Jg. (1995), H. 7, S. 1141-1149.

7 H. Mohring, M. Harwitz: Highway Benefits: An Analytical Framework, Evanston (Il.) 1962.

8 G. Ash, A. Morton, M. Dolly, P. Tarapore, C. Dvorak, Y. El Mghazli: Y.1541-QOSM: Model for Networks using Y.1541 Quality-of-Service Classes, RFC 5976 (2010); J. Babiarz, K. Chan, F. Baker: Configuration Guidelines for DiffServ Service Classes, RFC 4594, 2006.

9 G. Knieps: Network neutrality ..., a. a. O., S. 25.

Eine wichtige netzökonomische Herausforderung besteht darin, auf der Basis einer hinreichend allgemeinen Netzarchitektur für eine Hierarchie von Verkehrsklassen (Generalised-DiffServ-Architektur) anreizkompatible Preis- und Investitionsmodelle für den qualitätsdifferenzierten Datenpakettransport zu entwickeln. Es handelt sich um einen flexiblen analytischen Modellrahmen, der es ermöglicht, unterschiedliche Qualitätsdifferenzierungsstrategien zu implementieren. Anwendungen, die sehr verzögerungssensitiv sind, benötigen eine hohe Qualitätsklasse mit einer garantierten sehr niedrigen maximalen Verzögerung, während für Anwendungen mit eher höherer Toleranz hinsichtlich Verzögerung eine niedrigere Qualitätsklasse ausreichend ist, die auch ohne Qualitätsgarantien bereitgestellt werden kann. Um eine anreizkompatible Qualitätsdifferenzierung zu ermöglichen, müssen die Tarife für den Datenpakettransport in unterschiedlichen Qualitätsklassen monoton zunehmen, sodass in der höchsten Qualitätsklasse die höchsten Tarife und in der niedrigsten ohne Qualitätsgarantien der niedrigste Tarif anfallen.<sup>10</sup>

### Stochastische und deterministische Qualitätsgarantien

Grundsätzlich lässt sich zwischen stochastischen und deterministischen Qualitätsgarantien unterscheiden:

- Deterministische Qualitätsgarantien basieren auf einer Garantie der maximal zulässigen Verzögerung und erfordern eine Reservierung der benötigten Bandbreite sowie zusätzliche Netzkapazitäten (restoration capacities), um vereinbarte Qualitätsgarantien einzuhalten.<sup>11</sup>
- Demgegenüber können stochastische Qualitätsgarantien bereits über eine Priorisierung der Datenpaketübertragung für eine Hierarchie von Qualitätsklassen bereitgestellt werden.

Die Debatte über Netzneutralität war lange auf die Rolle von priorisierten Qualitätsklassen mit stochastisch abgeleiteten niedrigeren durchschnittlichen Wartezeiten fokussiert.<sup>12</sup> Inhalteanbieter mit zwischenspeicherbaren (cacheable) Inhalten (z.B. Videostreaming) besitzen zudem die strategische Möglichkeit, die Inhalte über Over-

lay-Netze auf Basis des Best-Effort-Internets bereitzustellen, indem sie insbesondere die Inhalte in der Nähe der Nachfrager einspeisen.<sup>13</sup> Solange die Anwendungen im Internet sich auf zwischenspeicherbare Kommunikationsdienste beschränkten und Echtzeit-Anwendungen (z.B. Sprachtelefonie) in Spezialnetzen abgewickelt wurden, fand eine Implementierung von qualitätsdifferenzierten Architekturen mit deterministischen Qualitätsgarantien im Internet nicht statt.

Das Internet der Dinge ist eng mit Innovationen in der Informations- und Kommunikationstechnologie verknüpft. Bresnahan und Trajtenberg<sup>14</sup> charakterisierten die Halbleitertechnologie als General-Purpose-Technologie mit einem inhärenten Potenzial für technologischen Fortschritt und innovative Komplementaritäten in allen Lebensbereichen. Darauf aufbauende rapide Fortschritte in der Mikroprozessortechnologie führten zu einer enormen Zunahme der Leistungsfähigkeit der Computer.<sup>15</sup> Inzwischen geht die Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologien in Richtung vernetzter Computer und echtzeitbasierter Maschine-zu-Maschine-Kommunikation.

### Komplementarität physischer und virtueller Netze

Der Begriff Internet der Dinge wird Kevin Ashton zugeschrieben, der auf die besondere Relevanz der physischen Welt im Vergleich zur virtuellen auf Informations- und Kommunikationstechnologien basierenden Welt verweist.<sup>16</sup> Das Internet der Dinge sowie der Übergang zu intelligenten Netzinfrastrukturen und smarten physischen Netzdienstleistungen verändert die traditionellen Netzsektoren fundamental und stellt somit auch die Netzökonomie vor völlig neuartige Fragen und Probleme. Es scheint keine allgemein gültige Definition für das Internet der Dinge der Zukunft zu geben, aber gewisse Grundprinzipien, die durchgängig angewendet werden, lassen sich erkennen. Entscheidend ist die Verknüpfung der physischen Welt mit komplementären virtuellen Netzen auf der Basis moderner Informations- und Kommunikationstechnologien. Auf diese Weise verwandeln sich die herkömmlichen physischen Netzinfrastrukturen in intelligente Netze, sodass echtzeitbasiert, georeferenziert,

10 Ders.: Entrepreneurial traffic management and the Internet Engineering Task Force, in: *Journal of Competition Law & Economics*, 11. Jg. (2015), H. 3, S. 739-741.

11 G. Knieps, V. Stocker: Price and QoS differentiation in all-IP networks, in: *International Journal of Management and Network Economics*, 3. Jg. (2016), H. 4, S. 324-325.

12 J. Bauer, G. Knieps: Complementary innovation and network neutrality, in: *Telecommunications Policy*, 42. Jg. (2018), H. 2, S. 174.

13 V. Stocker, G. Smaragdakis, W. H. Lehr, S. Bauer: The Growing Complexity of Content Delivery Networks: Challenges and Implications for the Internet Ecosystem, in: *Telecommunications Policy*, 41. Jg. (2017), H. 10, S. 1003-1016.

14 T. F. Bresnahan, M. Trajtenberg: General purpose technologies: Engines of growth?, in: *Journal of Econometrics*, 65. Jg. (1995), H. 1, S. 83-108.

15 E. Brynjolfsson, A. McAfee: *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*, New York 2014, S. 39-56.

16 K. Ashton: That „Internet of Things“ Thing, in: *RFID Journal*, 22. Jg. (2009), S. 97-114.

adaptive Allokationsentscheidungen getroffen werden können. Bi-direktionale Messgeräte, Sensoren, Aktoren und Fernsteuerung durch interaktive Maschine-zu-Maschine-Kommunikation in Echtzeit bilden die Basis für virtuelle Netze.

Es geht nicht mehr nur um reine Kommunikationsanwendungen wie Internettelefonie oder Videostreaming, sondern die Informations- und Kommunikationstechnologien stellen zunehmend Schlüsseltechnologien dar, die sämtliche Lebensbereiche durchdringen. Die zukünftige Entwicklung des Internets der Dinge hängt entscheidend von den Qualitätsanforderungen bei der Datenpaketübertragung ab, die Sensornetze, Adaptoren, intelligente Regler etc. benötigen, um auch zeitkritisches Management in stationären und mobilen Netzen für echtzeitkritische Anwendungen adaptiv zu ermöglichen. Diese Anforderungen können im traditionellen Internet nicht erfüllt werden. Die Entwicklungen in Richtung Internet der Dinge wären undenkbar ohne die fundamentalen Entwicklungen der Telekommunikation hin zu qualitätsdifferenzierten All-IP-Breitbandnetzen, die den Charakter einer General-Purpose-Technologie haben, weil sie für vielfältige, heterogene Anforderungen der Datenpaketübertragung eingesetzt werden können.

### Architektur virtueller Netze

Das Internet der Dinge ermöglicht die Entwicklung von intelligenten Netzen und richtet den Fokus auf die Interaktion zwischen physischen Netzinfrastrukturen und -dienstleistungen mit komplementären virtuellen Netzen. Die physischen Netzinfrastrukturen und -dienste sind naturgemäß sehr unterschiedlich, je nachdem ob es sich z.B. um Schienenverkehr, Straßenverkehr, Seeschifffahrt, Wassernetze, Pipelines oder Elektrizitätsnetze handelt. Daher haben sie auch heterogene Anforderungen an die Ausgestaltung eines virtuellen Netzes, obwohl sie alle auf derselben von Informations- und Kommunikationstechnologien gesteuerten Logistik des Internetprotokolls (IP) basieren. Aktives Staumanagement und Qualitätsdifferenzierung beim Datenpakettransport in All-IP-Breitbandnetzen sind für den Aufbau von virtuellen Netzen unerlässlich.<sup>17</sup>

Deterministische Qualitätsgarantien bei der Datenpaketübertragung erlangen für zeitkritische Anwendungen eine immer größere Bedeutung. Für eine Hierarchie von deterministischen Qualitätsklassen sind Preis- und Investitionsmodelle erforderlich, um heterogene Anforderungen

an garantierte Übertragungsqualitäten anreizkompatibel anbieten zu können. Die Hierarchie der Qualitätsklassen kann von den All-IP-Netzanbietern über Bandbreitenreservierung mittels Zulassungskontrollen implementiert werden. Je höher die Qualitätsklasse, umso strenger sind die Anforderungen an maximal zulässige Verzögerungen beim Datenpakettransport und umso höher sind auch die erforderlichen Bandbreitenkapazitäten. Da die Grenzkosten des Datenpakettransports in höheren Qualitätsklassen ansteigen, ergeben sich für den Datenpakettransport höhere Tarife.<sup>18</sup>

Grundlegend ist die Arbeitsteilung zwischen All-IP-Netzanbietern und Anbietern von virtuellen Netzen: Entscheidender Input virtueller Netze sind qualitätsdifferenzierte Bandbreitenkapazitäten mit heterogenen Datenpaketübertragungsqualitäten, um georeferenzierte, adaptive Echtzeitanwendungen von smarten physischen Netzdienstleistungen zu ermöglichen. Die All-IP-Netzbetreiber bieten qualitätsdifferenzierte All-IP-Bandbreitenkapazitäten in sogenannten Next-Generation-Netzen an, die für eine große Vielfalt von möglichen Anwendungen eingesetzt werden können.<sup>19</sup> Demgegenüber kombinieren die virtuellen Netzbetreiber die Bandbreitenkapazitäten innerhalb des geografischen Bereichs ihres virtuellen Netzes mit anderen Dimensionen eines virtuellen Netzes wie Sensornetzen, satellitenbasierten Ortungs- und Navigationsdiensten sowie Datenverarbeitung, abhängig von den Erfordernissen der physischen Netzdienstleistungen.

### Innovationspotenziale von intelligenten Netzen

Die Anforderungen an die verschiedenen Dimensionen eines virtuellen Netzes variieren erheblich. Verschiedene Anwendungsbereiche stellen heterogene Anforderungen sowohl an die physische als auch an die virtuelle Seite des Internets der Dinge, die nicht nur die Netzsektoren der Zukunft, sondern die ganze App-Ökonomie fundamental verändern können. Grundlegende Veränderungen der Netzarchitekturen und -dienstleistungen in intelligenten Netzen schaffen vielfältige Anforderungen an innovative Betreiberplattformen. Die Anbieter der physischen Netzdienstleistungen können ihre Betreiberplattformen durch Kooperation oder auch durch Integration mit geeigneten virtuellen Netzbetreibern bereitstellen.

17 G. Knieps: Internet of Things, future networks and the economics of virtual networks, in: Competition and Regulation in Network Industries, 18. Jg. (2017), H. 3-4, S. 240-255.

18 Ebenda, Appendix.

19 ITU-T: Functional framework and capabilities of the Internet of things, Recommendation ITU-T Y.2068, 2015, S. 2.

## Intelligente Stromnetze und Microgrids

Der Elektrizitätssektor erweist sich als besonders anschauliche Fallstudie, um die Bedeutung der umfassenden Marktöffnung für die Entwicklung von intelligenten Energienetzen und damit einhergehenden Sharing-Potenzialen aufzuzeigen. Lange Zeit befand sich die Wertschöpfungskette in der Hand integrierter monopolistischer Netzbetreiber, die gesetzlich vor Marktzutritt geschützt waren. Stromerzeugung und Transport innerhalb von Höchstspannungs- und Verteilnetzen wurde als integriertes sehr komplexes Planungsproblem verstanden.<sup>20</sup> Dezentrale Entscheidungen unabhängiger Stromerzeuger (insbesondere auch alternativer Energien wie Wind- und Solarenergie) wären in einem solchen institutionellen Umfeld nicht möglich gewesen, da diese sich nur innerhalb einer Marktordnung herausbilden können, in der Knappheitspreise des Stromnetzbetreibers die richtigen Signale senden, wann es sich für unabhängige Stromerzeuger lohnt, den Strom selbst zu erzeugen oder von Verteilnetzbetreibern zu beziehen.<sup>21</sup> Der Aufbau von Microgrids schafft für die angeschlossenen Haushalte die Möglichkeit, gleichzeitig als Stromerzeuger und Konsument (Prosumer) agieren zu können. Echtzeitbasierte, sensorgesteuerte Prosumerentscheidungen müssen innerhalb eines virtuellen Microgrids über einen lokalen Plattformanbieter aggregiert werden. Nur so kann sichergestellt werden, dass in Zeiten mit geringem Angebot an erneuerbarer Energie die fehlende Energie von einem Verteilnetzbetreiber gekauft bzw. in Zeiten mit hohem Angebot an erneuerbarer Energie die nicht lokal verbrauchte Energie verkauft werden kann.<sup>22</sup>

## Innovative Märkte für geteilte Mobilitätsdienstleistungen

Beim Paradigmenwechsel zu intelligenten Verkehrsmärkten gehen isolierte verkehrsträgerbezogene Verkehrsangebote zu gemeinsam genutzten App-basierten Mobilitätsdienstleistungsmärkten über. Ein vielversprechendes Beispiel ist die Personenbeförderung in Minibussen mit virtuellen Haltestellen und flexiblen Routen. So kann sich eine Vielfalt von Kombinationen zwischen gemeinsam genutzten Mobilitätsdienstleistungen entwickeln, die als Substitut für private individuelle Autofahrten dienen. Bei-

spiele für innovative Mobilitätsdienste sind Carsharing, Fahrdienst-Plattformen, App-basierte Rufbusdienste mit flexibler nachfragegesteuerter Routenwahl in Kombination mit hochkapazitätsfähigem schienengebundenem Verkehr.

Die im Personenbeförderungsgesetz nach wie vor vorhandenen regulatorischen Marktsplattungen in Nah- und Fernverkehr, Mietwagen und Taxi, Fahrgemeinschaften versus gewerbliche Personenbeförderung behindern die Entwicklung von innovativen Märkten für Mobilitätsdienstleistungen. Es ist daher erforderlich, auch die lokalen Verkehrsmärkte umfassend zu liberalisieren, gleichzeitig jedoch die Regulierung der Verkehrssicherheit und des Verbraucherschutzes beizubehalten oder sogar zu verstärken.<sup>23</sup> Virtuelle Netze für gemeinsam genutzte Mobilitätsdienstleistungen basieren auf einer Kombination von mobiler Echtzeit-Kommunikation, globalen Navigationssystem-Dienstleistungen und sensorgenerierter Datenverarbeitung.<sup>24</sup> Infrastrukturgenerierte Daten werden zunehmend durch sensorgenerierte Daten via Mobilfunk, On-board-Navigation und Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation ersetzt.

## Vernetztes, automatisiertes (fahrerloses) Fahren

Voll automatisierte (fahrerlose) Fahrzeuge werden auch in Zukunft nicht im eigentlichen Sinne autonom fahren, da sie eine Betreiberplattform benötigen, welche die Fahrzeuge während ihrer fahrerlosen Fahrt auf Basis von Informations- und Kommunikationstechnologien koordiniert und die für den Transportprozess verantwortlich ist. Es handelt sich folglich um vernetztes, automatisiertes Fahren mit besonders hohen Anforderungen an die Entwicklung von auf Big Data basierenden virtuellen Netzen, da die Datenerhebung über hochauflösungsfähige kamerabasierte Sensoren mit extrem hohem Datenaufkommen verbunden ist.<sup>25</sup> Detaillierte Echtzeitinformationen über das Verkehrsgeschehen in der lokalen Umgebung während einer Fahrt machen das Sharing von Sensordaten zwischen benachbarten Fahrzeugen unerlässlich, da diese für die Genauigkeit und Sicherheit der Fahrt erforderlich sind. Kamerabasierte Sensornetze erfordern eine extrem hohe Datenpaketübertragungsqualität mit einer

20 R. E. Bohn, M. C. Caramanis, F. C. Schewpe: Optimal pricing in electrical networks over space and time, in: Rand Journal of Economics, 15. Jg. (1984), H. 3, S. 360-376; H. W. Kuhn: Being in the right place at the right time, in: Operations Research, 50. Jg. (2002), H. 1, S. 132-134.  
21 G. Knieps: The Evolution of Smart Grids Begs Disaggregated Nodal Pricing, in: F. Sioshansi (Hrsg.): Future of Utilities – Utilities of the Future: How Technological Innovations in Distributed Energy Resources will Reshape the Electric Power Sector, Amsterdam u. a. O. 2016, S. 267-280.  
22 G. Knieps: Internet of Things and the Economics of Microgrids, in: F. Sioshansi (Hrsg.): Innovation and Disruption at the Grid's Edge, Amsterdam u. a. O. 2017, S. 241-258.

23 G. Knieps: Network Economics of Shared Mobility, in: Network Industries Quarterly, 20. Jg. (2018), H. 3, S. 9-12.  
24 OECD, International Transport Forum (ITF): Big Data and Transport: Understanding and assessing options, Paris 2015, [https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/15cpb\\_bigdata\\_0.pdf](https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/15cpb_bigdata_0.pdf) (30.4.2019); OECD, International Transport Forum (ITF): Data-Driven Transport Policy, International Transport Forum, Paris 2016, <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/data-driven-transport-policy.pdf> (30.4.2019).  
25 G. Knieps: Internet of Things, big data and the economics of networked vehicles, in: Telecommunications Policy, 43. Jg. (2019), H. 2, S. 171-181.

maximalen Latenzzeit von 1 Mikrosekunde sowie satellitenbasierte Geopositionsdienste mit extrem hoher Genauigkeit.

Die Relevanz von Big Data nimmt bei vernetztem automatisiertem Fahren aufgrund von kamerabasiertem Sensoring massiv zu. Der Übergang zu vernetzten fahrerlosen Fahrzeugen verursacht eine fundamentale Erhöhung der Anforderungen, um sich sicher, effizient und zeitsensibel an die sich verändernden Verkehrssituationen anzupassen. Dafür sind ultra-niedrige Latenzzeiten in der Datenpaketübertragung, anspruchsvolle Big-Data-Analysen, Anforderungen an die Sensorkompression und besonders strikte Positionierungsanforderungen notwendig. Um die extrem geringe Latenzzeit einhalten zu können, wird auch eine lokale Big-Data-Verarbeitung erforderlich.<sup>26</sup>

Die Umsetzung des Datenschutzes und der Cybersecurity im Kontext des vernetzten fahrerlosen Fahrens wird sicherlich durch die umfassenden Reformen auf diesem Gebiet in jüngster Zeit erleichtert. Dennoch muss von einem konkreten zusätzlichen verkehrspolitischen Handlungsbedarf ausgegangen werden, um den Besonderheiten im zukünftigen Straßenverkehr gerecht zu werden.<sup>27</sup> Dabei wird eine Kombination von institutionellen Lösungsansätzen relevant, wie etwa anwendungsspezifische Gesetzeslösungen (z.B. eCall, car2car-Kommunikation), Zertifizierungen für IT-Sicherheits- und Datenschutz sowie einheitliche Schnittstellen und Verhaltensregeln.<sup>28</sup>

### Kommerzielle Drohnen

In jüngster Zeit hat die Diskussion um Lufttaxis den Blick auf die zukünftige Rolle von kommerziellen Drohnen gelenkt, die ohne menschliche Piloten, aber dennoch nicht autonom, sondern ferngesteuert unterwegs sind. Drohnen bilden einen Sammelbegriff für heterogene Fluggeräte, die sich sowohl im Gewicht, in der Reichweite, in der Geschwindigkeit als auch in ihren Funktionalitäten erheblich unterscheiden.<sup>29</sup> Lange Zeit stand der Markt für „kleine Drohnen“ etwa für Spiele, Vermessungen und

das Fotografieren mit geringem Gewicht und niedrigen maximalen Flughöhen sowie einer Steuerung innerhalb des Sichthorizonts im Fokus der öffentlichen Diskussion, insbesondere auch unter dem Gesichtspunkt der Wahrung der Privatsphäre. Inzwischen geht die aktuelle Entwicklung vermehrt in Richtung „größerer“ kommerzieller Drohnen, etwa als Transportgeräte für Personen (Flugtaxis) auf den Shared-Mobilitätsdienstleistungsmärkten sowie Drohnen als Transportgeräte, nicht nur für spezifische Missionen, etwa für lebenswichtige Güter in entlegenen Gebieten oder Rettungseinsätze, sondern auch für vielfältige andere Einsätze, etwa in der Logistikbranche zur Paketzustellung. Drohnen können aber auch als mobile Sensoren zur Überwachung kritischer Infrastrukturen (Elektrizitäts-, Schienennetzen etc.) eingesetzt werden. Die Liste der Möglichkeiten, Drohnen einzusetzen, könnte beliebig fortgesetzt werden.

Die Entwicklung kommerzieller Drohnen führt zwangsläufig dazu, dass sowohl Startgewicht als auch Reichweite erheblich zunehmen und dass diese Fluggeräte auch innerhalb des öffentlichen Luftverkehrsraums koordiniert werden müssen, um das Risiko gegenüber anderen Flugobjekten (andere Drohnen oder bemannte Flugzeuge) und das Risiko von Unfällen am Boden zu minimieren. Sicherheitsanforderungen erfordern Zulassungsverfahren sowie eine Flugüberwachung und -koordination, wie sie im allgemeinen Luftverkehr praktiziert werden.

Der zukünftige Einsatz von kommerziellen Drohnen ist eng mit der Einrichtung von Betreiberplattformen verknüpft, sodass die Drohnen vernetzt in Echtzeit die erforderlichen Informationen über die Flugumgebung und andere flugrelevante Informationen von einer Zentrale erhalten und dabei auch relevante Informationen an andere Drohnen oder von Piloten gesteuerte Verkehrsflugzeuge kommunizieren können. Die komplementären virtuellen Netze beim Einsatz von „großen“ Drohnen können erheblich variieren, bauen letztlich aber immer auf einer Kombination kamerabasierter Sensoren, Big-Data-Verarbeitung, hochpräziser satellitenbasierter Positionsbestimmung und echtzeitbasierter Kommunikation mit extrem niedrigen Latenzzeiten auf. Fortschritte im Bereich kamerabasierter Sensornetze, standortsensitive Datenerhebung sowie Big-Data-Verarbeitung gewinnen immer größere Bedeutung.

Der gezielte Einsatz von „großen“ Drohnen in Katastrophenfällen zur Überwachung von kritischen Infrastrukturen, bei Rettungsmanövern oder zur Versorgung in entlegenen Gebieten wird für die Gesellschaft unbestritten an Bedeutung gewinnen. Dabei stellt sich die Frage, welcher Regelungs- und Handlungsbedarf entsteht, wenn die

26 G. P. Fettweis: The Tactile Internet: Applications and Challenges, in: IEEE Vehicular Technology Magazine, März 2014, S. 68; ITU-T: The Tactile Internet, ITU-T Technology Watch Report, August 2014, S. 8-9.

27 ITU-T: Framework of networked vehicle services and applications using NGN, Recommendation ITU-T Y. 2281, 2011.

28 Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur: Automatisiertes Fahren im Straßenverkehr – Herausforderungen für die zukünftige Verkehrspolitik, in: Straßenverkehrstechnik, 61. Jg. (2017), H. 8, S. 533-539, Teil 1 sowie H. 9, S. 625-626, Teil 2.

29 OECD, International Transport Forum (ITF): (Un)certain Skies? Drones in the World of Tomorrow, Paris 2018, <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/uncertain-skies-drones.pdf> (30.4.2019).

kommerziellen Drohnen immer stärker verbreitet sind. Es gilt, zwischen der zunehmenden Verknappung des Luftraums und der Start- und Landeplätze und damit einhergehender Allokationsprobleme und dem Auftreten von negativen Externalitäten in Form von Unfällen mit Personen- oder Sachschäden zu unterscheiden. Hierzu zählen Unfälle in der Luft mit Flugzeugen oder anderen Drohnen oder Unfälle bei einem Absturz am Boden. Hinzu kommen Belästigungen durch die Motor- und Rotorgeräusche von Drohnen sowie des optischen Umfeldes von Menschen. Diese Probleme werden auf lokal/regionaler, nationaler, europäischer und internationaler Ebene seit geraumer Zeit kontrovers diskutiert.<sup>30</sup> Grundsätzlich sind Probleme zu unterscheiden,

- die spezifisch bei „großen“ Drohnen wegen ihrer Mischung mit von Piloten gesteuerten Flugzeugen und der Unfallgefahr bei einem Absturz aufgrund des hohen Gewichts entstehen sowie Problemen,
- die bei allen Drohnenkategorien auftreten können, wie Cybersecurity (etwa die Gefahr des Hackens von relevanten Zugangsdaten) und Privacy (etwa das Überfliegen und Ausspionieren von privatem Gelände). Verletzungen der Privatsphäre durch Bild- oder Tonaufnahmen aus Drohnen können auch aus weiter Entfernung erfolgen, in der Drohnen kaum wahrgenommen werden.

Nationale Regulierungen weisen bisher eine große Bandbreite hinsichtlich administrativer, operationeller und den Luftraum betreffender Regeln auf, so kann etwa die Aus-

30 Ebenda; A. H. Michel: Drones at Home: Local and State Drone Laws. Center for the Study of the Drone at Bard College 2017, <https://drone-center.bard.edu/drones-at-home/> (12.3.2019); National Conference of State Legislatures: Taking Off, State Unmanned Aircraft Systems Policies, 2016, <http://www.ncsl.org/research/transportation/taking-off-state-unmanned-aircraft-systems-policies.aspx> (12.3.2019); National League of Cities (NLCC): Cities and Drones, What Cities need to know about unmanned Aerial Vehicles (UAVs), 2016, <https://www.nlc.org/resource/cities-and-drones> (12.3.2019).

weisung von Flugverbotszonen oder von Start- und Landeplätzen erheblich variieren.<sup>31</sup>

### Internet der Dinge und Netzökonomie – Herausforderungen und Handlungsbedarf

Das Internet der Dinge gewinnt zunehmend an Bedeutung. Wichtige Beispiele finden sich in der Organisation von Microgrids, intelligenten nachhaltigen Städten oder intelligenten Verkehrsinformationssystemen. Die Anbieter der physischen Netzdienstleistungen können ihre Betreiberplattformen durch Kooperation mit geeigneten virtuellen Netzbetreibern oder auch durch Integration mit einem virtuellen Netzanbieter bereitstellen. Das Internet der Dinge führt zu fundamentalen Herausforderungen für die traditionellen Netzindustrien, weil physische Netzdienstleistungen immer stärker auf Echtzeit basieren und dadurch adaptive und standortsensitive Informationen bereitgestellt werden müssen. Fundamentale Veränderungen der Netzarchitekturen und -dienstleistungen in intelligenten Netzen schaffen vielfältige Anforderungen an die Betreiberplattformen.

Zusätzlich stellen sich wichtige Herausforderungen aus Sicht des Datenschutzes und der Cybersecurity. Die Umsetzung wird sicherlich durch die umfassenden Reformen auf diesem Gebiet der jüngsten Zeit erleichtert. Dennoch besteht ein konkreter zusätzlicher Handlungsbedarf, um den Besonderheiten der unterschiedlichen Anwendungsfelder des Internets der Dinge gerecht zu werden. Eine zentrale Herausforderung besteht darin, die vielfältigen Potenziale für unterschiedliche Lebensbereiche zu nutzen und dabei gleichzeitig ihre Risiken und Gefahren in den Griff zu bekommen. Dies ist eine interdisziplinäre, gesellschaftspolitische Herausforderung, die weit über das Gebiet der Netzökonomie hinausgeht.

31 OECD, International Transport Forum (ITF): (Un)certain Skies? ..., a. a. O., S. 15-20; Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur: Umgang mit Drohnen im deutschen Luftraum. Verkehrspolitische Herausforderungen im Spannungsfeld von Innovation, Safety, Security und Privacy, März 2019.

#### Title: *Internet of Things and the Future of Network Economics*

**Abstract:** *The Internet of Things would not be possible without the rapid technological progress in the telecommunication sector during the past decades towards All-IP broadband networks. The transformation of the traditional network industries into intelligent networks is strongly dependent on the quality guarantees of data packet transmission required by smart bidirectional metering, sensors, actuators and remote control, enabling interactive machine-to-machine communication. Of particular importance is the interaction between the physical world and complementary virtual networks.*

**JEL Classification:** L51, L86, L88, L96