

Die Auswirkungen regulatorischer Rahmenbedingungen (insb. Versorgungsauflagen) auf die Mobilfunkqualität

Impressum

WIK Wissenschaftliches Institut für
Infrastruktur und Kommunikationsdienste GmbH
Rhöndorfer Str. 68
53604 Bad Honnef
Deutschland
Tel.: +49 2224 9225-0
Fax: +49 2224 9225-63
E-Mail: info@wik.org
www.wik.org

Vertretungs- und zeichnungsberechtigte Personen

Geschäftsführung	Dr. Cara Schwarz-Schilling (Vorsitzende der Geschäftsführung, Direktorin)
	Alex Kalevi Dieke (Kaufmännischer Geschäftsführer)
Prokuristen	Prof. Dr. Bernd Sörries
	Dr. Christian Wernick
	Dr. Lukas Wiewiorra
Vorsitzender des Aufsichtsrates	Dr. Thomas Solbach
Handelsregister	Amtsgericht Siegburg, HRB 7225
Steuer-Nr.	222/5751/0722
Umsatzsteueridentifikations-Nr.	DE 123 383 795

Stand: Januar 2025

ISSN 1865-8997

Bildnachweis Titel: © Robert Kneschke - stock.adobe.com

Weitere Diskussionsbeiträge finden Sie hier:
<https://www.wik.org/veroeffentlichungen/diskussionsbeitraege>

In den vom WIK herausgegebenen Diskussionsbeiträgen erscheinen in loser Folge Aufsätze und Vorträge von Mitarbeitern des Instituts sowie ausgewählte Zwischen- und Abschlussberichte von durchgeführten Forschungsprojekten. Mit der Herausgabe dieser Reihe bezweckt das WIK, über seine Tätigkeit zu informieren, Diskussionsanstöße zu geben, aber auch Anregungen von außen zu empfangen. Kritik und Kommentare sind deshalb jederzeit willkommen. Die in den verschiedenen Beiträgen zum Ausdruck kommenden Ansichten geben ausschließlich die Meinung der jeweiligen Autoren wieder. WIK behält sich alle Rechte vor. Ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung des WIK ist es auch nicht gestattet, das Werk oder Teile daraus in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) zu vervielfältigen oder unter Verwendung elektronischer Systeme zu verarbeiten oder zu verbreiten.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	II
Zusammenfassung	III
Summary	IV
1 Einleitung	1
2 Versorgungsaufgaben	3
2.1 Literaturüberblick	3
2.2 Allgemeine Versorgungsaufgaben	4
2.3 Spezielle Versorgungsaufgaben	5
3 Quantitative Analyse	6
3.1 Datengrundlage und verwendete Variablen	6
3.2 Abhängige Variablen – Veränderung der Mobilfunkqualität	6
3.2.1 Festlegung der Prä- und Post-Perioden	8
3.2.2 Wachstumsraten der Mobilfunkqualität vor und nach einer Vergabe von Frequenznutzungsrechten	8
3.3 Treatment-Variablen – Versorgungsaufgaben	9
3.4 Inputfaktoren für die DEA	14
3.5 Methodik	15
3.5.1 Differenz-in-Differenzen-Modell	15
3.5.2 Data Envelopment Analysis	18
4 Ergebnisse und Interpretation	24
4.1 Differenz-in-Differenzen-Modell	24
4.1.1 Übersicht der zentralen Ergebnisse aus den DiD-Modellen	24
4.1.2 Ergebnisse für den gemittelten Versorgungsaufgaben-Score	25
4.1.3 Ergebnisse für den gewichteten Versorgungsaufgaben-Score	28
4.2 Data Envelopment Analysis	32
4.2.1 Übersicht über die zentralen Ergebnisse des DEA-Ansatzes	32
4.2.2 Die Ergebnisse im Einzelnen	32
5 Fazit	41

Anhang	43
Literaturverzeichnis	48

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Verteilung der Versorgungsauflagen-Intensität (gemittelter Score)	13
Abbildung 3-2: Verteilung der Versorgungsauflagen-Intensität (gewichteter Score)	14
Abbildung 3-3: Effizienzmessung bei einer outputorientierten DEA	20

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Abhängige Variablen – Mobilfunkqualität von Opensignal	7
Tabelle 3-2: Beispiel zur Berechnung der Intensität der Versorgungsauflagen und Zuordnung zur Treatment- und Kontrollgruppe	12
Tabelle 4-1: Regressionsergebnisse Downloadgeschwindigkeit (gemittelter Score)	25
Tabelle 4-2: Regressionsergebnisse Uploadgeschwindigkeit (gemittelter Score)	26
Tabelle 4-3: Regressionsergebnisse Games-Erlebnis (gemittelter Score)	27
Tabelle 4-4: Regressionsergebnisse Sprachqualität in Apps (gemittelter Score)	28
Tabelle 4-5: Regressionsergebnisse Downloadgeschwindigkeit (gewichteter Score)	29
Tabelle 4-6: Regressionsergebnisse Uploadgeschwindigkeit (gewichteter Score)	30
Tabelle 4-7: Regressionsergebnisse Games-Erlebnis (gewichteter Score)	31
Tabelle 4-8: Regressionsergebnisse Sprachqualität in Apps (gewichteter Score)	31
Tabelle 4-9: DEA-Ergebnisse Downloadgeschwindigkeit	35
Tabelle 4-10: DEA-Ergebnisse Uploadgeschwindigkeit	36
Tabelle 4-11: DEA-Ergebnisse Games-Erlebnis	37
Tabelle 4-12: DEA-Ergebnisse Sprachqualität in Apps	38
Tabelle 4-13: Einfluss von Versorgungsauflagen auf die Mobilfunkqualität (Korrelationen di und $score$ *)	39
Tabelle 0-1: Übersicht der Vergaben von Frequenznutzungsrechten und Versorgungsauflagen	43
Tabelle 0-2: Robustheitstest über alle Modelle und Treatment-Schwellenwerte	45

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie untersucht, ob Versorgungsaufgaben im Rahmen der Vergabe von Frequenznutzungsrechten einen Einfluss auf die Qualität der Mobilfunkversorgung haben. Analysiert werden Daten von Mobilfunknutzenden für 112 Netzbetreiber in 32 EU- und OECD-Ländern im Zeitraum 2019 bis 2025. Ziel ist es, den Effekt der Auflagen von anderen Faktoren abzugrenzen.

Methodisch kommen zwei Ansätze zum Einsatz: Die Differenz-in-Differenzen-Schätzung erlaubt es, Effekte der Strenge der Auflagen isoliert zu betrachten und länder- sowie netzbetreiberspezifische Unterschiede weitgehend zu kontrollieren. Ergänzend wird die Data Envelopment Analysis (DEA) genutzt, um die Effizienz der Netzbetreiber in Bezug auf die bereitgestellte Mobilfunkqualität zu messen. Als Indikatoren dienen Download- und Uploadgeschwindigkeit, Games-Erlebnis sowie Sprachqualität in Apps.

Die Ergebnisse zeigen einen leicht positiven und statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen strengeren Versorgungsaufgaben und einer verbesserten Mobilfunkqualität. Dies betrifft vor allem die Messgrößen Uploadgeschwindigkeit, Games-Erlebnis und Sprachqualität in Apps. Bei der Downloadgeschwindigkeit konnten hingegen keine Unterschiede festgestellt werden. Robustheitstests zeigen, dass unterschiedliche Klassifikationen der Auflagen keinen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Darüber hinaus stärkt die Kombination beider Methoden die Validität der Resultate.

Da die in dieser Studie betrachteten Versorgungsaufgaben vor allem auf eine Flächenabdeckung bzw. eine Abdeckung einer bestimmten Bevölkerungszahl abzielen, die Daten zur Mobilfunkqualität jedoch nutzergeneriert werden und eher kapazitätsbezogen sind (d.h. vor allem Messungen bezogen auf Datenraten, und zwar dort, wo viele Nutzer sind), besteht eine gewisse Diskrepanz zwischen den Messgrößen zur Mobilfunkqualität als abhängige Variable und den Versorgungsaufgaben als Erklärungsvariable.

Im Gegensatz können aber Spillover- bzw. Crowding-out-Effekte der Versorgungsaufgaben analysiert werden. Strengere Auflagen gehen einher mit Verbesserungen bei Uploadgeschwindigkeit, Games-Erlebnis und Sprachqualität in Apps. Dies deutet darauf hin, dass Auflagen zusätzliche Investitionen auslösen, die zu einer insgesamt besseren Netzqualität führen. Dies gilt auch für Regionen, wo die Nutzung schwerpunktmäßig gemessen wird, auf die die Versorgungsaufgaben jedoch nicht direkt abzielen. Negative Crowding-out-Effekte, also Verschlechterungen der Netzqualität in städtischen Gebieten zugunsten ländlicher Regionen, konnten nicht festgestellt werden. Die Versorgung in Ballungsräumen, wo die meisten Nutzerdaten entstehen, bleibt gleich bzw. wird leicht besser, während ländliche Gebiete von den Auflagen profitieren.

Summary

The present study examines whether coverage obligations imposed in spectrum licensing have an impact on the quality of mobile network services. The analysis uses data from mobile network users for 112 operators across 32 EU and OECD countries over the period from 2019 to 2025. The aim is to isolate the effect of such obligations from other factors.

Two methodological approaches are applied: The Difference-in-Differences (DiD) estimation allows to isolate the effects of such coverage obligations while largely controlling for country- and operator-specific fixed effects. In addition, Data Envelopment Analysis (DEA) is used to measure the efficiency of mobile operators with respect to the quality of service they provide. Indicators include download and upload speed, gaming experience, and voice quality in apps.

The results show a slightly positive and statistically significant relationship between stricter coverage obligations and improved mobile service quality. This effect is particularly pronounced for upload speed, gaming experience, and voice quality. No significant effects were found for download speed. Robustness tests indicate that different classifications of the obligations do not affect the results. Furthermore, the combination of both methods enhances the validity of the findings.

Since the coverage obligations considered in this study mainly target geographic coverage or population coverage, while the mobile quality data are user-generated and more capacity-related, there is a certain discrepancy between the dependent variable (mobile service quality) and the explanatory variable (coverage obligations).

However, the study allows for the analysis of potential spillover or crowding-out effects of these obligations. Stricter obligations are associated with improvements in upload speed, gaming experience, and voice quality. This suggests that such obligations trigger additional investments, leading to an overall improvement in network quality. This also applies to regions where usage is primarily measured but which are not directly targeted by the coverage requirements. Negative crowding-out effects — i.e., deteriorations in network quality in urban areas in favour of rural regions — were not observed. Coverage in urban areas, where most user data originate, remains stable or slightly improves, while rural areas benefit from the obligations.

1 Einleitung

Bei frequenzregulatorischen Diskussionen wird weiterhin kontrovers diskutiert, welche Parameter die Marktergebnisse im Mobilfunk beeinflussen. Sind Versorgungsauflagen, welche den Mobilfunknetzbetreibern im Rahmen von Vergaben von Frequenznutzungsrechten auferlegt werden, für das Marktergebnis maßgeblich? Oder sind vor allem unternehmensspezifische Strategien für den Ausbau des öffentlichen Mobilfunknetzes verantwortlich? Um der Frage nachgehen zu können, welche Parameter die Marktergebnisse im Mobilfunk beeinflussen, wird in dieser Studie die Mobilfunkqualität anhand von Daten von Mobilfunknutzenden für insgesamt 112 Mobilfunknetzbetreiber aus 32 Ländern der Europäischen Union (EU) bzw. Mitgliedsländer der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) über einen Zeitraum von 2019 bis 2025 ausgewertet. Der Fokus in dieser Studie soll dabei auf der Analyse des Einflusses von Versorgungsauflagen im Kontext der Vergabe von Frequenznutzungsrechten liegen.

Obgleich die Voraussetzungen sowie die Marktsituation für die betrachteten Länder sehr unterschiedlich sein können, sollen mit zwei verschiedenen quantitativen Methoden die Effekte der Versorgungsauflagen analysiert werden.

Durch eine Differenz-in-Differenzen Schätzung kann der Effekt der Versorgungsauflagen isoliert werden. Ebenfalls sind durch die gewählte Methodik und deren Implementierung unterschiedliche Zeitpunkte der mit der Vergabe von Frequenznutzungsrechten verbundenen Versorgungsauflagen sowie variierende Ausbauraten zum Zeitpunkt der Auflage weitgehend unerheblich. Somit können Effekte von Versorgungsauflagen auf die Mobilfunkqualität bestimmt werden.

Der zweite Ansatz basiert auf der Data Envelopment Analysis (DEA). Mittels linearer Optimierung können die Effizienzen der Netzbetreiber in Hinblick auf die bereitgestellte Mobilfunkqualität zu einem bestimmten Zeitpunkt ermittelt werden. Durch die Gegenüberstellung von Netzbetreibern in Ländern mit Versorgungsauflagen und solchen in Ländern ohne (oder mit weniger strengen) Auflagen sowie den Veränderungen der Effizienzen der Netzbetreiber zwischen zwei Zeitpunkten (vor und nach Einführung der mit der Vergabe von Frequenznutzungsrechten verbundenen Versorgungsauflagen) können Rückschlüsse auf den Einfluss von Versorgungsauflagen auf die Mobilfunkqualität gezogen werden.

Bislang liegen kaum empirischen Untersuchungen darüber vor, wie sich Versorgungsauflagen auf die Qualität der Mobilfunkversorgung auswirken. Es ist daher unklar, ob unterschiedlich intensive Versorgungsauflagen zwischen den EU-Mitgliedstaaten bzw. den OECD-Ländern dazu führen, dass die systemische Kapazität der Mobilfunknetze von Land zu Land variiert.

Eine Analyse des Effekts von Versorgungsauflagen auf eine systemische Verbesserung der Mobilfunkqualität ist hilfreich, um explizit die Versorgungsauflagen als regulatorisches

Mittel zu bewerten. Als Vergleich dienen hierbei Länder mit schwachen bzw. keinen Versorgungsaufgaben, womit der Mobilfunkausbau hier vor allem wettbewerblich geprägt ist. Andere Faktoren, die ebenfalls zu einer guten Mobilfunkversorgung beitragen könnten, werden explizit nicht untersucht.¹

Die Qualität der Mobilfunkversorgung wird wie folgt operationalisiert: Download- und Uploadgeschwindigkeit, Games-Erlebnis und Anrufqualität über Sprachapps. Eine geografische Komponente im Sinne einer Bevölkerungs- oder Flächenabdeckung wird nicht betrachtet.

Die vorliegende Studie gliedert sich wie folgt: Kapitel 2 stellt qualitativ den Forschungsstand zu Versorgungsaufgaben im Rahmen von Frequenznutzungsrechten im Mobilfunk dar. Dabei werden diese in allgemeine und spezielle Auflagen gegliedert. In Kapitel 3 wird die quantitative Analyse beschrieben. Diese umfasst die Auswahl der Datengrundlage und die Beschreibung der Modelle. Die Ergebnisse der Analysen werden in Kapitel 4 zusammengefasst. Das abschließende Fazit wird in Kapitel 5 gezogen.

¹ Siehe dafür z. B. Sörries et al. (2021).

2 Versorgungsaufgaben

Eine Mehrheit der nationalen Regulierungsbehörden nutzt bei der Vergabe von Frequenznutzungsrechten für den öffentlichen Mobilfunk Versorgungsaufgaben. Diese unterscheiden sich maßgeblich nach ihren ausgewählten Kriterien und Intensität. Ziel der Versorgungsaufgaben ist eine systemische oder geografische Verbesserung der Mobilfunkqualität in dem jeweiligen Land.²

2.1 Literaturüberblick

Die Evaluation regulatorischer Maßnahmen ist ein zentrales Thema in der wissenschaftlichen Debatte und spielt auch in der regulatorischen Praxis eine immer bedeutendere Rolle. Im Telekommunikationssektor ist die Analyse kausaler Effekte besonders herausfordernd, da zahlreiche Einflussfaktoren sich gegenseitig beeinflussen, etwa vorhergehende Regulierungsentscheidungen und Marktergebnisse oder angebots- und nachfragerseitige Aspekte der Mobilfunknutzung. Diese wechselseitigen Beziehungen führen zu Endogenität in quantitativen Analysen, was die Durchführung und Aussagekraft von Regulierungsevaluationen erschwert.³

Ein internationaler Vergleich zeigt, dass Länder mit strikten Versorgungsaufgaben, wie die Niederlande oder Südkorea, eine besonders hohe Mobilfunkqualität und nahezu flächendeckende Versorgung erzielen. In Ländern mit schwächeren Auflagen, etwa den USA oder Kanada, wird hingegen auf Infrastrukturwettbewerb gesetzt und weitgehend auf verbindliche Qualitätsvorgaben verzichtet. Dort resultiert die Netzqualität primär aus dem Wettbewerb zwischen den Anbietern, was ebenfalls zu guten Ergebnissen führt.⁴

Neben deskriptiven Vergleichen existieren in der Literatur einige quantitative Studien, die den Einfluss regulatorischer Maßnahmen auf die Mobilfunkqualität untersuchen. So zeigen Analysen, dass die Höhe der Gebote bei 3G-Frequenzauktionen maßgeblich von nationalen und marktspezifischen Rahmenbedingungen, dem Lizenzvergabeverfahren sowie von Betreiberauflagen beeinflusst wurde.⁵ Darüber hinaus belegen Studien mithilfe ökonometrischer Panelregressionen, dass sich regulatorische Maßnahmen, die die verfügbare Frequenzmenge für Mobilfunkbetreiber begrenzen oder die Kosten für Frequenznutzungsrechte erhöhen, negativ auf die Netzabdeckung und die Netzqualität auswirken.⁶ Der spezifische Effekt von Versorgungsaufgaben wurde unter anderem von Sörries et al. (2021) untersucht. In dieser Studie wurde mithilfe multipler linearer Regressionen geschätzt, welchen Einfluss Versorgungsaufgaben auf die Mobilfunkabdeckung von 3G und 4G in den EU-Mitgliedstaaten hatten. Die Ergebnisse zeigen, dass

² Für einen umfassenden Überblick über die Ausgestaltung von Versorgungsaufgaben und die Unterschiede zwischen Ländern siehe Sörries et al. (2020).

³ DIW Econ (2017)

⁴ Sörries et al. (2021, S. 2)

⁵ Bohlin et al. (2010)

⁶ Bahia und Castells (2022)

Versorgungsauflagen einen positiv signifikanten Effekt auf die Mobilfunkabdeckung haben, wobei dieser Effekt besonders in den ersten Jahren nach der Vergabe von Frequenznutzungsrechten am stärksten ist.

Der Einfluss von Versorgungsauflagen auf die Marktergebnisse im Mobilfunk wurde unseres Wissens bisher noch nicht mittels der DEA untersucht. Im Telekommunikationssektor kommt die DEA meistens in Hinblick auf einen Effizienzvergleich von Telekommunikationsunternehmen (TKU) zur Anwendung. Dabei wird in der Regel der Ressourceneinsatz in Form von Personaleinsatz (Anzahl der Mitarbeiter), Investitionen in Netzwerke und Betriebskosten den Marktergebnissen in Form von Umsatz, Anzahl der Kunden, Net zabdeckung, Datenvolumen oder Servicequalität gegenübergestellt. So unterziehen z. B. Usero und Asimakopoulos (2013) über siebzig europäische Mobilfunkunternehmen für die Jahre 2007 bis 2009 einem Effizienzvergleich, wobei sie feststellen, dass die Anbieter mit geringen Effizienzwerten tendenziell eher aus den neueren Beitrittsstaaten der EU stammen. Bielov et al. (2022) vergleichen die Effizienz von 34 nationalen und multinationalen Mobilfunknetzbetreibern aus OECD-Ländern zwischen 2014 und 2018. Multinational aufgestellte Unternehmen schneiden dabei hinsichtlich der Effizienz tendenziell schlechter ab als rein national agierende Unternehmen. Eine ältere Studie von Lien und Peng (2001) untersucht den Einfluss der Liberalisierung der Telekommunikationsmärkte auf die Performanz von TKU in 24 OECD-Ländern. Wesentliches Ergebnis ist, dass TKU in liberalisierten Märkten tendenziell eine höhere Effizienz aufweisen.

Zusammenfassend gibt es nur wenige empirische Studien, die die Auswirkungen regulatorischer Vorgaben auf Marktergebnisse untersuchen. Eine solche Analyse ist jedoch sowohl für die Mobilfunknutzenden als auch für die Gestaltung künftiger Regulierung von großer Bedeutung. Die vorliegende Arbeit greift daher auf Methoden aus den genannten Studien zurück und wendet diese auf die jüngsten Vergaben von Frequenznutzungsrechten seit 2019 an. Damit wird der Analysehorizont über die EU hinaus erweitert und mithilfe eines ökonometrischen Panelmodells der Effekt von Versorgungsauflagen länderübergreifend und im Zeitverlauf untersucht. Dies wird ergänzt durch die nichtparametrische Data Envelopment Analysis, die bisher noch nicht in diesem Kontext angewendet wurde.

2.2 Allgemeine Versorgungsauflagen

Allgemeine Versorgungsauflagen beziehen sich auf die systemische oder geografische Komponente des Mobilfunks. Die systemische Komponente ist die Anforderung zu einer Mindestqualität in der Datenrate (Download, Upload, Latenz) für die Mobilfunknutzenden. Die geografische Komponente kann sich auf die Erschließung der Fläche eines Landes zur nahezu lückenlosen Versorgung oder auf einen Anteil der Bevölkerung beziehen. Der Netzausbau der Mobilfunknetzbetreiber erfolgt bevorzugt in städtischen und halbstädtischen Gebieten, da hier mit vergleichsweise geringem Aufwand ein großer Teil der Bevölkerung erreicht werden kann. Demgegenüber bestehen für die Mobilfunknetzbetreiber zunächst wenig Anreize, dünn besiedelte oder unbewohnte Regionen zu versorgen.

Versorgungsaufgaben setzen hier an, indem sie verbindliche Vorgaben zur Mindestabdeckung und zur -qualität vorschreiben. Flächenbezogene Versorgungsaufgaben für Mobilfunknetzbetreiber sind anspruchsvoller umzusetzen als Auflagen für die Abdeckung eines Bevölkerungsanteils.⁷

2.3 Spezielle Versorgungsaufgaben

Spezielle Versorgungsaufgaben beziehen sich auf sogenannte Problemgebiete in der Versorgung, beispielsweise die Abdeckung ländlicher Regionen, von Verkehrswegen oder von festgelegten Gebieten (Städte oder Regionen). Daneben kann aber auch eine Auflage zur Errichtung einer bestimmten Anzahl von Basisstationen als spezielle Auflage gesehen werden.⁸

⁷ Sörries et al. (2020, S. 5-7)

⁸ Sörries et al. (2020, S. 8-11)

3 Quantitative Analyse

Die quantitative Analyse basiert auf einem Länderpanel bestehend aus verschiedenen Messdaten und Metriken der Mobilfunkqualität (s. Abschnitt 3.3). Es werden zwei methodische Ansätze verfolgt, um den Einfluss von Versorgungsauflagen auf die Mobilfunkqualität zu untersuchen. Zum einen wird eine Panelregression mit einer Differenz-in-Differenzen Schätzung eingesetzt, um die Auswirkungen von Versorgungsauflagen auf Marktergebnisse zu messen. Zum anderen wird eine Data Envelopment Analysis (DEA) verwendet, bei der eine Produktionsfunktion gebildet wird, um Länder mit dem bestmöglichen „Output“ bei sonst gleichen „Inputs“ zu identifizieren. Beide Methoden ermöglichen eine differenzierte Quantifizierung und Bewertung der Versorgungsauflagen im internationalen Vergleich.

3.1 Datengrundlage und verwendete Variablen

Für die quantitative Analyse ist zunächst die Auswahl geeigneter Variablen sowie der Aufbau einer entsprechenden Datenbank für den Untersuchungszeitraum erforderlich. Zur Beantwortung der Forschungsfragen werden Daten zur Mobilfunkqualität aus 32 EU- und OECD-Ländern⁹ mit insgesamt 112 Mobilfunknetzbetreibern herangezogen. Der Analysezeitraum erstreckt sich von 2019 bis 2025. Innerhalb dieses Gesamtzeitraums werden die jüngsten Vergaben von Frequenznutzungsrechten in den verschiedenen Ländern betrachtet. Dies geschieht technologienutral und unabhängig vom vergebenen Frequenzband.

3.2 Abhängige Variablen – Veränderung der Mobilfunkqualität

Für die Analyse werden verschiedene Qualitätsindikatoren der Mobilfunknetze pro Land und Mobilfunknetzbetreiber als abhängige Variablen herangezogen. Zur Gewährleistung einer einheitlichen und vergleichbaren Datengrundlage für die Mobilfunkqualität über die Zeit und in den verschiedenen Ländern werden Daten von Opensignal verwendet. Opensignal verwendet Crowd-Daten, d. h. die gesammelten Daten basieren auf realen Erfahrungen von Mobilfunknutzenden. Die Datenerhebung erfolgt über die Opensignal-App sowie über Anwendungen von Partnerunternehmen, die weltweit auf mehr als 100 Millionen Endgeräten installiert sind.¹⁰ Laut Angaben von Opensignal erfolgt die Auswahl der Partner strategisch innerhalb der jeweiligen Länder, um eine möglichst breite Nutzenden- und Gerätevielfalt abzubilden. Ziel ist es, eine Stichprobe zu generieren, die den Bevölkerungsquerschnitt jedes Landes möglichst genau repräsentiert. Im Gegensatz zu den

⁹ Liste aller Länder: Australien, Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Italien, Japan, Kanada, Kroatien, Lettland, Litauen, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Südkorea, Tschechische Republik, Ungarn, USA, Vereinigtes Königreich.

¹⁰ Siehe, z. B. Opensignal (2024), Germany Mobile Network Experience Report - Our Methodology, online verfügbar unter: <https://www.opensignal.com/reports/2024/11/germany/mobile-network-experience>, zuletzt abgerufen am 06.05.2025.

häufig verwendeten theoretischen Abdeckungsmodellen der Netzbetreiber erfasst OpenSignal die tatsächliche Mobilfunkqualität aus der Perspektive der Nutzenden. Es liefert damit praxisnahe Daten zur Netzverfügbarkeit und Netzqualität.¹¹

Die ausgewählten abhängigen Variablen werden in Tabelle 3-1 vorgestellt. Diese vier Messgrößen wurden ausgewählt, da sie unverändert in ihrer Erhebungs- und Auswertungsmethodik über den betrachteten Zeitraum von OpenSignal gesammelt wurden, und für die meisten Länder und Zeitpunkte verfügbar sind, was einen Vergleich über die Zeit erst ermöglicht.

Tabelle 3-1: Abhängige Variablen – Mobilfunkqualität von OpenSignal

Messgröße	Definition von OpenSignal
Erlebnis der Download-Geschwindigkeit	Gemessen in Mbit/s stellt das Erlebnis der Download-Geschwindigkeit die typischen alltäglichen Geschwindigkeiten dar, die ein*e Nutzer*in in den mobilen Datennetzen eines Betreibers erlebt.
Erlebnis der Upload-Geschwindigkeit	Das Erlebnis der Upload-Geschwindigkeit misst die durchschnittliche Upload-Geschwindigkeit für jeden Betreiber, die von Nutzer*innen in ihren mobilen Datennetzwerken festgestellt wird.
Gaming-Erlebnis	Das Gaming-Erlebnis von OpenSignal misst, wie mobile Nutzer*innen mobiles Multiplayer-Gaming in Echtzeit im Netzwerk eines Betreibers erleben. Auf einer Skala von 0 bis 100 analysiert es, wie das mobile Multiplayer-Gaming-Erlebnis der Nutzer*innen durch mobile Netzwerkbedingungen wie Latenz, Paketverlust und Jitter beeinflusst wird.
Sprachqualität in Apps	Die Voice App Experience von OpenSignal misst die Qualität der Nutzererfahrung bei Over-the-Top (OTT)-Sprachdiensten – also mobilen Sprach-Apps wie WhatsApp, Skype, Facebook Messenger usw. – mithilfe eines Modells, das auf einem Ansatz der International Telecommunication Union (ITU) zur Quantifizierung der allgemeinen Sprachqualität basiert und eine Reihe kalibrierter technischer Parameter einbezieht. Dieses Modell beschreibt den genauen Zusammenhang zwischen technischen Messwerten und der wahrgenommenen Gesprächsqualität. Die Voice App Experience eines jeden Anbieters wird auf einer Skala von 0 bis 100 berechnet.

Quelle: Siehe für die Definitionen z. B. OpenSignal (2023), Erlebnisbericht zum Mobilfunknetz – Österreich, <https://www.opensignal.com/de/reports/2023/10/austria/mobile-network-experience>, zuletzt abgerufen am 19.05.2025.

Die vier abhängigen Variablen sind verfügbar auf Ebene der Netzbetreiber pro Land. Daten von Mobilfunknutzenden, die einen Vertrag bei einem virtuellen Netzbetreiber abgeschlossen haben, gehen dabei nicht in die Erhebung ein. Die Erhebungsrate schwankt dabei je Land zwischen jährlichen und halbjährlichen Zeitpunkten. Für die Länder mit jährlicher Datenverfügbarkeit werden die halbjährlichen Daten als gemittelter Wert ermittelt. So soll ein ausgewogener Paneldatensatz gewährleistet werden.

¹¹ Siehe OpenSignal (2025), <https://www.opensignal.com/our-approach>, zuletzt abgerufen am 06.05.2025.

3.2.1 Festlegung der Prä- und Post-Perioden

Um herauszufinden, welchen Einfluss Versorgungsauflagen auf die Mobilfunkqualität haben, ist neben der Bestimmung von Treatment- und Kontrollgruppen (siehe Kapitel 3.3) die Einteilung der Perioden in vor und nach der Vergabe von Frequenznutzungsrechten maßgeblich. Beispielsweise könnte der direkte Vergabezeitpunkt genutzt werden, um zwischen Prä- und Post-Perioden zu unterscheiden.

Es kann argumentiert werden, dass Versorgungsauflagen, die an zukünftige Vergaben von Frequenznutzungsrechten gebunden sind, auch im Vorfeld kommuniziert werden. So könnten diese antizipiert werden und dadurch theoretisch auch allein durch die Antizipation beispielsweise neue Mobilfunkstandorte entstehen. Somit könnte die Mobilfunkqualität schon im Vorfeld verbessert werden. Dies scheint jedoch eher unwahrscheinlich bzw. würde bestenfalls nur einem sehr geringen Effekt ausmachen. Andererseits kann argumentiert werden, dass die Mobilfunkqualität sich nicht schlagartig nach der Vergabe von Frequenznutzungsrechten verändern kann, da der Roll-out neuer Frequenzen bzw. das Errichten zusätzlicher Mobilfunkstandorte oder die Aufrüstung bestehender Standorte mit einem gewissen Zeitverzug verläuft. Zudem werden Investitionen in den Mobilfunkausbau erst nach der finalen Zuteilung der ersteigerten Frequenznutzungsrechte getätigt, da erst hier die genauen Frequenzen bekannt werden. Somit ist von einem gewissen Zeitverzug (*lag*) beim Netzausbau auszugehen.

Somit werden alle Messperioden eines Landes, die vor der jeweiligen Vergabe von Frequenznutzungsrechten lagen, als Teil der Prä-Periode definiert. Zusätzlich wird die nächste Messperiode direkt nach der Vergabe von Frequenznutzungsrechten ebenfalls in die Prä-Periode inkludiert. Die Post-Perioden sind dann die Messperioden, die zeitlich ab der ersten Messung nach der Vergabe von Frequenznutzungsrechten liegen.

3.2.2 Wachstumsraten der Mobilfunkqualität vor und nach einer Vergabe von Frequenznutzungsrechten

Die absoluten Werte von Opensignal werden in gemittelte Wachstumsraten für die Zeit vor der Vergabe von Frequenznutzungsrechten (inkl. erste Messung nach der Vergabe, siehe Prä-Perioden im vorangegangenen Kapitel 3.2.1) und nach einer Vergabe von Frequenznutzungsrechten umgewandelt (Post-Perioden). So kann die Geschwindigkeit des Netzausbau, mögliche Kapazitätssteigerungen und die Verbesserung der Mobilfunkqualität abhängig von der jüngsten Vergabe von Frequenznutzungsrechten analysiert werden.

Der Vorteil gemittelter Wachstumsraten gegenüber absoluten Werten besteht darin, dass absolute Werte nur einen Unterschied in dem Level der Mobilfunkqualität wiedergeben, welche stark von Pfadabhängigkeiten und makroökonomischen Bedingungen beeinflusst sind. Durch die Ermittlung der Wachstumsraten wird dieser Levelunterschied egalisiert.

Das bedeutet, dass vorangegangene Versorgungsaufgaben oder Marktentwicklungen in den unterschiedlichen Ländern und zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgehoben werden.

Diese Umwandlung in Wachstumsraten erlaubt die Analyse des direkten Effekts der Versorgungsaufgabe auf die Verbesserung im Mobilfunk. Die Wachstumsraten werden auf Ebene der Betreiber vor und nach der Vergabe von Frequenznutzungsrechten ermittelt. Hiermit entsteht ein theoretischer Paneldatensatz von *Anzahl Beobachtungen* = $2 * Anzahl Länder * Anzahl Betreiber$ je abhängiger Variable. Die tatsächliche Anzahl der Beobachtung weicht davon jedoch ab, da Opensignal für manche Länder oder Messgrößen erst später oder unregelmäßig Messungen durchgeführt hat, sodass nicht für alle Zeitpunkte Daten zur Verfügung stehen.

3.3 Treatment-Variablen – Versorgungsaufgaben

Die Treatment-Variable (deutsch: „Behandlungsvariable“) bezeichnet den Term, dessen Einfluss auf die Mobilfunkqualität untersucht werden soll. In diesem Fall sind die relevanten Treatment-Variablen verschiedene Indikatoren, die Länder mit keinen bzw. schwachen Versorgungsaufgaben von solchen mit strengeren Auflagen unterscheiden. Da sich die Versorgungsaufgaben zwischen den Ländern teils erheblich unterscheiden, reicht ein einfacher Vergleich zwischen Ländern mit und ohne Auflagen nicht aus. Stattdessen soll zwischen Ländern mit strengen und weniger strengen Auflagen differenziert werden (Intensität der Auflagen). Hierfür müssen die Versorgungsaufgaben im ersten Schritt quantifiziert werden.

Um Versorgungsaufgaben zu quantifizieren, werden diese durch einen zusammengesetzten Index als Score dargestellt. Ein zusammengesetzter Index fasst mehrere Indikatoren und Variablen zusammen, um mehrdimensionale Konzepte zu messen. Es werden umfangreiche Informationen numerisch zusammengefasst, um Länder vergleichbar zu machen. In der Score-Bildung wird zunächst eine Auswahl relevanter und verfügbarer Einzelindikatoren vorgenommen, um die Intensität der Versorgungsaufgabe abzubilden. Anschließend erfolgt eine Normalisierung der Daten, indem die jeweiligen Indikatoren auf eine Skala von 0 bis 1 angepasst werden. So wird eine Vergleichbarkeit zwischen den Variablen hergestellt. Abschließend werden die Indikatoren gewichtet. Die Gewichtung der Variablen basiert auf der Bedeutung für die Stärke der Versorgungsaufgabe.¹²

Als Ausgangsvariablen dienen die maximal zu versorgende Fläche und Bevölkerung eines Landes (jeweils in %), die kürzeste Zeit bis zur Versorgung dieser Fläche oder Bevölkerung (in Jahren), die maximal bereitzustellende Downloadgeschwindigkeit (in Mbit/s) sowie die kürzeste Zeit bis zur Bereitstellung dieser Geschwindigkeit. Zusätzlich werden Indikatorvariablen (0 oder 1) für zu versorgende Verkehrswege, für ländliche

¹² Das Vorgehen verläuft analog zu der Handlungsempfehlungen zu zusammengesetzten Indizes der OECD (2008, S. 19-31).

Gebiete und für die Errichtung bestimmter Basisstationen bzw. zu versorgende Gebiete berücksichtigt.

Im nächsten Schritt des Indexverfahrens erfolgt die Normalisierung der Variablen (x) auf einen Wertebereich von 0 bis 1(x_{norm}).

Für Indikatoren, bei denen ein niedriger Wert eine höhere Verpflichtungsintensität signalisiert (bspw. die Zeit), wird die Max-Min-Normalisierung angewendet: $x_{norm} = \frac{x - \max(x)}{\min(x) - \max(x)}$.

Bei Qualitätsindikatoren (bspw. die Downloadgeschwindigkeit), bei denen höhere Werte eine größere Verpflichtungsintensität anzeigen, kommt die Min-Max-Normalisierung zum Einsatz. Durch diese Vorgehensweise erhält die strengste Auflage den Wert 1, die leichteste Auflage wird mit 0 bewertet: $x_{norm} = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$.

Im Anschluss an die Normalisierung erfolgt die Bildung von zwei verschiedenen Scores zur Abbildung der Intensität der Versorgungsaufgabe. Erstens wird ein Durchschnittsscore ($score_{avg}$) berechnet, bei dem alle genormten Variablen das gleiche Gewicht erhalten: $score_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$.

Zweitens wird ein gewichteter Score ($score_{gew}$) gebildet, bei dem Variablen mit höherem Einfluss auf die Härte der Auflage ein entsprechend höheres Gewicht erhalten. Das Gewicht w_i fließt mit höherer Gewichtung ($2 * \frac{1}{n}$) für allgemeine Versorgungsaufgaben der Fläche, Bevölkerung und Qualität ein. Eine halbe Gewichtung ($0,5 * \frac{1}{n}$) gibt es für die Variablen der Zeit und für spezielle Versorgungsaufgaben für Verkehrswege, ländliche Regionen und spezifische Standorte: $score_{gew} = \sum_{i=1}^n w_i * x_i$.

Die endgültige Zuweisung des Treatment-Status erfolgt anhand eines eigens gewählten Schwellenwerts. Liegt der ermittelte Score bei mindestens 0,2 oder höher, wird der Treatment-Status zugewiesen. Es gibt also eine intensive Versorgungsaufgabe in dem jeweiligen Land. Ist der ermittelte Score kleiner, wird das Land der Kontrollgruppe zugeordnet:¹³

$$(3-1) \quad Treatment = \begin{cases} 1, & \text{wenn } score \geq 0,2 \\ 0, & \text{wenn } score < 0,2 \end{cases}$$

Diese Vorgehensweise wird beispielhaft für die Versorgungsaufgabe in Deutschland und weitere Länder beschrieben.¹⁴ Für Deutschland werden die Versorgungsaufgaben der Vergabe von Frequenznutzungsrechten im Juni 2019 analysiert:

- Es mussten bis Ende des Jahres 2022 mindestens 98 % der Haushalte mit mindestens 100 Mbit/s versorgt werden.

¹³ Weitere Grenzwerte (1. Quartil, Median, 3. Quartil) des Auflagen-Scores werden als Robustheits-Checks durchgeführt.

¹⁴ Die jeweiligen Quellen können Tabelle 0-1 im Anhang entnommen werden.

- Zusätzlich waren bis zu diesem Zeitpunkt alle Bundesautobahnen sowie bestimmte Bundesstraßen mit mindestens 100 Mbit/s zu versorgen.
- Bis Ende des Jahres 2024 wurden weitere Anforderungen an die Versorgung von Bundesstraßen, Landes- und Staatsstraßen, Seehäfen, Schienenwegen und spezifischen Standorten gestellt.
- Außerdem mussten bis Ende des Jahres 2022 insgesamt 1.000 5G-Basisstationen und 500 Basisstationen mit mindestens 100 Mbit/s in „weißen Flecken“ in Betrieb genommen werden.

In Griechenland wurden im Rahmen der Multiband-Auktion im Dezember 2020 Versorgungsaufgaben vergeben. Hier mussten

- innerhalb von fünf Jahren mindestens 99 % der Bevölkerung sowie 95 % der Landesfläche, der Seengebiete, der Autobahnen und der Eisenbahnnetze mit Mobilfunk versorgt werden.
- Zudem war die Bereitstellung von mindestens 100 Mbit/s innerhalb von fünf Jahren für die genannten Bereiche verpflichtend.
- Des Weiteren gab es spezifische Anforderungen an die Versorgung großer Städte mit 5G sowie Anforderungen zum Errichten von Basisstationen, die das 26-GHz-Band nutzen.

In der Schweiz gab es im Rahmen der Auktion der Frequenzen bei 700 MHz, 1.400 MHz und 3.500 MHz im Februar 2019 eine Auflage zur Bevölkerungsversorgung:

- Bis Ende des Jahres 2024 mussten 50 % der Schweizer Bevölkerung mit 700-MHz-Frequenzen versorgt werden.

In der Auktion in Großbritannien im März 2021 wurden die Frequenznutzungsrechte bei 700 MHz und 3,6–3,8 GHz vergeben. Hier gab es keine Versorgungsaufgaben.

In der Tabelle 3-2 wird für diese Länder dieses Vorgehen beispielhaft dargestellt. Der gewichtete Score von Deutschland fällt geringer aus als der durchschnittliche Score, da es in Deutschland bei der Vergabe im Jahr 2019 keine Auflage zur Flächenversorgung gab. Griechenland weist in diesem Vergleich nahezu durchweg die strengsten Auflagen auf und erreicht somit sowohl beim durchschnittlichen als auch beim gewichteten Score die höchsten Werte. Die Schweiz verfügt lediglich über eine Auflage hinsichtlich der Bevölkerungsabdeckung und bleibt damit unter dem Schwellenwert von 0,2. Sie wird der Kontrollgruppe zugeordnet. Das Vereinigte Königreich hat keine Versorgungsaufgaben und zählt ebenfalls zur Kontrollgruppe.

Tabelle 3-2: Beispiel zur Berechnung der Intensität der Versorgungsauflagen und Zuordnung zur Treatment- und Kontrollgruppe

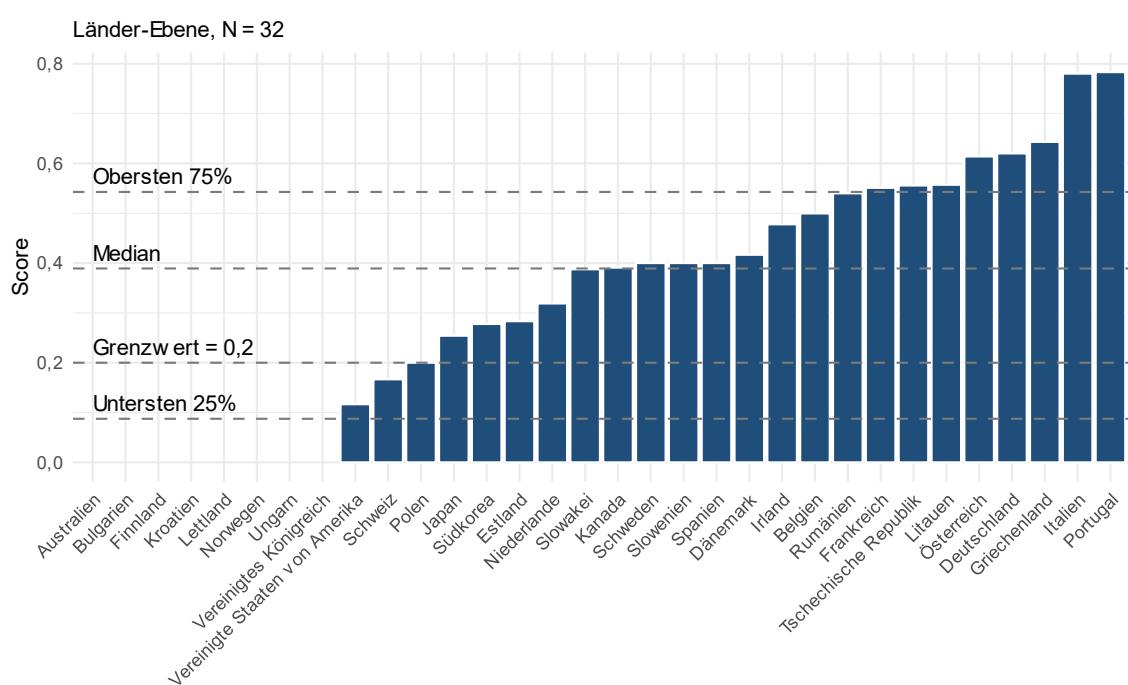
Land	Fläche (%)	Zeit-Fläche (Jahre)	Normal. Zeit-Fläche	Bevölke-rung (%)	Zeit-Bev. (Jahre)	Normal. Zeit-Bev.	Qualität (Mbit/s Downlink)	Normal. Qualität	Zeit-Qualität (Jahre)	Normal. Zeit-Qualität	Transport	Ländlich	Locations	Score Mittelwert	Score gewichtet	Treatment
Deutsch-land	0	0	0	0,98	3	0,88	100	0,39	5	0,71	1	0	1	0,62	0,50	1
Griechen-land	0,95	5	0,83	0,99	5	0,63	100	0,39	10	0	1	0	1	0,64	0,71	1
Schweiz	0	0	0	0,5	6	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0,17	0,14	0
UK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Quelle: Eigene Abbildung anhand der Quellen aus Tabelle 0-1:

Übersicht der Vergaben von Frequenznutzungsrechten und Versorgungsauflagen.

Abbildung 3-1 zeigt die Verteilung der Intensität der Versorgungsauflagen nach dem gemittelten Scoring-Verfahren. Dargestellt wird der vollständige Datensatz der 32 Länder. Dabei wird deutlich, dass die Versorgungsauflagen-Scores variieren. Während Länder wie Australien, Bulgarien und Finnland keine Auflagen haben und einen Score von 0 aufweisen, erreichen Portugal, Italien und Griechenland die höchsten Intensitäten. Der Median liegt bei circa 0,4. Der Grenzwert von 0,2 trennt die Länder mit keinen bzw. schwachen von Ländern mit stärkeren Versorgungsauflagen.

Abbildung 3-1: Verteilung der Versorgungsauflagen-Intensität (gemittelter Score)



Quelle: Eigene Abbildung anhand Quellen aus Tabelle 0-1: Übersicht der Vergaben von Frequenznutzungsrechten und Versorgungsauflagen.

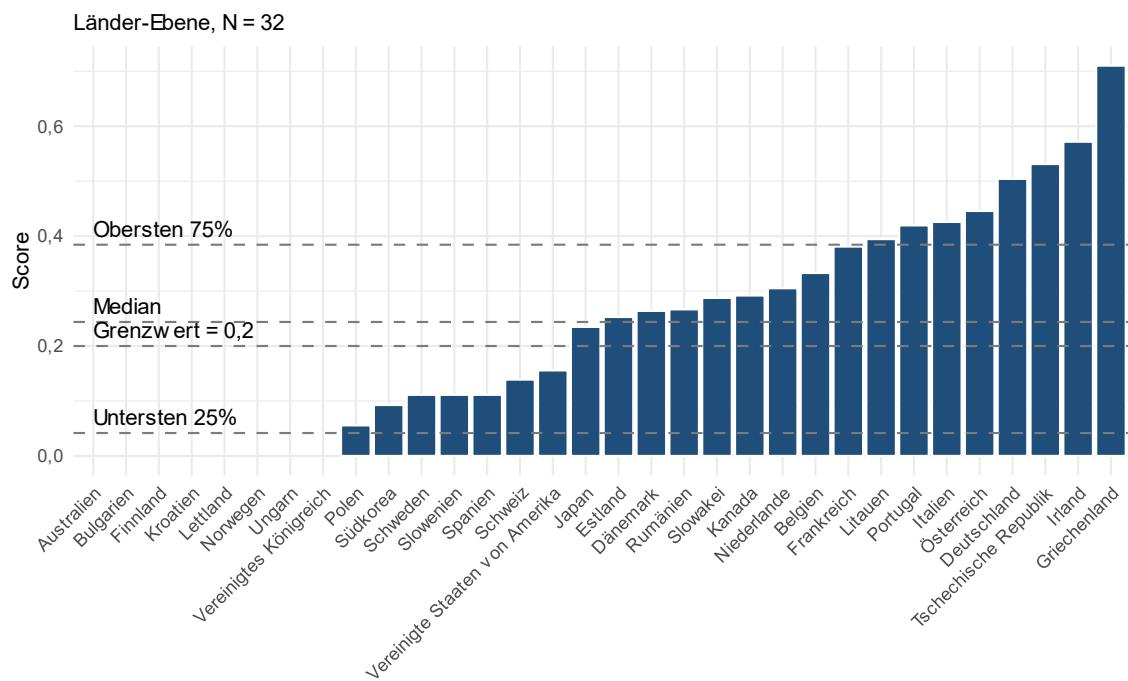
Abbildung 3-2 zeigt die Verteilung der Intensität der Versorgungsauflagen auf Basis des gewichteten Scores. Es wird deutlich, dass die Scores sich nicht maßgeblich verändern. Die höchsten Intensitäten erreichen Griechenland, Irland und die Tschechische Republik. Der Median liegt in dieser Verteilung näher bei dem Grenzwert von 0,2. Auffällig im Vergleich ist, dass nur wenige Länder sehr hohe Scores erzielen. Für die Einteilung in die Treatment- und Kontrollgruppen ist dies allerdings unerheblich.

Länder ohne Versorgungsauflagen erhalten sowohl beim Durchschnitts- als auch beim gewichteten Score immer den Wert 0.

Beim durchschnittlichen Score weisen Italien und Portugal den höchsten Score auf, während Griechenland hier auf Rang 3 folgt. Im gewichteten Score hingegen hat Griechenland die strengsten Versorgungsauflagen, während Italien und Portugal auf den Rängen

6 und 7 liegen. In Italien und Portugal beziehen sich die strengen Auflagen vor allem auf ländliche Gebiete, Verkehrswege und spezifische Standorte, die im gewichteten Score jedoch weniger stark berücksichtigt werden.

Abbildung 3-2: Verteilung der Versorgungsauflagen-Intensität (gewichteter Score)



Quelle: Eigene Abbildung anhand Quellen aus Tabelle 0-1: Übersicht der Vergaben von Frequenznutzungsrechten und Versorgungsauflagen.

3.4 Inputfaktoren für die DEA

Für die DEA werden weitere Variablen als Inputfaktoren benötigt. Als erstes wird das Bruttoinlandsprodukt pro Kopf als makroökonomischer Indikator genutzt, um die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der jeweiligen Länder abzubilden. Zweitens wird die Bevölkerungsdichte einbezogen, um Unterschiede in der Siedlungsstruktur der Länder zu berücksichtigen. Die Bevölkerungsdichte ist für den Mobilfunkausbau zentral, um möglichst viele Nutzende mit möglichst wenig Basisstationen abzudecken.

Diese Variablen werden ausschließlich in der DEA angewendet. In der Differenz-in-Differenzen Analyse werden betreiber- bzw. länderfixe Effekte verwendet und nicht für länderspezifische Variablen kontrolliert. Die fixen Effekte kontrollieren für unbeobachtete Heterogenität. Die Verwendung weiterer länderspezifischer Kontrollvariablen könnte zu einem überspezifizierten Modell führen.

3.5 Methodik

Es werden zwei quantitative Methoden verwendet, um den Effekt von Versorgungsauflagen auf die Mobilfunkqualität abzuschätzen. Einerseits wird ein Differenz-in-Differenzen (DiD)-Modell genutzt, um einen isolierten Effekt der Versorgungsauflagen zu schätzen. Andererseits wird die Data Envelopment Analysis (DEA) genutzt, um mittels eines Effizienzvergleichs den Einfluss von Versorgungsauflagen zu ermitteln. Durch die Gegenüberstellung von Netzbetreibern in Ländern mit Versorgungsauflagen und solchen in Ländern ohne (oder mit weniger strengen) Auflagen und den Veränderungen der Effizienzen der Netzbetreiber zwischen zwei Zeitpunkten (vor und nach den mit der Vergabe von Frequenznutzungsrechten verbundenen Versorgungsauflagen) können Rückschlüsse auf den Einfluss von Versorgungsauflagen auf die Mobilfunkqualität gezogen werden.

Der Fokus von Versorgungsauflagen in den zurückliegenden Vergaben von Frequenznutzungsrechten lag, wie bereits dargelegt, primär auf der Abdeckung der Bevölkerung bzw. der Fläche, nicht jedoch auf der Bereitstellung einer bestimmten Mindestqualität. Die Datengrundlage dieser Studie bezieht sich auf Qualitätsvariablen. Es kann somit nicht der direkte Effekt der Versorgungsauflage auf die geografische Mobilfunkabdeckung bestimmt werden. Es besteht aber die Möglichkeit, Spillover- bzw. Crowding-out-Effekte der Versorgungsauflagen zu analysieren. Ein möglicher Mechanismus für Spillover-Effekte könnte in verstärkten Investitionen in den Mobilfunkausbau bestehen, was zu einer Steigerung der Netzkapazität führen würde. Crowding-out-Effekte würden hingegen bei einer bevölkerungsbezogenen Versorgungsauflage für eine reduzierte Mobilfunkqualität bzw. eine verminderte systemische Kapazität im Vergleich zu Ländern ohne Auflagen resultieren. Der Mechanismus ist dadurch gekennzeichnet, dass Versorgungsauflagen dazu führen, dass Investitionen in die Fläche gelenkt werden und somit Investitionsmittel für den Kapazitätsaufbau in Ballungsgebieten nicht zur Verfügung stehen.

3.5.1 Differenz-in-Differenzen-Modell

Das DiD-Modell¹⁵ ist ein ökonometrischer Ansatz zur Evaluierung des Effekts einer politischen Maßnahme oder Intervention. Im Wesentlichen basiert diese Methode auf der Beobachtung von zwei Gruppen (Treatment- und Kontrollgruppe) zu verschiedenen Zeitpunkten vor und nach der Intervention. Dabei ist die Treatmentgruppe von der Intervention (hier: starke Versorgungsauflage) betroffen, die Kontrollgruppe nicht. Der Vorteil dieser Methode liegt in der doppelten Differenzenbildung. Es werden sowohl die Unterschiede zwischen den Gruppen als auch die Unterschiede innerhalb des betrachteten Objekts über die Zeit hinweg berücksichtigt. Die grundlegende Formel für den DiD-Effekt lässt sich darstellen als:

$$(3-2) \quad DiD = (Treat_{Post} - Treat_{Pre}) - (Kontroll_{Post} - Kontroll_{Pre})$$

¹⁵ Siehe für eine umfassende Erklärung des DiD-Modells Angrist und Pischke (2008, S. 169–182).

Es wird also zuerst der gemittelte Effekt innerhalb der Treatmentgruppe und der Kontrollgruppe vor und nach der Intervention gebildet. Diese Effekte werden dann mit der zweiten Differenz zwischen den Gruppen verglichen. Dadurch wird der durchschnittliche Effekt der Intervention ermittelt. In einer Panelregression wird das DiD-Modell mit folgender Gleichung formalisiert:

$$(3-3) \quad y_{it} = \beta_0 + \beta_1 * Treat_i + \beta_2 * Post_t + \beta_3(Treat_i * Post_t) + \varepsilon_{it}$$

Dabei ist β_0 die Konstante, β_1 quantifiziert den Effekt, ob ein Netzbetreiber oder Land (i) in der Treatmentgruppe ist (Dummy-Variable $Treat_i$). β_2 quantifiziert den Effekt, ob es sich bei der Beobachtung um vor oder nach der Vergabe handelt (Dummy-Variable $Post_t$). Der relevante DiD-Schätzer ist β_3 , der den durchschnittlichen Behandlungseffekt („Average Treatment Effect“) quantifiziert. Dabei werden die Beobachtungen untersucht, die der Treatmentgruppe angehören und zeitlich gesehen nach der Vergabe liegen ($Treat_i * Post_t$).

Eine weitere Version dieses Modells inkludiert individuelle¹⁶ fixe Effekte. Diese kontrollieren für unbeobachtete Heterogenität zwischen den einzelnen Individuen (δ_i), die sich über die Zeit nicht verändert. Das können Unterschiede wie langfristige Unternehmensstrategien, die Landesgröße oder Siedlungsstrukturen der Länder sein. Formell lässt sich das Modell ausdrücken als:

$$(3-4) \quad y_{it} = \delta_i + \beta_2 * Post_t + \beta_3(Treat_i * Post_t) + \varepsilon_{it}, \text{ mit}$$

$$\delta_i = \beta_0 + \beta_1 * Treat_i + \eta_i$$

Durch das Hinzunehmen der individuellen fixen Effekte wird für jedes Individuum eine eigene Konstante angenommen, um so für strukturelle Unterschiede zwischen den Ländern zu kontrollieren.

Da die Länder zu unterschiedlichen Zeitpunkten Frequenzen vergeben haben, können die Zeiträume (t) nur in Prä ($Post = 0$) und Post ($Post = 1$) aufgeteilt werden (siehe Kapitel 3.2.1). Für diese Zeiträume wurden die entsprechenden Wachstumsraten gebildet (siehe Kapitel 3.2.13.2.2).¹⁷

In Modell 1 werden betreiberspezifische fixe Effekte und in Modell 2 länderspezifische fixe Effekte genutzt. Modell 1 kontrolliert damit für zeitinvariante Eigenschaften der einzelnen Netzbetreiber innerhalb eines Landes. Modell 2 kontrolliert für zeitinvariante Unterschiede zwischen Ländern, nicht mehr zwischen den Netzbetreibern. Das Modell 2

¹⁶ In diesem Kontext auf Ebene der Mobilfunknetzbetreiber oder der Länder.

¹⁷ Das bedeutet jedoch auch, dass der Umstand, dass es sich um unterschiedliche Beobachtungszeiträume zwischen den Ländern handelt, in den bisher beschrieben Modellen nicht berücksichtigt wird. Die Post-Periode in einem Land kann im April 2019 anfangen, während die Post-Periode eines anderen Landes erst im November 2022 beginnt. Beide Zeiträume werden jedoch direkt verglichen, sodass zeitvariante Effekte, die alle Individuen unterschiedlich oder gleichermaßen treffen (beispielsweise die Corona-Krise ab Frühjahr 2020), in den obigen Modellen nicht beachtet werden. Diese Einschränkung betrifft jedoch nur eben solche Effekte. Für zeitinvariante Effekte wiederum wird kontrolliert.

nutzt die Variation innerhalb der Länder über die Zeit und nutzt dabei die Daten der Netzbetreiber eines Landes.

$$\text{Modell 1 - Betreiberebene: } y_{it} = \delta_i + \beta_2 * Post_t + \beta_3(Treat_i * Post_t) + \varepsilon_{it}$$

$$\text{Modell 2 - Länderebene: } y_{jt} = \delta_j + \beta_2 * Post_t + \beta_3(Treat_j * Post_t) + \varepsilon_{jt}$$

Die abhängige Variable y_{it} ist die entsprechende gemittelte Wachstumsrate der Mobilfunkqualität (s. Abschnitt 3.2) von Netzbetreiber i bzw. Land j zu der jeweiligen Periode t vor oder nach der Vergabe von Frequenznutzungsrechten. Der Indikator $Post_t$ nimmt den Wert 1 für die Periode nach der Vergabe von Frequenznutzungsrechten an und 0 davor. Der dazugehörige Koeffizient β_2 gibt daher an, wie sich die Mobilfunkqualität in Ländern ohne Versorgungsaufgaben nach der Vergabe von Frequenznutzungsrechten verändert hat. Der relevante DiD-Schätzer β_3 misst den Effekt der Versorgungsaufgabe nach der Vergabe von Frequenznutzungsrechten auf die Mobilfunkqualität relativ zu Netzbetreibern ohne Auflage. Die gleiche Analyse wird in Modell 2 für Land j durchgeführt.

In dieser Studie werden in allen betrachteten Ländern neue Frequenznutzungsrechte über Auktionen zur Verfügung gestellt. Somit ist grundsätzlich davon auszugehen, dass die Qualität im Mobilfunk in allen Ländern ansteigt. Der reine Effekt der Versorgungsaufgaben kann isoliert werden, indem Länder mit schwachen bzw. keinen Auflagen mit Ländern, in denen es strengere Auflagen gibt, verglichen werden. Es wird die Veränderung im Anstieg der Mobilfunkqualität in einem Vorher-Nachher-Vergleich betrachtet.

Es verbleiben jedoch zwei wesentliche methodische Probleme. Erstens besteht das Problem der Endogenität. So könnte zum Beispiel das vorherige Niveau der Mobilfunkqualität den Umfang bzw. die Eingriffstiefe der Versorgungsaufgaben beeinflussen, sodass umgekehrte Kausalität vorliegen könnten. Regulierungsentscheidungen sind nicht unabhängig von Marktergebnissen und Länder mit schlechter Mobilfunkqualität könnten umfangreichere Versorgungsaufgaben erlassen, um einen stärkeren Anstieg der Mobilfunkqualität zu erzwingen.

Zudem kann die wichtige Annahme der DiD-Methode, die Annahme paralleler Trends, aufgrund fehlender Daten nicht näher evaluiert werden. Diese Annahme besagt, dass sich ohne Intervention beide Gruppen über die Zeit hinweg parallel entwickelt hätten. In diesem Kontext bedeutet das, dass sich ohne Versorgungsaufgabe die Wachstumsraten der Mobilfunkqualität zwischen zwei Ländern gleich verhalten würde, wenn beide Länder neue Frequenznutzungsrechte vergeben.

Diese Annahme ist zentral für die kausale Interpretation des geschätzten Effekts der Versorgungsaufgaben. Die Annahme paralleler Trends kann aber generell nie direkt überprüft werden. Als Plausibilitätscheck wird häufig untersucht, ob vor der Intervention parallele Trends zwischen den Gruppen bestanden haben. Das ist in diesem Kontext nicht möglich, da es nicht genügend Messdaten für jedes Land vor der letzten Vergabe von

Frequenznutzungsrechten gibt. Es können also nur theoretische Argumente für diese Annahme vorgebracht werden.

Argumente zu Gunsten der Annahme paralleler Trends sind folgende: Die Einführung einer neuen Mobilfunktechnologie führt oftmals zur Bereitstellung neuer Frequenznutzungsrechte. Unabhängig von Versorgungsauflagen würde sich die Mobilfunkqualität zwischen den Ländern bzw. den Mobilfunknetzbetreibern gleich entwickeln, da die neue Mobilfunktechnologie allen gleichermaßen zur Verfügung steht. Dies spricht für eine parallel verlaufende Entwicklung der Mobilfunkqualität nach der Vergabe neuer Frequenznutzungsrechte, wenn es keine Versorgungsauflagen gäbe.

Aus ökonometrischer Sicht ist diese Einführung ein exogener, positiver technologischer Schock. Veränderungen in der Mobilfunkqualität, die durch die Nutzung der neuen Technologie und der zusätzlichen Frequenznutzungsrechte erfolgen, erfassen alle Mobilfunknetzbetreiber auf dieselbe Art und Weise. Wenn sich Mobilfunknetzbetreiber systematisch anders entwickeln, dann ist dies allein auf den Umfang der Versorgungsauflagen zurückzuführen. So kann dieser Effekt isoliert betrachtet werden. Alle nicht systematischen Unterschiede sind darüber hinaus im Fehlerterm enthalten.

Gegen die Annahme paralleler Trends spricht allerdings, dass Länder schon vor der Vergabe unterschiedliche Wachstumsraten der Mobilfunkqualität haben können. So kann ein Land mit relativ schlechter Versorgung bereits auf einem stärkeren Wachstumspfad sein als ein Land mit relativ guter Versorgung.¹⁸

Abschließend kann die Annahme paralleler Trends weder bestätigt noch falsifiziert werden. Deshalb und aufgrund einer möglichen umgekehrten Kausalität können die Ergebnisse dieser Studie nicht als kausal betrachtet werden.

3.5.2 Data Envelopment Analysis

Neben der DiD-Methode kann die Frage, ob Versorgungsauflagen die Mobilfunkqualität beeinflussen und wie sich die Netzbetreiber in unterschiedlichen Ländern in dieser Hinsicht zueinander verhalten, auch in einen Produktionszusammenhang überführt werden. Dafür müssen bestimmte Inputs für die Produktion von Mobilfunkqualität eingesetzt werden. Dieser Produktionszusammenhang zwischen Inputs und Outputs kann nun wiederum innerhalb der Methodik der DEA einer quantitativen Betrachtung zugänglich gemacht werden, um einen Vergleich der Netzbetreiber in den unterschiedlichen Ländern durchzuführen.

¹⁸ In der Tat kann ein leicht negativer Zusammenhang zwischen der Höhe der einzelnen Messgrößen der Mobilfunkqualität und deren Wachstumsrate beobachtet werden. Das bedeutet, dass Netzbetreiber, die bereits ein besonders hohes Level an Qualität haben, geringere Wachstumsraten aufweisen. Da der Zusammenhang jedoch nur leicht negativ ist, wird dieser Umstand als nicht relevant betrachtet.

Die DEA hat ihre Ursprünge in einer Arbeit von Charnes et al. (1978) und ist in der Zwischenzeit eine weitverbreitete Methodik bei Effizienz- bzw. Produktivitätsanalysen.¹⁹ Die DEA kann entweder input- oder outputorientiert erfolgen. Bei einer inputorientierten Betrachtungsweise (im Rahmen einer Kostenfunktion) wird danach gefragt, wie weit ein Unternehmen seinen Input in Relation zur Frontier bei gegebenem Output reduzieren kann. Bei einer Outputorientierung (im Rahmen einer Produktionsfunktion) wird hingegen untersucht, wie weit ein Unternehmen seinen Output bei gegebenem Input in Relation zur Effizienzgrenze erhöhen könnte. Im vorliegenden Kontext wird daher ein outputorientierter Ansatz verfolgt, da es um die Produktion von Mobilfunkqualität geht.

Ausgangspunkt dieses Ansatzes ist bei einer Produktionsfunktion das Verhältnis von Output(s) zu Input(s). Unter Rückgriff auf Methoden der linearen Programmierung wird endogen aus dem Datensatz eine Produktions- bzw. Effizienzgrenze (Frontier) ermittelt und jede Betrachtungseinheit (in unserem Fall die Mobilfunkunternehmen) zu dieser Frontier über Distanzfunktionen ins Verhältnis gesetzt.

Dies sei anhand von Abbildung 3-3 erläutert. Dargestellt ist eine Produktionsfunktion mit einem Output y und einem Input x . Die Effizienzgrenze wird von den Unternehmen²⁰ aufgespannt, für die es kein vergleichbares Unternehmen mit einer besseren Output-Input-Kombination gibt. Die Vergleichbarkeit wird bei einer outputorientierten DEA dabei über die Inputs hergestellt. Es werden somit nur Unternehmen mit einer vergleichbaren Ausstattung an Inputfaktoren miteinander verglichen. Hierbei ist die Annahme über die Skalenerträge von wesentlicher Bedeutung. Wenn konstante Skalenerträge (constant returns to scale, CRS) unterstellt werden, werden Unternehmen unabhängig von ihrer Größe miteinander verglichen. Da in Abbildung 3-3 nur ein Input dargestellt ist, wird in diesem Fall jedes Unternehmen mit allen anderen verglichen. Die Effizienzgrenze unter der Annahme konstanter Skalenerträge wird durch Unternehmen E aufgespannt (effiziente Grenze (CRS)), da alle anderen Beobachtungspunkte ein geringes Output-Input-Verhältnis aufweisen. Das Unternehmen E wird auch als Peer bezeichnet. Dies bedeutet, dass alle anderen Unternehmen bei gegebenem Input im Vergleich zum Peer ihren Output steigern könnten und somit technisch ineffizient sind. Das Maß der technischen Effizienz (TE_{CRS}) bzw. der Faktor, um den ein ineffizientes Unternehmen seinen Output steigern könnte (OF_{CRS}), wird über Distanzfunktionen ermittelt, wobei gilt:

$$(3-5) \quad OF_{CRS} = 1/TE_{CRS}.$$

Der Outputfaktor ist reziprok zur technischen Effizienz. Es sei das Unternehmen B betrachtet, das unterhalb der Effizienzgrenze liegt und somit ineffizient produziert. Unter der Annahme konstanter Skalenerträge lässt sich der Faktor, um den das Unternehmen in Relation zur Frontier seinen Output ausweiten könnte, durch das Verhältnis der

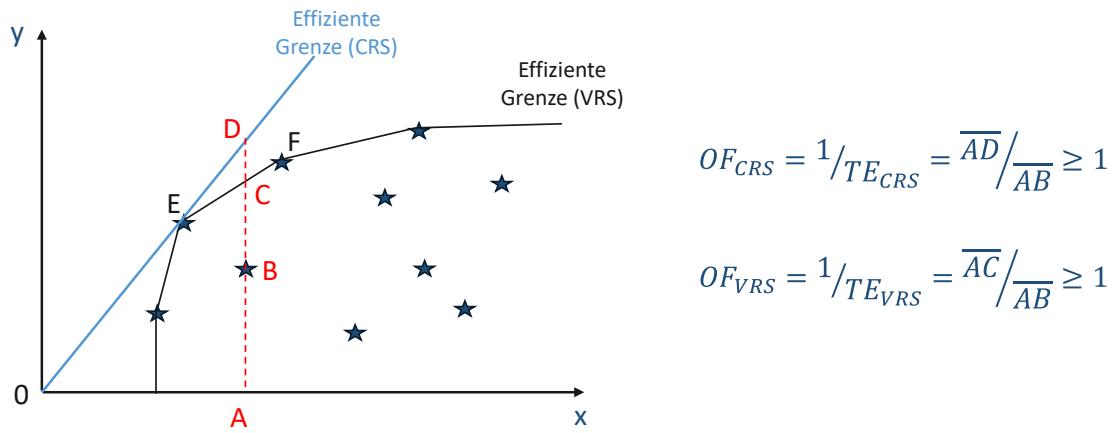
¹⁹ Vgl. z. B. Coelli et al. (2005) sowie Bogetoft und Otto (2011).

²⁰ Einzelne Beobachtungen sind mit einem Stern in Abbildung 3-3 dargestellt.

Distanzen zwischen den Punkten A und D (\overline{AD}) und zwischen den Punkten A und B (\overline{AB}) ausdrücken. Das effiziente Unternehmen E hat folgendermaßen einen Wert von Eins.

In Abbildung 3-3 ist auch der Fall für variable Skalenerträge (variable returns to scale, VRS) abgebildet. In diesem Fall werden nur Unternehmen ähnlicher Größe miteinander verglichen. Es entsteht eine abschnittsweise lineare und konvexe Effizienzgrenze. Unter der Annahme variabler Skalenerträge wird das Unternehmen B mit einer Linearkombination der beiden Unternehmen E und F verglichen, die beide eine ähnliche Größe hinsichtlich der Ressourcenausstattung wie das Unternehmen B haben. Entsprechend werden die Distanzen (\overline{AC}) und (\overline{AB}) zur Ermittlung des Outputfaktors ins Verhältnis gesetzt.

Abbildung 3-3: Effizienzmessung bei einer outputorientierten DEA



Quelle: Eigene Darstellung.

Im outputorientierten Fall soll für jedes Unternehmen das maximal mögliche Verhältnis zwischen Output und Input gefunden werden. Mit anderen Worten: Wie stark kann der Output gesteigert werden bei gegebenem Input?

Der Algorithmus lautet formal:

$$(3-6) \quad \max OF_{CRS}$$

unter folgenden Nebenbedingungen:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i x_i \leq x_0,$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i y_i \geq OF_{CRS} \cdot y_0,$$

$$\lambda_i \geq 0, \forall i = 1, \dots, n,$$

wobei OF_{CRS} der zu maximierende Output-Skalierungsfaktor ist. Wenn $OF_{CRS} = 1$, ist das Unternehmen effizient. Wenn $OF_{CRS} > 1$, ist das Unternehmen ineffizient und der Output kann gemäß dem Skalierungsfaktor gesteigert werden. λ_i sind die Gewichtungsfaktoren,

die ein hypothetisches, effizientes Unternehmen als Linearkombination existierender Unternehmen konstruiert. x_0 ist der tatsächliche Inputvektor und y_0 der tatsächliche Outputvektor des betrachteten Unternehmens i .²¹ n ist die Anzahl der Beobachtungen. In- und Outputs dürfen nicht negativ sein.

Grob gesprochen besagt der Algorithmus, dass eine gewichtete Kombination realer Unternehmen (Peers) gesucht wird, die mindestens so viel Output bei gleichem Input wie das betrachtete Unternehmen produzieren. Wenn eine solche Kombination gefunden wird, ist das betrachtete Unternehmen ineffizient. CRS bedeutet in diesem Kontext, dass Skalierung bei jeder Unternehmensgröße grundsätzlich möglich ist, wobei Input und Output in gleicher Weise skaliert werden.

Bei VRS kommt im Rahmen des Algorithmus (3-6) folgende zusätzliche Nebenbedingung hinzu:

$$(3-7) \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1.$$

Bei der ermittelten Effizienzgrenze handelt es sich somit um eine relative Grenze, die nur durch die Unternehmen aus dem betrachteten Datensatz aufgespannt wird.²² Alle Unternehmen mit einem Skalierungsfaktor von 100 % bilden die Eckpunkte der abschnittsweise linearen und konvexen Effizienzgrenze, die alle anderen Unternehmen mit einem Faktor größer 100 % umschließt.²³

Ein großer Vorteil der DEA ist, dass keine Annahmen hinsichtlich der funktionalen Form zwischen Inputs und Outputs getroffen werden müssen, sondern dass die Produktionszusammenhänge direkt aus den Daten abgeleitet werden. Daher ist die DEA sehr daten-sparsam und kann bei entsprechender Datengüte bereits bei relativ geringen Stichprobengrößen robuste und aussagekräftige Ergebnisse liefern. Es gilt, de facto nur eine wesentliche Annahme über die Skalenerträge zu treffen. Die Wahl ist dabei kontextabhängig. Können Unternehmen ihre Betriebsgröße frei wählen, so ist CRS die geeignete Annahme. Besteht diese Wahlfreiheit nicht bzw. nur sehr eingeschränkt, so ist es durchaus sinnvoll, eine abweichende Annahme hinsichtlich der Skalenerträge zu treffen.²⁴ Da die Mobilfunknetzbetreiber ihre Netze privatwirtschaftlich errichten und zudem einem Infrastrukturwettbewerb ausgesetzt sind, ist im vorliegenden Kontext die Annahme konstanter

²¹ Die vektorielle Betrachtung gilt, wenn mehr als ein Input bzw. mehr als ein Output die Produktionsfunktion aufspannen.

²² Im Datensatz nicht enthaltene Unternehmen können somit zu einer veränderten Effizienzgrenze führen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass sich die aus dem betrachteten Datensatz ergebenden Relationen grundsätzlich ändern.

²³ Da die Effizienzgrenze nicht aus einer Stichprobe geschätzt, sondern mittels linearer Programmierung ermittelt wird, wird die DEA als deterministisch und nicht-parametrisch klassifiziert (vgl. z. B. Gugler et al. 2012).

²⁴ So ist wurden z. B. im Rahmen der ersten beiden Effizienzvergleiche bei den deutschen Strom- und Gasnetzen nicht-fallende Skalenerträge angenommen, wodurch kleine Netzbetreiber auch nur mit kleinen Netzbetreibern verglichen wurden. Diese Vorgehensweise diente dem Schutz kleiner Netzbetreiber. Im Rahmen der als Gebietsmonopolisten agierenden Betreiber von Energienetzen war dies gerechtfertigt. Zum Vorgehen bei den Energienetzen siehe z. B. Swiss Economics und Sumicsid (2014).

Skalenerträge sachgerecht. Ein weiteres Argument für CRS ist, dass sowohl auf der Outputseite als auch auf der Inputseite nur relative Größen verwendet werden.²⁵

Eine weitere Annahme, die jedoch methodenimmanent ist, ist die Konvexität der Effizienzgrenze.²⁶ Sie besagt, dass nicht nur die tatsächlich beobachteten, sondern beliebige Kombinationen von In- und Outputs innerhalb des Produktionsmöglichkeitenraums möglich sind. In Verbindung mit der oben erwähnten Nichtnegativitätsbedingung für In- und Outputs impliziert dies, dass ein positiver Zusammenhang zwischen den Output- und Inputgrößen bestehen muss. Es muss mithin $\frac{\partial y}{\partial x} > 0$ gelten. Daher werden in den DEA-Analysen nur Inputs verwendet, die diese Bedingung erfüllen. Diese Bedingung kann für die beiden in Abschnitt 3.4 aufgelisteten Inputvariablen, Bevölkerungsdichte und Bruttoinlandsprodukt pro Kopf, als erfüllt angenommen werden. Eine höhere Bevölkerungsdichte führt angebotsseitig tendenziell zu geringeren Ausbaukosten, so dass *ceteris paribus* eine bessere Mobilfunkqualität bereitgestellt werden kann. Ein höheres Bruttoinlandsprodukt pro Kopf kann in ähnlicher Weise sowohl nachfrageseitig als auch angebotsseitig einen positiven Einfluss auf die Mobilfunkqualität ausüben. Angebotsseitig wäre dies durch ein besseres Investitionsklima gegeben, während nachfrageseitig eine höhere Zahlungsbereitschaft der Treiber ist.²⁷

Allerdings ist die DEA aufgrund der fehlenden Stochastik relativ anfällig gegenüber Ausreißern, die z. B. aufgrund von Mess- und Datenfehlern oder falschen Angaben entstehen können, was zu verzerrten Ergebnissen führen kann.²⁸ Diesem Nachteil wird mittels Sensitivitätsanalysen begegnet.

Das bisher beschriebene Setting liefert einen Vergleich der Netzbetreiber in unterschiedlichen Ländern in Hinblick auf die bereitgestellte Mobilfunkqualität zu einem gewissen Zeitpunkt. Um Aussagen zum Einfluss von Versorgungsauflagen auf die Mobilfunkqualität zu tätigen, erfolgt eine Second-Stage-Analyse. Die DEA wird für das Sample sowohl für einen frühen Zeitpunkt t_1 , der die Situation vor den mit der Vergabe von Frequenznutzungsrechten verbundenen Versorgungsauflagen widerspiegelt, als auch für einen späteren Zeitpunkt t_2 durchgeführt, der die Situation nach den mit der Vergabe von Frequenznutzungsrechten verbundenen Versorgungsauflagen abbildet. Für jeden

²⁵ Vgl. Kapitel 3.1.

²⁶ Vgl. z. B. Sumicsid (2010, RZ 5.51).

²⁷ Bei anderen denkbaren Variablen ist *a priori* oft nicht eindeutig, welchen Einfluss sie auf die Mobilfunkqualität ausüben. Dies gilt z. B. für die FTTB/H-Abdeckung. Für den grundsätzlichen Zusammenhang zwischen Festnetz und Mobilfunk finden Grzybowski und Verboven (2016) je nach Region und Situation sowohl Indizien für eine Komplementarität als auch für die Substituierbarkeit zwischen den Produkten auf diesen beiden Märkten. Ähnliches gilt für die Marktanteile der Netzbetreiber auf dem Mobilfunkmarkt. Während Wettbewerb grundsätzlich positiv in Hinblick auf Investitionen gesehen wird, kann ab einem gewissen Punkt eine höhere Wettbewerbsintensität zu einer reduzierten Investitionstätigkeit führen. Es ist daher eher von einem u-förmigen Verlauf auszugehen. Für den Mobilfunkmarkt siehe z. B. GSMA (2020). Stronzik und Zuloaga (2020) haben einen u-förmigen Verlauf für FTTB/H-Investitionen in Verbindung mit steigender Wettbewerbsintensität im Festnetzbereich empirisch nachgewiesen.

²⁸ Vgl. z. B. Stronzik et al. (2023).

Netzbetreiber i werden somit zwei Skalierungsfaktoren für unterschiedliche Zeitpunkte berechnet ($OF_i(t_1)$ und $OF_i(t_2)$), für die die Differenz d_i berechnet werden kann:

$$(3-8) \quad d_i = OF_i(t_1) - OF_i(t_2).$$

Die Überlegung ist: Wenn Versorgungsaufgaben einen positiven Einfluss auf die Mobilfunkqualität haben, dann müssten Netzbetreiber aus Ländern mit strengen Versorgungsaufgaben tendenziell eine größere positive Differenz d_i aufweisen. Sie müssten gewissermaßen stärker an die Effizienzgrenze rücken als Netzbetreiber aus Ländern mit geringen Versorgungsaufgaben.²⁹ Dieser Zusammenhang kann mittels einer einfachen Korrelationsanalyse zwischen d_i und dem Score der Versorgungsaufgaben ($score_{avg}$ und $score_{gew}$) untersucht werden.³⁰ Voraussetzung für die Analysen sind gleiche Stichproben zu den beiden unterschiedlichen Zeitpunkten, um Verzerrungen aufgrund unterschiedlicher Zusammensetzungen zu vermeiden.

Die Verwendung der Versorgungsaufgaben als weitere Inputvariable in der DEA wäre hingegen für die vorliegende Fragestellung nicht zielführend, da – wie oben ausgeführt – a priori ein positiver Zusammenhang zwischen Versorgungsaufgaben und den Outputvariablen zur Abbildung der Mobilfunkqualität angenommen werden würde. Der Aussagegehalt der ermittelten Skalierungsfaktoren würde sich in der Form ändern, dass die Ergebnisse zeigen würden, wie effizient die Versorgungsaufgaben im Vergleich zu Unternehmen aus Ländern mit vergleichbaren Versorgungsaufgaben umgesetzt wurden.

²⁹ Je höher der Skalierungsfaktor ist, desto weiter entfernt liegt das Unternehmen von der Effizienzgrenze.

³⁰ Die Differenzen d_j finden ihre Entsprechung in den im Rahmen des DiD-Ansatzes verwendeten Wachstumsraten, siehe Abschnitt 3.5.1.

4 Ergebnisse und Interpretation

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse beider Methoden jeweils getrennt zuerst übersichtsweise und dann im Detail vorgestellt und interpretiert.

4.1 Differenz-in-Differenzen-Modell

4.1.1 Übersicht der zentralen Ergebnisse aus den DiD-Modellen

- Hinsichtlich der Wachstumsrate der **Downloadgeschwindigkeit** zeigt sich **kein signifikanter Unterschied** zwischen Ländern mit strengen Versorgungsauflagen und solchen mit keinen oder nur schwachen Auflagen.
- Auch für die Wachstumsrate der **Uploadgeschwindigkeit** lässt sich **kein signifikanter Unterschied** zwischen der Treatment- und der Kontrollgruppe feststellen.
- Für die Wachstumsrate des **Games-Erlebnisses** gibt es **heterogene Ergebnisse**. Für den gemittelten Versorgungsauflagen-Score gibt es ein signifikant positives Wachstum für die Länder mit starken Versorgungsauflagen. Für den gewichteten Versorgungsauflagen-Score findet nur ein Modell signifikante Ergebnisse.
- Für die Wachstumsrate der **Sprachqualität in Apps** lässt sich ebenfalls ein **positiver und signifikanter Zusammenhang** finden. Bei dieser Metrik haben über alle Modelle hinweg Länder mit strengen Versorgungsauflagen höhere Wachstumsraten.

Werden die Schwellenwerte für die Einteilung in Treatment- und Kontrollgruppe im Zuge einer Überprüfung der Ergebnisse auf ihre Robustheit angepasst, bleiben die Ergebnisse konstant. In Modellen für Download- und Uploadgeschwindigkeit lassen sich keine signifikanten Ergebnisse finden. Die Ergebnisse für Games-Erlebnis und Sprachqualität in Apps bleiben jedoch in einer überwiegenden Mehrheit von Modellen positiv signifikant.

Die untersuchten Versorgungsauflagen sind in der Mehrheit bevölkerungs- oder flächenbezogen. Dies hat Auswirkungen auf die kapazitätsbezogene Mobilfunkqualität. Wie in Kapitel 3.5 beschrieben, können Spillover- bzw. Crowding-out-Effekte untersucht werden. Aufgrund der Tatsache, dass in keinem Fall signifikant negative Koeffizienten auftreten, kann zumindest ein schädlicher Einfluss der bevölkerungsbezogenen Versorgungsauflagen auf die Mobilfunkqualität ausgeschlossen werden. Die vorliegenden empirischen Belege legen die Vermutung nahe, dass es sich bei den beobachteten positiven Koeffizienten um Spillover-Effekte handeln könnte. Die bevölkerungsbezogenen Auflagen haben also tendenziell einen positiven Effekt auf die Mobilfunkqualität.

4.1.2 Ergebnisse für den gemittelten Versorgungsauflagen-Score

Die Ergebnisse der Panelregressionen werden in diesem Kapitel zuerst mit dem gemittelten Versorgungsauflagen-Score vorgestellt (s. Kapitel 3.3). Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse für den gewichteten Score diskutiert. In Tabelle 0-2 im Anhang werden weitere Robustheitschecks abgebildet, die den Treatment-Status anhand von Quartilen zuordnen.

Die Schätzung der DiD-Modelle für die Wachstumsrate der Downloadgeschwindigkeit zeigt keinen signifikanten Einfluss der Versorgungsaufgaben. Das bedeutet, dass Mobilfunknetze von Betreibern in Ländern mit strengen Versorgungsaufgaben keine stärkere Verbesserung der Downloadgeschwindigkeit aufweisen als Netze in Ländern mit schwachen oder gar keinen Auflagen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass regulatorische Vorgaben zur Versorgung zwar die Abdeckung und Mindeststandards beeinflussen können, sich jedoch nicht zwingend in einem beschleunigten Wachstum der durchschnittlichen Downloadgeschwindigkeit niederschlagen. Hier ist zu beachten, wie die Versorgungsaufgaben der jüngsten Vergaben von Frequenznutzungsrechten gestaltet waren. Die meisten Auflagen bezogen sich auf eine weitreichende Versorgung der Fläche und der Bevölkerung.³¹ Es kann also die Annahme herangezogen werden, dass Investitionen vorzugsweise für die Erfüllung dieser Auflagen getätigt wurden.

Tabelle 4-1: Regressionsergebnisse Downloadgeschwindigkeit (gemittelter Score)

Abhängige Variable:		
	Wachstumsrate: Downloadgeschwindigkeit	
	Betreiber FE (1)	Länder FE (2)
Post	0.0075 (0.0241)	0.0075 (0.0236)
Treatment × Post	-0.0073 (0.0288)	-0.0078 (0.0282)
Beobachtungen	138	138
R ²	0.0016	0.0009
Korrigiertes R ²	-1.2424	-0.2007

Anmerkung: Die Zuordnung zur Treatment- und Kontrollgruppe fand über den gemittelten Score statt;
*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01; Standardfehler in Klammern.

Die Schätzung der DiD-Modelle für die Wachstumsrate der Uploadgeschwindigkeit zeigt analog zur Downloadgeschwindigkeit keinen signifikanten Einfluss der Versorgungsaufgaben. Mobilfunknetze von Betreibern in Ländern mit strengen Versorgungsaufgaben haben keine stärkere Verbesserung der Uploadgeschwindigkeit als Netze in Ländern mit schwachen oder gar keinen Auflagen. Eine Erklärung könnte ebenfalls analog zur

³¹ Insgesamt gab es fünf Auflagen zur Flächenversorgung, 22 zur Bevölkerungsabdeckung und lediglich sieben mit Qualitätsvorgaben.

Downloadgeschwindigkeit in der Natur der Auflagen liegen, die eher auf die Versorgung der Fläche und Bevölkerung abzielen als auf Qualität.

Tabelle 4-2: Regressionsergebnisse Uploadgeschwindigkeit (gemittelter Score)

	Abhängige Variable:	
	Wachstumsrate: Uploadgeschwindigkeit	
	Betreiber FE (1)	Länder FE (2)
Post	-0.0156 (0.0167)	-0.0156 (0.0161)
Treatment × Post	0.0018 (0.0200)	-0.0002 (0.0193)
Beobachtungen	138	138
R ²	0.0389	0.0271
Korrigiertes R ²	-1.1586	-0.1692

Anmerkung: Die Zuordnung zur Treatment- und Kontrollgruppe fand über den gemittelten Score statt;
 *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01; Standardfehler in Klammern.

Die Regressionsergebnisse für die Wachstumsrate des Games-Erlebnisses sind positiv signifikant in den Modellen mit fixen Effekten auf Ebene der Betreiber und auf Ebene der Länder. Diese Ergebnisse deutet darauf hin, dass in Ländern mit strengen Versorgungsauflagen nach deren Auferlegung ein signifikant höheres Wachstum des Games-Erlebnisses im Vergleich zu Ländern mit schwachen oder keinen Auflagen zu beobachten ist. Diese Ergebnisse lassen sich möglicherweise durch den zunehmenden Ausbau von 5G-Standalone-Netzen erklären, der zu deutlich geringeren Latenzen führt, ein entscheidender Faktor für die Qualität von Online-Videospielen. Auffällig ist, dass dieses Wachstum insbesondere in Ländern mit strengen Versorgungsauflagen zu beobachten ist, was darauf hindeutet, dass regulatorische Vorgaben einen positiven Einfluss auf die Verbreitung leistungsfähiger Netztechnologien und damit auf das Erlebnis beim Gaming haben könnten.

Tabelle 4-3: Regressionsergebnisse Games-Erlebnis (gemittelter Score)

	Abhängige Variable:	
	Wachstumsrate: Games-Erlebnis	
	Betreiber FE (1)	Länder FE (2)
Post	0.0009 (0.0118)	0.0009 (0.0093)
Treatment × Post	0.0329** (0.0149)	0.0329*** (0.0117)
Beobachtungen	113	113
R ²	0.2197	0.1931
Korrigiertes R ²	-0.7835	0.0282

Anmerkung: Die Zuordnung zur Treatment- und Kontrollgruppe fand über den gemittelten Score statt;
 *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01; Standardfehler in Klammern.

Die Ergebnisse der Regressionen zur Wachstumsrate der Sprachqualität in Apps ist positiv signifikant. Demnach ist in Ländern mit strengen Versorgungsauflagen nach deren Einführung ein signifikant höheres Wachstum der Sprachqualität in Apps zu beobachten als in Ländern mit schwachen oder keinen Auflagen. Der Effekt bleibt unabhängig von der gewählten Spezifikation robust. Die Ergebnisse legen nahe, dass regulatorische Vorgaben zur Versorgung einen positiven und konsistenten Einfluss auf die Verbesserung der Anrufqualität über Internetdienste haben.

Tabelle 4-4: Regressionsergebnisse Sprachqualität in Apps (gemittelter Score)

	Abhängige Variable:	
	Wachstumsrate: Sprachqualität in Apps	
	Betreiber FE (1)	Länder FE (2)
Post	-0.0026 (0.0042)	-0.0026 (0.0036)
Treatment × Post	0.0107** (0.0051)	0.0109** (0.0044)
Beobachtungen	124	124
R ²	0.1270	0.1047
Korrigiertes R ²	-0.8514	-0.0692

Anmerkung: Die Zuordnung zur Treatment- und Kontrollgruppe fand über den gemittelten Score statt;

*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01; Standardfehler in Klammern.

4.1.3 Ergebnisse für den gewichteten Versorgungsauflagen-Score

Zur weiteren Darstellung der Robustheit der Ergebnisse kann die Zuordnung in die Treatment- und Kontrollgruppen variiert werden. Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, kann der Versorgungsauflagen-Score als gemittelter Wert oder mit gewichteten Variablen berechnet werden. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse für den gewichteten Score diskutiert.

Die Schätzung der DiD-Modelle für die Wachstumsrate der Downloadgeschwindigkeit zeigt auch unter Verwendung des gewichteten Versorgungsauflagen-Scores keinen signifikanten Effekt. Unabhängig von der verwendeten Spezifikation bleibt der Einfluss der Versorgungsauflagen auf die Verbesserung der Downloadgeschwindigkeit statistisch anhand der hier verwendeten Daten und Modelle nicht nachweisbar.

Tabelle 4-5: Regressionsergebnisse Downloadgeschwindigkeit (gewichteter Score)

<i>Abhängige Variable:</i>		
	Wachstumsrate: Downloadgeschwindigkeit	
	Betreiber FE	Länder FE
	(1)	(2)
Post	-0.0012 (0.0202)	-0.0012 (0.0198)
Treatment × Post	0.0063 (0.0267)	0.0056 (0.0261)
Beobachtungen	138	138
R ²	0.0014	0.0006
Korrigiertes R ²	-1.2427	-0.2010

Anmerkung: Die Zuordnung zur Treatment- und Kontrollgruppe fand über den gewichteten Score statt;
 *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01; Standardfehler in Klammern.

Dieser Befund gilt ebenso weiterhin im Modell der Wachstumsrate der Uploadgeschwindigkeit. In allen Modellvarianten bleibt der DiD-Koeffizient statistisch insignifikant. Es gibt also keinen Unterschied zwischen Ländern mit starken oder schwachen bzw. keinen Versorgungsaufgaben. Interessant ist jedoch, dass der Indikator für die Periode nach der Vergabe negativ signifikant ausfällt. Das bedeutet, dass die Wachstumsrate der Uploadgeschwindigkeit gesunken ist. Dies bedeutet nicht zwingend negatives Wachstum, es kann auch lediglich ein langsameres Wachstum stattfinden.

Tabelle 4-6: Regressionsergebnisse Uploadgeschwindigkeit (gewichteter Score)

	Abhängige Variable:	
	Wachstumsrate: Uploadgeschwindigkeit	
	Betreiber FE (1)	Länder FE (2)
Post	-0.0307** (0.0137)	-0.0307** (0.0134)
Treatment × Post	0.0286 (0.0182)	0.0261 (0.0177)
Beobachtungen	138	138
R ²	0.0764	0.0453
Korrigiertes R ²	-1.0744	-0.1473

Anmerkung: Die Zuordnung zur Treatment- und Kontrollgruppe fand über den gewichteten Score statt;

*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01; Standardfehler in Klammern.

Tabelle 4-7 zeigt die Regressionsergebnisse für die Wachstumsrate des Games-Erlebnisses unter den beiden Modellen. Der DiD-Koeffizient ist nur im Modell mit länderfixen Effekten (Spalte 2) positiv und auf dem 5%-Niveau signifikant. Im Vergleich zu den vorherigen Ergebnissen in Tabelle 4-3, bei denen signifikanten Effekte der Versorgungsauflagen festgestellt wurden, zeigen sich hier heterogene Befunde. Der positive und signifikante Effekt im länderfixen Effekte-Modell deutet darauf hin, dass in Ländern mit strengen Versorgungsauflagen das Games-Erlebnis nach den mit der Vergabe von Frequenznutzungsrechten verbundenen Auflagen stärker wächst als in Ländern mit schwachen oder keinen Auflagen. Dies unterstützt die vorherigen Ergebnisse. Allerdings ist dieser Effekt nicht robust über alle Modellspezifikationen hinweg, was auf eine gewisse Unsicherheit in der Interpretation hinweist.

Tabelle 4-7: Regressionsergebnisse Games-Erlebnis (gewichteter Score)

	Abhängige Variable:	
	Wachstumsrate: Games-Erlebnis	
	Betreiber FE (1)	Länder FE (2)
Post	0.0104 (0.0101)	0.0104 (0.0079)
Treatment × Post	0.0236 (0.0148)	0.0236** (0.0116)
Beobachtungen	113	113
R ²	0.1850	0.1626
Korrigiertes R ²	-0.8629	-0.0085

Anmerkung: Die Zuordnung zur Treatment- und Kontrollgruppe fand über den gewichteten Score statt;
*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01; Standardfehler in Klammern.

Die Umstellung auf den gewichteten Versorgungsaufgaben-Score führt zu keiner Veränderung der Ergebnisse hinsichtlich der Wachstumsrate der Sprachqualität in Apps. Der DiD-Koeffizient bleibt in allen Modellspezifikationen positiv signifikant. Damit erweisen sich die Befunde als robust. Es lässt sich somit festhalten, dass die Sprachqualität in Apps in Ländern mit Versorgungsaufgaben signifikant stärker zunimmt als in Ländern ohne entsprechende Vorgaben.

Tabelle 4-8: Regressionsergebnisse Sprachqualität in Apps (gewichteter Score)

	Abhängige Variable:	
	Wachstumsrate: Sprachqualität in Apps	
	Betreiber FE (1)	Länder FE (2)
Post	-0.0008 (0.0035)	-0.0008 (0.0030)
Treatment × Post	0.0100** (0.0047)	0.0103** (0.0041)
Beobachtungen	124	124
R ²	0.1269	0.1053
Korrigiertes R ²	-0.8516	-0.0685

Anmerkung: Die Zuordnung zur Treatment- und Kontrollgruppe fand über den gewichteten Score statt;
*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01; Standardfehler in Klammern.

Um die Ergebnisse auf ihre Robustheit zu überprüfen, wurden die Treatment-Schwellenwerte (s. Abschnitt 3.3) auf das erste Quartil, den Median und das dritte Quartil der Score-Verteilung gesetzt. Grundsätzlich bleiben die Ergebnisse bestehen, dass das Games-Erlebnis und die Sprachqualität in Apps signifikant stärker in Ländern mit strengen Versorgungsaufgaben zunimmt als in Ländern ohne oder mit schwächeren Auflagen. Die

jeweiligen Schätzungen für den DiD-Koeffizienten und die entsprechenden Signifikanzniveaus können im Anhang der Tabelle 0-2 entnommen werden.

4.2 Data Envelopment Analysis

4.2.1 Übersicht über die zentralen Ergebnisse des DEA-Ansatzes

- Die **Effizienzgrenzen** werden vor allem von Unternehmen aus Ländern mit **geringer Bevölkerungsdichte** bzw. **niedrigem Bruttoinlandsprodukt pro Kopf** aufgespannt.
- **Deutsche TKU** nehmen eher einen Mittelfeldplatz ein oder sind **im hinteren Drittel** des Samples positioniert. Bis auf die Messgröße Games-Erlebnis konnten die deutschen TKU jedoch ihre **Positionierung über den Betrachtungszeitraum verbessern**.
- Hinsichtlich der **Uploadgeschwindigkeit** konnte ein **signifikant positiver Zusammenhang** zwischen der Strenge der Versorgungsauflagen und Verbesserung der Mobilfunkqualität für das gesamte Sample identifiziert werden.
- Im Rahmen von **Sensitivitätsbetrachtungen** weisen auch die Messgröße **Games-Erlebnis und Sprachqualität in Apps** einen signifikant positiven Zusammenhang auf.
- Hinsichtlich der **Downloadgeschwindigkeit** konnte **in keinem Fall** ein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden.
- Ein **signifikant negativer Effekt** von den bisher eher flächenbezogenen Versorgungsauflagen auf die Mobilfunkqualität ist **in keinem der betrachteten Fälle** aufgetreten.

4.2.2 Die Ergebnisse im Einzelnen

Analog zum DiD-Ansatz werden Analysen für die vier betrachteten Messgrößen der Mobilfunkqualität (Downloadgeschwindigkeit, Uploadgeschwindigkeit, Games-Erlebnis und Sprachqualität in Apps) separat durchgeführt. Da jeweils zwei Zeitpunkte betrachtet werden, werden insgesamt acht DEA-Rechnungen durchgeführt. Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 3.5.2 erfolgt die DEA outputorientiert unter der Annahme konstanter Skalenerträge. Als Outputvariable wird jeweils eine Messgröße der Mobilfunkqualität verwendet. Als Inputs fungieren die Bevölkerungsdichte sowie das Bruttoinlandsprodukt pro Kopf.

Um eine möglichst hohe Anzahl an Beobachtungen und konsistente Samples für die beiden Zeitpunkte pro Messgröße zu erhalten, müssen zum einen die beiden Zeitpunkte (vor den mit der Vergabe von Frequenznutzungsrechten verbundenen Versorgungsauflagen und danach) bestimmt werden und zum anderen einige Transformationen im Datensatz vorgenommen werden. Als Zeitpunkt zur Abbildung der Situation vor den mit der Vergabe von Frequenznutzungsrechten verbundenen Versorgungsauflagen wurde das Jahr 2020

gewählt. Zur Abbildung der Situation nach Einführung der Versorgungsauflagen wurde grundsätzlich das Jahr 2024 herangezogen. Eine Ausnahme musste für die Sprachqualität in Apps gemacht werden, hier wird das Jahr 2023 zur Abbildung der Wirkung der Versorgungsauflagen verwendet. Nach dem Jahr 2024 (bzw. 2023 bei der Sprachqualität in Apps) liegen zu wenige Daten für die Messgrößen vor, um eine aussagekräftige Rechnung durchführen zu können. Gleiches gilt für einen früheren Zeitpunkt vor dem Jahr 2020.

Da für die Variablen zur Abbildung der Mobilfunkqualität im Gegensatz zu den Inputgrößen in der Regel mehr als eine Beobachtung für das relevante Jahr pro Mobilfunknetzbetreiber für die jeweilige Messgröße vorliegt und die Erhebungszeitpunkte sich in den Ländern unterscheiden, wurde einheitlich für das Startjahr der frühestmöglich vorliegende Wert genommen, während für das Endjahr der spätestmöglich vorliegende Wert verwendet wurde. Ferner wurden für einzelne Länder, die vor dem Jahr 2021 keine Beobachtungen aufweisen, die Werte aus 2021 für 2020 verwendet. Ein analoges Vorgehen wurde in Einzelfällen für Länder vorgenommen, für die nach dem Jahr 2023 keine Beobachtungen vorliegen.

Tabelle 4-9 bis Tabelle 4-12 enthalten die Ergebnisse für die vier Messgrößen der Mobilfunkqualität. Anhand von Tabelle 4-9 für die Downloadgeschwindigkeit wird der Aufbau der Tabellen etwas näher erläutert. Im Tabellenkopf sind Angaben zur Anzahl der Beobachtungen und der einbezogenen Länder enthalten.

Bei der Downloadgeschwindigkeit werden 81 Mobilfunknetzbetreiber aus 24 Ländern berücksichtigt.

Anschließend werden die Unternehmen und das dazugehörige Land ausgewiesen, die im Start- (2020) und Endjahr (2024) jeweils die Effizienzgrenze aufspannen. Während im Jahr 2020 die Effizienzgrenze nur von zwei Unternehmen aufgespannt wird (Telus Kanada und HT Kroatien), sind dies im Jahr 2024 vier Netzbetreiber (SK Telecom Südkorea, A1 Österreich, Vodafone Australien und T-Mobile USA).

Nachfolgend sind die fünf TKU und das dazugehörige Land mit den größten positiven Veränderungen des Skalierungsfaktors d_i zwischen den beiden Zeitpunkten gelistet („Top 5 Veränderung Skalierungsfaktor“). Neben dem Land und dem TKU werden auch der Score für die Versorgungsauflage sowie die Differenz des Skalierungsfaktors aufgeführt.³² Die beiden Unternehmen ein und Three aus Irland haben sich am stärksten an die Frontier angenähert.

Analog werden die fünf Unternehmen gelistet, die den geringsten Wert für d_i aufweisen („Worst 5 Veränderung Skalierungsfaktor“). Hinsichtlich der Downloadgeschwindigkeit ist Ungarn mit zwei Unternehmen vertreten (DIGIMobil und Vodafone). Das negative

³² In den Tabellen ist aus Gründen der Übersichtlichkeit nur der durchschnittliche Wert für den Score der Versorgungsauflagen, $score_{avg}$, aufgeführt.

Vorzeichen zeigt, dass sich diese Unternehmen von der Effizienzgrenze über die Jahre entfernt haben.

Den Abschluss der Tabelle bilden Informationen über die drei deutschen Mobilfunknetzbetreiber, Telekom, Vodafone und Telefónica mit der Marke O2. Neben den Werten für den Skalierungsfaktor in den jeweiligen beiden Jahren und der sich daraus ergebenden Differenz sind auch die Ränge aufgeführt, die die deutschen Unternehmen innerhalb des Samples einnehmen. Während die Telekom noch im Mittelfeld liegt, sind Vodafone und O2 eher im hinteren Bereich des Samples verortet. Allerdings konnten diese beiden Unternehmen ihre Position durch eine Annäherung an die Frontier zwischen den Jahren 2020 und 2024 deutlich verbessern, während die Telekom nur eine leichte Verbesserung ihrer Position verzeichnen konnte.

Tabelle 4-9: DEA-Ergebnisse Downloadgeschwindigkeit

Anz. Betreiber	81					
Anz. Länder	24					
Peers						
	2020		2024			
<i>Land</i>	<i>Betreiber</i>	<i>Land</i>	<i>Betreiber</i>			
Canada	Telus	South Korea	SK tele-com			
Croatia	HT	Bulgaria	A1			
		Australia	Vodafone			
		USA	T-Mobile			
Top 5 Veränderung Skalierungsfaktor						
<i>Land</i>	<i>Betreiber</i>	<i>Versorgungs- auflage</i>	<i>Verände- rung (d_i)</i>			
Ireland	eir	0,48	4,41			
Ireland	3	0,48	4,07			
USA	T-Mobile	0,12	3,00			
Romania	Digi Mobil	0,54	1,87			
Denmark	Telia	0,42	1,72			
Worst 5 Veränderung Skalierungsfaktor						
<i>Land</i>	<i>Betreiber</i>	<i>Versorgungs- auflage</i>	<i>Verände- rung (d_i)</i>			
Belgium	Telenet	0,50	-1,75			
UK	O2	0,00	-1,52			
Hungary	DIGIMobil	0,00	-1,34			
Hungary	Vodafone	0,00	-1,34			
Belgium	Orange	0,50	-1,31			
Deutsche Betreiber						
	<i>Faktor 2020 (OF_i)</i>	<i>Rang 2020</i>	<i>Faktor 2024 (OF_i)</i>	<i>Rang 2024</i>	<i>Verände- rung (d_i)</i>	<i>Rang 2024</i>
Telekom	2,78	42	2,66	38	0,12	41
Vodafone	4,09	71	3,03	51	1,06	12
O2	4,55	74	4,15	71	0,40	29

Quelle: Eigene Berechnungen.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Uploadgeschwindigkeit (siehe Tabelle 4-10). Die Unternehmen, die die Effizienzgrenze aufspannen und den größten Aufholeffekt aufweisen, sind überwiegend aus Ländern mit einer geringen Bevölkerungsdichte oder einem niedrigen Bruttoinlandsprodukt pro Kopf, während die Unternehmen mit den geringsten Werten für d_i eher aus entwickelten Industriestaaten mit einer höheren Bevölkerungsdichte stammen.

Ferner stammen die Top 5 hinsichtlich der Veränderung des Skalierungsfaktors eher aus Ländern mit strenger Versorgungsauflagen, während sich die Worst 5 eher geringeren Auflagen gegenübersehen, was auf einen positiven Zusammenhang zwischen der Strenge der Versorgungsauflagen und der Mobilfunkqualität hindeutet.

Tabelle 4-10: DEA-Ergebnisse Uploadgeschwindigkeit

Anz. Betreiber	81					
Anz. Länder	24					
Peers						
		2020		2024		
<i>Land</i>	<i>Betreiber</i>	<i>Land</i>	<i>Betreiber</i>			
Canada	Telus	Canada	Rogers			
Croatia	HT	Finland	DNA			
		Australia	Vodafone			
		Bulgaria	A1			
Top 5 Veränderung Skalierungsfaktor						
<i>Land</i>	<i>Betreiber</i>	<i>Versor-gungsaufage</i>		<i>Verände-rung (d_i)</i>		
Hungary	DIGIMobil	0,00		1,91		
Romania	Digi Mobil	0,54		1,82		
Austria	Magenta	0,61		0,91		
Italy	Vodafone	0,78		0,72		
Ireland	eir	0,48		0,57		
Worst 5 Veränderung Skalierungsfaktor						
<i>Land</i>	<i>Betreiber</i>	<i>Versor-gungsaufage</i>		<i>Verände-rung (d_i)</i>		
UK	O2	0,00		-1,47		
Japan	NTT docomo	0,25		-1,30		
France	Orange	0,55		-0,93		
Poland	Plus	0,20		-0,92		
UK	3	0,00		-0,89		
Deutsche Betreiber						
	<i>Faktor 2020 (OF_i)</i>	<i>Rang 2020</i>	<i>Faktor 2024 (OF_i)</i>	<i>Rang 2024</i>	<i>Verände-rung (d_i)</i>	<i>Rang 2024</i>
Telekom	2,07	45	2,35	46	-0,27	45
Vodafone	3,44	74	2,95	64	0,49	6
O2	3,16	71	2,92	63	0,24	15

Quelle: Eigene Berechnungen.

Wie aus Tabelle 4-11 hervorgeht, ist dieser Zusammenhang zwischen Strenge der Versorgungsauflagen und Verbesserung der Mobilfunkqualität bei einem Vergleich der Top 5 und Worst 5 beim Games-Erlebnis weniger ausgeprägt. Ferner sind die deutschen TKU deutlich besser positioniert. Im Gegensatz zu den beiden bisher betrachteten Messgrößen, Download- und Uploadgeschwindigkeit, hat sich die Position der deutschen Unternehmen allerdings innerhalb des Samples über die Zeit insgesamt leicht verschlechtert.

Tabelle 4-11: DEA-Ergebnisse Games-Erlebnis

Anz. Betreiber	81					
Anz. Länder	24					
Peers						
	2020		2024			
<i>Land</i>	<i>Betreiber</i>	<i>Land</i>	<i>Betreiber</i>			
Australia	Telstra	Australia	Optus			
Bulgaria	Vivacom	Canada	Telus			
		Bulgaria	A1			
		Finland	DNA			
Top 5 Veränderung Skalierungsfaktor						
<i>Land</i>	<i>Betreiber</i>	<i>Versorgungs- auflage</i>	<i>Verände- rung (d_i)</i>			
Ireland	3	0,48	0,45			
Ireland	eir	0,48	0,34			
Hungary	Vodafone	0,00	0,33			
Hungary	DIGIMobil	0,00	0,31			
UK	3	0,00	0,30			
Worst 5 Veränderung Skalierungsfaktor						
<i>Land</i>	<i>Betreiber</i>	<i>Versorgungs- auflage</i>	<i>Verände- rung (d_i)</i>			
USA	AT&T	0,12	-0,16			
France	Orange	0,55	-0,15			
Croatia	A1	0,00	-0,15			
Croatia	HT	0,00	-0,14			
Austria	3	0,61	-0,13			
Deutsche Betreiber						
	<i>Faktor 2020 (OF_i)</i>	<i>Rang 2020</i>	<i>Faktor 2024 (OF_i)</i>	<i>Rang 2024</i>	<i>Verände- rung (d_i)</i>	<i>Rang 2024</i>
Telekom	1,94	20	1,82	27	0,11	29
Vodafone	1,95	19	1,84	25	0,11	31
O2	2,04	13	1,97	12	0,08	41

Quelle: Eigene Berechnungen.

Hinsichtlich der Sprachqualität in Apps verfestigt sich das Bild, dass vor allem Unternehmen aus Ländern mit geringen Bevölkerungsdichten bzw. einem niedrigen Bruttoinlandsprodukt pro Kopf in beiden Perioden die Frontier aufspannen. Wie bei der Uploadgeschwindigkeit sind auch in diesem Fall die fünf Unternehmen mit der größten positiven Veränderung der Mobilfunkqualität eher in Ländern mit strengen Versorgungsauflagen beheimatet, während das untere Ende von Netzbetreibern gebildet wird, die aus Ländern mit eher weniger strenger Auflagen stammen. Dies deutet wiederum darauf hin, dass sich strengere Versorgungsauflagen positiv auf die Entwicklung der Mobilfunkqualität auswirken. Auffallend ist zudem, dass bei der Sprachqualität in Apps diesmal alle drei deutschen TKU in den Top 5 hinsichtlich der Veränderung des Skalierungsfaktors zu finden sind. Trotz dieser deutlichen Qualitätsverbesserung konnten sie ihre Positionierung innerhalb des Samples jedoch nur leicht verbessern und befinden sich weiterhin im letzten Viertel.

Tabelle 4-12: DEA-Ergebnisse Sprachqualität in Apps

Anz. Betreiber	95					
Anz. Länder	27					
Peers						
2020		2023				
<i>Land</i>	<i>Betreiber</i>	<i>Land</i>	<i>Betreiber</i>			
Australia	Telstra	Canada	Telus			
Bulgaria	Vivacom	Australia	Optus			
Canada	Telus	Bulgaria	A1			
Top 5 Veränderung Skalierungsfaktor						
<i>Land</i>	<i>Betreiber</i>	<i>Versorgungs- auflage</i>	<i>Verände- rung (d_i)</i>			
Germany	O2	0,62	0,34			
Germany	Vodafone	0,62	0,32			
Switzerland	Sunrise	0,17	0,31			
Germany	Telekom	0,62	0,30			
Switzerland	Salt	0,17	0,25			
Worst 5 Veränderung Skalierungsfaktor						
<i>Land</i>	<i>Betreiber</i>	<i>Versorgungs- auflage</i>	<i>Verände- rung (d_i)</i>			
Norway	Telia	0,00	-0,18			
Norway	Telenor	0,00	-0,18			
Norway	ice	0,00	-0,16			
Croatia	A1	0,00	-0,10			
Ireland	Vodafone	0,48	-0,09			
Deutsche Betreiber						
	<i>Faktor 2020 (OF_i)</i>	<i>Rang 2020</i>	<i>Faktor 2023 (OF_i)</i>	<i>Rang 2023</i>	<i>Verände- rung (d_i)</i>	<i>Rang 2023</i>
Telekom	2,28	84	1,98	82	0,30	4
Vodafone	2,27	82	1,95	76	0,32	2
O2	2,31	85	1,97	81	0,34	1

Quelle: Eigene Berechnungen.

Die bisher vorgestellten Ergebnisse lassen bei einzelnen Messgrößen einen positiven Einfluss von Versorgungsauflagen vermuten. Um jedoch einen systematischen Zusammenhang identifizieren zu können, ist – wie in Abschnitt 3.5.2 ausgeführt – eine Second-Stage-Analyse erforderlich, indem die Korrelationen zwischen der Veränderung der Skalierungsfaktoren, d_i , und den Scores der Versorgungsauflagen, $score_{avg}$ und $score_{weight}$, für die vier Messgrößen betrachtet werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-13 dargestellt.

Tabelle 4-13: Einfluss von Versorgungsauflagen auf die Mobilfunkqualität (Korrelationen d_i und $score_*$)

Downloadgeschwindigkeit				
	Gesamte Stichprobe	ohne folgende Länder		
		AUS+CAN	BUL+GRE	BUL+GRE+AUS+CAN
score _{avg}	0.048	0.069	0.189	0.189
score _{weight}	0.028	0.007	0.148	0.098
Uploadgeschwindigkeit				
	Gesamte Stichprobe	ohne folgende Länder		
		AUS+CAN	BUL+GRE	BUL+GRE+AUS+CAN
score _{avg}	0.102	0.184	0.168	0.256**
score _{weight}	0.224**	0.111	0.301***	0.130
Games-Erlebnis				
	Gesamte Stichprobe	ohne folgende Länder		
		AUS+CAN	BUL+GRE	BUL+GRE+AUS+CAN
score _{avg}	-0.075	-0.068	0.106	0.098
score _{weight}	0.013	-0.092	0.200*	0.058
Sprachqualität in Apps				
	Gesamte Stichprobe	ohne folgende Länder		
		AUS+CAN	BUL+GRE	BUL+GRE+AUS+CAN
score _{avg}	0.156	0.059	0.312***	0.200*
score _{weight}	0.082	-0.043	0.297***	0.114

Anmerkung: *** p < 0,01, ** p < 0,05, * p < 0,1

Quelle: Eigene Berechnungen.

Für das gesamte Sample kann nur im Fall der Uploadgeschwindigkeit für den gewichteten Score der Versorgungsauflagen ein signifikanter positiver Zusammenhang identifiziert werden.³³

Wie in Abschnitt 3.5.2 ebenfalls erläutert, ist die DEA relativ anfällig gegenüber Ausreißern. Aus den bisher vorgestellten Ergebnistableaus geht hervor, dass die

³³ Signifikante Korrelationen zwischen Strenge der Versorgungsauflage und Änderung der Mobilfunkqualität sind in Tabelle 4-13 in den blau markierten Zellen zu finden, wobei zusätzlich auch das Signifikanzniveau ausgewiesen ist.

Effizienzgrenzen oft von Unternehmen aus Ländern mit geringen Bevölkerungsdichten bzw. niedrigen Bruttoinlandsprodukten pro Kopf aufgespannt werden. Um der Ausreißerproblematik zu begegnen, wurden im Rahmen von Sensitivitätsrechnungen daher jeweils die beiden Länder mit der geringsten Bevölkerungsdichte (Australien und Kanada) sowie die beiden Länder mit dem geringsten Bruttoinlandsprodukt pro Kopf (Bulgarien und Griechenland) aus dem Datensatz ausgeschlossen. Im dritten Fall werden beide Gruppen ausgeschlossen. Insbesondere der Ausschluss von Unternehmen aus Ländern mit einem geringen Bruttoinlandsprodukt pro Kopf führt zu zusätzlichen Signifikanzen beim Games-Erlebnis und der Anrufqualität. Der Zusammenhang bei der Downloadgeschwindigkeit bleibt insignifikant.

Insgesamt gesehen kann somit auch bei der DEA ein leicht positiver Zusammenhang zwischen Strenge der Versorgungsauflagen und Verbesserung der Mobilfunkqualität identifiziert werden. Da die Auflagen jedoch eher flächenbezogen sind, geht es um Spillover- bzw. Crowding-out-Effekte auf die eher kapazitätsbezogene Mobilfunkqualität. Da in keinem Fall signifikante negative Korrelationen auftreten, kann zumindest ein schädlicher Einfluss der bisher flächenbezogenen Versorgungsauflagen auf die Mobilfunkqualität ausgeschlossen werden. Die erforderlichen Investitionen zur Erfüllung der Vorgaben bzgl. der Flächenabdeckung gehen bisher nicht zulasten der bestehenden Mobilfunkqualität.

5 Fazit

Im Rahmen dieser Studie wurde der Einfluss von Versorgungsauflagen auf die Mobilfunkqualität auf Basis eines Panels mit insgesamt 112 Mobilfunknetzbetreibern aus 32 OECD-Ländern für den Zeitraum der Jahre 2019 bis 2025 untersucht. Die Analysen nutzen neben der Differenz-in-Differenzen-Methode (DiD) als parametrischen Ansatz auch die nicht-parametrische Data Envelopment Analysis (DEA). Die Differenz-in-Differenzen-Methode ermöglicht es, für die meisten länder- und netzbetreiberspezifischen Unterschiede zu kontrollieren, sodass Effekte der Strenge der Versorgungsauflage auf die Mobilfunkqualität isoliert werden können. Außerdem können große Unterschiede in der absolut gemessenen Mobilfunkqualität zwischen den Ländern und Netzbetreibern durch die Verwendung von Wachstumsraten negiert werden, so dass diese Länder miteinander vergleichbar werden. Bei der DEA kann dieser Effekt in Form einer Second-Stage-Analyse über die Korrelation zwischen der Veränderung der Effizienzwerte über die Zeit und der Strenge der Versorgungsauflagen identifiziert werden.

Die quantitativen Analysen mittels DiD und DEA zeigen, dass ein leicht positiver und statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen strengeren Versorgungsauflagen und der Qualität der Mobilfunkversorgung besteht. Dies gilt insbesondere für die Messgrößen Uploadgeschwindigkeit, Games-Erlebnis und Sprachqualität in Apps. Für die Messgröße Downloadgeschwindigkeit konnte kein statistisch signifikanter Zusammenhang gefunden werden. Neben der durch die zwei unterschiedlichen Methoden gewährleisteten Robustheit der Ergebnisse werden die Ergebnisse auch durch weitere Robustheitstests (z. B. durch unterschiedliche Bewertungen der Strenge der Versorgungsauflage und die damit verbundene Einteilung in Treatment- und Kontrollgruppen beim DiD-Ansatz) bestätigt.

Da die in dieser Studie betrachteten Versorgungsauflagen vor allem auf eine Flächenabdeckung bzw. eine Abdeckung einer bestimmten Bevölkerungszahl abzielen, die Daten zur Mobilfunkqualität jedoch nutzergeneriert werden und eher kapazitätsbezogen sind, besteht eine gewisse Diskrepanz zwischen den Messgrößen zur Mobilfunkqualität als abhängige Variable und den Versorgungsauflagen als Erklärungsvariable.

Im Gegensatz können jedoch Spillover- bzw. Crowding-out-Effekte der Versorgungsauflagen analysiert werden. Spillover-Effekte würden bei einer bevölkerungsbezogenen Versorgungsauflage für eine bessere Mobilfunkqualität bzw. höhere systemische Kapazität im Vergleich zu Ländern ohne Auflagen führen. Ein Mechanismus hierfür wäre, dass generell mehr in den Mobilfunkausbau investiert wird und somit auch die Kapazität im Netz steigt. Crowding-out-Effekte würden hingegen bei einer bevölkerungsbezogenen Versorgungsauflage für eine schlechtere Mobilfunkqualität bzw. niedrige systemische Kapazität im Vergleich zu Ländern ohne Auflagen führen. Der Mechanismus hierbei ist, dass Versorgungsauflagen Investitionen in die Fläche leiten und Investitionsmittel für den Kapazitätsaufbau in Ballungsgebieten fehlen.

Die Ergebnisse der quantitativen Analysen bilden daher eine Evidenz für einen positiven Spillover-Effekt der Versorgungsauflagen auf die systemische Mobilfunkqualität. Es hat zwar keine höhere Netzverdichtung durch steigende Kapazitäten im Sinne von Downloadgeschwindigkeiten stattgefunden. Allerdings sind die Messgrößen für Uploadgeschwindigkeit, Games-Erlebnis und die Sprachqualität in Apps signifikant verbessert worden im Vergleich zu Ländern ohne Versorgungsauflagen. Weiterhin konnten keine negativen Wirkungen von Versorgungsauflagen auf die Mobilfunkqualität identifiziert werden. Es deutet somit nichts auf ein eventuelles Crowding-out durch Versorgungsauflagen in der Form hin, dass diese zu Minderinvestitionen führen, was wiederum eine schlechtere Mobilfunkqualität zur Folge hätte.

Dennoch verbleiben Limitationen bedingt durch die Datengrundlage. Es liegt in der Natur der Sache, dass Ländervergleiche in ihrem Stichprobenumfang begrenzt sind. Ferner ergeben sich Einschränkungen im Beobachtungszeitraum, bedingt durch das Fehlen frühzeitiger, systematisch gleicher Erhebungen zur Mobilfunkqualität über alle Länder hinweg.

Anhang

Tabelle 0-1: Übersicht der Vergaben von Frequenznutzungsrechten und Versorgungsaufgaben

Land	Jahr der Vergabe von Frequenznutzungsrechten	Art der Versorgungsaufgaben	Quellen
Australien	2021	Keine Auflagen	ACMA
Belgien	2022	Bevölkerungsabdeckung, bestimmte Verkehrswägen	BIPT, CMS
Bulgarien	2021	Keine Auflagen	5GObservatory
Dänemark	2021	Bevölkerungsabdeckung, Basisstationen	5GObservatory
Deutschland	2019	Bevölkerungsabdeckung, Qualität, Verkehrswägen, Basisstationen	Bundesnetzagentur
Estland	2022	Abdeckung von Landkreisen	TTJA
Frankreich	2020	Qualität, Verkehrswägen, Basisstationen	ARCEP
Finnland	2020	Keine Auflagen	5GObservatory
Griechenland	2020	Flächenabdeckung, Bevölkerungsabdeckung, Qualität, Basisstationen, Verkehrswägen	EETT
Irland	2022	Flächenabdeckung, Bevölkerungsabdeckung, Qualität, Basisstationen, Verkehrswägen	ComReg
Italien	2018	Bevölkerungsabdeckung, ländliche Regionen, Verkehrswägen	5GObservatory
Japan	2019	Bevölkerungsabdeckung	5GObservatory
Kanada	2020	Bevölkerungsabdeckung, ländliche Regionen	ISED, Analysys Mason
Kroatien	2023	Keine Auflagen	5GObservatory
Lettland	2021	Keine Auflagen	5GObservatory
Litauen	2022	Flächenabdeckung, Qualität, Verkehrswägen, bestimmte Standorte	RRT, RRT
Niederlande	2020	Bevölkerungsabdeckung, Qualität	Overheid.nl
Norwegen	2019	Bevölkerungsabdeckung, Verkehrswägen	5GObservatory
Österreich	2020	Bevölkerungsabdeckung, Qualität, Verkehrswägen, ländliche Regionen	RTR
Polen	2023	Basisstationen	5GObservatory
Portugal	2021	Bevölkerungsabdeckung, Verkehrswägen, ländliche Regionen, Basisstationen	ANACOM
Rumänien	2022	Bevölkerungsabdeckung, Verkehrswägen, Basisstationen	ANCOM
Schweden	2023	Qualität, ausgewählte Verkehrswägen	Telia, 5GObservatory

Schweiz	2019	Bevölkerungsabdeckung	BAKOM
Slowakei	2020	Bevölkerungsabdeckung, ländliche Regionen	5GObservatory
Slowenien	2021	Verkehrswege, bestimmte Standorte	5GObservatory
Spanien		Verkehrswege, bestimmte Standorte	5GObservatory
Südkorea	2018	Basisstationen	MSIT, KAS
Tschechische Republik	2020	Flächenabdeckung, Bevölkerungsabdeckung, Verkehrswege, ländliche Regionen	5GObservatory
Ungarn	2020	Keine Auflagen	5GObservatory
USA	2019-2022	Bevölkerungsabdeckung	FCC, CMS
Vereinigtes Königreich	2021	Keine Abdeckung	5GObservatory

Tabelle 0-2: Robustheitstest über alle Modelle und Treatment-Schwellenwerte

Treatment	Abhängige Variable	Modell	Koeffizient	Std. Error	P-Wert	Beobachtungen	Signifikanz
Treatment: Durchschnittsscore 0.2	Downloadgeschwindigkeit	betreiberfixe Effekte	-0,0073	0,0288	0,8008	149	
Treatment: Durchschnittsscore 1. Quartil	Downloadgeschwindigkeit	betreiberfixe Effekte	0,0013	0,0304	0,9662	149	
Treatment: Durchschnittsscore 2. Quartil	Downloadgeschwindigkeit	betreiberfixe Effekte	-0,0263	0,0268	0,3306	149	
Treatment: Durchschnittsscore 3. Quartil	Downloadgeschwindigkeit	betreiberfixe Effekte	0,0055	0,0327	0,8673	149	
Treatment: Gewichteter Score 0.2	Downloadgeschwindigkeit	betreiberfixe Effekte	0,0063	0,0267	0,8158	149	
Treatment: Gewichteter Score 1. Quartil	Downloadgeschwindigkeit	betreiberfixe Effekte	0,0013	0,0304	0,9662	149	
Treatment: Gewichteter Score 2. Quartil	Downloadgeschwindigkeit	betreiberfixe Effekte	0,0063	0,0267	0,8158	149	
Treatment: Gewichteter Score 3. Quartil	Downloadgeschwindigkeit	betreiberfixe Effekte	0,0127	0,0304	0,6761	149	
Treatment: Durchschnittsscore 0.2	Downloadgeschwindigkeit	länderfixe Effekte	-0,0078	0,0282	0,7834	149	
Treatment: Durchschnittsscore 1. Quartil	Downloadgeschwindigkeit	länderfixe Effekte	0,0008	0,0298	0,9778	149	
Treatment: Durchschnittsscore 2. Quartil	Downloadgeschwindigkeit	länderfixe Effekte	-0,0252	0,0263	0,3397	149	
Treatment: Durchschnittsscore 3. Quartil	Downloadgeschwindigkeit	länderfixe Effekte	0,0059	0,0320	0,8539	149	
Treatment: Gewichteter Score 0.2	Downloadgeschwindigkeit	länderfixe Effekte	0,0056	0,0261	0,8300	149	
Treatment: Gewichteter Score 1. Quartil	Downloadgeschwindigkeit	länderfixe Effekte	0,0008	0,0298	0,9778	149	
Treatment: Gewichteter Score 2. Quartil	Downloadgeschwindigkeit	länderfixe Effekte	0,0056	0,0261	0,8300	149	
Treatment: Gewichteter Score 3. Quartil	Downloadgeschwindigkeit	länderfixe Effekte	0,0132	0,0297	0,6586	149	
Treatment: Durchschnittsscore 0.2	Games-Erlebnis	betreiberfixe Effekte	0,0329	0,0149	0,0322	143	**
Treatment: Durchschnittsscore 1. Quartil	Games-Erlebnis	betreiberfixe Effekte	0,0376	0,0154	0,0181	143	**
Treatment: Durchschnittsscore 2. Quartil	Games-Erlebnis	betreiberfixe Effekte	0,0329	0,0149	0,0322	143	**
Treatment: Durchschnittsscore 3. Quartil	Games-Erlebnis	betreiberfixe Effekte	0,0818	0,0150	0,0000	143	***
Treatment: Gewichteter Score 0.2	Games-Erlebnis	betreiberfixe Effekte	0,0236	0,0148	0,1156	143	
Treatment: Gewichteter Score 1. Quartil	Games-Erlebnis	betreiberfixe Effekte	0,0376	0,0154	0,0181	143	**
Treatment: Gewichteter Score 2. Quartil	Games-Erlebnis	betreiberfixe Effekte	0,0236	0,0148	0,1156	143	
Treatment: Gewichteter Score 3. Quartil	Games-Erlebnis	betreiberfixe Effekte	0,0578	0,0152	0,0004	143	***
Treatment: Durchschnittsscore 0.2	Games-Erlebnis	länderfixe Effekte	0,0329	0,0117	0,0062	143	***

Treatment: Durchschnittsscore 1. Quartil	Games-Erlebnis	länderfixe Effekte	0,0376	0,0121	0,0025	143	***
Treatment: Durchschnittsscore 2. Quartil	Games-Erlebnis	länderfixe Effekte	0,0329	0,0117	0,0062	143	***
Treatment: Durchschnittsscore 3. Quartil	Games-Erlebnis	länderfixe Effekte	0,0818	0,0122	0,0000	143	***
Treatment: Gewichteter Score 0.2	Games-Erlebnis	länderfixe Effekte	0,0236	0,0116	0,0441	143	**
Treatment: Gewichteter Score 1. Quartil	Games-Erlebnis	länderfixe Effekte	0,0376	0,0121	0,0025	143	***
Treatment: Gewichteter Score 2. Quartil	Games-Erlebnis	länderfixe Effekte	0,0236	0,0116	0,0441	143	**
Treatment: Gewichteter Score 3. Quartil	Games-Erlebnis	länderfixe Effekte	0,0578	0,0122	0,0000	143	***
Treatment: Durchschnittsscore 0.2	Uploadgeschwindigkeit	betreiberfixe Effekte	0,0018	0,0200	0,9303	146	
Treatment: Durchschnittsscore 1. Quartil	Uploadgeschwindigkeit	betreiberfixe Effekte	-0,0001	0,0211	0,9979	146	
Treatment: Durchschnittsscore 2. Quartil	Uploadgeschwindigkeit	betreiberfixe Effekte	-0,0246	0,0185	0,1876	146	
Treatment: Durchschnittsscore 3. Quartil	Uploadgeschwindigkeit	betreiberfixe Effekte	0,0133	0,0226	0,5570	146	
Treatment: Gewichteter Score 0.2	Uploadgeschwindigkeit	betreiberfixe Effekte	0,0286	0,0182	0,1202	146	
Treatment: Gewichteter Score 1. Quartil	Uploadgeschwindigkeit	betreiberfixe Effekte	-0,0001	0,0211	0,9979	146	
Treatment: Gewichteter Score 2. Quartil	Uploadgeschwindigkeit	betreiberfixe Effekte	0,0286	0,0182	0,1202	146	
Treatment: Gewichteter Score 3. Quartil	Uploadgeschwindigkeit	betreiberfixe Effekte	0,0163	0,0210	0,4409	146	
Treatment: Durchschnittsscore 0.2	Uploadgeschwindigkeit	länderfixe Effekte	-0,0002	0,0193	0,9923	146	
Treatment: Durchschnittsscore 1. Quartil	Uploadgeschwindigkeit	länderfixe Effekte	-0,0019	0,0203	0,9270	146	
Treatment: Durchschnittsscore 2. Quartil	Uploadgeschwindigkeit	länderfixe Effekte	-0,0210	0,0179	0,2438	146	
Treatment: Durchschnittsscore 3. Quartil	Uploadgeschwindigkeit	länderfixe Effekte	0,0150	0,0218	0,4929	146	
Treatment: Gewichteter Score 0.2	Uploadgeschwindigkeit	länderfixe Effekte	0,0261	0,0177	0,1426	146	
Treatment: Gewichteter Score 1. Quartil	Uploadgeschwindigkeit	länderfixe Effekte	-0,0019	0,0203	0,9270	146	
Treatment: Gewichteter Score 2. Quartil	Uploadgeschwindigkeit	länderfixe Effekte	0,0261	0,0177	0,1426	146	
Treatment: Gewichteter Score 3. Quartil	Uploadgeschwindigkeit	länderfixe Effekte	0,0180	0,0203	0,3754	146	
Treatment: Durchschnittsscore 0.2	Anrufqualität	betreiberfixe Effekte	0,0107	0,0051	0,0387	144	**
Treatment: Durchschnittsscore 1. Quartil	Anrufqualität	betreiberfixe Effekte	0,0099	0,0054	0,0709	144	*
Treatment: Durchschnittsscore 2. Quartil	Anrufqualität	betreiberfixe Effekte	0,0029	0,0051	0,5636	144	
Treatment: Durchschnittsscore 3. Quartil	Anrufqualität	betreiberfixe Effekte	0,0167	0,0055	0,0037	144	***
Treatment: Gewichteter Score 0.2	Anrufqualität	betreiberfixe Effekte	0,0100	0,0047	0,0388	144	**

Treatment: Gewichteter Score 1. Quartil	Anrufqualität	betreiberfixe Effekte	0,0099	0,0054	0,0709	144	*
Treatment: Gewichteter Score 2. Quartil	Anrufqualität	betreiberfixe Effekte	0,0100	0,0047	0,0388	144	**
Treatment: Gewichteter Score 3. Quartil	Anrufqualität	betreiberfixe Effekte	0,0095	0,0054	0,0835	144	*
Treatment: Durchschnittsscore 0.2	Anrufqualität	länderfixe Effekte	0,0109	0,0044	0,0137	144	**
Treatment: Durchschnittsscore 1. Quartil	Anrufqualität	länderfixe Effekte	0,0101	0,0046	0,0311	144	**
Treatment: Durchschnittsscore 2. Quartil	Anrufqualität	länderfixe Effekte	0,0025	0,0043	0,5701	144	
Treatment: Durchschnittsscore 3. Quartil	Anrufqualität	länderfixe Effekte	0,0165	0,0048	0,0009	144	***
Treatment: Gewichteter Score 0.2	Anrufqualität	länderfixe Effekte	0,0103	0,0041	0,0132	144	**
Treatment: Gewichteter Score 1. Quartil	Anrufqualität	länderfixe Effekte	0,0101	0,0046	0,0311	144	**
Treatment: Gewichteter Score 2. Quartil	Anrufqualität	länderfixe Effekte	0,0103	0,0041	0,0132	144	**
Treatment: Gewichteter Score 3. Quartil	Anrufqualität	länderfixe Effekte	0,0092	0,0046	0,0489	144	**

Literaturverzeichnis

- Angrist, J. D. und J.-S. Pischke (2008): *Mostly Harmless Econometrics: An Empiricist's Companion*. Princeton University Press.
- Bahia, K. und P. Castells (2022): The impact of spectrum assignment policies on consumer welfare. *Telecommunications Policy*, Vol 46, No. 5, <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2022.102344>.
- Bielov, C., H. Mitomo und H. Hämmänen (2022): Efficiency frontier of OECD MNOs: Multinational vs Domestic, *Telecommunications Policy*, Vol 46, No. 5, <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2022.102344>.
- Bogetoft, P. und L. Otto (2011): Benchmarking with DEA, SFA, and R, *International Series in Operations Research and Management Science*, Volume 157, Springer, New York.
- Bohlin, E., G. Madden und A. Morey (2010): *An Econometric Analysis of 3G Auction Spectrum Valuations*. European University Institute.
- Charnes, A., W.W. Cooper und E. Rhodes (1978): Measuring efficiency of decision making units, *European Journal of Operational Research* 2, S. 429–444.
- Coelli, T. J., D. S. Prasada Rao, C. J. O'Donnell und G. E. Battese (2005): *An introduction to efficiency and productivity analysis*. New York: Springer, 2005.
- DIW Econ (2017): Methodische Ansätze zur kausalen Analyse der Auswirkungen regulatorischer Maßnahmen. Abgerufen am 12. 05 2025 von https://diw-econ.de/wp-content/uploads/DIW-Econ_DICE-Consult_BMWi_TK2_Endbericht_v1.0.pdf
- Grzybowski, L. und F. Verboven (2016): Substitution between fixed-line and mobile access: the role of Complementarities, *Journal of Regulatory Economics*, Vol 49(2), 113-151, DOI: 10.1007/s11149-015-9290-2.
- GSMA (2020): Mobile market structure and performance in Europe Lessons from the 4G era, Februar 2020, abrufbar unter: [GSMA-Mobile-Market-Structure-and-Performance-in-Europe_February20.pdf](https://www.gsma.com/mobile-market-structure-and-performance-in-europe/_/media/gsma/mobile-market-structure-and-performance-in-europe_february20.pdf), zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Gugler, K., M. Klien und S. Schmitt (2012): Wirtschaftswissenschaftliches Gutachten zu Benchmarkingmethoden für die österreichischen Energienetze. Gutachten für die E-Control Austria, 2012.
- Lien, D. und Y. Peng (2001): Competition and production efficiency: *Telecommunications in OECD countries, Information Economics and Policy*, Vol 13, No. 1, 51-76, [https://doi.org/10.1016/S0167-6245\(00\)00030-5](https://doi.org/10.1016/S0167-6245(00)00030-5).
- OECD (2008): *Handbook on Construction Composite Indicators*. Abgerufen am 2025. 05 06 von https://www.oecd.org/en/publications/handbook-on-constructing-composite-indicators-methodology-and-user-guide_9789264043466-en.html.
- Opensignal (2024): Von <https://www.opensignal.com/reports/2024/11/germany/mobile-network-experience> abgerufen.
- Sörries, B., M. Franken, D. Baischew und S. Lucidi (2020): Einfluss von Versorgungsauflagen auf die Mobilfunkabdeckung in der EU, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 470, Bad Honnef.

Sörries, B., M. Franken, S. Lucidi, D. Baischew und M. Wissner (2021). Internationale Vorbilder für eine gute Mobilfunkversorgung - Identifizierung von Erfolgsfaktoren. Abgerufen am 12.05.2025 von https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/mobilfunk-studie-internationale-vorbilder-fuer-eine-gute-mobilfunkversorgung-identifizierung-von-erfolgsfaktoren.pdf?__blob=publicationFile.

Stronzik, M., A. Cullmann, J. Rechlitz und M. Wissner (2023): Genereller Produktivitätsfortschritt österreichischer Strom-Verteilernetzbetreiber (5. Regulierungsperiode), Endbericht, Studie im Auftrag von E-Control, 11. Juli 2023, Bad Honnef.

Stronzik, M. und G. Zuloaga (2020): Empirische Untersuchung der FTTB/H-Ausbauaktivität im europäischen Vergleich, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 465, Bad Honnef.

Sumicsid (2010), Benchmarking of German Gas Transmission System Operators, 2010.

Swiss Economics und Sumicsid (2014): Effizienzvergleich für Verteilernetzbetreiber Strom 2013, Ergebnisdokumentation und Schlussbericht, Februar 2014.

Usero, B. und G. Asimakopoulos (2013): Benchmarking Mobile Operators Using DEA: An Application to the European Mobile Markets, in: Lee, I. (Hrsg): Mobile Services Industries, Technologies, and Applications in the Global Economy, S. 87–103, DOI: 10.4018/978-1-4666-1981-4.ch006.

ISSN 1865-8997