

[EWI-KURZSTUDIE]

Messung und Regulierung von Spannungsqualität - Status Quo in Deutschland und Erfahrungen anderer europäischer Länder

Kurzstudie

Gefördert vom: Projektträger Jülich (PtJ) & BMWK

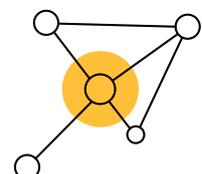
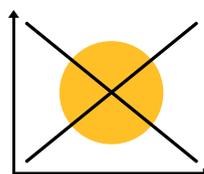
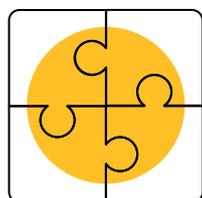
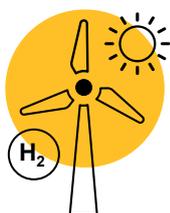
Förderkennzeichen: 03EI4048AV - 03EI4048A

Juni 2025

Gefördert vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



Beteiligte Institution

Energiewirtschaftliches Institut
an der Universität zu Köln gGmbH (EWI)



Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen
und Geotechnologien IEG



Autoren

Energiewirtschaftliches Institut
an der Universität zu Köln gGmbH (EWI)

Philipp Artur Kienscherf
Dr. Lisa Just
Merit Dressler
Antonie Reinecke
Amelie Sitzmann
Stephan Terhorst
Amelie Wöstmann

Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen
und Geotechnologien IEG

Stella Oberle
Housam Al Rakouki

Mit freundlicher Unterstützung vom
IAEW der RWTH Aachen University

Franziska Tischbein

Kontakt

Philipp Artur Kienscherf
Energiewirtschaftliches Institut
an der Universität zu Köln gGmbH (EWI)

Alte Wagenfabrik
Vogelsanger Straße 321a

Bitte zitieren als

EWI und Fraunhofer IEG (2025). Messung und Regulierung von Spannungsqualität -
Status-quo in Deutschland und Erfahrung anderer europäischer Länder. Kurzstudie

50827 Köln Tel.: +49 (0)221 650 853-60

<https://www.ewi.uni-koeln.de>

Das Energiewirtschaftliche Institut an der Universität zu Köln (EWI) ist eine gemeinnützige GmbH, die sich der anwendungsnahen Forschung in der Energieökonomik und Energie-Wirtschaftsinformatik widmet und Beratungsprojekte für Wirtschaft, Politik und Gesellschaft durchführt. Annette Becker und Prof. Dr. Marc Oliver Bettzüge bilden die Institutsleitung und führen ein Team von etwa 40 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Das EWI ist eine Forschungseinrichtung der Kölner Universitätsstiftung. Neben den Einnahmen aus Forschungsprojekten, Analysen und Gutachten für öffentliche und private Auftraggeber wird der wissenschaftliche Betrieb finanziert durch eine institutionelle Förderung des Ministeriums für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWIKE). Die Haftung für Folgeschäden, insbesondere für entgangenen Gewinn oder den Ersatz von Schäden Dritter, ist ausgeschlossen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen der Versorgungsqualität	3
2.1	Definition der Versorgungsqualität	3
2.2	Qualitätsregulierung in Deutschland	5
3	Status-quo der Spannungsqualität in Deutschland.....	8
4	Status-quo der Spannungsqualität im europäischen Ausland	11
4.1	Messung der Spannungsqualität	11
4.2	Regulierung der Spannungsqualität	13
5	Mögliche Weiterentwicklung der Qualitätsregulierung in Deutschland.....	16
5.1	Handlungsoptionen zur Integration von Spannungsqualität	16
5.2	Herausforderungen bei der Berücksichtigung von Spannungsqualität	18
6	Zusammenfassung	20
	Literaturverzeichnis	21
	Abkürzungsverzeichnis	24
	Abbildungsverzeichnis.....	25
	Tabellenverzeichnis	26

1 Einleitung

Die Dekarbonisierung des Energiesektors in Deutschland führt zu weitreichenden Veränderungen in der Stromversorgung. Der fortschreitende Ausbau der erneuerbaren Energien (EE)¹ stellt neue Herausforderungen an die Stabilität und Qualität der Stromversorgung. Dies betrifft neben der Höchstspannungs- und Hochspannungsebene zunehmend auch die Mittel- und Niederspannungsnetze. Ein Aspekt ist hierbei die Spannungsqualität, die für die Endverbrauchssektoren, insbesondere die Industrie, von großer Bedeutung ist. Durch den vermehrten Einsatz von EE in Kombination mit dem Kohleausstieg, und dem damit verbundenen Wegfall an Blindleistung im Netz, sind in den kommenden Jahren eine Zunahme an Spannungsqualitätsproblemen, wie Spannungsschwankungen², Flicker³ und Oberschwingungen⁴, zu erwarten (DFBEW, 2019). Während Stromnetzbetreiber auf der Höchst- und Hochspannungsebene Parameter der Spannung und Frequenz nahezu flächendeckend messen (50hertz et al., 2017), finden solche Messungen durch die Verteilnetzbetreiber in der Nieder- und Mittelspannung nur vereinzelt statt. Daher gibt es derzeit keine fundierte Datengrundlage zum Zustand der Spannungsqualität in den unteren Netzebenen.

Insbesondere empfindliche Geräte und Schalttechnik in Industrieanlagen sind von einer unzureichenden Spannungsqualität betroffen, wodurch bei einer Abnahme der Spannungsqualität erhebliche wirtschaftliche Schäden auftreten könnten. So zeigen die Ergebnisse der Unternehmensbefragung der Deutschen Industrie- und Handelskammer (DIHK), dass die Anzahl der Stromausfälle unter drei Minuten (sog. Kurzzeitunterbrechungen) im Jahr 2023 zugenommen hat; in der Industrie waren demnach die Hälfte der Befragten von Kurzzeitunterbrechungen betroffen (DIHK, 2024).

Derzeit wird die Spannungsqualität nicht in der Qualitätsregulierung berücksichtigt. Zudem ist der Netzbetreiber gesetzlich nicht verpflichtet, Daten zur Spannungsqualität zu erfassen und systematisch zu überwachen. Die europäische Norm EN 50160 „Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsverteilnetzen“ ist in Deutschland nicht als Standard im Rahmen eines Rechtsakts umgesetzt. Laut dem Bericht zur Spannungsqualität von der Bundesnetzagentur (2021) „[...] sind die Netzbetreiber dazu angehalten, die Grenzwerte aus der Europäischen Norm EN 50160 zur Spannungsqualität einzuhalten“. Durch die fehlende Berücksichtigung der Spannungsqualität in dem regulatorischen Rahmen haben die Netzbetreiber keine ausreichenden bzw. monetären Anreize, die Spannungsqualität zu überwachen und zu sichern.

Die Einbindung der Spannungsqualität in eine Anreizregulierung könnte mit ökonomischen Trade-Offs einer Qualitätsdifferenzierung einhergehen. In der Theorie und Empirie geht hervor, dass

¹ Als erneuerbare Energien wird in dieser Kurzstudie die Stromerzeugung aus erneuerbaren Primärenergieträgern, beispielsweise Wind- und Sonnenenergie, bezeichnet.

² Kurzfristige Spannungsschwankungen bezeichnen Abweichungen der elektrischen Spannung von ihrem Nominalwert für Sekunden bis Minuten, der je nach Spannungsebene festgelegt ist. Es kann zwischen kurzzeitigen Spannungseinbrüchen (Dips) und Spannungsspitzen (Spikes) unterschieden werden.

³ Flicker zählen zu den kurzfristigen Spannungsschwankungen und verursachen sichtbare Helligkeitsschwankungen bei Beleuchtung in Folge schneller Spannungsänderungen.

⁴ Oberschwingungen beschreiben unerwünschte Spannungs- oder Stromwellenformen, die über der Grundfrequenz (50 Hz) auftreten. Sie entstehen durch nichtlineare Verbraucher, die den sinusförmigen Stromfluss verzerren.

das gewünschte Qualitätslevel stark mit individuellen Kundenpräferenzen variiert (Fumagalli et al., 2007). Beispielsweise könnte die energieintensive Industrie der Spannungsqualität einen höheren Wert beimessen als Haushalte, da Spannungseinbußen mit unterschiedlich hohen Schäden verbunden sein können. Diese Heterogenität der Qualitätsanforderungen verschiedener Kundengruppen erschwert es für den Regulierer, ein Mindestniveau der Spannungsqualität festzulegen, da im Stromnetz nicht ohne Weiteres eine Produktdifferenzierung zwischen verschiedenen Kundengruppen vorgenommen werden kann. Jedoch ist ein Mindestniveau der Spannungsqualität von entscheidender Bedeutung für die Versorgungssicherheit und Stabilität des Stromnetzes. In diesem Zusammenhang wird deutlich, dass die Spannungsqualität Merkmale eines öffentlichen Gutes aufweist.

In der vorliegenden Kurzstudie werden mögliche Handlungsoptionen zur Integration der Spannungsqualität in den bestehenden Regulierungsrahmen untersucht. Dafür werden zunächst die grundlegenden Aspekte der Versorgungsqualität erläutert (Kapitel 2). Während in Kapitel 3 auf die Messung und Regulierung von Spannungsqualität in Deutschland eingegangen wird, weitet Kapitel 4 die Betrachtung von Spannungsqualität auf Europa aus. Mögliche Weiterentwicklungen der Qualitätsregulierung in Deutschland werden in Kapitel 5 aufgezeigt. Abschließend fasst Kapitel 6 die Erkenntnisse der Studie zusammen.

2 Grundlagen der Versorgungsqualität

2.1 Definition der Versorgungsqualität

Die Versorgungsqualität eines Stromnetzes wird in die Bereiche Netzzuverlässigkeit (auch Versorgungszuverlässigkeit), Servicequalität und Spannungsqualität (auch Produktqualität) unterteilt (BNetzA, 2021; Geibel, 2017).⁵ In Abbildung 1 sind die Teilbereiche der Versorgungsqualität dargestellt. Im Kontext der deutschen Regulierung wird zudem die Netzleistungsfähigkeit der Versorgungsqualität zugeordnet.

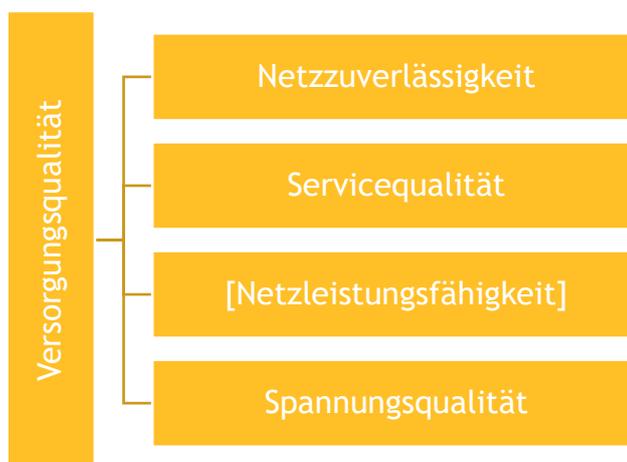


Abbildung 1: Definition der Versorgungsqualität und ihrer Teilbereiche in Anlehnung an BNetzA (2025b)

Netzzuverlässigkeit misst die Fähigkeit des Netzes, die Netznutzenden unterbrechungsfrei mit elektrischer Energie zu versorgen. Versorgungsunterbrechungen können dabei geplant und ungeplant auftreten. Zur Bewertung der Netzzuverlässigkeit stehen international anerkannte Kennzahlen zur Verfügung. Zulässige Kennzahlen sind die Dauer und Häufigkeit der Unterbrechung der Energieversorgung, die Menge der nicht gelieferten Energie und die Höhe der nicht gedeckten Last (vgl. § 20 ARegV Abs. 1). Dabei werden Versorgungsunterbrechungen unterteilt in Kurzzeitunterbrechungen (weniger als drei Minuten) und Langzeitunterbrechungen (mehr als drei Minuten) (BNetzA, 2021).

Servicequalität beschreibt die Beziehung zwischen den Netzbetreibern und den Netznutzenden. Sie beschreibt einerseits die Qualität der Kommunikation zwischen den beiden Parteien, z. B. das Einhalten von Terminen. Andererseits misst sie die Qualität von Dienstleistungen wie der Rechnungslegung (BNetzA, 2025b). Servicequalität wird meist national geregelt, findet aber auch in den Richtlinien der *Electricity Directive* der Europäischen Union (EU) Beachtung (EU, 2019).

Im Rahmen der deutschen Regulierung wird der Begriff der *Netzleistungsfähigkeit* als die Fähigkeit des Netzes beschrieben, die Nachfrage nach Energieübertragung zu erfüllen.

⁵ In der weiteren Analyse werden die Begrifflichkeiten „Netzzuverlässigkeit“ und „Spannungsqualität“ verwendet.

Netzleistungsfähigkeit kann unter anderem anhand der Dauer oder Häufigkeit von Maßnahmen zur Bewirtschaftung von Netzengpässen gemessen werden (BNetzA, 2025b).

Spannungsqualität beschreibt die technische Qualität der Stromversorgung. Die Merkmale der Spannung in öffentlichen Stromnetzen sind unter anderem in der europäischen Norm (EN) 50160 festgelegt und definieren die Netzqualität am Übergabepunkt vom Netz zu den Abnahmestellen (Geibel, 2017). Betrachtete Spannungsmerkmale in der Norm sind Frequenzhaltung, Spannungsschwankungen wie transiente Überspannung und Flicker, Spannungseinbrüche, Oberschwingungen und Spannungsasymmetrie⁶. Spannungsqualität ist demnach nicht eindimensional zu bewerten, sondern inhärent multidimensional, wobei verschiedenen Aspekten der Spannungsqualität für unterschiedliche Netznutzende eine abweichende Priorität zukommen kann. In der genannten Norm werden Grenzwerte für diese Merkmale der Spannungsqualität festgelegt. In Bezug auf die Frequenzhaltung legt die Norm fest, dass die Netzfrequenz im Mittelwert über eine Woche im Bereich zwischen 49,5 bis 50,5 Hertz liegen muss (EVU, 2025). In Bezug auf die allgemeine Spannungsqualität liegt die EN 50160 fest, dass der Effektivwert der Spannung für Niederspannungssysteme unter normalen Betriebsbedingungen nicht 10 % von der Referenzspannung⁷ abweichen darf.

In Abbildung 2 sind Merkmale der Spannungsqualität auf Verteilnetzebene entsprechend ihrer Dauer und dem Effektivwert der Spannung kategorisiert. Spannungseinbrüche treten auf, wenn der Effektivwert unter das zulässige Spannungsband fällt und zwischen zehn Millisekunden bis zu einer Minute andauert (siehe Abbildung 2). Liegt die Spannung an der Übergabestelle für mehr als eine Sekunde bei weniger als 5 % der Referenzspannung, liegt eine Versorgungsunterbrechung vor (N-ERGIE Netz GmbH, 2020).

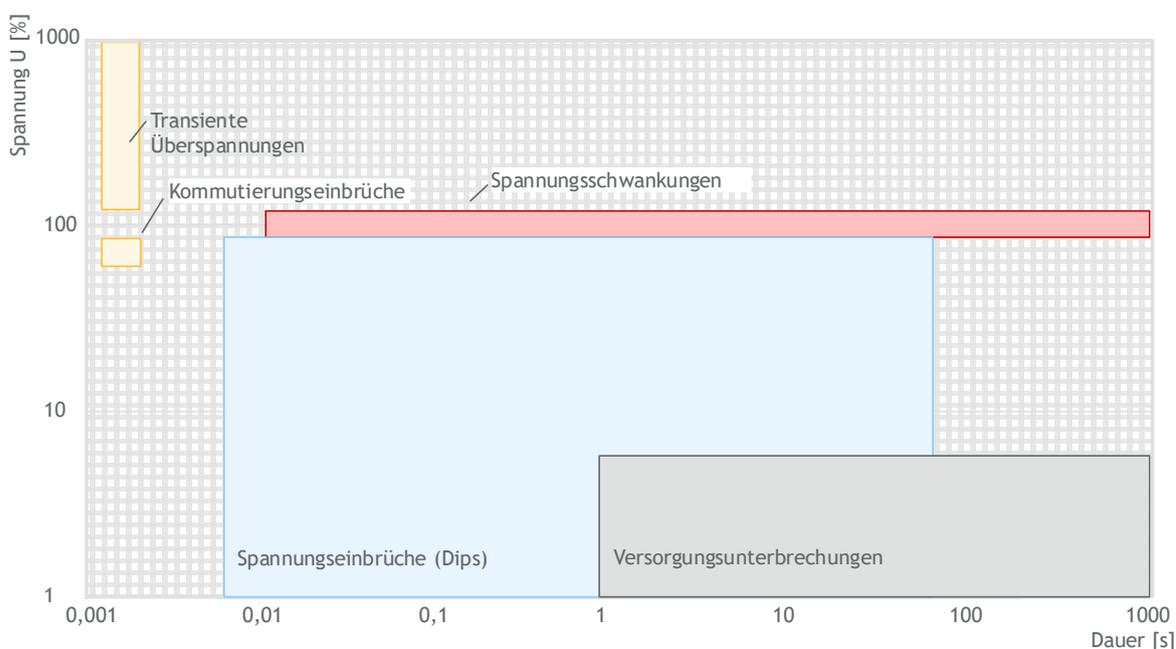


Abbildung 2: Klassifizierung Spannungseinschränkungen, eigene Darstellung in Anlehnung an N-ERGIE Netz GmbH (2020)

⁶ Asymmetrien in der Spannungsqualität treten auf, wenn in einem dreiphasigen Stromnetz die Spannung oder der Strom der drei Phasen nicht gleichmäßig verteilt ist. Ein ideales dreiphasiges Netz hat gleiche Spannungsamplituden und einen Phasenabstand von 120°.

⁷ Die Referenzspannung in der Niederspannung ist in Europa typischerweise 230 Volt (einphasig) oder 400 Volt (dreiphasig).

Es wird deutlich, dass die Konzepte der Netzzuverlässigkeit und der Spannungsqualität eng miteinander verknüpft sind, jedoch unterschiedliche Schwerpunkte setzen (Kontinuität der Stromversorgung vs. Qualität der Stromversorgung).

2.2 Qualitätsregulierung in Deutschland

In Deutschland wird der Stromnetzbetrieb unter anderem im Rahmen der Anreizregulierungsverordnung (ARegV) durch die Bundesnetzagentur (BNetzA) reguliert. Hintergrund ist, dass Stromnetze ein sogenanntes natürliches Monopol sind, in dem der Wettbewerb nur eingeschränkt bzw. nicht sinnvoll möglich ist. Dabei funktioniert die Anreizregulierung grundsätzlich nach dem Prinzip eines simulierten Wettbewerbs. Den Netzbetreibern wird eine Erlösobergrenze vorgegeben, die ihre maximalen Einnahmen aus den Netzentgelten bestimmt. Die Erlösobergrenze basiert auf den zu erwartenden Kosten des Netzbetriebs eines Netzbetreibers und wird vor Beginn jeder Regulierungsperiode festgesetzt. Während der Regulierungsperiode sind die tatsächlichen Kosten und Erlöse des Netzbetreibers voneinander entkoppelt. Netzbetreiber haben dadurch einen Anreiz, ihre Produktivität zu steigern und Kosten zu senken, da sie die Differenz zwischen den tatsächlichen Kosten und der Erlösobergrenze als Gewinn einbehalten können. Um sicherzustellen, dass der Kostendruck nicht zulasten der Versorgungsqualität geht, umfasst die Anreizregulierung eine Qualitätsregulierung, die unter anderem durch ein Qualitätselement (Q-Element) umgesetzt wird (BNetzA, 2025b). Damit ist die Qualitätsregulierung der Gegenpart zu einer auf Kosteneffizienz ausgerichteten Netzregulierung. Durch die Anwendung eines Q-Elements können Netzbetreiber, die sich durch eine besonders hohe Versorgungsqualität auszeichnen, eine Erhöhung ihrer Erlösobergrenze erhalten (Bonus). Im gegenteiligen Fall wird die Erlösobergrenze hingegen gesenkt (Malus).

Die konkrete Ausgestaltung des Q-Elements obliegt der BNetzA und ist in der ARegV, dem EnWG sowie in weiteren Beschlüssen der BNetzA, wie Beschlusskammer (BK) 4-13-739, geregelt. In § 21 a Abs. 5 EnWG ist verankert, dass Qualitätsvorgaben bezüglich der Netzzuverlässigkeit sowie der Netzleistungsfähigkeit getroffen werden können. Die Kennzahlen, die für die Bewertung der Versorgungsqualität herangezogen werden können, werden definiert: für die Netzzuverlässigkeit sind die Dauer und Häufigkeit der Unterbrechung der Energieversorgung, die Menge der nicht gelieferten Energie und die Höhe der nicht gedeckten Last zulässig (§ 20 Abs. 1 ARegV). Zur Bewertung der Netzleistungsfähigkeit können „die Häufigkeit und Dauer von Maßnahmen zur Bewirtschaftung von Engpässen und die Häufigkeit und Dauer des Einspeisemanagements nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz“ herangezogen werden (§ 20 Abs. 5 ARegV).

Die praktische Umsetzung des Q-Elements wird zu Beginn einer Regulierungsperiode von der BNetzA konkretisiert. Wie auch in den vorangegangenen Perioden wird in der vierten Regulierungsperiode (2024-2028) als Kennzahl zur Bewertung der Netzzuverlässigkeit die durchschnittliche Dauer von geplanten und ungeplanten Versorgungsunterbrechungen von mehr als drei Minuten für einen angeschlossenen Netzkunden innerhalb eines Kalenderjahres herangezogen. Hierfür wird auf der Niederspannungsebene die Kennzahl „System Average Interruption Duration Index“ (SAIDI) und auf der Mittelspannungsebene die Kennzahl „Average System Interruption Duration Index“ (ASIDI) herangezogen.

Berechnungsgrundlage des SAIDI sowie des ASIDI

Gemäß § 52 EnWG sind Netzbetreiber verpflichtet, der BNetzA einen Bericht über alle aufgetretenen Langzeitunterbrechungen innerhalb eines Jahres vorzulegen und darin Informationen zu Zeitpunkt, Dauer, Ausmaß und Ursache der Versorgungsunterbrechung anzugeben (BIHK, 2017). Zur Abbildung der durchschnittlichen Versorgungsunterbrechung (VU) je Letztverbraucher (LV) ermittelt die BNetzA aus diesen Daten den SAIDI und den ASIDI.

Die Kennzahlen werden für jeden Verteilnetzbetreiber einzeln berechnet und setzen die Dauer sowie die Häufigkeit der Versorgungsunterbrechungen ins Verhältnis zur Gesamtzahl der angeschlossenen Letztverbraucher. Die Kennzahl SAIDI und ASIDI berechnet sich wie folgt:

$$SAIDI = \frac{\sum \text{Anzahl der betroffenen LV je VU} * \text{Dauer der VU}}{\text{Gesamtzahl angeschlossener LV}} \quad (1)$$

$$ASIDI = \frac{\sum \text{Unterbrochene Bemessungsleistung je VU} * \text{Dauer der VU}}{\text{Gesamtanzahl angeschlossener LV}} \quad (2)$$

Berechnungsgrundlage des Q-Elements

Zur Berechnung des Q-Elements wird die SAIDI-Kennzahl eines Netzbetreibers (i) einem Referenzwert (y^{Ref}) gegenübergestellt. Der Referenzwert berechnet sich aus dem Durchschnittswert der Zuverlässigkeitskennzahl aller Netzbetreiber. Dabei wird der Durchschnittswert mit der Anzahl der Letztverbraucher eines Netzbetreibers gewichtet. Der Referenzwert der ASIDI-Kennzahl wird analog zur $y^{Ref} = \frac{\sum_i SAIDI_i * LV_{T,i}}{\sum_i LV_{T,i}}$

(3) bestimmt.

$$y^{Ref} = \frac{\sum_i SAIDI_i * LV_{T,i}}{\sum_i LV_{T,i}} \quad (3)$$

Um gebietsstrukturelle Unterschiede zwischen Netzbetreibern bei der Ermittlung der Qualitätskennzahlen einzubeziehen, wird ein netzbetreiberindividueller Referenzwert (y_{ind}^{Ref}) in der Mittelspannung berechnet. Zur Bestimmung der Kennzahl wird die Lastdichte eines Netzbetreibers berücksichtigt.

Zur Ermittlung der Zu- und Abschläge, welche das Q-Element in der Erlösobergrenze ist, wird die jährliche Differenz zwischen den errechneten Referenzwerten ($y_{ind}^{(Ref)}$ und $y^{(Ref)}$) und den individuellen Netzzuverlässigkeiten je Netzebene ($ASIDI_{ind}$ und $SAIDI_{ind}$) mit der Anzahl der durchschnittlichen Letztverbraucher der letzten drei Jahre ($LV_{ind}^{(MS+NS)}$ und $LV_{ind}^{(NS)}$) gewichtet und aufsummiert (siehe (4)). Abschließend wird diese Summe mit dem Monetarisierungsfaktor m multipliziert (BNetzA, 2023b).

$$Bonus_i / Malus_i = \left[\left(y_{ind}^{(Ref)} - ASIDI_{ind} \right) * LV_{ind}^{(MS+NS)} + \left(y^{(Ref)} - SAIDI_{ind} \right) * LV_{ind}^{(NS)} \right] * m \quad (4)$$

Der Monetarisierungsfaktor wird verwendet, damit die Zu- und Abschläge des Q-Elements auf die Erlösobergrenze die Kosten der Gesellschaft durch die Versorgungsunterbrechungen beinhaltet. Für die ermittelten Werte der Q-Elemente im Jahr 2024 ergab sich ein Monetarisierungsfaktor von 0,3 €/Minute/Kunde/Jahr (BNetzA, 2023a).

Derzeitige Diskussionen um das Q-Element

Seit Einführung der Anreizregulierung wird regelmäßig über mögliche Weiterentwicklungsoptionen des Q-Elements diskutiert, da weitere Indikatoren der Versorgungsqualität wie die Netzleistungsfähigkeit, die Spannungsqualität und die Servicequalität in der Berechnung des Q-Elements derzeit nicht berücksichtigt werden.

In einem von der BNetzA beauftragten Gutachten zur Vorbereitung der vierten Regulierungsperiode (2024-2028) wurde vorgeschlagen, das Q-Element unter anderem um Kennzahlen zur Erfassung von Kurzunterbrechungen zu ergänzen (E-Bridge, ZEW, FGH, 2020). Ein europäischer Vergleich zeigt, dass viele Länder Kurzunterbrechungen bereits regulieren (CEER & ECRB, 2022). Als geeignete Kennzahl wird der „Monetary Average Interruption Frequency Index“ (MAIFI) vorgeschlagen (E-Bridge et al. 2020). Da die Ausfallkosten bei sensiblen Industrie- und Gewerbekunden in den höheren Netzebenen deutlich höher sind und die notwendige Technik zur Registrierung von Kurzzeitunterbrechungen in den unteren Netzebenen nicht vorhanden ist, empfiehlt der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) und der Verband kommunaler Unternehmen (VKU), die Kennzahl MAIFI nur für die Mittelspannungsebene in Erwägung zu ziehen (BDEW & VKU, 2019).

In der fünften Regulierungsperiode ab dem Jahr 2029 ist eine Weiterentwicklung der Qualitätsregulierung um zusätzliche Kennzahlen zur Netzzuverlässigkeit, wie den MAIFI, bisher nicht vorgesehen. Hingegen plant die BNetzA in einem Festlegungsverfahren zur Weiterentwicklung der Qualitätsregulierung [GBK-24-02-1#4] das Q-Element um weitere Elemente hinsichtlich der Netzleistungsfähigkeit zu ergänzen, die insbesondere die Energiewendekompetenz der Stromverteilnetze abbilden. Als geeignete Indikatoren zur Beschreibung der Energiewendekompetenz nennt die BNetzA (2024) die zügige Umsetzung von Netzanschlüssen, die Digitalisierung der Netze, die Abregelung und netzorientierte Steuerung sowie die Entwicklung und Anwendung von Standardisierungsprozessen. Ende 2025 plant die BNetzA, die Indikatoren zur Ermittlung der Energiewendekompetenz in einem Festlegungsentwurf zu definieren. Zudem sollen Methoden entwickelt werden, mit denen die identifizierten Indikatoren mit finanziellen Anreizen belegt werden können (BNetzA, 2025a). Ziel der Weiterentwicklung der Qualitätsregulierung ist es, Verteilnetzbetreiber zu belohnen, die ihre Stromnetze im Hinblick auf die Energiewende transformieren. Darüber hinaus zieht die BNetzA in Betracht, die Servicequalität als weiteren Aspekt in die Qualitätsregulierung einzuführen. Im Gegensatz zur Einbindung der Netzleistungsfähigkeit in das Q-Element ist für die Servicequalität keine finanzielle Anreizsetzung vorgesehen. Vielmehr dient die Datenerhebung der Schaffung von Transparenz und Vergleichbarkeit (BNetzA, 2024).

3 Status-quo der Spannungsqualität in Deutschland

Im deutschen Regulierungsrahmen sind die Netzbetreiber nicht dazu verpflichtet, eine kontinuierliche Überwachung von Spannungsqualität durchzuführen. Die EN 50160 ist in Deutschland nicht als Standard im Rahmen eines Rechtsakts umgesetzt. Während die Norm im Rahmen des Netzanschlussprozess für Anschlussgeber sowie -nehmer zunächst als Grundlage dient, werden darüber hinaus, dem Bericht zur Spannungsqualität der BNetzA (2021) nach, Netzbetreiber lediglich „[...] dazu angehalten, die Grenzwerte aus der EN 50160 zur Spannungsqualität einzuhalten“. Durch die fehlende Berücksichtigung der Spannungsqualität in dem regulatorischen Rahmen haben die Netzbetreiber allerdings keine ausreichenden bzw. monetären Anreize, die Spannungsqualität zu überwachen und zu sichern.

Stromverbraucher haben die Möglichkeit, bei den Netzbetreibern Informationen zur Qualität der Versorgungsspannung anzufordern (DFBEW, 2019). Da das Monitoring der Spannungsqualität von Seiten der Unternehmen und Netzbetreibern jedoch nicht verpflichtend ist, erfolgt keine offizielle und standardisierte Berichterstattung. Öffentlich zugängliche Informationen über Spannungsqualitätsprobleme stammen daher aus freiwilligen Angaben von Unternehmen und Stromnetzbetreibern.

In der Vergangenheit wurden bereits mehrere Unternehmensbefragungen zur Spannungsqualität durchgeführt (DIHK, 2024; BNetzA, 2021; BIHK, 2017). In einer Erhebung der BNetzA (2021) wurden die netzseitigen Störungen erfasst, die von 101 Unternehmensstandorten im Zeitraum von 2018 bis Mitte 2020 gemeldet wurden. Im Untersuchungszeitraum traten Kurzzeitunterbrechungen, Spannungsschwankungen sowie -einbrüche am häufigsten auf. Abbildung 3 zeigt, dass nur wenige Unternehmensstandorte häufig von Spannungsereignissen betroffen waren. Insgesamt trat im Zeitraum von 2018 bis Anfang 2020 bei 38 % der betrachteten Standorte mindestens eine Kurzzeitunterbrechung auf. Beim Auftreten von Spannungseinbrüchen lag der Anteil ebenfalls bei 38 % und bei Spannungsschwankungen bei 20 %. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse der Erhebung eine steigende Anzahl an Spannungseinbrüchen und -schwankungen im Jahr 2020 gegenüber den Vorjahren auf. Dies spiegelt sich in der verschlechterten Wahrnehmung der Spannungsqualität einiger Unternehmen während des Erhebungszeitraums wider. Die BNetzA sieht aufgrund der geringen Rücklaufquote der Befragung und der Häufigkeitsverteilung von Spannungsereignissen das Niveau der Spannungsqualität als akzeptabel und sieht keinen regulatorischen Handlungsbedarf.

Aus einer aktuelleren Erhebung der DIHK (2024) geht hervor, dass bei den Unternehmen die Sorge um Kurzzeitunterbrechungen zunimmt. Für das Jahr 2023 meldeten 42 % der 1.000 befragten Unternehmen Kurzzeitunterbrechungen in ihrem Betrieb. Bei etwa zwei Drittel der Unternehmen konnte keine Ursache des Störfalles identifiziert werden, während ein Zehntel der Unternehmen den Netzbetreiber verantwortlich für den Störfall sahen.

Die Ergebnisse der beiden Erhebungen stellen jedoch weitgehend Einzelfalluntersuchungen dar und ermöglichen keine ganzheitliche Analyse von Spannungsqualitätsproblemen. Auch andere Erhebungen zur Spannungsqualität, wie die Unternehmensbefragung des Verbands der Industriellen Energie- & Kraftwirtschaft (VIK) und des Bayerischen Industrie- und

Handelskammertags (BIHK), können aufgrund ihrer kleinen Stichproben nicht als repräsentativ angesehen werden (BIHK, 2017). Um ein repräsentatives Bild für ganz Deutschland zu erhalten, wäre eine gesetzlich verpflichtende Datenerhebung seitens der Unternehmen oder der Netzbetreiber erforderlich.

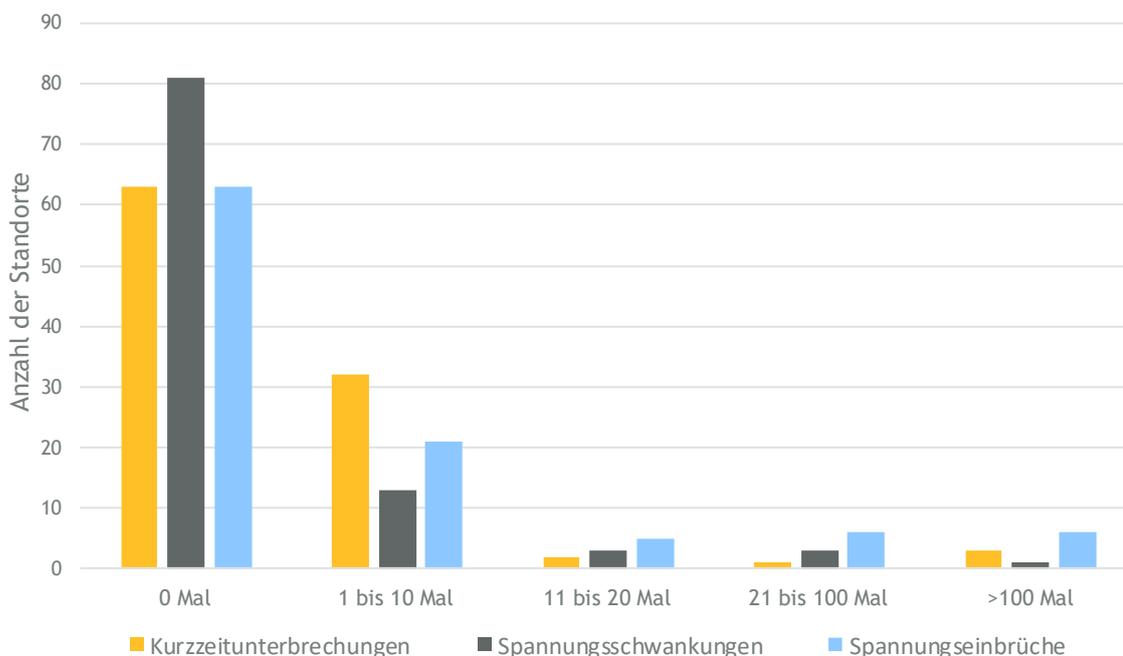


Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung von ausgewählten Spannungsereignissen 2018 - 2020 1. Halbjahr, eigene Darstellung in Anlehnung an BNetzA (2021)

Neben der freiwilligen Befragung zur Spannungsqualität innerhalb von Unternehmen erfasst das Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN) in einer jährlichen Erhebung die Störungsdaten der Netzbetreiber. Obwohl die Teilnahme an der Erhebung freiwillig ist, wird in der FNN-Störungsstatistik im Berichtsjahr 2023 rund 80 % des deutschen Stromnetzes erfasst. Für Industrie- und Gewerbekunden mit Geräten und Anlagen, die hochempfindlich auf kurzzeitige Spannungseinbrüche reagieren, werden 1,9 kurzschlussartige Fehler pro 100 Kilometer Leitungslänge in der Mittelspannung im Jahr 2022 verzeichnet. Gegenüber dem Vorjahr ist dieser Wert auf einem leicht niedrigeren Niveau. Die historische Entwicklung im Zeitraum von 2011 bis 2022 zeigt auf, dass Spannungseinbrüche auf der Mittelspannungsebene nahezu auf einem konstanten Niveau verharren (VDE, 2023). Insgesamt gibt die FNN-Störungsstatistik jedoch nur bedingt Auskunft über die Spannungsqualität eines Netzgebietes. Zum einen bildet die Statistik zur Häufigkeit der Spannungseinbrüche nur ein spezifisches Merkmal der Spannungsqualität ab (kurzschlussartige Fehler). Zum anderen führen äußere Einflüsse, wie z. B. atmosphärische oder Fremdeinwirkung, zu Kurzschlüssen. Typische Beispiele sind Blitzeinschläge oder Schäden an Leitungen durch Bauarbeiten. Diese äußeren Einflüsse sind meist unabhängig von der technischen Qualität der Stromversorgung und liegen daher nicht im Verantwortungsbereich des Netzbetreibers.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es bislang keine repräsentative Datenlage zur Spannungsqualität auf Verbraucherseite gibt. Daher unterliegen tatsächliche Auswirkungen von Spannungsqualitätsproblemen für Unternehmen einer hohen Unsicherheit. Trotzdem deuten die Befragungsergebnisse darauf hin, dass Spannungsabfälle bis hin zu Ausfällen zunehmende Sorgen bei Unternehmen auslösen. Vor dem Hintergrund der fortschreitenden Elektrifizierung der industriellen Nachfrage und des zunehmenden Anteils von EE in der Stromversorgung wird das Auftreten von Spannungsqualitätsproblemen in Zukunft häufiger erwartet (DIHK, 2024). Eine robuste Datengrundlage wäre eine notwendige Voraussetzung, um die Spannungsqualität in den deutschen Stromnetzen zu bewerten und ggf. in der Stromnetzregulierung zu berücksichtigen.

4 Status-quo der Spannungsqualität im europäischen Ausland

4.1 Messung der Spannungsqualität

Während die Versorgungsqualität in der deutschen Anreizregulierung durch das Q-Element ausschließlich über Langzeitunterbrechungen ermittelt wird, erfolgt die Messung der Versorgungsqualität in anderen europäischen Ländern teils umfassender. Ein vom „Council of European Energy Regulators“ (CEER) vorgelegter Benchmarking Report aus dem Jahr 2022 vergleicht, wie verschiedene europäische Länder Versorgungsqualität definieren und wie sie diese überwachen (CEER & ECRB, 2022). In dem Bericht wird zwischen Unterbrechungen der Stromversorgung und Spannungsqualitätsproblemen, d.h. Störungen der Stromversorgung, wie beispielsweise Spannungseinbrüchen oder schnellen Spannungsschwankungen, unterschieden. Fälle, in denen Spannungseinbrüche mit einer Versorgungsunterbrechung einhergehen, werden im CEER-Bericht nicht gesondert betrachtet.

Überwachung von Spannungsqualität

In einem europäischen Vergleich zeigt sich, dass die Spannungsqualität in den meisten Ländern systematisch überwacht wird. Tabelle 1 bietet einen Überblick über die Spannungsqualitätsmerkmale auf Verteilnetzebene, die in den verschiedenen europäischen Ländern erfasst werden. Dabei zeigt sich, dass in 23 europäischen Ländern die Spannungsqualität auf Verteilnetzebene überwacht wird. Deutschland gehört jedoch zu den zehn Ländern, die ein solches Monitoring bislang nicht durchführen. In Ländern, in denen die Spannungsqualität des Stromnetzes überwacht wird, werden unterschiedliche Merkmale zur Messung herangezogen. Häufig verwendete Indikatoren für die Spannungsqualitätsüberwachung umfassen Spannungsschwankungen, Flicker, Spannungseinbrüche und Oberschwingungen. Spezielle Indikatoren wie transiente Überspannungen, Interharmonische Spannung und Netz-Signalspannung werden nur von wenigen europäischen Ländern auf Verteilnetzebene gemessen und werden daher in dem tabellarischen Überblick in Tabelle 1 als „Sonstige Merkmale“ zusammengefasst. Es werden keine Angaben zu den erfassten Merkmalen der Spannungsqualität in Albanien, Frankreich und der Ukraine gemacht, da diese Informationen im CEER-Bericht nicht vorliegen.

Neben der Nutzung verschiedener Spannungsqualitätsmerkmale unterscheiden sich die Ansätze zur Überwachung der Spannungsqualität in verschiedenen europäischen Ländern, insbesondere in Bezug auf Regulierung, Messkontinuität und Digitalisierung.

Tabelle 1: Überwachung der Spannungsqualität auf Verteilnetzebene nach eigener Auswertung auf Basis von CEER & ECRB (2022)

Europäische Länder	Überwachung Spannungsqualität	Spannungsqualitätsmerkmale						
		Spannungs-schwankungen	Flicker	Spannungs-unsymmetrie	Oberschwingungs-spannung	Spannungs-einbrüche	Spannungs-überhöhungen	Sonstige Merkmale
Albanien	x	keine Angaben						
Österreich	x	x	x	x	x	x		
Belgien	x	x	x	x	x	x	x	x
Bosnien und Herzegowina	x							
Kroatien	x							
Zypern	x	x	x	x	x	x	x	
Estland								
Finnland								
Frankreich	x	keine Angaben						
Georgien	x	x	x			x	x	
Deutschland								
Griechenland								
Ungarn	x	x		x	x	x	x	
Irland	x	x	x	x	x	x		
Italien	x	x		x	x	x	x	x
Kosovo	x	x			x			
Lettland	x	x	x	x				x
Litauen								
Luxemburg								
Malta								
Moldawien								
Montenegro								
Niederlande	x	x	x	x	x	x	x	x
Mazedonien	x		x	x				x
Norwegen	x		x			x	x	x
Polen	x							
Portugal	x	x	x	x	x	x	x	
Rumänien	x	x			x	x		
Serbien								
Slowakei	x	x	x	x	x	x		x
Slowenien	x	x	x	x	x	x	x	x
Spanien								
Schweden	x			x	x			
Ukraine	x	keine Angaben						

So gibt es in einigen Ländern, wie z. B. Frankreich, keine gesetzliche Verpflichtung zur Überwachung der Spannungsqualität. In anderen Ländern wird die Überwachung der Spannungsqualität aktiv von der nationalen Regulierungsbehörde unterstützt. Ein Beispiel hierfür ist Ungarn, wo die Regulierungsbehörde die Überwachung initiiert hat, indem sie dem Netzbetreiber 400 Messgeräte zur Verfügung stellte, um Schwachstellen im Netz zu identifizieren, bevor Kunden auf Spannungsqualitätsprobleme stoßen. In anderen europäischen Ländern, wie Griechenland und Lettland, erfolgt die Überwachung der Spannungsqualität auf Anfrage von Netzkunden. Schließlich gibt es Länder wie Norwegen, in denen bei Vorliegen einer Kundenbeschwerde eine verpflichtende Spannungsqualitätsüberwachung erfolgt. Die Kosten für die Überwachung trägt der Netzbetreiber vorerst und legt sie anschließend auf die Netznutzende über die Netznutzungsentgelte um (Ministry of Petroleum and Energy Norway, 2004). In

Österreich wird eine verpflichtende Anzahl an jährlichen Messungen festgelegt. So sind Messbetreiber dazu verpflichtet, an verschiedenen Messstellen im gesamten Bundesgebiet für mindestens drei aufeinanderfolgende Wochen Messungen durchzuführen. Die Daten über ausgewählte Spannungsqualitätsparameter werden der Regulierungsbehörde gemeldet und in einem jährlichen Bericht veröffentlicht (E-Control, 2024).

In Bezug auf die Messkontinuität zeigt sich, dass die meisten Länder regelmäßige Messungen durchführen. So werden beispielsweise in Belgien und Niederlande feste Messpunkte auf unterschiedlichen Spannungsebenen kontinuierlich überwacht. Es gibt aber auch Länder, in denen die Messungen auf einen bestimmten Zeitraum begrenzt sind. Ein Beispiel ist Georgien, wo die Spannungsqualität mit tragbaren Messgeräten durchschnittlich zwei Wochen pro Jahr erfasst wird. In vielen Ländern wird eine Kombination aus kontinuierlichen und temporären Messungen durchgeführt. So wird beispielsweise in Frankreich die kontinuierliche Messung an kritischen Punkten durch eine temporäre Überwachung auf Anfrage von Netzkunden ergänzt (CEER & ECRB, 2022).

Im Bereich der Digitalisierung zeigt sich, dass die Überwachung der Spannungsqualität in den meisten europäischen Ländern auf der Niederspannungsebene automatisiert erfolgt. So haben die meisten europäischen Länder Anforderungen an intelligente Zähler, die eine Überwachung der Spannungsqualität ermöglichen. In Italien erfassen intelligente Zähler Spannungsabweichungen und Unterbrechungen. Die Durchdringung intelligenter Zähler beträgt hier nahezu 100 % aller Nutzer des Niederspannungsnetzes. Ein Best-Practice-Beispiel im Ausbau intelligenter Zähler ist Norwegen. Hier liegt die Durchdringungsrate von intelligenten Zählern seit dem Jahr 2019 ebenfalls bei fast 100 %. Diese können das Spannungsniveau jedes Endverbrauchenden messen und ermöglichen die Fernablesung von Spannungsabweichungen (CEER & ECRB, 2022).

4.2 Regulierung der Spannungsqualität

In den meisten europäischen Ländern wird die Kontinuität der Stromversorgung in die Anreizregulierung einbezogen, während die Spannungsqualität ausgenommen bleibt (Seppälä & Järventausta, 2024). Stattdessen wird die Spannungsqualität häufig unter Berücksichtigung nationaler und europäischer Standards in regulatorische Vorgaben oder gesetzliche Rahmenbedingungen integriert. Der CEER-Benchmarking-Report zeigt, dass in 23 europäischen Ländern, darunter Österreich, Belgien, Frankreich, Luxemburg und die Niederlande, die Spannungsqualität über Stromversorgungsunterbrechungen hinaus auf Verteilnetzebene reguliert wird. Die Festlegung von Höchstwerten gemäß der EN 50160 bildet das zentrale Instrument zur Bewertung der Spannungsqualität in den europäischen Ländern. Andere europäische Länder wie Norwegen und die Niederlande setzen nationale Standards um, die strengere Anforderungen an die Spannungsqualität stellen als die Norm.

Werden die Grenzwerte der Spannungsqualität nicht eingehalten, können Netzbetreiber zu reduzierten Tarifen für die Dienstleistung des Stromnetzes oder zu Kompensationszahlungen verpflichtet werden. In Lettland ist der Verteilnetzbetreiber bei Nichteinhaltung der Norm zur Spannungsqualität dazu verpflichtet, einen reduzierten Tarif für die entsprechende Nutzergruppe anzuwenden. In Italien ist vorgesehen, dass Verteilnetzbetreiber bei Spannungseinbrüchen auf

der Hochspannungsebene den Kunden entschädigen müssen, wenn die Spannungsqualität unter bestimmte Schwellenwerte fällt. Schadensersatzforderungen kämen jedoch nur dann in Betracht, wenn der Netzkunde einen tatsächlichen Schaden nachweisen und beziffern sowie zusätzlich die Rechtswidrigkeit und das Verschulden des Netzbetreibers nachweisen kann (CEER & ECRB, 2022).

Um die Verantwortung für den entstandenen Schaden bei Spannungseinbrüchen zwischen dem Netzbetreiber und dem Netzkunden zu bestimmen, werden in einzelnen europäischen Ländern Verantwortungszuweisungskurven, in der Literatur bekannt als „responsibility-sharing curves“, angewendet (Delfanti, Fumagalli, Garrone, Grilli & Lo Schiavo, 2010; Weldemariam, Cuk & Cobben, 2019). Je nach Restspannung und Dauer des Spannungseinbruchs⁸ werden vom Regulierer üblicherweise mindestens zwei Cluster gebildet. Ein Cluster erfasst Spannungseinbrüche, gegen die Verbrauchergeräte immun sein sollten, während das andere Cluster solche Einbrüche umfasst, die auf schwerwiegende Probleme im Stromnetz hinweisen. Dadurch werden die Anforderungen an die Spannungsqualität im Netz in Abstimmung mit der Leistungsfähigkeit von Geräten oder Anlagen definiert (Weldemariam et al., 2019). Die Kurven können auf Grenzwerten nationaler und europäischer Normen zur Spannungsqualität oder auf internationalen Normen zur Störfestigkeit von Anlagen basieren. In Abbildung 4 sind Verantwortungszuweisungskurven für die Länder Italien und Frankreich abgebildet. In Frankreich werden die zwei Cluster gebildet, die in dem Emerald-Vertrag zwischen Netzbetreibern und Kunden verankert sind. Im Emerald-Vertrag wird festgelegt, dass Netzkunden für Spannungseinbrüche verantwortlich sind, die kürzer sind als 0,0006 Sekunden oder bei denen die verbleibende Spannung über 70 % der Nennspannung auf Mittel- und Hochspannungsebene liegt. Der Verantwortungsbereich der Netzkunden liegt oberhalb der grau gestrichelten Kurve. Hingegen sind die Netzbetreiber dafür verantwortlich, die Anzahl der Spannungseinbrüche zu begrenzen, die länger als 0,6 Sekunden dauern und die Spannung tiefer als 70 % der Nennspannung ist (Bereich rechts unterhalb der grau gestrichelten Kurve).

In Italien werden zur Bildung der Verantwortungsverteilungskurven die Störfestigkeitsnormen von Anlagengeräten herangezogen.⁹ Anders als in Frankreich ist der Netzbetreiber schon für Spannungseinbrüche unter 0,6 Sekunden verantwortlich. Der Verantwortungsbereich des Netzbetreibers entspricht dem Bereich rechts unterhalb der blau gestrichelten Kurve in Abbildung 4. In dem Bereich zwischen den beiden blauen Kurven ist der Netzbetreiber verantwortlich, die Spannungseinbrüche bei überschaubarem Kostenaufwand zu mindern. Im Gegenzug müssen Gerätehersteller sicherstellen, dass verschiedene Immunitätsklassen von Geräten den Bereich abdecken können. Für den Bereich oberhalb der oberen blauen Kurve müssen Anlagenbetreiber sicherstellen, dass ihre Anlagen immun gegen diese Spannungseinbrüche sind (Weldemariam et al., 2019).

⁸ Spannungseinbrüche treten auf, wenn die Effektivspannung für eine Zyklusdauer unter 90 % der Referenzspannung sinkt. Die Dauer eines solchen Ereignisses liegt zwischen zehn Millisekunden und einer Minute.

⁹ Für die Clusterbildung wurden die Störfestigkeitsnormen für die Klasse 2 und 3 von Anlagengeräten gemäß Internationaler Elektrotechnischer Kommission (IEC) 61000-4-11/34 11,12 herangezogen.

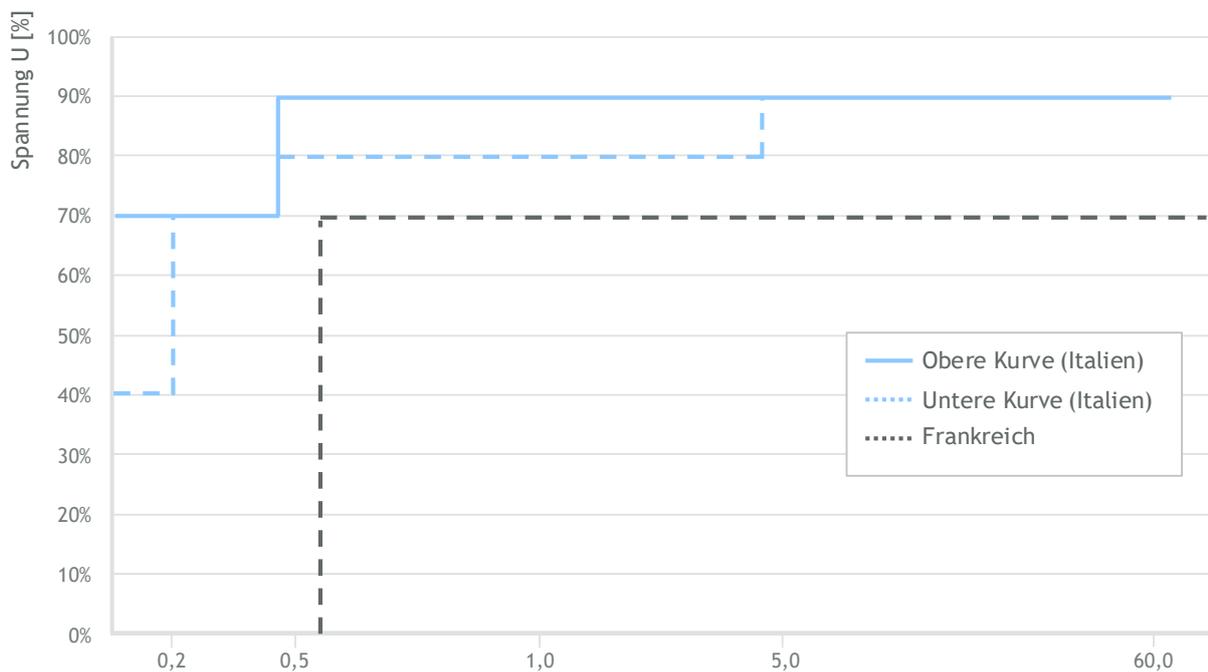


Abbildung 4: Verantwortungsverteilungskurven in Italien und Frankreich, eigene Darstellung in Anlehnung an Weldemariam et al. (2019)

5 Mögliche Weiterentwicklung der Qualitätsregulierung in Deutschland

5.1 Handlungsoptionen zur Integration von Spannungsqualität

Ausweitung der Messung von Qualitätsaspekten

Netzbetreiber sind nach § 52 EnWG verpflichtet, der BNetzA Versorgungsunterbrechungen mitzuteilen. Dies umfasst jedoch nur einen Ausschnitt der Versorgungsqualität und deckt nicht die Spannungs- und Servicequalität ab. Einzelne Merkmale der Spannungsqualität von Netzbetreibern an Übergabestellen werden nur dann kontinuierlich gemessen, wenn Beschwerden von Netzkunden vorliegen und nachgewiesen werden kann, dass die Störungen auf der Netzseite verursacht werden (BNetzA, 2021). Um die Transparenz der Spannungsqualität im Verteilnetz zu erhöhen, könnte eine verpflichtende Messung seitens der Netzbetreiber festgelegt werden. Alternativ könnten die Meldepflichten im Falle von Versorgungsstörungen gemäß § 52 EnWG um den Aspekt der Spannungsstörungen erweitert werden.

Dabei kann eine verpflichtende punktuelle Messung Rückschlüsse auf die Einhaltung von Spannungsqualitätsnormen an einzelnen Übergabestellen ermöglichen. Um dies umzusetzen, könnte, analog zu Österreich, verpflichtende Messungen an verschiedenen Messstellen in einer Verordnung gesetzlich verankert werden. Die Auswahl der Messstellen könnte einem statistisch fundierten und dem Stand der Technik entsprechenden Auswahlverfahren folgen. Unter Berücksichtigung der heterogenen Kundenpräferenzen in Bezug auf die Spannungsqualität wäre es aus ökonomischer Sicht sinnvoll, Messungen vorrangig in denjenigen Netzgebieten durchzuführen, in denen Netzkunden einer hohen Spannungsqualität einen hohen Stellenwert beimessen. Die Auswahl der Messstellen könnte wie in Österreich im Anschluss zwischen Netzbetreibern und der zuständigen Regulierungsbehörde konsultiert und final festgelegt werden (E-Control, 2024).

Eine flächendeckende Messung hingegen könnte vollständige Transparenz über einzelne Merkmale der Spannungsqualität im gesamten Netzgebiet schaffen. Jedoch sollte eine gesetzliche Verpflichtung zur flächendeckenden Messung unter Abwägung der Kosten/Nutzen-Relation sorgfältig geprüft werden. Die Messung von Spannungsqualitätsparametern auf der Niederspannungsebene könnte im Rahmen der flächendeckenden Ausbringung von Smart Metern realisiert werden. Gemäß dem Messstellenbetriebsgesetz (MsbG) müssen Smart Meter netzrelevante Messwerte, einschließlich Spannungs- und Frequenzdaten, in einer viertelstündlichen Auflösung erfassen und täglich übermitteln (§ 34 Abs. 1 S.4 MsbG). Ferner ist der Einbau von Smart Metern für Stromverbraucher mit einem Jahresverbrauch von mehr als 6.000 kWh bis spätestens 2032 gesetzlich verpflichtend, sofern die technische Umsetzbarkeit gegeben und die Maßnahme wirtschaftlich vertretbar ist. Für Haushaltskunden bleiben die entstehenden Kosten durch eine gesetzlich festgelegte Obergrenze von 25 € pro Jahr für den Messstellenbetrieb begrenzt (§ 32 Abs. 1 MsbG). Da Netzbetreiber ohnehin schrittweise Smart Meter einführen müssen, könnte die Integration der Erhebung von Spannungsqualitätsdaten in diesen Prozess eine kostengünstige Lösung darstellen.

In Bezug auf die Kontinuität der Messung sollte zwischen den Spannungsereignissen unterschieden werden. Ein Messungszeitraum von zwei bis drei Wochen ist oft ausreichend, um die Bedeutung von Spannungsabweichungen an einem bestimmten Punkt im Netz festzustellen. Spannungsereignisse wie Spannungseinbrüche oder transiente Überspannungen treten jedoch selten und an verschiedenen Punkten im Verteilnetz auf. Vor diesem Hintergrund ist eine kontinuierliche Überwachung der betreffenden Spannungsqualitätsmerkmale erforderlich (Fumagalli et al., 2007).

Hinsichtlich der Kosten-Nutzen-Aspekte ist festzustellen, dass die Messung von Kurzzeitunterbrechungen in der Regel keinen erheblichen Mehraufwand für die Netzbetreiber bedeutet, sofern der Netzzustand erst nach Abschluss aller automatischen Vorgänge im Netz, wie Schutzauslösungen und automatische Umschaltungen, betrachtet wird (E-Bridge, ZEW, FGH, 2020). Die DIHK spricht sich für eine stichprobenartige Erhebung von Stromversorgungsunterbrechungen unter drei Minuten als Ergänzung des offiziellen Monitorings aus (DIHK, 2024).

Weiterentwicklung des Q-Elements

Die Überwachung von Spannungsqualität und eine damit einhergehende verbesserte Datenbasis wäre eine wesentliche Voraussetzung zur Weiterentwicklung des Q-Elements. Eine fundierte Datengrundlage würde es dem Regulierer ermöglichen, geeignete Indikatoren zur Abbildung der Spannungsqualität in den einzelnen Netzgebieten auszuwählen und auf dieser Basis angemessene Grenzwerte festzulegen. Wie in Kapitel 3 aufgezeigt wird, liegt derzeit keine repräsentative Datengrundlage zur Spannungsqualität auf der Nieder- und Mittelspannungsebene vor. Zur Erweiterung des Q-Elements um Parameter der Spannungsqualität ist es daher erforderlich, zunächst eine verlässliche Datengrundlage in den jeweiligen Netzgebieten zu schaffen.

Auf Grundlage von Spannungsqualitätsdaten könnte eine Methodik entwickelt werden, die eine Verknüpfung der Spannungsqualitätsindikatoren mit finanziellen Anreizen vorsieht. Die Integration der Spannungsqualität in das Q-Element in Form eines Bonus-Malus System könnte bei den Netzbetreibern systematische Anreize schaffen, Spannungsqualitätsparameter wie beispielsweise Frequenz, Flicker und Asymmetrien, zu überwachen und darüber hinaus diese zu verbessern.

Aus rechtlicher Perspektive wäre die Erweiterung des Q-Elements um Merkmale der Spannungsqualität grundsätzlich möglich. Die derzeitige Gesetzeslage im EnWG und in der ARegV lässt einen größeren Handlungsspielraum bei der Bestimmung des Q-Elements zu, der über die Messung von Versorgungsunterbrechungen hinausgeht. So grenzt sich die Legaldefinition von Netzzuverlässigkeit in der ARegV nicht eindeutig von der Spannungsqualität ab, da sie als „Fähigkeit des Energieversorgungsnetzes, Energie möglichst unterbrechungsfrei und unter Einhaltung der Produktqualität zu transportieren“ definiert wird (§ 19 Abs. 3 ARegV). Die Produktqualität, hinsichtlich beispielsweise der Frequenz, Flickern und Asymmetrie, könnte daher rechtskonform in der aktuellen Bestimmung des Q-Elements Anwendung finden.

Mehrstufiger Ansatz

Um die Qualitätsregulierung in Deutschland weiterzuentwickeln, wäre ein stufenweiser Ansatz denkbar. Begonnen werden würde dabei mit der verpflichtenden Messung von Kurzzeitunterbrechungen, um Stromversorgungsunterbrechungen ganzheitlich abzubilden.

Darauf aufbauend könnten weitere Spannungsqualitätsmerkmale wie Spannungseinbrüche, Flicker und Oberschwingungen verpflichtend gemessen werden, da eine robuste Datengrundlage eine notwendige Voraussetzung ist, um Spannungsqualität zu bewerten und ggf. zukünftig in der Qualitätsregulierung in einem Bonus-Malus-System zu verankern. Auch hier könnte mit der verpflichtenden punktuellen Messung von Spannungsqualitätsmerkmalen an kritischen Netzpunkten begonnen werden. Bei Hinweisen auf eine unzureichende Spannungsqualität könnten diese Messungen zu flächendeckenden Messungen ausgeweitet werden.

Bei Hinweisen auf eine unzureichende Spannungsqualität in Deutschland sollte über eine regulatorische Verankerung von Spannungsqualität in der Qualitätsregulierung nachgedacht werden. Hierdurch würden dann neben Unterbrechungen auch jene Parameter, die die Produktqualität kontinuierlich gewährleisten, abgedeckt werden. Eine Möglichkeit wäre es die Verteilnetzbetreiber dazu gesetzlich zu verpflichten, die Anforderung an die Spannungsqualität gemäß der deutschen Fassung der Norm EN 50160 einzuhalten, so wie es in den meisten europäischen Ländern der Fall ist (siehe Kapitel 4). Alternativ könnten einzelne Spannungsqualitätsparameter in das Q-Element integriert und mit finanziellen Anreizen verknüpft werden.

5.2 Herausforderungen bei der Berücksichtigung von Spannungsqualität

Aus ökonomischer Perspektive ist die Regulierung von Spannungsqualität mit einer Kosten-Nutzen-Abwägung verbunden.

In Bezug auf die Ausweitung der Messung von Qualitätsaspekten ist es von zentraler Bedeutung, dass der Regulierer die Kosten der Messung der Spannungsqualität dem potenziellen Nutzen einer erhöhten Transparenz über die Spannungsqualität im Netz gegenüberstellt. Verschiedene Kundengruppen, wie etwa Industrie- und Haushaltskunden, sind in unterschiedlichem Maße von Spannungsqualitätsproblemen betroffen. Dementsprechend unterscheidet sich auch der Nutzen, den diese Kundengruppen aus einer höheren Transparenz und der ggf. damit einhergehenden Verbesserung von Spannungsqualität ziehen könnten. Dieser ökonomische Trade-Off, bedingt durch heterogene Kundenpräferenzen, steht einer fehlenden Differenzierung der Kosten nach Kundengruppen gegenüber. So werden in Deutschland die Kosten des Messtellenbetriebs durch die Netzbetreiber unabhängig vom konkreten Nutzen der Messungen über die Netznutzungsentgelte auf alle Letztverbraucher umgelegt.

Die Berücksichtigung von Kosten-Nutzen-Aspekten bei der Messung und Regulierung der Spannungsqualität wird auch durch das Fehlen öffentlich zugänglicher Daten erschwert. Zum einen liegen keine gesicherten Angaben über die Kosten, die durch die Messung und Regulierung von Spannungsmerkmalen bei den Netzbetreibern und Letztverbrauchern entstehen würden, vor. Zum anderen ist die Quantifizierung des Nutzens punktueller oder flächendeckender Messungen von Spannungsqualitätsmerkmalen in der Praxis bislang nur eingeschränkt möglich. Ein Ansatz zur Nutzenbewertung besteht in der Erfassung und monetären Bewertung von Schäden, die infolge unzureichender Spannungsqualität entstehen.

Wird zur Erfassung der Schäden und die Präferenz für Qualitätsverbesserung auf die Berichterstattung der etwaig Geschädigten zurückgegriffen, muss beachtet werden, dass

hierüber asymmetrische Informationen vorliegen. Je nach Ausgestaltung der Umlage von Mehrkosten auf die Netznutzende können hierdurch Anreize für Fehlangaben entstehen: Werden wie im bisherigen Regulierungssystem die Kosten für die Qualitätserhöhung auf alle Netznutzende umgelegt, können einzelne Netznutzende davon profitieren, einen höheren Bedarf anzugeben, da sie die Mehrkosten hierfür nur zu Teilen tragen müssen. Werden andererseits die Mehrkosten abweichend vom derzeitigen Regulierungssystem nur auf vulnerable Netznutzende umgelegt, können Anreize zum Trittbrettfahren entstehen. Diese auf die fehlende Produktdifferenzierung bzw. Ausschließbarkeit von Kundengruppen von der Spannungsqualität zurückgehenden Herausforderungen sollten bei einer Berücksichtigung der Spannungsqualität in der Netzregulierung konsistent mitgedacht werden.

Die systematische Erhebung von Schäden durch unzureichende bzw. Präferenzen für die Produktqualität würde einen ersten Ansatz zur ökonomischen Bewertung des tatsächlichen Nutzens einer verbesserten Spannungsqualität liefern. Jedoch sollte eine Kosten-Nutzen-Analyse nicht nur statisch, sondern intertemporal erfolgen. Vor dem Hintergrund des Wegfalls von Blindleistung im Zuge des Kohleausstiegs könnten Spannungsqualitätsprobleme in der Zukunft häufiger auftreten. Potenzielle zukünftige Schäden sollten daher bei der Kosten-Nutzen-Abwägung der Messung und Regulierung von Spannungsqualität berücksichtigt werden, insbesondere auch vor dem Hintergrund der Vorlaufzeiten regulatorischer Veränderungen bzw. Anpassungen in der Netzbewirtschaftung. Zudem könnte eine frühzeitige Erfassung von Spannungsqualitätsmerkmalen präventiv dazu beitragen, Schäden durch unzureichende Spannungsqualität zu vermeiden.

Bei der Integration der Spannungsqualität in das Q-Element treten neben dem Trade-Off der Qualitätsdifferenzierung auch Herausforderungen aufgrund der Multidimensionalität auf. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, weist die Spannungsqualität verschiedene Dimensionen auf, die jeweils unterschiedliche Spannungsqualitätsparameter betreffen. Im Q-Element sollte der Regulierer die Spannungsqualitätsparameter berücksichtigen, bei denen der Grenznutzen einer Qualitätsverbesserung die Grenzkosten übersteigt. Da die Netznutzer die Dimensionen der Spannungsqualität unterschiedlich bewerten, steht der Regulierer vor der Herausforderung eine Auswahl an Spannungsqualitätsparameter zu treffen, die mit finanziellen Anreizen im Q-Element verknüpft werden würden. Dabei ist zu beachten, dass die Einbeziehung mehrerer Qualitätsindikatoren in das Qualitätselement den Erfolg eines Regulierungssystems beeinträchtigen könnte. So heben Fumagalli et al. (2007) hervor, dass eine erfolgreiche Qualitätsregulierung in der Regel auf einer begrenzten Anzahl von Qualitätsindikatoren basiert.

Angesichts beider Trade-Offs sollten starke Eingriffe in die Anreizregulierung erst dann in Erwägung gezogen werden, wenn sichergestellt ist, dass die Grenzkosten einer höheren Spannungsqualität nicht den Grenznutzen übersteigen. Aufgrund der Multidimensionalität und der unterschiedlichen Präferenzen der Netznutzer gestaltet sich eine solche Kosten-Nutzen-Abwägung in der Praxis jedoch als äußerst komplex aus.

Vor dem Hintergrund unterschiedlicher Nutzungspräferenzen wäre es denkbar, unterschiedliche Qualitätsniveaus in verschiedenen Netzgebieten anzustreben. Dies ginge jedoch wiederum mit einer erhöhten Komplexität des regulatorischen Rahmens und einer schlechteren Vergleichbarkeit der Netzbetreiber einher, was sich negativ auf den Effizienzvergleich im Rahmen der Anreizregulierung auswirken würde.

6 Zusammenfassung

Der fortschreitende Ausbau von EE stellt neue Herausforderungen an die Stabilität und Qualität der Stromversorgung in allen Netzebenen. Ein relevanter Aspekt hierbei ist die Spannungsqualität, welche sich durch die zunehmende Einspeisung von EE in Kombination mit dem Rückgang konventioneller Kraftwerke und dem damit verbundenen Wegfall von Blindleistung verschlechtern könnte (DFBEW, 2019). Besonders betroffen wären empfindliche Industrieanlagen, bei denen Spannungsqualitätsprobleme erhebliche wirtschaftliche Schäden verursachen können.

Derzeit erfolgt die Messung der Spannungsqualität in Deutschland fast ausschließlich in der Hoch- und Höchstspannungsebene (50hertz et al, 2017). In der Mittel- und Niederspannungsebene, also dort, wo viele Industriekunden angeschlossen sind, besteht keine Messpflicht - entsprechend fehlen repräsentative Daten. Eine flächendeckende Datengrundlage zur Spannungsqualität liegt nicht vor, was die Einschätzung des Handlungsbedarfs erschwert.

Um die Spannungsqualität systematisch zu regulieren, wäre ein erster Schritt, Netzbetreiber zur Erhebung von Spannungsqualitätsparametern zu verpflichten. Eine punktuelle Messung an kritischen Netzpunkten könnte zunächst Transparenz schaffen. Perspektivisch könnte die im Messstellenbetriebsgesetz vorgesehene Einführung intelligenter Messsysteme zur kontinuierlichen Erfassung von Spannungsdaten genutzt werden (§34 MsbG). Eine umfassende Datengrundlage wäre notwendig, um die Spannungsqualität ggf. in das Q-Element der Anreizregulierung zu integrieren.

Da die Qualitätsregulierung bislang ausschließlich Kennzahlen zur Netzzuverlässigkeit berücksichtigt, wäre eine Erweiterung um Spannungsqualitätsparameter ein möglicher nächster Schritt. Hierbei müsste der Regulierer sorgfältig abwägen, welche Spannungsqualitätsaspekte volkswirtschaftlich relevant sind und wo der Nutzen einer Verbesserung die entstehenden Kosten übersteigt. Aufgrund der Heterogenität der Nutzerpräferenzen ist dies mit regulatorischer Komplexität verbunden.

Die Einführung verpflichtender Spannungsqualitätsmessungen und ggf. der Einsatz netzoptimierender Betriebsmittel zur Steigerung der Spannungsqualität ist mit Kosten für Netzbetreiber verbunden, die in der Regel über Netzentgelte an Letztverbraucher weitergegeben werden. Daher ist es essenziell, dass der Regulierer Maßnahmen unter einer Kosten-Nutzen-Analyse abwägt. Derzeit fehlen belastbare Informationen zu den Kosten und dem Nutzen flächendeckender Spannungsqualitätsmessungen. Zur Bewertung wäre eine begleitende Erhebung wirtschaftlicher Schäden durch Spannungsqualitätsprobleme sinnvoll.

Literaturverzeichnis

- 50hertz, amprion, Tennet, TransnetBW 2017. Aktuelles und zukünftiges Rollenverständnis der Übertragungsnetzbetreiber insbesondere hinsichtlich der Zusammenarbeit mit Verteilnetzbetreibern. Online verfügbar unter https://www.amprion.net/Dokumente/Presse/Stellungnahmen/2017/2017_08_30_langfassung_positionspapier_tsodso.pdf, zuletzt geprüft am 07.01.2025.
- ARegV: Anreizregulierungsverordnung vom 29. Oktober 2007 (BGBl. I S. 2529), die zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 22. Dezember 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 405) geändert worden ist.
- BDEW & VKU 2019. Weiterentwicklung der Qualitätsregulierung: BNetzA-Konsultation der Vorschläge von E-Bridge, ZEW und FGH.
- BIHK 2017. Energiewende im Strommarkt - Versorgungsqualität. Industrie- und Handelskammern in Bayern.
- BNetzA 2021. Bericht zur Spannungsqualität: Bericht zur freiwilligen Umfrage über die Spannungsqualität in Unternehmen.
- BNetzA 2023a. Bericht zum Qualitätselement der 4. Regulierungsperiode: Bestimmung der Referenzwerte und des Monetarisierungsfaktors Anlage 1 zur Festlegung BK8-23/006-A. Bonn.
- BNetzA 2023b. Festlegung über die nähere Ausgestaltung und das Verfahren zur Bestimmung des Qualitätselementes hinsichtlich der Netzzuverlässigkeit für Elektrizitätsverteilernetze nach den §§ 19 und 20 ARegV für die vierte Regulierungsperiode (Jahre 2024 bis einschließlich 2028 - Methodikbeschluss): Aktenzeichen: BK8-23/006-A. Bonn.
- BNetzA 2024.: Eckpunkte zu den Methoden der Anreizmechanismen für die Versorgungsqualität von Energieversorgungsnetzen - insbesondere zur Steigerung der Energiewendekompetenz. Hg. v. Große Beschlusskammer Energie. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/GBK/Methoden_Ebene2/Qualitaetselement/Eckpunkte.pdf?__blob=publicationFile&v=3, Zugriff am 07.01.2025.
- BNetzA 2025a. Festlegung der Datenerhebung zur Weiterentwicklung der Qualitätsregulierung hinsichtlich der Netzzuverlässigkeit, der Netzleistungsfähigkeit und der Netzservicequalität im Strombereich (GBK-24-02-1#5).
- BNetzA 2025b. Qualitätsregulierung und Qualitätselement. Verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/BK08/BK8_05_EOG/57_QElement/start.html, Zugriff am 07.01.2025.
- Bundestag 2023. Bundesgesetzblatt Teil I - Gesetz zum Neustart der Digitalisierung der Energiewende. Verfügbar unter <https://www.recht.bund.de/bgbl/1/2023/133/VO.html>.
- CEER & ECRB 2022. 7th CEER-ECRB Benchmarking Report on the Quality of Electricity and Gas Supply.

- Delfanti, M., Fumagalli, E., Garrone, P., Grilli, L. & Lo Schiavo, L. 2010. Toward Voltage-Quality Regulation in Italy. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(2): 1124-1132.
- DFBEW 2019. Versorgungszuverlässigkeit, Spannungsqualität und Kosten: Betrachtung der Stromnetze in Deutschland und Frankreich. Deutsch-französische Büro für die Energiewende.
- DIHK 2024. Betriebe verzeichnen hohe Zahl an Stromunterbrechungen: Ergebnisse einer DIHK-Unternehmensbefragung von Februar 2024. Verfügbar unter <https://www.dihk.de/de/themen-und-positionen/wirtschaftspolitik/energie/betriebe-verzeichnen-hohe-zahl-an-stromunterbrechungen-116894>, Zugriff am 07.01.2025.
- E-Bridge, ZEW, FGH 2020. Gutachten zur Konzeptionierung eines Qualitätselementes.
- E-Control 2024. Statistik über die Spannungsqualität in Österreich 2024. Berichtsjahr 2023. Online verfügbar unter https://www.e-control.at/documents/1785851/0/2023_PQ_Bericht_final.pdf/33543c8e-2117-e6cb-8cb6-096b92737556?t=1731317364229, Zugriff am 07.01.2025.
- EnWG: Energiewirtschaftsgesetz vom 7. Juli 2005 (BGBl. I S. 1970, 3621), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 23. Dezember 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 448) geändert worden ist.
- EU 2019. DIRECTIVE (EU) 2019/944 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU. Verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0944>, Zugriff am 07.01.2025.
- EVU 2025. DIE NETZQUALITÄTSKRITERIEN NACH EN 50160. Verfügbar unter https://www.evu-messtechnik.de/docs/EVU-DIN_EN_50160-i.pdf, Zugriff am 07.01.2025.
- Fumagalli, E., Lo Schiavo, L. & Delestre, F. 2007. *Service Quality Regulation in Electricity Distribution and Retail*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Geibel, D. 2017. Bereitstellung von Zusatzfunktionalitäten durch multifunktionale PV-Batterie-Stromrichtersysteme in Verteilungs- und Industrienetzen.
- MsbG. Messstellenbetriebsgesetz vom 29. August 2016 (BGBl. I S. 2034), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 21. Februar 2025 (BGBl. 2025 I Nr. 51) geändert worden ist.
- Ministry of Petroleum and Energy Norway 2004. Regulations relating to the quality of supply in the Norwegian power system. Online verfügbar unter https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/oed/vedlegg/lover-og-reglement/reg_no_1557_of_30_november_2004.pdf, Zugriff am 07.01.2025.
- N-ERGIE Netz GmbH 2020. Versorgungszuverlässigkeit und Einflüsse auf die Spannungsqualität im Versorgungsgebiet der N-ERGIE Netz GmbH.
- Seppälä, J. & Järventausta, P. 2024. Analyzing Supply Reliability Incentive in Pricing Regulation of Electricity Distribution Operators. *Energies*, 17(6).
- VDE 2023. VDE FNN Störungs- und Verfügbarkeitsstatistik 2022. Verfügbar unter <https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/versorgungsqualitaet/versorgungszuverlaessigkeit/versorgungszuverlaessigkeit>, Zugriff am 07.01.2025.

Weldemariam, L. E., Cuk, V. & Cobben, J. F. G. 2019. A proposal on voltage dip regulation for the Dutch MV distribution networks. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 29(2).

Abkürzungsverzeichnis

ARegV	Anreizregulierungsverordnung
ASIDI	Average System Interruption Duration Index
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BIHK	Bayerischer Industrie- und Handelskammertag
BK	Beschlusskammer
BNetzA	Bundesnetzagentur
CAIDI	Customer Average Interruption Duration Index
CEER	Council of European Energy Regulators
DIHK	Deutsche Industrie- und Handelskammer
EE	Erneuerbare Energien
EN	Europäische Norm
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EU	Europäische Union
EWI	Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln gGmbH
FNN	Forum Netztechnik/Netzbetrieb
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission
MAIFI	Monetary Average Interruption Frequency Index
MsbG	Messstellenbetriebsgesetz
Q-Element	Qualitätselement
SAIDI	System Average Interruption Duration Index
SAIFI	System Average Interruption Frequency Index
VIK	Verband der Industriellen Energie- & Kraftwirtschaft
VKU	Verband kommunaler Unternehmen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Definition der Versorgungsqualität und ihrer Teilbereiche in Anlehnung an BNetzA (2025b)	3
Abbildung 2: Klassifizierung Spannungseinschränkungen, eigene Darstellung in Anlehnung an N-ERGIE Netz GmbH (2020)	4
Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung von ausgewählten Spannungsereignissen 2018 - 2020 1. Halbjahr, eigene Darstellung in Anlehnung an BNetzA (2021).....	9
Abbildung 4: Verantwortungsverteilungskurven in Italien und Frankreich, eigene Darstellung in Anlehnung an Woldemariam et al. (2019)	15

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überwachung der Spannungsqualität auf Verteilnetzebene nach eigener Auswertung auf Basis von CEER & ECRB (2022)	12
--	----