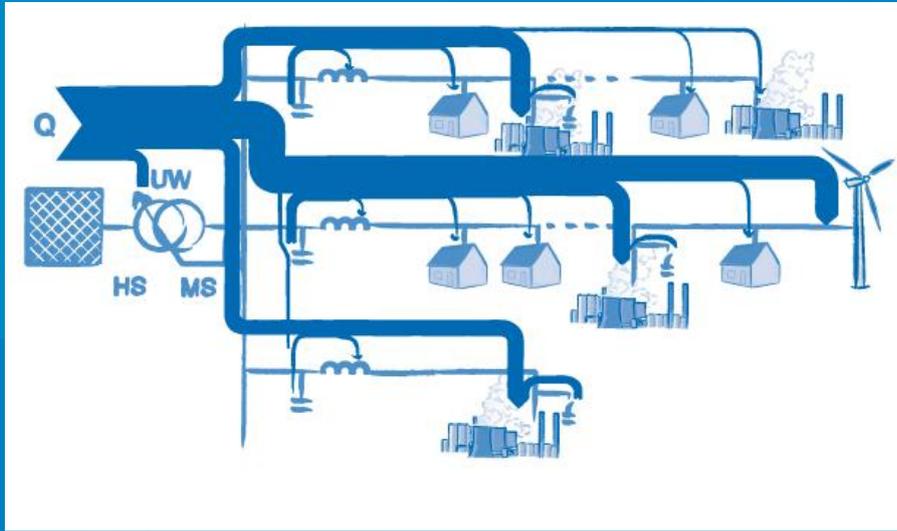


# FNN-Hinweis



## BLINDLEISTUNGS- MANAGEMENT IN VERTEILUNGNETZEN

November 2014

**FNN**

**VDE**

## Impressum

© Forum Netztechnik / Netzbetrieb im VDE (FNN)

Bismarckstraße 33, 10625 Berlin

Telefon: + 49 (0) 30 3838687 0

Fax: + 49 (0) 30 3838687 7

E-Mail: [fnn@vde.com](mailto:fnn@vde.com)

Internet: <http://www.vde.com/fnn>

November 2014

# **Blindleistungsmanagement in Verteilungsnetzen**

**November 2014**

## Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>8</b>
Anregungen/Anmerkungen .....	8
<b>Einleitung</b> .....	<b>9</b>
Motivation .....	9
Zielsetzung und technisch-betrieblicher Betrachtungsbereich.....	10
Inhalt und Aufbau des FNN-Hinweises .....	12
<b>1 Anwendungsbereich</b> .....	<b>13</b>
<b>2 Normative Verweisungen</b> .....	<b>14</b>
<b>3 Begriffe und Abkürzungen</b> .....	<b>15</b>
3.1 Begriffe .....	15
3.1.1 Blindleistung Q, [5].....	15
3.1.2 Blindleistungsbedarf (Q-Bedarf) .....	15
3.1.3 Blindleistungsmanagement (Q-Management) .....	15
3.1.4 Blindleistungsverhalten (Q-Verhalten).....	16
3.1.5 Blindleistungsvermögen (Q-Vermögen) .....	16
3.1.6 Blindleistungsänderungsfähigkeit (Q-Änderungsfähigkeit).....	16
3.1.7 Dynamische Netzstützungsblindleistung (Dynamische Netzstützungs-Q).....	16
3.1.8 Eigenbilanzblindleistung (Eigen-Bilanz-Q) .....	16
3.1.9 Erzeugungsanlage (EZA), [5] .....	16
3.1.10 Erzeugungseinheit (EZE), [5] .....	16
3.1.11 Fremdbilanzblindleistung (Fremd-Bilanz-Q) .....	16
3.1.12 Mittelspannungsnetz (MS-Netz), [5] .....	16
3.1.13 Natürliche Leistung einer Leitung, [37] .....	17
3.1.14 Netzanschlusspunkt (NAP), [5].....	17
3.1.15 Quasi-stationäre Netzstützungsblindleistung, (Quasi-stationäre Netzstützungs-Q) .....	17
3.1.16 Blindleistungsbilanz (Q-Bilanz).....	17
3.1.17 Blindleistungshaushalt (Q-Haushalt) .....	17
3.1.18 Scheinleistung S, [5] .....	17
3.1.19 Spannungshaltungsblindleistung (Spannungshaltung-Q) .....	17
3.1.20 Grundschiebungsblindleistung / Verschiebungsblindleistung (Grundschiebungs-Q / Verschiebungs-Q), [3,4].....	17
3.1.21 Verschiebungsfaktor [6].....	18
3.1.22 Wirkleistung P, [5].....	18
3.2 Abkürzungen.....	18
<b>4 Grundlagen zur Anwendung</b> .....	<b>20</b>
<b>5 Beeinflussung des Blindleistungs-Verhaltens</b> .....	<b>26</b>
5.1 Blindleistungsfähige Erzeugungsanlagen und Speicher .....	27
5.1.1 Q-Bereitstellung im Rahmen der Richtlinien.....	27
5.1.2 Q-Bereitstellung im Rahmen bilateraler Vereinbarungen .....	28
5.1.3 Q-Änderungsfähigkeit der Erzeugungsanlage.....	30

5.1.4	Q-Änderungsfähigkeit von statischen und dynamischen Kompensationen .....	32
5.2	Kompensationsanlagen .....	32
5.2.1	Allgemeines .....	32
5.2.2	Fremde Kompensationsanlagen.....	33
5.2.3	Q-Bereitstellung im Rahmen der technischen Anschlussregeln .....	33
5.2.4	Q-Bereitstellung im Rahmen bilateraler Vereinbarungen.....	34
5.2.5	Q-Bereitstellung von Erzeugungsanlagen in Industrienetzen mit kundeneigenen Kompensationseinrichtungen .....	34
5.2.6	Eigene Kompensationsanlagen des Verteilungsnetzbetreibers .....	34
5.2.7	Mischanlagen.....	34
5.3	Netzstruktur und Netzbetrieb.....	35
5.3.1	Netztopologie.....	35
5.3.2	Spannungsniveau .....	37
5.3.3	Erweiterung des Q-Vermögens durch direkt wirkende Spannungsregelung .....	38
<b>6</b>	<b>Systemanalyse .....</b>	<b>40</b>
6.1	Messwert-basierte Analyse des Q-Verhaltens des eigenen Netzes .....	41
6.2	Simulationsbasierte Analyse des Q-Verhaltens des eigenen Netzes .....	45
6.2.1	Charakteristische Lastflusskombinationen (Netzplanungsfälle).....	46
6.2.2	Zeitreihenanalyse .....	48
6.2.3	Analyse mithilfe probabilistischer Lastflussrechnung .....	49
<b>7</b>	<b>Umsetzung eines Blindleistungs-Managements .....</b>	<b>52</b>
7.1	Schnittstelle mit vorgelagertem bzw. benachbarten Netzen .....	53
7.2	Verhalten bei abweichenden Schaltzuständen und Störungen.....	54
7.2.1	Abweichungen vom Normalschaltzustand.....	54
7.2.2	Anlagenverhalten bei Störung oder Kommunikationsausfall.....	54
7.3	Spannungshaltung vs. Blindleistungshaushalt .....	55
7.3.1	Mögliche Wechselwirkungen und Auswirkungen eines Q-Managements.....	55
7.3.2	Einfluss der Entfernung der Erzeugungsanlage vom Umspannwerk.....	55
7.4	Einsatz eigener und fremder Betriebsmittel .....	57
7.5	Erzeugungsanlagen und Speicher .....	58
7.5.1	Grundsätzlich verfügbare Möglichkeiten der Q-Beeinflussung .....	58
7.5.2	Stabilität bei spannungsabhängiger Regelung.....	60
7.5.3	Kombination Q-Regelungs- und - Steuerungsverfahren bei mehreren Erzeugungsanlagen in einem Netz.....	61
7.5.4	Bewertung der Kennlinienverfahren .....	64
7.6	Ausblick: Kommunikations-basiertes Blindleistungsmanagement .....	64
7.6.1	Manuelle oder automatisierte Vorgaben aus der Netzführung.....	64
7.6.2	Zukunftsmusik: Zustandsschätzung und optimierte, automatisierte Vorgaben ...	64
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>66</b>

## Bildverzeichnis

Bild 1:	Schematische Darstellung der Blindleistungsflüsse in einem MS-Netz: bei Schwachlast ohne dezentrale Einspeisung (links) und bei Starklast mit dezentraler Einspeisung (rechts).....	10
Bild 2:	Betrachtungsbereich mit den zu berücksichtigenden Schnittstellen und Unterlagen (G=Generator; V=Verbraucheranlage).....	11
Bild 4:	Begriffsdarstellung im Verbraucherzählpeilsystem .....	20
Bild 5:	Erläuterung zum Q-Vermögen des Netzes .....	21
Bild 6:	Erläuterung zur Q-Änderungsfähigkeit des Netzes .....	22
Bild 7:	Übersicht zu den Beeinflussungsmöglichkeiten des Q-Verhaltens und deren weitere Behandlung im vorliegenden FNN-Hinweis .....	26
Bild 8:	Beispielhaftes Q-Vermögen von einer Erzeugungseinheit (Wind).....	29
Bild 9:	Beispielhaftes Q-Vermögen von neueren Erzeugungseinheiten (Photovoltaik) .....	30
Bild 10:	Aufbau der Regelstrecke einer Erzeugungsanlage (Beispiel).....	31
Bild 11:	Veranschaulichung der Veränderung des Verschiebungsfaktors am Beispiel eines Verbrauchers (cosφ 0,93 ind.) mit Photovoltaik-Anlage (Betrieb mit cosφ 0,95 ind.) .	35
Bild 12:	Beispielhafter Q-Bedarf von typischen Ortsnetztransformatoren bzw. typischer HS/MS-Transformatoren .....	36
Bild 13:	Auf die Leitungslänge (Kabel und Freileitung) bezogener Q-Bedarf .....	37
Bild 14:	Ablaufdiagramm zur Analyse des Q-Verhaltens .....	40
Bild 15:	P-Q-Diagramm eines Netzgebietes an der Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators gemessen (Umspannwerk mit 2 Transformatoren; Summe der MS-seitigen ¼-h-Messungen über ein Jahr) .....	41
Bild 16:	Beispielhafte P-Q-Diagramme bei unter- und oberspannungsseitiger Messung .....	42
Bild 17:	Beispielhafte P-Q-Diagramme bei unter- und oberspannungsseitiger Messung am Erzeugungsanlagen-Anschlusstransformator .....	42
Bild 18:	Beispielhafte P-Q-Diagramme für Stadt- und Landnetze und deren Durchmischung	43
Bild 19:	Beispielhafte P-Q-Diagramme für Erzeugungsanlagen .....	43
Bild 20:	Beispielhafte Darstellung von P- und Q-Gängen und den daraus resultierenden cosφ-Werten im Zeitbereich einer Woche für die vier Quadranten .....	45
Bild 21:	Prinzipskizze des Musternetzes, in Anlehnung an [25].....	47
Bild 22:	Q-Beiträge für den unbeeinflussten Ausgangsfall .....	47
Bild 23:	Wirkleistungsbilanz des Musternetzes .....	48
Bild 24:	Q-Bilanz des Musternetzes im unbeeinflussten Ausgangsfall .....	49
Bild 25:	Mögliche Q-Bandbreite eines beispielhaften MS-Netzes.....	50
Bild 26:	Prozessschritt Umsetzung eines Q-Managements .....	52
Bild 27:	Darstellung der höchstzulässigen Erzeugungsanlagen-Anschlussleistung einer Leitung in Abhängigkeit der Anschlussentfernung und der Bereiche ihrer anschlussbegrenzenden Kriterien .....	56
Bild 28:	Blindleistungsflüsse zwischen den Spannungsebenen für den Stark- und Schwachlastfall .....	69
Bild 29:	Q-Bilanz des Musternetzes in verschiedenen Beeinflussungsfällen.....	71
Bild 30:	Q-Vermögen und Q-Beitrag der Erzeugungsanlagen bei Q-Vermögen gem. BDEW MS-RL [6] .....	71

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht zu Veröffentlichungen mit Q-Vorgaben .....	23
Tabelle 2: Beispielhafte Q-Beeinflussungsmöglichkeiten von Steuer- und Regeleinheiten durch den Verteilungsnetzbetreiber .....	24
Tabelle 3: Bereichs-Vorgaben für den Verschiebungsfaktor in Abhängigkeit der Spannungsebene .....	28
Tabelle 4: Erläuterung zu den beispielhaften Zeitdauern aus Bild 10.....	31
Tabelle 5: Darstellung des Blindleistungsanteils und der Scheinleistungserhöhung bezogen auf die Wirkleistungsentnahme .....	33
Tabelle 6: Betriebsmittelmatrix hinsichtlich wesentlicher Aspekte für das Q-Management ohne Berücksichtigung der Änderung von Netzverlusten .....	58
Tabelle 7: Möglichkeiten der Q-Beeinflussung mittels Erzeugungsanlage (üb=übererregt; un=untererregt).....	60
Tabelle 8: Kombinationen von Q-Regelungs- bzw. –Steuerungsverfahren .....	62
Tabelle 9: Vorteile/Besonderheiten der Kombinationsmöglichkeiten von Erzeugungsanlagen-Regelungsstrategien.....	63
Tabelle 10: Übersicht zu den Funktionen und deren Anwender .....	70

## Vorwort

Die zunehmenden Veränderungen in der Erzeugungs- und Laststruktur, insbesondere in den NS- und MS-Netzen, führen zu veränderten Wechselwirkungen zwischen den Verteilungsnetzen mit den überlagerten Übertragungsnetzen. Dies betrifft sowohl den Wirkleistungsfluss als auch den Blindleistungsaustausch (Q-Austausch).

Um auch weiterhin einen sicheren, effizienten und zuverlässigen Betrieb der Netze zu ermöglichen, kommt u. a. der lokalen bzw. regionalen Spannungshaltung eine große Bedeutung zu, genauso wie dem Ausgleich und der Bereitstellung der Blindleistung (Q-Haushalt).

Der FNN-Hinweis wurde von der Projektgruppe „Blindleistungsmanagement“ des Forums Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN) erarbeitet.

## Anregungen/Anmerkungen

Es ist eine Weiterentwicklung des vorliegenden FNN-Hinweises vorgesehen. Entsprechende Anregungen/Anmerkungen hierzu richten Sie bitte unter Angabe der Kontaktdaten und des fachlichen Hintergrund des Kommentators (z. B. Netzbetreiber, Erzeugungsanlagen-Betreiber, Hersteller, Dienstleister) an folgende Adresse:

Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN)  
Bismarckstr. 33  
10625 Berlin  
Tel.: + 49 (0) 30 3838687 0  
Fax: + 49 (0) 30 3838687 7  
E-Mail: [fnn@vde.com](mailto:fnn@vde.com)  
Internet: [www.vde.com/fnn](http://www.vde.com/fnn)

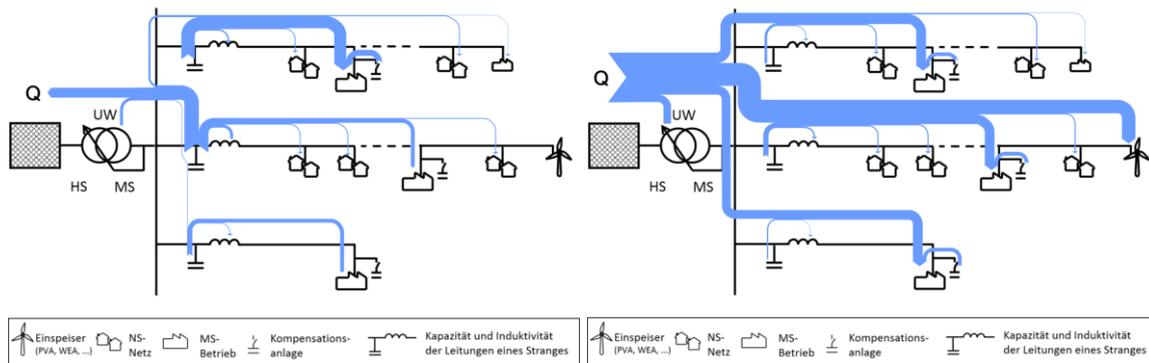
## Einleitung

### Motivation

Im Zuge der Energiewende stellen sich viele Herausforderungen für Netzbetreiber und Hersteller und Betreiber von Anlagen, um weiterhin eine hohe Versorgungsqualität zu gewährleisten. Eine davon betrifft die Bereitstellung und den Einsatz von Blindleistung (Q). Da die bereitzustellende Blindleistung Übertragungskapazitäten beansprucht und Verluste verursacht, ist es das Ziel, hier stets eine optimierte Verteilung für den sicheren und zuverlässigen Systembetrieb zu finden. Dabei sind zum Teil vollkommen unterschiedliche Aspekte für die Übertragungsebene und die Verteilungsebene zu beachten.

Für den Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) resultiert die Frage, wie er künftig die notwendige Blindleistung für das Gesamtsystem bereitstellen soll. Aufgrund der Veränderungen in der Erzeugungs- und Laststruktur und der derzeit nur begrenzt zur Verfügung stehenden bzw. wegfallenden Elemente (z. B. Kraftwerke) zur Blindleistungsbereitstellung im Übertragungsnetz erwächst ein zusätzlicher Handlungsbedarf zur Aufrechterhaltung eines ausgeglichenen Blindleistungshaushalts. Ist die Bilanz regional nicht ausgeglichen, muss Blindleistung über größere Distanzen aus anderen Regionen bezogen oder in andere Regionen geliefert werden, was entsprechende Spannungsunterschiede bewirkt. Dies kann bei zu hohen Spannungen zu Betriebsmittelzerstörungen und bei zu tiefen Spannungen zum Spannungskollaps führen. Um einen zu hohen Blindleistungstransport im Übertragungsnetz zu verhindern und dort gleichzeitig Planungssicherheit bezüglich des Blindleistungsbedarfs der unterlagerten Ebenen zu schaffen, gibt es Vereinbarungen zwischen Verteilungsnetzbetreiber (VNB) und Übertragungsnetzbetreiber, die den Blindleistungsbedarf des Verteilungsnetzes regulieren und beschränken. Für die verbleibende, in den Vereinbarungen zugestandene Abweichung vom ausgeglichenen Blindleistungshaushalt, fungiert das Übertragungsnetz und die daran angeschlossenen Großkraftwerke bislang als "Ausgleichsbecken" für die Blindleistung.

Auf Seiten der Verteilungsnetzbetreiber führt die zunehmende im Verteilungsnetz installierte Erzeugungsleistung zu Problemen und Aufwand, das zulässige Spannungsband einzuhalten. Einen Lösungsbaustein stellt hier die Blindleistung dar, mit der eine Erzeugungsanlage (EZA) zur Spannungshaltung beitragen kann. Neben den Erzeugungsanlagen bestimmen die Verbrauchsanlagen und die Netzbetriebsmittel das Blindleistungsverhalten von Verteilungsnetzen. Mittelspannungsnetze (MS-Netze), die im Fokus dieses Beitrages stehen, verhalten sich in Schwachlastzeiten oftmals kapazitiv. Im Starklastfall oder Starkwindfall beziehen sie i. d. R. induktive Blindleistung aus dem vorgelagerten Netz. Bilder 1 und 2 fassen für ein MS-Netz für den Schwachlastfall ohne Einspeisung und den Starklastfall mit hoher Einspeisung die relevanten Komponenten und die sich ergebenden Blindleistungsflüsse schematisch zusammen.



**Bild 1:** Schematische Darstellung der Blindleistungsflüsse in einem MS-Netz: bei Schwachlast ohne dezentrale Einspeisung (links) und bei Starklast mit dezentraler Einspeisung (rechts)

Mit Blick auf die Spannungs-Blindleistungsregelung durch Erzeugungsanlagen, den weiteren Netzzubau sowie das geänderte Blindleistungsverhalten auf Verbraucherseite sind für die Zukunft erheblich größere Blindleistungsflüsse bzw. eine deutliche Zunahme des induktiven, aber auch kapazitiven Blindleistungsbedarfs zu erwarten, wobei sich innerhalb Deutschlands regional deutliche Unterschiede einstellen können [1; 33; 34] (siehe auch [Anhang A](#)).

Eine Lösungsmöglichkeit besteht z. B. darin, das Potential zur Blindleistungsbereitstellung aus den blindleistungsfähigen Anlagen (z. B. dezentrale Erzeugungsanlagen) in den Verteilungsnetzen verstärkt zu nutzen, indem diese aktiv und situationsbedingt Blindleistung für das Gesamtsystem bereitstellen. Dazu müssen geeignete technische und betriebliche Maßnahmen zum Blindleistungsaustausch an den Schnittstellen zu den Verteilungsnetzen abgestimmt werden. Die praktische Ausgestaltung einer solchen Blindleistungsbetriebsweise stellt Neuland dar. Wegen des großen Einflusses der lokalen Gegebenheiten, werden die noch zu findenden Lösungen jeweils individuell anzupassen sein. Der sich gegenwärtig im Komitologieverfahren befindliche Entwurf des europäischen Network Code „Demand Connection Code“ (NC DCC) [2] enthält für die Schnittstelle ÜNB/VNB eine bewusst offen gestaltete Aufforderung, dieses Thema gemeinsam anzugehen. Somit sind hinsichtlich des Blindleistungsaustausches zwischen Höchstspannungsnetz und Hochspannungsnetz noch entsprechende Regelungen gemeinsam von ÜNB und VNB zu erarbeiten. Dies wird mit der zunehmenden Erzeugung in den unterlagerten Netzen immer wichtiger. Entsprechende Arbeiten zur Beschreibung der Schnittstellen zwischen ÜNB und VNB laufen bereits im FNN.

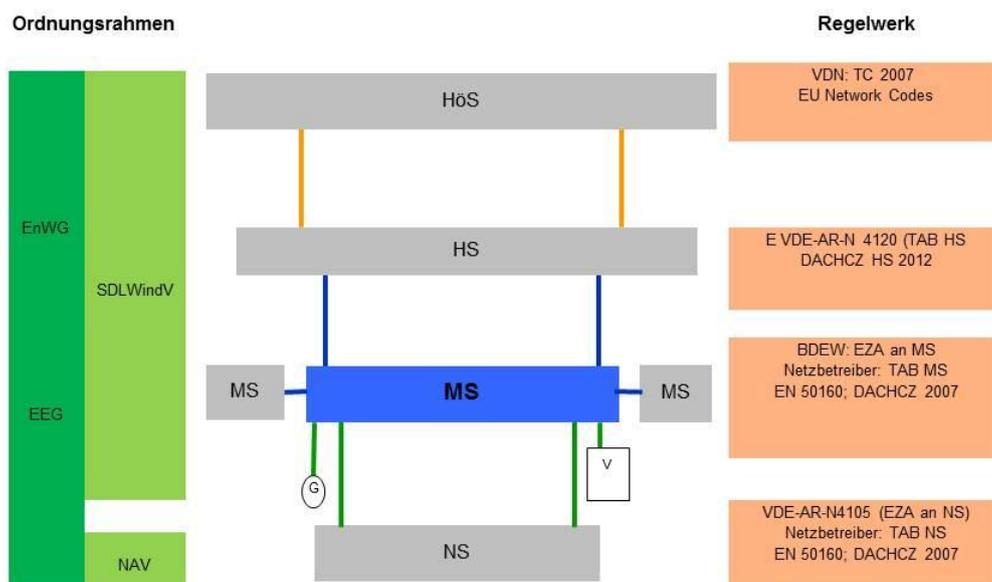
### Zielsetzung und technisch-betrieblicher Betrachtungsbereich

Die Möglichkeiten, regelnd den Blindleistungsfluss im Hoch- und Höchstspannungsnetz (HS-Netz, HöS-Netz) zu beeinflussen, sind allgemein bekannt. Aus diesem Grund stellt der vorliegende FNN-Hinweis das Blindleistungsverhalten von MS-Netzen unter Berücksichtigung der Niederspannungsebene (NS-Ebene) und die Möglichkeiten zu seiner Beeinflussung in den Vordergrund.

Da die vorgelagerten Spannungsebenen HS und HöS aber über die entsprechenden Schnittstellen ebenfalls Auswirkungen auf die Vorgaben für die MS- und NS-Spannungsebene haben, sollen diese entsprechend einbezogen werden. Es werden somit folgende Aspekte berücksichtigt und entsprechende Hinweise zu deren Umgang formuliert:

- Beschreibung der Schnittstellen eines MS/NS-Netzbetreibers zu vorgelagerten, benachbarten und mitunter nachgelagerten Netzbetreibern sowie zu direkt an sein MS-Netz angeschlossenen Anlagenbetreibern,
- Beschreibung heute verfügbarer und aufgrund des Ordnungsrahmens umsetzbarer technischer/betrieblicher Lösungsmöglichkeiten unter Einbeziehung von Herstellern und Anlagenbetreibern,
- Fragestellungen im Rahmen der Netzplanung und des Netzbetriebes, z. B. systemspezifische Abwägung zwischen einer Blindleistungsregelung mit dem Ziel eines ausgeglichenen Blindleistungshaushalts oder einer optimierten Spannungshaltung.

Bild 2 stellt den Betrachtungsbereich sowie die zu berücksichtigenden Gesetze, Verordnungen bzw. Regelwerke dar. Dabei sind auch die hierzu laufenden FNN-Aktivitäten zur Weiterentwicklung der Verteilungsnetze zu beachten. Zudem werden europäische Network Codes erarbeitet, welche sich letztlich auch bis in die NS hinein auswirken können [2].



*Bild 2: Betrachtungsbereich mit den zu berücksichtigenden Schnittstellen und Unterlagen (G=Generator; V=Verbraucheranlage)*

Jede der Schnittstellen in Bild 2 bedarf einer Definition hinsichtlich einer Blindleistungsanforderung und der Ausgestaltung der resultierenden Kommunikationsschnittstellen und des Datenumfanges.

Betrachtet wird nur die Grundswingungs-Blindleistung (auch Verschiebungs-Blindleistung genannt). Zu beachten ist dabei, dass bei den gängigen Messgeräten explizit die Grundswingungsblindleistung ausgewählt werden muss.

Die Oberswingungsbelastung in den Netzen der allgemeinen Stromversorgung nimmt aufgrund der zunehmenden Anzahl an Geräten mit nichtlinearem Verhalten stetig zu. Die Beurteilung der hierdurch verursachten Netzurückwirkungen erfolgt gemäß den Technischen Regeln nach DACHCZ [3, 4] und ist nicht Gegenstand dieses FNN-Hinweises.

Netzwirtschaftliche und rechtliche Aspekte, wie z. B. Abrechnungsfragen oder Fragen zur evtl. Vertragsgestaltung und Details zu Prozessabläufen und Marktgestaltung werden ausgeklammert.

### Inhalt und Aufbau des FNN-Hinweises

In dem vorliegenden FNN-Hinweis werden die verschiedenen durchzuführenden Schritte hin zu einer Umsetzung des Blindleistungsmanagements dargestellt (Bild 3). Ausgehend von der Darlegung der Beeinflussungsmöglichkeiten des Blindleistungsverhaltens werden Hinweise zur Analyse des eigenen Netzes gegeben. Die entsprechenden Kapitel 5 und 6 konzentrieren sich dabei auf die technischen Aspekte. Auf dieser Basis kann ein Blindleistungsmanagement umgesetzt werden (Kapitel 7).

Das Blindleistungsmanagement umfasst dabei die gezielte Einflussnahme auf die Blindleistung im Rahmen der Netzplanung und die operative Umsetzung zur Erreichung von Vorgaben (z. B. Blindleistungs-Vorgaben des vorgelagerten Netzbetreibers). Die Ausgestaltung des Blindleistungsmanagements kann systemspezifisch sehr unterschiedlich sein, z. B. einmalige Vorgabe/Einstellung von bestimmten (Soll-)Werten bis hin zu einem komplexen rechnergestützten vollautomatisierten System mit Prognosetool.



Bild 3: Allgemeine Darstellung zum Ablauf des Blindleistungsmanagements

## 1 Anwendungsbereich

Dieser FNN-Hinweis gilt für die Planung und Netzführung der NS-/MS- und HS-Verteilungsnetze mit Netzennennspannungen bis 110 kV.

Der FNN-Hinweis gibt Empfehlungen und Hinweise zur technischen und betrieblichen Umsetzung eines Blindleistungsmanagements in Verteilungsnetzen unter Berücksichtigung des geltenden Ordnungsrahmens, des geltenden Vorschriftenwerkes sowie der in Kraft befindlichen technischen Anwendungsregeln (und z.T. Richtlinien).

## 2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses FNN-Hinweises erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen):

VDE-AR-N 4105 Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz – Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz

EN 62053-23: 2003 Wechselstrom-Elektrizitätszähler Besondere Anforderungen Teil 23: Elektronische Blindverbrauchszähler der Genauigkeitsklassen 2 und 3 (IEC 62053-23:2003)

DIN IEC 871 Teil2: April 1993 Kondensatoren; Parallelkondensatoren für Wechselspannungs-Starkstromanlagen mit einer Nennspannung über 1000 V; Teil 2: Lebensdauerprüfung

EN 50160: 2009 Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen

## 3 Begriffe und Abkürzungen

### 3.1 Begriffe

#### 3.1.1 Blindleistung Q, [5]

Dies ist der Anteil der Scheinleistung, der nicht zur Erzeugung elektrischer Energie beiträgt.

Die Blindleistung besteht aus folgenden Anteilen:

- Grundschiebungsbindleistung/Verschiebungsbindleistung,
- Verzerrungsbindleistung und
- Unsymmetriebindleistung.

Die Verzerrungsbindleistung kann unterteilt werden in:

- Oberschwingungsbindleistung und
- Modulationsbindleistung.

Messgeräte messen derzeit mit der Einstellung „Verzerrungsbindleistung“ vorwiegend die „Oberschwingungsbindleistung“.

Die geometrische Summe aller Anteile wird auch als Gesamtbindleistung (Gesamt-Q) bezeichnet.

Die Gesamt-Q ist die Größe für ein zweipoliges Netzwerkelement oder einen Zweipol bei periodischen Bedingungen, welche gleich der Quadratwurzel aus der Differenz Quadrat der Scheinleistung S minus Quadrat der Wirkleistung P ist (IEV 131-11-43).

Anm.: Bei Sinusvorgängen ist die Gesamt-Q gleich dem Betrag des Imaginärteils der komplexen Leistung (IEV 141-11-43).

Die SI-Einheit der Gesamt-Q ist das Voltampere, VA. In IEC 60027-1 werden der Einheitenname „Var“ und das Einheitenzeichen „var“ angegeben (IEV 131-11-43). Die Blindleistung der Grundschiebung ist das Produkt aus Strom und Spannung und dem Sinus des Phasenwinkels, bezogen auf die Grundschiebung und auf Einphasensysteme.

Bei Mehrphasensystemen ist der entsprechende Verkettungsfaktor zu berücksichtigen. Der Verkettungsfaktor beträgt bei symmetrischen, sinusförmigen Dreiphasensystemen  $\sqrt{3}$ .

In diesem FNN-Hinweis wird unter dem Begriff Blindleistung ausschließlich die Grundschiebungsbindleistung verstanden.

#### 3.1.2 Blindleistungsbedarf (Q-Bedarf)

Der Q-Bedarf ist prinzipiell nicht abhängig von der Richtung des Wirkleistungsflusses. Bei der Q-Analyse kommt es vor allem auf den Saldo von Einspeisung und Verbrauch an. Eine Richtungsabhängigkeit kommt nur über die Veränderung der Spannung mit hinein.

#### 3.1.3 Blindleistungsmanagement (Q-Management)

Das Q-Management umfasst die Analyse des Blindleistungsverhaltens, der Beeinflussungsmöglichkeiten sowie bei Bedarf das Ableiten und Durchführen von Maßnahmen im Rahmen der Netzplanung und der Netzführung.

#### **3.1.4 Blindleistungsverhalten (Q-Verhalten)**

Das Q-Verhalten beschreibt die Reaktion einer Anlage, eines Betriebsmittels oder Netzes auf die Strom- und Spannungsverhältnisse oder äußere Vorgaben im Hinblick auf Q-Bezug und -abgabe. Es ist ein Oberbegriff, der sowohl Erzeugung und Verbrauch von Blindleistung erfasst.

#### **3.1.5 Blindleistungsvermögen (Q-Vermögen)**

Das Q-Vermögen beschreibt die Höhe der abhängig von der Wirkleistungssituation dauerhaft bereitstellbaren induktiven und kapazitiven Blindleistung.

#### **3.1.6 Blindleistungsänderungsfähigkeit (Q-Änderungsfähigkeit)**

Die Q-Änderungsfähigkeit beschreibt die Fähigkeit, auf Änderungen im Netz oder auf geänderte Sollwertvorgaben das Q-Verhalten innerhalb einer definierten Reaktionszeit zu verändern.

#### **3.1.7 Dynamische Netzstützungsblindleistung (Dynamische Netzstützungs-Q)**

Die dynamische Netzstützungs-Q umfasst die (ausschließliche) Q-Bereitstellung zur dynamischen Netzstützung.

#### **3.1.8 Eigenbilanzblindleistung (Eigen-Bilanz-Q)**

Die Eigen-Bilanz-Q umfasst die (ausschließliche) Q-Bereitstellung zum („statischen“) Ausgleich des eigenen Q-Haushaltes für das eigene System.

#### **3.1.9 Erzeugungsanlage (EZA), [5]**

Eine Erzeugungsanlage umfasst alle an einem Netzanschluss/Hausanschluss angeschlossenen Erzeugungseinheiten eines Primärenergieträgers (z. B. alle Photovoltaik-Einheiten).

ANMERKUNG: Formelzeichen, die sich auf die Erzeugungsanlage beziehen, erhalten den Index „A“.

#### **3.1.10 Erzeugungseinheit (EZE), [5]**

Eine Erzeugungseinheit umfasst eine einzelne Einheit zur Erzeugung elektrischer Energie.

ANMERKUNG 1: Bei einer Photovoltaik-Einheit z. B. ist dies der Umrichter inkl. der (aus Netz-Sicht) nachgeschalteten Komponenten/Solarmodule. Eine Photovoltaik-Erzeugungsanlage mit zwei fest an den Zählerplatz angeschlossenen Umrichtern besteht also aus zwei Erzeugungseinheiten.

ANMERKUNG 2: Formelzeichen, die sich auf die Erzeugungseinheit beziehen, erhalten den Index „E“.

#### **3.1.11 Fremdbilanzblindleistung (Fremd-Bilanz-Q)**

Die Fremd-Bilanz-Q umfasst die (ausschließliche) Q-Bereitstellung zum („dynamischen“) Ausgleich des Q-Haushaltes des vorgelagerten Netzbetreibers, also insgesamt für übergreifende Systeme.

#### **3.1.12 Mittelspannungsnetz (MS-Netz), [5]**

Dies ist das Drehstromnetz der Netzbetreiber mit einer Netznominalspannung  $> 1 \text{ kV}$  bis  $< 60 \text{ kV}$ .

### 3.1.13 Natürliche Leistung einer Leitung, [37]

Dies ist der Wert der von einer Leitung übertragenen Leistung, bei der die von der Leitungskapazität abgegebene Blindleistung die von der Leitungsinduktivität aufgenommene Blindleistung kompensiert und bei der sich die Leitung infolgedessen wie ein reiner Wirkwiderstand verhält (IEV: 603-02-24)

### 3.1.14 Netzanschlusspunkt (NAP), [5]

Dies ist der Netzpunkt, an dem die Kundenanlage an das Netz des Netzbetreibers angeschlossen ist.

ANMERKUNG: Der Netzanschlusspunkt hat vor allem Bedeutung im Zusammenhang mit der Netzplanung. Eine Unterscheidung zwischen Netzanschlusspunkt und Verknüpfungspunkt ist nicht in allen Fällen erforderlich.

### 3.1.15 Quasi-stationäre Netzstützungsblindleistung, (Quasi-stationäre Netzstützungs-Q)

Die quasi-stationäre Netzstützungs-Q umfasst die (ausschließliche) Q-Bereitstellung zur quasi-stationären Netzstützung, beispielsweise um einem Spannungskollaps vorzubeugen.

### 3.1.16 Blindleistungsbilanz (Q-Bilanz)

Der Begriff Q-Bilanz wird verwendet, wenn ein Vertragsverhältnis betrachtet wird.

### 3.1.17 Blindleistungshaushalt (Q-Haushalt)

Der Begriff Q-Haushalt wird verwendet, wenn ein technischer Sachverhalt betrachtet wird.

### 3.1.18 Scheinleistung S, [5]

Die Scheinleistung ist das Produkt der Effektivwerte aus Außenleiter-Neutralleiter-Spannung und Strom je Außenleiter.

### 3.1.19 Spannungshaltungsblindleistung (Spannungshaltung-Q)

Die Spannungshaltungs-Q umfasst die (ausschließliche) Q-Bereitstellung zur Spannungshaltung im eigenen Netz.

### 3.1.20 Grundschiwungsblindleistung / Verschiebungsblindleistung (Grundschiwungs-Q / Verschiebungs-Q), [3,4]

Die Blindleistung der Grundschiwung ist das Produkt aus Strom und Spannung und dem Sinus des Phasenwinkels, bezogen auf die Grundschiwung und auf Einphasensysteme. Bei Mehrphasensystemen ist der entsprechende Verkettungsfaktor zu berücksichtigen. Der Verkettungsfaktor beträgt bei symmetrischen, sinusförmigen Dreiphasensystemen  $\sqrt{3}$ .

Die Blindleistung ist die Leistung jener elektrischen Energie, die zum Aufbau von magnetischen Feldern (z. B. in Motoren, Transformatoren) oder von elektrischen Feldern (z. B. in Kondensatoren) bereitgestellt wird. Bei überwiegend magnetischem Feld ist die Blindleistung induktiv, bei überwiegend elektrischem Feld kapazitiv.

ANMERKUNG: Sie ist das Produkt aus Scheinleistung und Sinus des Phasenverschiebungswinkels  $\varphi$  zwischen den Grundschiwungen der Leiter-Sternpunkt-Spannung U und des Stroms I.

### 3.1.21 Verschiebungsfaktor [6]

Der  $\cos\varphi$  des Phasenwinkels zwischen den Grundschnwingungen einer Leiter-Sternpunktspannung und eines Stromes.

### 3.1.22 Wirkleistung P, [5]

Die Wirkleistung ist die elektrische Leistung, die für die Erzeugung elektrischer Energie maßgebend ist und die für die Umwandlung in andere Leistungen (z. B. mechanische, thermische oder chemische) verfügbar ist.

ANMERKUNG: Dies ist die vom Hersteller angegebene Nennleistung der Erzeugungseinheit bei Nennbedingungen. Es ist die Leistung der netzseitigen Betriebsmittel anzusetzen (z. B. der Umrichter).

Bei periodischen Bedingungen entspricht der Mittelwert der Momentanleistung  $p$  der Wirkleistung.

## 3.2 Abkürzungen

BNetzA	Bundesnetzagentur
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EZA	Erzeugungsanlage
EZE	Erzeugungseinheit
FACTS	Flexible-AC-Transmission-System
FNN	Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE
HöS	Höchstspannung
HS	Hochspannung
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
MS	Mittelspannung
NAP	Netzanschlusspunkt
NS	Niederspannung
ONS	Ortsnetzstation
PV	Photovoltaik
Q	Blindleistung
rONT	regelbarer Ortsnetztransformator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SVC	Static VAR Compensator
TAB	Technische Anschlussbedingungen
UW	Umspannwerk

ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
VNB	Verteilungsnetzbetreiber
WEA	Windenergieanlage

## 4 Grundlagen zur Anwendung

Praktische Erfahrungen belegen, dass ein einheitliches Verständnis zum Q-Verhalten gefördert werden muss. Häufig auftretende Missverständnisse resultieren insbesondere aus der unterschiedlichen Verwendung bzw. einem unterschiedlichen Verständnis der Begriffe induktiv und kapazitiv im Verbraucher- und Erzeugerzählpeilsystem. Eine genaue Definition ist daher Grundlage jeglicher Kommunikation. Eine ausführliche Beschreibung der beiden möglichen Zählpeilsysteme findet man im „Kapitel 2 Begriffe und Definitionen“ der Technischen Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen [3].

Im Verantwortungsbereich der Netzbetreiber hat sich die Verwendung des Verbraucherzählpeilsystems durchgesetzt. Für den Techniker kann die Vorstellung hilfreich sein, welcher Effekt auf die Spannung in einem Netz entsteht. So ergibt sich eine spannungsanhebende Wirkung, wenn man einen Kondensator/eine Kapazität anschließt, was dem übererregten Bereich (Quadrant III und IV) entspricht. Schließt man eine Spule/eine Induktivität an, so stellt sich ein spannungssenkender Effekt ein, was dem untererregten Bereich (Quadrant I und II) entspricht. Die Begriffe über- und untererregt ergeben sich dabei aus dem Verhalten von Synchronmaschinen. Aufgrund ihrer Unabhängigkeit vom verwendeten Zählpeilsystem ist es sinnvoll, diese auch für andere Elemente zur Beschreibung ihres Q-Verhaltens einzusetzen, um Missverständnisse zu vermeiden. Eine Übersicht zu den verwendeten Begriffen zeigt das Bild 4.

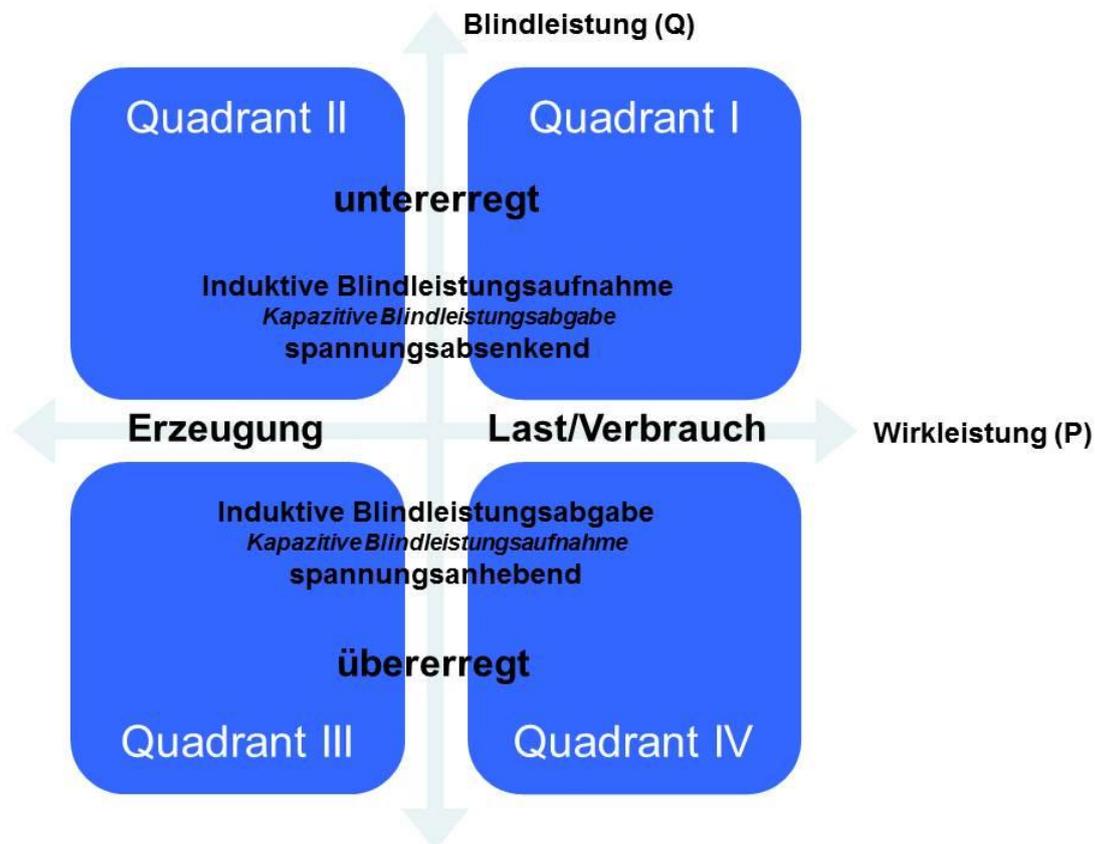


Bild 4: Begriffsdarstellung im Verbraucherzählpeilsystem

Zur besseren Lesbarkeit wird im vorliegenden FNN-Hinweis häufig das Wort Blindleistung durch Q ersetzt. Zudem werden folgende Begriffe eingeführt (s. auch Kapitel 3):

- **Blindleistung(Q)-Vermögen des Netzes** (Bild 5): Sie beschreibt das Vermögen, in welchem Maße sich die Grenzen im Q-Verhalten bei einem bestimmten Wirkleistungsverhalten (Rand des P-Q-Verhaltens) dauerhaft beeinflussen lassen. Über das Q-Vermögen kann folglich die durch das P-Q-Verhalten aufgespannte Fläche angepasst werden. Für ein bestimmtes Wirkleistungsverhalten ergeben sich dabei maximal vier mögliche (obere und untere) Grenzwerte  $Q_{og,max}(P)$ ,  $Q_{og,min}(P)$ ,  $Q_{ug,max}(P)$ ,  $Q_{ug,min}(P)$ . Die Differenz zwischen dem „Rand“ bzw. Grenzwert des ursprünglichen P-Q-Verhalten bei dem jeweiligen Wirkleistungsverhalten zu den erreichbaren Grenzwerten ergibt das vom Wirkleistungsverhalten abhängige Q-Vermögen. Folglich ergeben sich für eine Wirkleistungsaufnahme vier Werte des Q-Vermögens:  $Q_{V,og,max}(P)$ ,  $Q_{V,og,min}(P)$ ,  $Q_{V,ug,max}(P)$ ,  $Q_{V,ug,min}(P)$ . Der Grund der Anpassung (Einsatz der Blindleistung für die Spannungshaltung oder Q-Bilanz im eigenen oder vorgelagerten Netz) ist für die Definition des Q-Vermögens irrelevant.

## Q-Vermögen

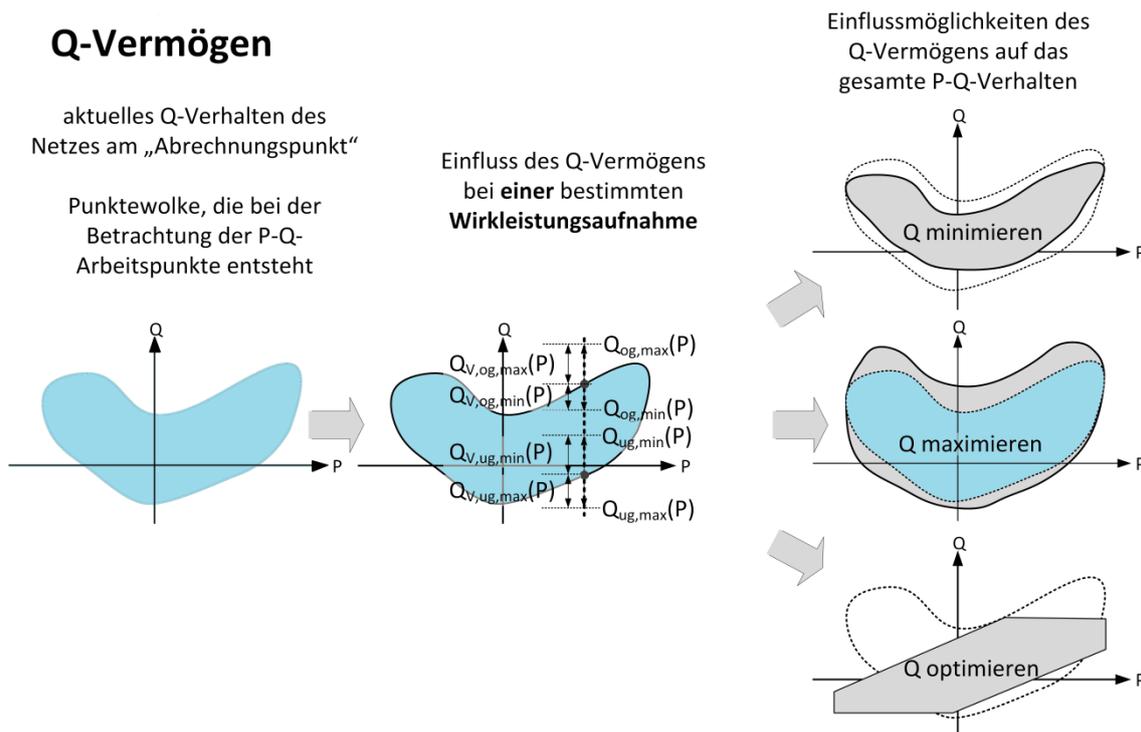


Bild 5: Erläuterung zum Q-Vermögen des Netzes

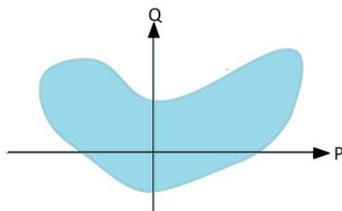
- **Blindleistung(Q)-Änderungsfähigkeit des Netzes** (Bild 6): Sie beschreibt die Fähigkeit, das Q-Verhalten des Netzes zum momentanen Arbeitspunkt zu ändern. Der Arbeitspunkt kann dabei beliebige Punkte innerhalb der P-Q-Fläche einnehmen (das Vorhandensein von Lücken ist dabei ebenfalls denkbar) und muss nicht zwangsläufig auf dem Rand des P-Q-Verhaltens liegen. Die Q-Änderungsfähigkeit kann dabei für jeden Arbeitspunkt unterschiedlich hoch ausfallen. Die Höhe der abrufbaren „Q-Änderungsfähigkeit“ kann zudem die vereinbarten Blindleistungsgrenzen überschreiten. Die Q-Änderungsfähigkeit des Netzes

ist vor allen Dingen für den kurzfristig gezielten Abruf von Blindleistung zum Ausgleich der eigenen Q-Bilanz oder der des vorgelagerten Netzes („Fremd-Bilanz-Q“) sowie zur Stützung des Netzes beim drohenden Spannungskollaps („quasi-stationäre Netzstützung-Q“) relevant.

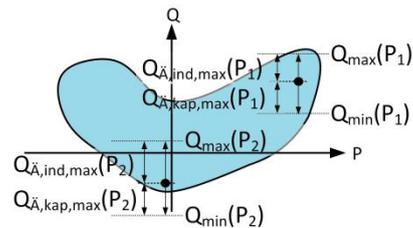
## Q-Änderungsfähigkeit

aktuelles Q-Verhalten des  
Netzes am „Abrechnungspunkt“

Punktewolke, die bei der  
Betrachtung der P-Q-  
Arbeitspunkte entsteht



Einfluss der Q-Änderungsfähigkeit  
an **einem** bestimmten  
**Arbeitspunkt**



*Bild 6: Erläuterung zur Q-Änderungsfähigkeit des Netzes*

Weitere Begriffe und Vorgaben zur Blindleistung finden sich in verschiedenen Veröffentlichungen, eine Übersicht hierzu gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht zu Veröffentlichungen mit Q-Vorgaben

Veröffentlichung	Kapitel / Abschnitt
DACHCZ: Technischen Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen [3]	2. Begriffe und Definitionen ➔ Zählpeilsysteme
FNN: VDE-AR-N 4105 [5]	5.7.5 Blindleistung
BDEW: Technische Richtlinie „Erzeugungsanlagen am MS-Netz“ [6]	2.5.4 Blindleistung
BDEW: Regelungen und Übergangsfristen für bestimmte Anforderungen in Ergänzung zur technischen Richtlinie, vom 01. Januar 2013 [6]	2.2 „Zu Abschnitt 2.5.4 Blindleistung“
FNN: (E) VDE-AR-N 4120 (TAB HS) [7]	gemäß aktueller Fassung zu ergänzen
BMW: NAV [8]	§16 Nutzung des Anschlusses (Abs. 2)
BDEW: TAB Niederspannung 2007 [9]	10.3.3 Blindleistungs-Kompensationseinrichtungen
BDEW: TAB Mittelspannung 2008 [10]	5.6 Blindleistungskompensation
VDN: TC 2007 [11]	3.3.8 Blindleistungsbereitstellung 3.3.13.4 Blindleistungsabgabe
EU: DCC [2]; RfG [32]	gemäß aktueller Fassung zu ergänzen

Im Rahmen dieses FNN-Hinweises werden folgende Einsatzfälle der Blindleistung unterschieden:

- **Blindleistungs-Bereitstellung zur Spannungshaltung im eigenen Netz („Spannungshaltungs-Q“):**  
Damit ist beispielsweise der untererregte Betrieb von Erzeugungsanlagen gemeint, um der von ihr verursachten Spannungsanhebung entgegen zu wirken.
- **Blindleistungs-Bereitstellung zum („statischen“) Ausgleich des eigenen Q-Haushaltes („Eigen-Bilanz-Q“):**  
Damit ist die Einhaltung der zulässigen Bandbreite des Q-Verhaltens des eigenen Netzes im Normalbetrieb gegenüber dem vorgelagerten Netzbetreiber gemeint. Basis bildet die Anforderung des vorgelagerten Netzbetreibers.
- **Blindleistungs-Bereitstellung zum („dynamischen“) Ausgleich des Q-Haushaltes des vorgelagerten Netz-betreibers („Fremd-Bilanz-Q“):**  
Damit ist eine kurzfristige Anpassung des Q-Verhaltens des eigenen Netzes (Veränderung des aktuellen Arbeitspunktes) innerhalb und ggf. auch außerhalb der zulässigen Bandbreite auf Anfrage des vorgelagerten Netzbetreibers gemeint. Basis bildet eine bilaterale Vereinbarung mit dem vorgelagerten Netzbetreiber.

Die folgenden speziellen Formen der Blindleistungs-Bereitstellung werden hier nicht weiter betrachtet:

- **Blindleistungs-Bereitstellung zur Vermeidung eines Spannungskollapses („quasi-stationäre Netzstützungs-Q“):**

Vom Zugriffsprozess unterscheidet sich diese Q-Bereitstellungsart nicht von der Fremdbilanz-Q. Für den Übertragungsnetzbetreiber ist im Rahmen der Planung nur der gesicherte Wert der Q-Änderungsfähigkeit für den gestörten Betrieb seines Netzes von Bedeutung.

- Blindleistungs-Bereitstellung zur dynamischen Netzstützung („dynamische Netzstützung-Q“):  
Damit ist die Einspeisung von Blindstrom im Falle von Netzfehlern gemeint.

Abschließend werden noch Begrifflichkeiten zu Steuerung bzw. Regelung von Anlagen erläutert. Tabelle 2 zeigt einige grundsätzliche Spielarten der Beeinflussungsmöglichkeiten von Steuer- und Regeleinheiten (z. B. Erzeugungsanlage, Speicher, Kompensationsanlagen, regelbare Transformatoren) für den Verteilungsnetzbetreiber auf. Sie werden im weiteren Verlauf näher erläutert.

*Tabelle 2: Beispielhafte Q-Beeinflussungsmöglichkeiten von Steuer- und Regeleinheiten durch den Verteilungsnetzbetreiber*

Durch VNB per Fernzugriff erreichbar	Nicht durch VNB per Fernzugriff erreichbar, aber mit zeitlicher Verzögerung durch VNB beeinflussbar (z. B. über Monteur, Anlagenbetreiber)	Nicht regelbar
Direkt zentral geregelt	Lokal/Autark/Autonom geregelt	---
Heute sehr selten	Heute Stand der Technik für neu installierte Anlagen	Mehrzahl der Bestandsanlagen

Zu unterscheiden sind Anlagen, auf deren Sollwert der Verteilungsnetzbetreiber eine Beeinflussungsmöglichkeit per Fernzugriff hat, von denen, auf die er nur durch einen Monteur vor Ort Einfluss nehmen kann.

Direkte, zentrale Beeinflussung per IKT kann in einer Sollwertvorgabe bestehen, oder in der zyklischen – z. B. stündlichen – Übertragung aktualisierter Kennlinienparameter.

Lokal Q-geregelte Anlagen arbeiten anhand einer lokal gespeicherten, vorparametrierten Funktion bzw. Kennlinie (z. B. Q(U)-Kennlinie,  $\cos\phi(U)$ - bzw.  $\cos\phi(P)$ -Kennlinie oder Q(P)-Kennlinie).

Hat der Verteilungsnetzbetreiber einen eigenen IKT-Zugriff auf die Anlage, über den er selten beispielsweise eine andere Kennlinie vorgibt, so handelt es sich gemäß der Kategorisierung in Tabelle 2 um eine durch den Verteilungsnetzbetreiber per IKT erreichbare, lokal geregelte Anlage.

Lokal/autark geregelte Anlagen, bei denen etwa eine Änderung des eingestellten maximalen Verschiebungsfaktors oder der eingestellten Kennlinie nur über einen Fachmann vor Ort, oder über die IKT des Anlagenbetreibers möglich ist, auf die der Verteilungsnetzbetreiber also keinen Fernzugriff hat, werden als ‚durch den Verteilungsnetzbetreiber nicht per Fernzugriff erreichbar‘ aufgeführt. Diese Anlagen haben im Hinblick auf die gezielte Anpassung eines festgestellten Q-Verhaltens für den Verteilungsnetzbetreiber eher eine geringe Bedeutung.

Zu unterscheiden sind Anlagen, auf deren Sollwert der Verteilungsnetzbetreiber eine Beeinflussungsmöglichkeit per IKT hat, von denen, auf die er nur durch einen Monteur-Besuch vor Ort Einfluss nehmen kann. Im Rahmen der zentralen Regelung könnte etwa an das Beispiel

eines Windparks gedacht werden, der direkt einen Q-Sollwert per IKT aus der Verteilungsnetzbetreiber-Leitstelle erhält.

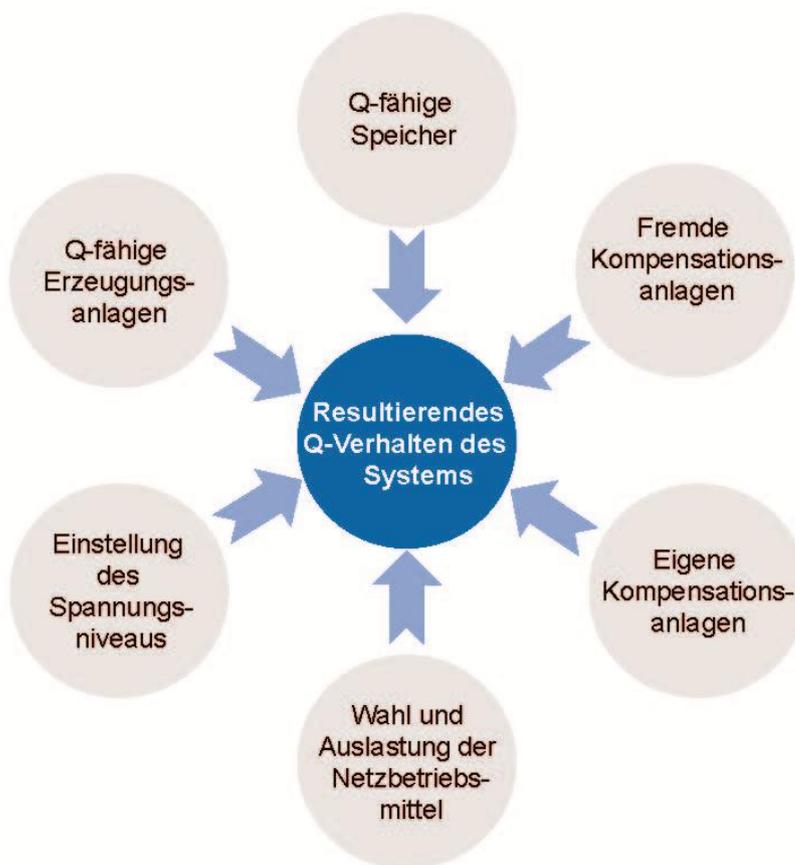
Demgegenüber befinden sich bei einer lokalen Regelung Stellglied und Intelligenz der Sollwertermittlung in unmittelbarer Nähe der Anlage, z. B. innerhalb eines Gehäuses. Neben der Bezeichnung ‚lokal‘ sind auch die Bezeichnungen ‚autark‘ und ‚autonom‘ für diese Regelung gängig<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Gelegentlich wird die lokale / autonome / autarke Regelung auch als dezentral bezeichnet. Der Begriff ‚dezentral‘ besitzt im vorliegenden Zusammenhang – je nach Autor - allerdings eine derartige Bedeutungsvielfalt, dass von weiterer Diskussion hier abgesehen wird.

## 5 Beeinflussung des Blindleistungs-Verhaltens

Das resultierende Q-Verhalten eines Systems wird maßgeblich von Erzeugungsanlagen, Speichern, fremden und eigenen Kompensationsanlagen, der Wahl und Auslastung der Netzbetriebsmittel sowie dem Spannungsniveau bestimmt. Dies sind gleichzeitig aber auch die Stellschrauben (Regelvariablen) zur Änderung des Q-Verhaltens des Systems. Die vorhandenen Möglichkeiten zur direkten Spannungsregelung durch Transformatoren legen zudem den Freiraum der Q-Beeinflussung und damit die Grenzen des Q-Vermögens fest. Das Bild 7 zeigt eine zusammenfassende Übersicht der Regelvariablen, welche im Folgenden im Detail erläutert werden.



Grenzen des Q-Vermögens allgemein bestimmt durch Regel- und Einsatzstrategien von:

- HS/MS-Stufentransformator
- Regelbaren Ortsnetztransformatoren
- Lösungen zur Spannungslängsregelung im MS-bzw. NS-Strang

*Bild 7: Übersicht zu den Beeinflussungsmöglichkeiten des Q-Verhaltens und deren weitere Behandlung im vorliegenden FNN-Hinweis*

## 5.1 Blindleistungsfähige Erzeugungsanlagen und Speicher

Seit 2008 müssen Erzeugungsanlagen auf der MS-Ebene und seit 2012 auf der NS-Ebene ein Q-Vermögen besitzen. Dies hat zur Folge, dass es in den heutigen Netzen eine Mischung von Anlagen unterschiedlichen Q-Vermögens gibt, wobei die Mehrzahl der Bestandsanlagen nicht regelbar ist. Weiterhin ist zu unterscheiden in Anlagen, die direkt am Umspannwerk angebunden sind, und solchen, die sich im Netz befinden, so dass sich im Rahmen von (n-1)-Fällen ihre elektrische Nähe zum Umspannwerk verändert.

Hinweise auf ihre denkbare Rolle im Rahmen eines Q-Managements werden in Kapitel 7 gegeben. Hierbei sind insbesondere diejenigen Erzeugungsanlagen von Bedeutung, auf die der Netzbetreiber entsprechende Zugriffsmöglichkeiten hat (s. Abschnitt 7.2).

Neben Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen sind auch Biomasseanlagen und Blockheizkraftwerke zu beachten. Das Q-Vermögen dieser Erzeugungsanlage wird auch von der Technologie der Netzkopplung bestimmt. Großen Einfluss auf das nutzbare Q-Potenzial hat die Betriebsweise der Anlagen, die sehr unterschiedlich sein kann (wärme- oder stromgeführt, dargebotsabhängig oder –unabhängig). Künftig können zudem umrichterbasierte Speicher in den Fokus rücken.

### 5.1.1 Q-Bereitstellung im Rahmen der Richtlinien

Bei Wirkleistungsabgabe muss eine Erzeugungsanlage mindestens mit einer Blindleistung betrieben werden können, die einem durch die technischen Anschlussregeln vorgegebenen Verschiebungsfaktor am Netzanschlusspunkt entspricht. Der vorgegebene Verschiebungsbereich ist von der Spannungsebene, an der die Erzeugungsanlage angeschlossen ist, abhängig. Eine Übersicht enthält Tabelle 3.

Tabelle 3: Bereichs-Vorgaben für den Verschiebungsfaktor in Abhängigkeit der Spannungsebene

Spannungsebene	Regelwerk/Richtlinie	Bereichs-Vorgaben
Hochspannung	VDN: TransmissionCode 2007 [11]	Verschiedene Varianten (künftig ist hier die VDE-AR-N 4120 gültig)
Mittelspannung	BDEW: Erzeugungsanlagen an MS, 2008 [6] ; künftig zu ersetzen durch die VDE-AR- N 4110 (TAR MS)	mindestens $\cos\varphi$ von 0,95 <sub>untererregt</sub> bis 0,95 <sub>übererregt</sub>
Niederspannung	VDE-AR-N 4105: Erzeugungsanlagen an NS [5];	von Anlagenbemessungsscheinleistung und Generatortyp bzw. Netzanbindung abhängig: <u><math>\Sigma S_{E_{max}} \leq 3,68 \text{ kVA}</math></u> : Betrieb mit $\cos\varphi=0,95$ untererregt bis 0,95 übererregt (keine Kennlinienvorgabe des Netzbetreibers); <u><math>3,68 \text{ kVA} &lt; \Sigma S_{E_{max}} \leq 13,8 \text{ kVA}</math></u> : Kennlinienvorgabe des Netzbetreibers innerhalb $\cos\varphi = 0,95$ untererregt bis 0,95 übererregt (vgl. Bild 4 in VDE-AR-N 4105), $\cos\varphi(P)$ oder fester $\cos\varphi$ ; <u><math>\Sigma S_{E_{max}} &gt; 13,8 \text{ kVA}</math></u> : Kennlinienvorgabe des Netzbetreibers innerhalb $\cos\varphi = 0,90$ untererregt bis 0,90 übererregt (siehe Bild 5 in VDE-AR-N 4105)

Erzeugungsanlagen in der NS-Ebene werden seit dem 01.01.2012 mit aktivierter  $\cos\varphi(P)$ -Kennlinie ausgeliefert und besitzen in diesem Fall bereits ein Q-Verhalten. Der Netzbetreiber kann davon abweichende Vorgaben machen, z. B. einen festen  $\cos\varphi$  verlangen. In der MS-Ebene kann der Netzbetreiber dem Anlagenbetreiber für seine Erzeugungsanlage bei Bedarf eine andere im Rahmen der technischen Anschlussregeln beschriebene Kennlinie oder Fahrweise vorgeben.

Die Umsetzung der Q-Bereitstellung erfolgt über die Wechselrichter und/oder eigenständige Kompensationsanlagen.

### 5.1.2 Q-Bereitstellung im Rahmen bilateraler Vereinbarungen

Bei den Erzeugungsanlagen ist zu beachten, dass oftmals über die im Rahmen der technischen Anschlussregeln gesteckten Grenzen hinaus (geforderte V-Kurve am Netzanschlusspunkt) Blindleistung zur Verfügung gestellt werden kann.

Eine insbesondere für geringe Wirkleistungseinspeisung beliebige Vorgabe eines Q-Sollwertes bis hin zu einem Betrieb im Phasenschiebermodus ist von den technischen Anschlussregeln

nicht vorgegeben, technisch aber in vielen Fällen möglich, weil immer mehr Erzeugungseinheiten die Möglichkeit der Q-Bereitstellung unabhängig von einer Wirkleistungseinspeisung bieten.

Die maximal mögliche Q-Bereitstellung ist abhängig von der Netzspannung und von der Wirkleistungseinspeisung. In Bild 8 und Bild 9 ist das Q-Vermögen einer einzelnen Erzeugungseinheit bei  $1,0 \times U_n$  dargestellt. Bei hohen bzw. niedrigen Netzspannungen kann es zu Einschränkungen bei der Q-Bereitstellung im Bemessungsleistungsbereich kommen. Sollten sich einzelne Erzeugungseinheit im Service-Modus befinden, ist der Q-Bereich der entsprechenden Erzeugungsanlage eingeschränkt. Das am Netzanschlusspunkt verfügbare Q-Vermögen der Erzeugungsanlage weicht i. d. R. von dem der einzelnen Erzeugungseinheit ab.

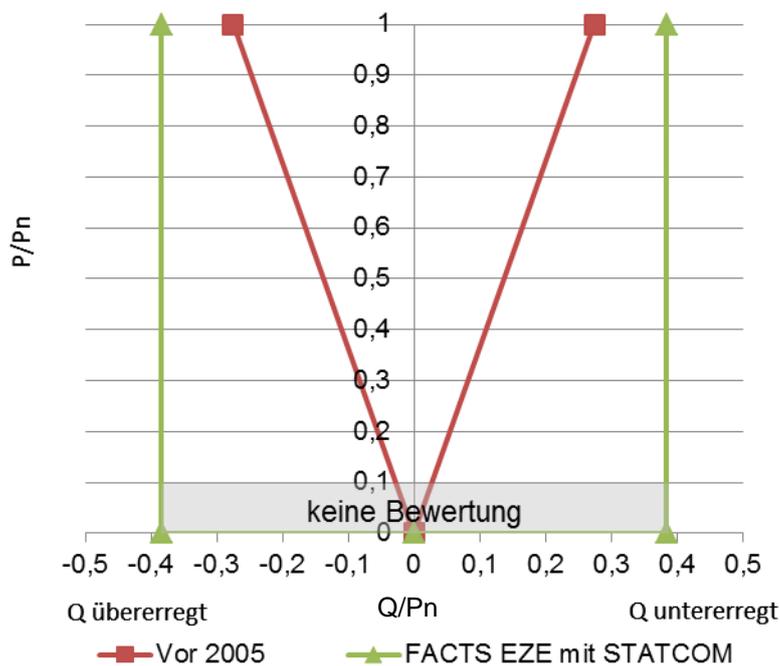
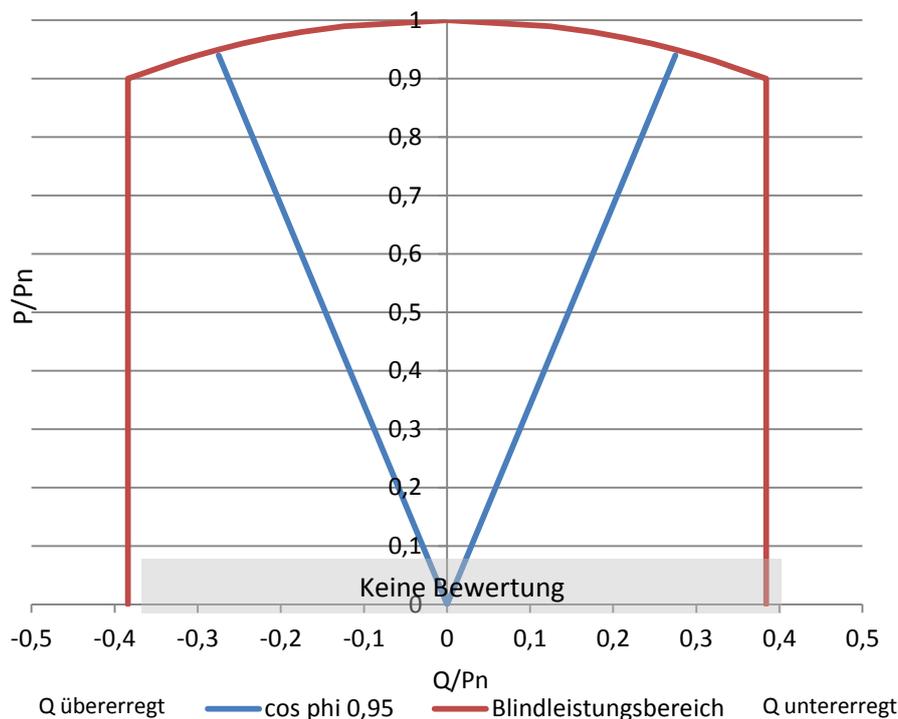


Bild 8: Beispielhaftes Q-Vermögen von einer Erzeugungseinheit (Wind)



*Bild 9: Beispielhaftes Q-Vermögen von neueren Erzeugungseinheiten (Photovoltaik)*

In Einzelfällen kann ein über die technischen Anschlussregeln hinaus gehender Q-Abruf sinnvoll erscheinen. Die Vorgaben wären demnach im Rahmen bilateraler Vereinbarungen umzusetzen. Bilaterale Vereinbarungen können auch eine dauerhafte Q-Bereitstellung zur Netzkomensation beinhalten.

### 5.1.3 Q-Änderungsfähigkeit der Erzeugungsanlage

Die Q-Änderungsfähigkeit wird durch den Aufbau der Erzeugungsanlage, die eingesetzten Erzeugungseinheiten, den eingesetzten zusätzlichen Komponenten, der Informations- und Kommunikationstechnik und den Erzeugungsanlagen-Regler bestimmt. Entscheidend ist der Aufbau der Regelstrecke mit folgenden, für die Dynamik relevanten Größen (Bild 10):

- Messwerterfassung am Regelpunkt,
- Regelgeschwindigkeit des Erzeugungsanlagen-Reglers und ggf. der unterlagerten Regler,
- Aufbau der Kommunikationstrecke zwischen Sollwertvorgabe, Erzeugungsanlagen-Regler und Erzeugungseinheit,
- Regelgeschwindigkeit/Q-Änderungsfähigkeit der Erzeugungseinheit und zusätzlicher Komponenten (z. B. Drosseln, Kondensatoren, STATCOM),
- Parametrierung des Erzeugungsanlagen-Reglers,
- Stabilität des elektrischen Netzes und
- Informations- und Kommunikationstechnik zwischen der Netzführung des Netzbetreibers und der Erzeugungsanlage.

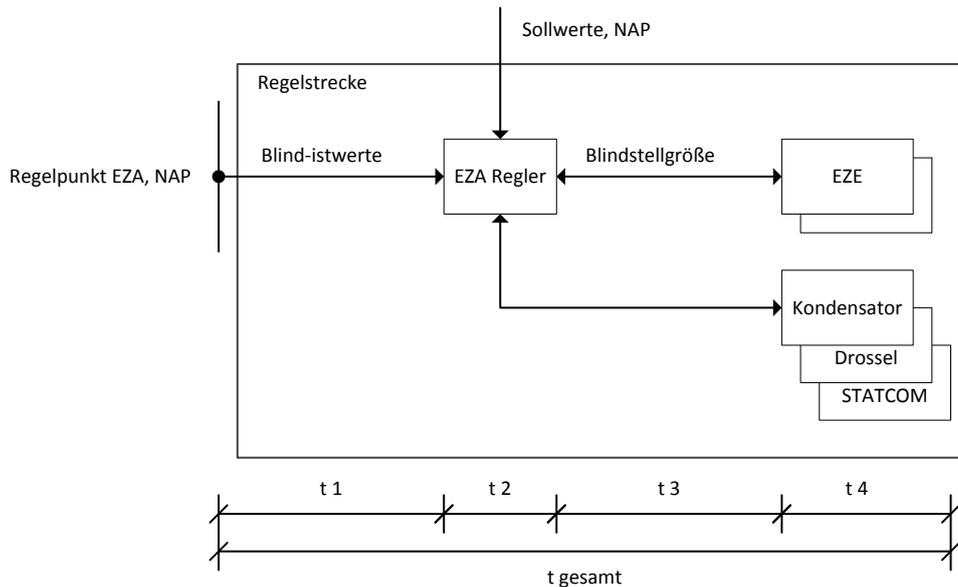


Bild 10: Aufbau der Regelstrecke einer Erzeugungsanlage (Beispiel)

Tabelle 4: Erläuterung zu den beispielhaften Zeitdauern aus Bild 10

Zeitdauer	Umfasst
t1 ( $\geq 1$ s)	die Zeit zur Erfassung und Aufbereitung der Messwerte am Netzanschlusspunkt und der Übertragung zum Erzeugungsanlagen-Regler
t2 ( $> 1$ s)	die Regelgeschwindigkeit und kann entsprechend der Anforderungen an die Dynamik im Regler angepasst werden. In diese Zeit kann die Mittelwertbildung der Messwerte mit einfließen
t3 ( $\leq 1$ s)	die Zeit zur Übertragung der Stellgrößen an die untergelagerten Regelungen der Erzeugungseinheiten und zusätzlicher Komponenten
t4 ( $\geq 1$ s)	die Eigenzeit der Komponenten und der Regelgeschwindigkeit der unterlagerten Regler der Erzeugungseinheiten

Das auf den Netzanschlusspunkt bezogene Zeitverhalten der gesamten Erzeugungsanlage wird in Anwendungsregeln definiert. Insofern handelt es sich bei den beispielhaften Zeiten in Bild 10 bzw. Tabelle 4 um ca.-Größen, welche in Abhängigkeit der Anforderungen am Netzanschlusspunkt, der eingesetzten Komponenten und der gewählten Übertragungsmedien schwanken können. Im Bild 10 wurde nicht die Zeit der Übertragung der Sollwerte dargestellt. Die Sollwertvorgabe durch den Netzbetreiber erfolgt z. B. durch eine Fernwirkanlage (sofern vorhanden). Dabei werden entweder  $\cos\phi$ -Werte, Funktionen ( $\cos\phi(P)$ ,  $Q(U)$ ) oder Q-Sollwerte vorgegeben. In Abhängigkeit vom Übertragungsweg kommen Zeiten zwischen 1 s – 2 s bei der Übertragung der Sollwerte zustande. In Summe ergibt sich  $t_{\text{gesamt}}$ , welche sehr von den gewählten Übertragungsmedien abhängig ist. Die Kommunikation innerhalb einer Erzeugungsanlage sollte aufgrund der höheren Verfügbarkeit vorzugsweise mit Lichtwellenleitern- oder Kupferkabeln ausgeführt werden.

#### 5.1.4 Q-Änderungsfähigkeit von statischen und dynamischen Kompensationen

Bei statischen Kompensationen wird die Q-Änderungsfähigkeit durch das Schaltgerät bestimmt. Auch die Entladezeit von Kondensatoren spielt bei der Verwendung von statischen Kompensationen eine entscheidende Rolle. Nähere Informationen kann man Abschnitt 5.2 entnehmen.

### 5.2 Kompensationsanlagen

Im Folgenden werden Hinweise zu fremden und eigenen Kompensationsanlagen gegeben, um sie für ein Blindleistungsmanagement zu nutzen. Dem voran werden die wichtigsten Informationen zu Bauformen gegeben.

#### 5.2.1 Allgemeines

Die derzeit verwendeten Kompensationseinrichtungen lassen sich technologisch wie folgt einteilen:

- statische, nicht schaltbare Kondensatoranlagen (kapazitiv) zur Kompensation induktiver Leistung,
- Kondensatoranlagen (kapazitiv, meist verdrosselt ausgeführt) zur Kompensation induktiver Leistung, in Stufen mit Schützen, Thyristorschaltern bzw. Leistungsschaltern geschaltet,
- Kompensationsdrosseln (induktiv) zur Kompensation kapazitiver Leistung (z. B. von Kabelanlagen) statisch oder in Stufen geschaltet bzw. stufenlos regelbar und
- leistungselektronische Kompensationsanlagen wie SVC, Aktivfilter und STATCOM, die stufenlos regelbar induktive wie auch kapazitive Blindleistung schnell zur Verfügung stellen können.

Die Anlagen können je nach Spannungsebene im HS- MS- bzw. NS-Netz angeschaltet sein. Je nach Anforderung hinsichtlich der Q-Änderungsgeschwindigkeit steht die Blindleistung aus den o. g. Kompensationsanlagen nach ungefähr

- 20 ms (SVC, Aktivfilter, Drosseln, STATCOM, thyristorgeschaltete NS-Anlagen),
- 30 sek (Schütz-geschaltete NS-Anlagen) und
- 5 bis 10 Minuten (MS-Anlagen mit Leistungsschalter, aufgrund der Kondensator-Entladezeit)

zur Verfügung. Zu beachten sind dabei Schalthäufigkeit pro Zeiteinheit und die Leistungsfähigkeit der Schaltgeräte sowie das Q-Vermögen in Abhängigkeit von der Netzbetriebsspannung, insbesondere bei passiven Betriebsmitteln.

NS-Kompensationsanlagen sind heute hauptsächlich kapazitiv ausgeführt. Aufgrund der verwendeten Leistungsschütze und Entladewiderstände sind Reaktionszeiten auf Q-Änderungen von 30 Sekunden und mehr zu erwarten. Nur durch Verwendung von Thyristorschaltern für die jeweiligen Kompensationsstufen können Reaktionszeiten von unter 1 Sekunde erreicht werden. Die verwendeten Q-Regler orientieren sich nur an der Entlastung des jeweiligen Transformators von Blindstrom und sind in den meisten Fällen nicht für eine Einbindung in ein übergeordnetes Q-Management ausgelegt.

MS-Kompensationsanlagen sind bei Industriekunden gleichfalls vorwiegend als kapazitive Anlagen ausgeführt. Gemäß der IEC 60871 kann die Entladezeit der Kondensatoren bis zu 10

Minuten betragen, bevor eine Wiederschaltung erfolgen kann. Daraus begründet sich die geringe Q-Änderungsgeschwindigkeit. Durch Zusatzmaßnahmen, wie z. B. Entladespannungswandler, kann die Entladezeit bis in den Sekundenbereich reduziert werden. Im Bereich der städtischen Netze, Wind- und Photovoltaik-Parks sind zunehmend auch Kompensationsdrosseln im Einsatz. Diese sind in Stufen aufgebaut oder verfügen über einen eigenen Stufenschalter zur Leistungsanpassung.

Vorteile bieten dynamische Kompensationsanlagen, wie sie vielfach bei Industriekunden mit schnellen Q-Änderungen eingesetzt werden und neben der Q-Kompensation auch die Reduzierung von Oberschwingungen und des Spannungsflickers zur Aufgabe haben. Da diese jedoch auf die Technologie des Industrieprozesses angepasst sind (z. B. Walzwerke, Lichtbogenöfen, Schachtfördermaschinen, u. a.), stehen sie für übergeordnete Netzaufgaben nicht zur Verfügung, ohne den industriellen Prozess und die Spannungsqualität im Versorgungsnetz zu beeinträchtigen. Diese Kompensationsanlagen werden auf Basis der Bewertung von Oberschwingungen und Flicker nach D-A-CH-CZ-Regel [3] konfiguriert.

### 5.2.2 Fremde Kompensationsanlagen

Industriekunden, die bereits Kompensationsanlagen betreiben, sind mit dieser Technologie vertraut und können ihre vorhandenen kapazitiven wie auch möglicherweise induktiven Anlagen teilweise ohne großen Aufwand erweitern, um damit ggf. die Möglichkeit zur Erbringung von Systemdienstleistungen zu schaffen.

Gewerbliche Kompensationsanlagen auf NS-Ebene sind grundsätzlich geregelt mit feiner Stufung ausgeführt. Auf MS-Ebene werden zwar zunehmend ebenfalls geregelte Anlagen installiert, aber mit gröberen Stufen.

### 5.2.3 Q-Bereitstellung im Rahmen der technischen Anschlussregeln

Für ein Versorgungsgebiet werden im Rahmen des Netzanschlussvertrages Grenzen für den Verschiebungsfaktor  $\cos\varphi$  für den Bezug von induktiver und kapazitiver Blindleistung vorgegeben. Entsprechend installierte NS- wie auch MS-Kompensationsanlagen auf Kundenseite (vorwiegend kapazitiv) regeln auf den vereinbarten Netzanschlusspunkt die zu entnehmende maximale Blindleistung aus. Als Übersicht sind in Tabelle 5 gebräuchliche Verschiebungsfaktoren  $\cos\varphi$ , das entsprechende Verhältnis der Blind- zur Wirkleistung ( $\tan\varphi$ ) und die Scheinleistungserhöhung bei gleicher Wirkleistungsentnahme dargestellt.

Tabelle 5: Darstellung des Blindleistungsanteils und der Scheinleistungserhöhung bezogen auf die Wirkleistungsentnahme

Verschiebungsfaktor $\cos\varphi$	Verhältnis Blindleistung / Wirkleistung ( $\tan\varphi$ )	Scheinleistungserhöhung bezogen auf die Wirkleistung
0,90	48 %	11,1 %
0,93	39 %	7,5 %
0,95	32 %	5,3 %
0,98	20 %	2,0 %

#### **5.2.4 Q-Bereitstellung im Rahmen bilateraler Vereinbarungen**

Bei Sondervertragskunden kann über die technischen Anschlussregeln hinaus an strategisch günstigen Netzknoten eine individuelle Vereinbarung über eine Installation zusätzlicher Kompensationsleistung getroffen werden. Oftmals lässt sich auf betrieblicher Seite eine Blindleistung von bis zu 400 kvar mit wenig Aufwand nachrüsten, wenn keine baulichen Maßnahmen anfallen. Soll diese Leistung nicht fest, sondern flexibel abrufbar sein, muss der Zugriff über eine informations- und kommunikationstechnische Einbindung erfolgen.

#### **5.2.5 Q-Bereitstellung von Erzeugungsanlagen in Industrienetzen mit kundeneigenen Kompensationseinrichtungen**

Verfügt ein Kunde über eine zentrale Q-Kompensationsanlage, die auf den Verknüpfungspunkt regelt, so regelt diese Kompensationseinrichtung ggf. gegen die Q-Bereitstellung der Erzeugungsanlage im Industrienetz. Dieses Problem innerhalb der Kundenanlage kann bilateral zwischen Netzbetreiber und dem Kunden gelöst werden. Ggf. ist ein zusätzlicher Messpunkt für die Q-Kompensationsanlage aufzubauen, der ausschließlich die Bezugsleistung misst, oder die Erzeugungsanlage ist in das Regelungskonzept der Kompensationseinrichtung zu integrieren.

#### **5.2.6 Eigene Kompensationsanlagen des Verteilungsnetzbetreibers**

Großer Vorteil eigener Kompensationsanlagen des Verteilungsnetzbetreibers im Netz ist die individuelle und optimale Konfiguration (hinsichtlich Reaktionszeiten und Zugriff) sowie Platzierbarkeit. Allerdings gilt es dabei zu bedenken, dass sich die Randbedingungen hinsichtlich der Anforderungen an das Q-Verhalten und Ausbau des Netzes (Änderung des Verkabelungsgrads etc.) ändern können.

Kompensationsanlagen im Netz sind in der Regel einfacher im Umspannwerk als im MS-Strang zu realisieren (Genehmigung, Platzbedarf und Lärmpegel). Abweichend davon kann es in Einzelfällen auch kostengünstiger sein, wenn z. B. vorhandene, aber nicht mehr genutzte Netzbetriebsmittel (z. B. begehbare ausgestattete Stationen mit Platzreserve) zum Netzanschluss von Kompensationseinrichtungen genutzt werden können.

#### **5.2.7 Mischanlagen**

Unter Mischanlagen sind Kundenanlagen mit Bezug und Erzeugung elektrischer Energie zu verstehen. Bei Bezug von Wirkleistung aus dem Netz können neben den Regelungen der TAB weiterhin bilaterale Vereinbarungen zwischen dem Anschlussnehmer und dem Netzbetreiber getroffen werden. In der Regel wird dabei ein Verschiebungsfaktorbereich vorgegeben.

Je mehr es zu einer Durchmischung und einer unkorrelierten Betriebsweise von Verbrauchern und Erzeugungsanlagen in den Netzen kommt, umso weniger kann das Systemverhalten über den Verschiebungsfaktor beschrieben werden, da P- und Q-Verhalten voneinander entkoppelt sind. Insbesondere bei geringem Wirkleistungsbezug kann es zu unzulässigen Werten des Verschiebungsfaktors kommen, wie Bild 11 illustriert. Wenn die Verbrauchslast weiterhin einen  $\cos\varphi$  von 0,93 ind. und zudem die Photovoltaik-Anlage einen  $\cos\varphi$  von 0,95 ind. aufweist, sinkt der resultierende Verschiebungsfaktor auf 0,67 ind.. Vor diesem Hintergrund sind Regelungen zu schaffen, die diese veränderten Gegebenheiten berücksichtigen. Diese Regelungen sollten sich nicht mehr ausschließlich auf die Größe  $\cos\varphi$  stützen, sondern die Blindleistung selbst verwenden.

Verfügen die Mischanlagen über regelbare Q-Kompensationsanlagen, sind die Hinweise unter Abschnitt 5.2.2 zu beachten.

Anmerkung: Besteht die Kundenanlage aus Erzeugungseinheiten/Erzeugungsanlagen, die nach unterschiedlichen Netzanschlussregeln angeschlossen und betrieben werden („Alt- und Neuanlagen“-Thematik), so ist das in der Regel unterschiedliche Q-Verhalten dieser Anlagen zu beachten [12].

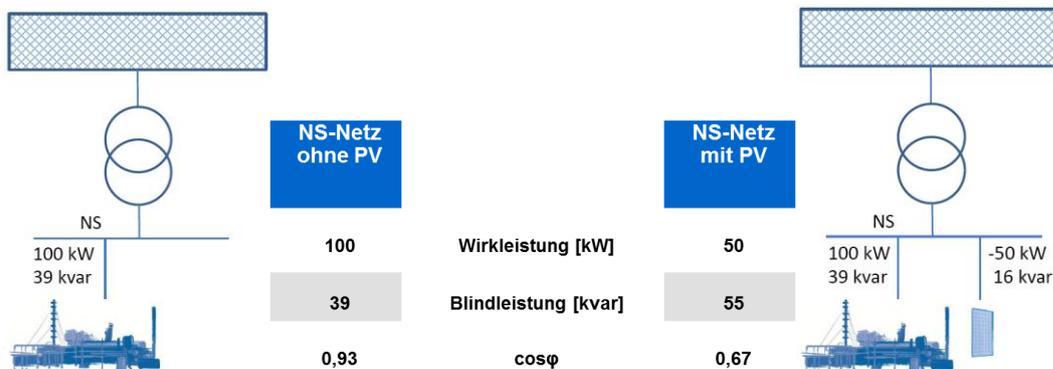


Bild 11: Veranschaulichung der Veränderung des Verschiebungsfaktors am Beispiel eines Verbrauchers ( $\cos\phi$  0,93 ind.) mit Photovoltaik-Anlage (Betrieb mit  $\cos\phi$  0,95 ind.)

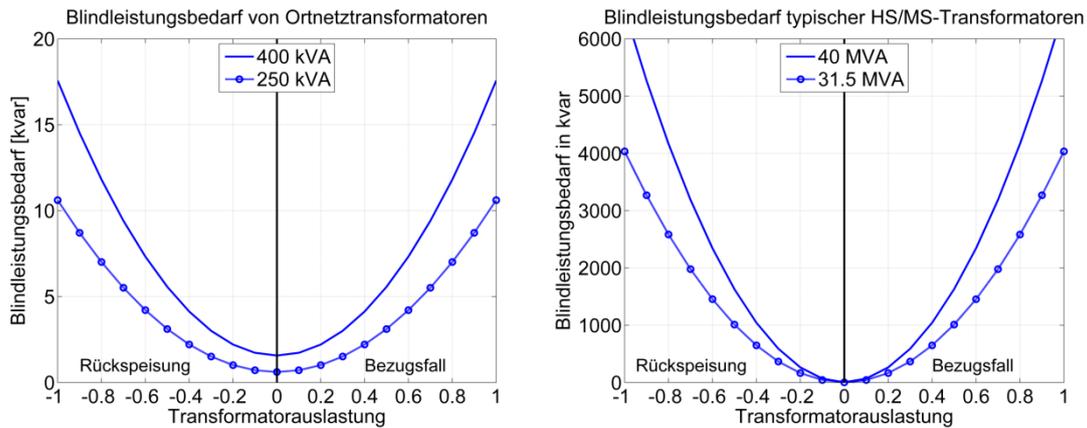
### 5.3 Netzstruktur und Netzbetrieb

Neben den aktiven Maßnahmen zur Beeinflussung der Q-Verhältnisse stehen dem Netzbetreiber weitere passive bzw. indirekt wirkende oder das Q-Vermögen erweiternde Instrumente zur Verfügung. Zu nennen sind hier Netztopologie-Anpassungen, die Einstellung des Spannungsniveaus und die Erhöhung des Q-Vermögens durch direkt wirkende Spannungsregelansätze.

#### 5.3.1 Netztopologie

Änderungen in der Netztopologie führen neben entsprechenden Änderungen in der Zusammensetzung bzw. dem Umfang der Betriebsmittel auch zu Veränderungen ihrer Belastungen. Beide Faktoren bestimmen zusammen das Q-Verhalten des Netzes. Die bestimmenden Betriebsmittel sind Transformatoren und Leitungen.

Bild 12 zeigt den Q-Bedarf von typischen Transformatoren im Verteilungsnetz in Abhängigkeit der Belastung. Transformatoren verhalten sich demnach stets induktiv. Ihre Q-Aufnahme unterteilt sich in eine nahezu konstante Hauptfeld-Q und eine belastungsabhängige Streufeld-Q. Letztere nimmt aufgrund des quadratischen Zusammenhangs zwischen der Blindleistung und dem Laststrom überproportional mit der Belastung zu.



*Bild 12: Beispielhafter Q-Bedarf von typischen Ortsnetztransformatoren bzw. typischer HS/MS-Transformatoren*

Konstruktionsbedingt haben Kabel und Freileitungen einen unterschiedlichen Q-Bedarf. Die Wahl des Betriebsmittels – sofern man diese hat – hat somit einen entscheidenden Einfluss auf den Q-Haushalt eines Netzes. Bereits ab einem geringen Verkabelungsgrad verhalten sich Netze in Schwachlastzeiten kapazitiv. Ausgeglichen in seinem Q-Haushalt ist ein Netz oder eine Leitung, wenn sich der kapazitive und induktive Blindleistungsbedarf aufheben. Dies ist der Fall, wenn die natürliche Leistung  $P_{nat}$  übertragen wird.

Bild 13 zeigt den normierten Q-Bedarf verschiedener Leitungen unter der Annahme, dass der Dauerbelastungsstrom gleich dem Bemessungsstrom ist, d. h. ohne Berücksichtigung von Umrechnungsfaktoren. Unterteilt sind die Kennlinien dabei in zwei Bereiche; dem unternatürlichen (links der gestrichelten Linie) und dem übernatürlichen (rechts der gestrichelten Linie) Betriebsbereich.

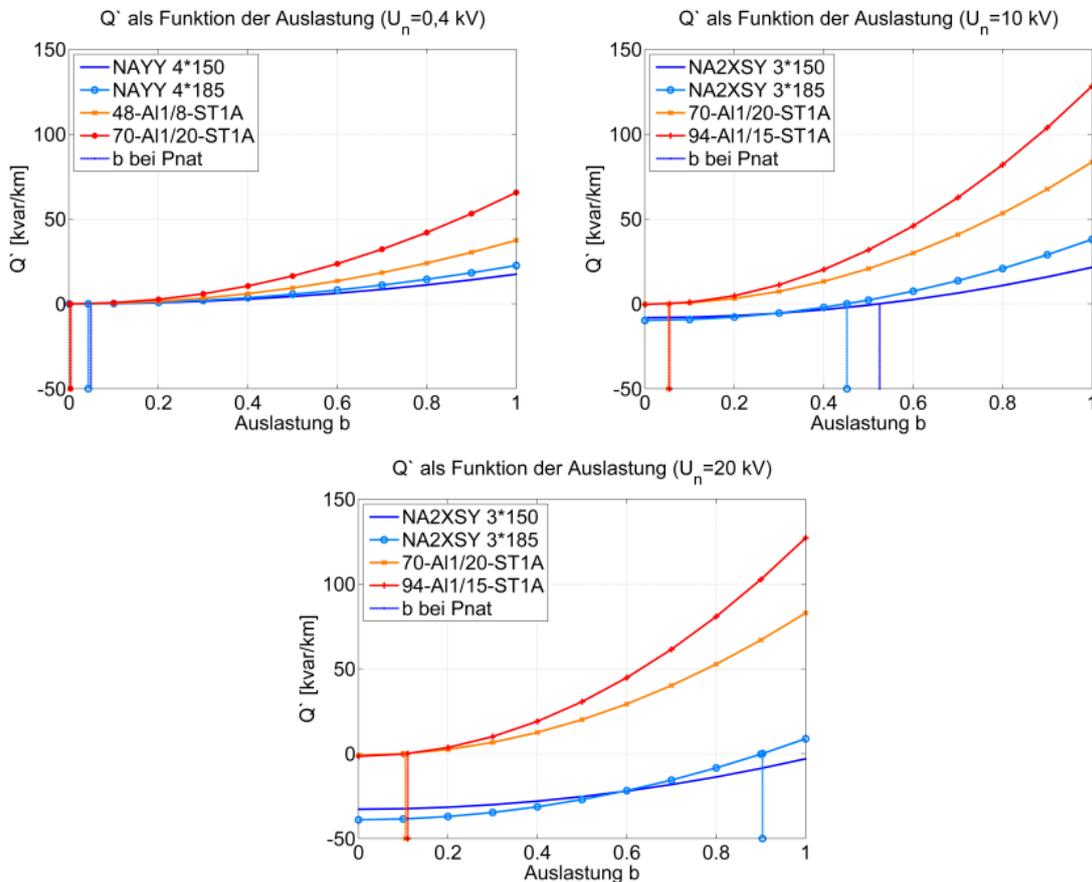


Bild 13: Auf die Leitungslänge (Kabel und Freileitung) bezogener Q-Bedarf

Aus Bild 13 bzw. dem Vergleich der einzelnen Diagramme untereinander werden folgende Aussagen ersichtlich:

- Im NS-Netz verhalten sich sowohl Kabel als auch Freileitungen schon bei niedriger Leitungsauslastung induktiv.
- Im MS-Netz muss stärker zwischen den Leitungstypen differenziert werden, da sich Freileitungen überwiegend induktiv verhalten ( $P_{nat} \ll S_{therm}$ ), Kabel jedoch nahezu über den kompletten Auslastungsbereich kapazitiv wirken ( $P_{nat} \approx S_{therm}$ ).
- 10-kV-Kabel haben einen deutlich geringeren Q-Bedarf gegenüber 20-kV-Kabeln. Daraus resultiert auch insgesamt eine marginale Beeinflussungsmöglichkeit des Q-Bedarfs im 10-kV-Netz durch Anpassung der Netzspannung (s. nächster Abschnitt).
- Erfolgt ein Netzausbau in der MS-Ebene vorwiegend mit Kabeln, bewirkt dies ein zunehmendes kapazitives Verhalten des Verteilungsnetzes.

### 5.3.2 Spannungsniveau

Unter Voraussetzung der Möglichkeit, in engen Grenzen das Spannungsniveau an der Umspannwerks-Sammelschiene festzusetzen, kann das Q-Verhalten des Verteilungsnetzes beeinflusst werden. Beispielsweise führt ein höheres Spannungsniveau zu einer höheren Ladeleistung der Leitungskapazitäten und damit zu einem insgesamt höheren kapazitiven Q-

Verhalten der Leitungen. Auch die Leitungsströme und damit der induktive Q-Bedarf der Leitungen ändern sich aufgrund der Spannungsabhängigkeit der Lasten. Dieser Einfluss ist allerdings nicht pauschal vorherbestimmbar. Denn einerseits führen spannungsabhängige Lasten in diesem Fall zu höheren Strömen, andererseits leistungskonstante Lasten zu niedrigeren Strömen. Im Normalfall kann mit höherem Spannungsniveau für ein gesamtes Verteilungsnetz mit einem insgesamt kapazitiveren bzw. weniger stark induktiven Q-Verhalten und umgekehrt ausgegangen werden.

In ausgedehnten Kabelnetzen kann in Zeiten eines geringen Lastflusses in Erwägung gezogen werden, durch geeignete Sollwert-Regelung des Stufentransformators (realisierbar über Stromkompoundierung unter Beachtung der Lastflussrichtung, s. [13]) über die Spannungsabhängigkeit der Ladeleistung Einfluss auf den Q-Austausch zu nehmen. Diese Maßnahme ist für den NS-Bereich aber uninteressant und für 10-kV-Netze nur von geringem Nutzen. Wird diese Q-Beeinflussungsmöglichkeit in Betracht gezogen, ist eine Einzelfallanalyse angeraten, weil sich der Einfluss sehr wohl unterschiedlich in den einzelnen Netzabschnitten gestalten kann.

### 5.3.3 Erweiterung des Q-Vermögens durch direkt wirkende Spannungsregelung

Werden Maßnahmen mit direkt wirkender Spannungsbeeinflussung wie beispielsweise die dynamische Sollwert-Regelung des HS/MS-Transformators, rONT's oder Lösungen zur Spannungslängsregelung im Verteilungsnetz eingesetzt (s. Bild 7), so können sich zusätzliche Flexibilitäten durch den gewonnenen Freiraum innerhalb des nach EN 50160 vorgegebenen Spannungsbandes ergeben. Diese können neben der Erhöhung der Netzanschlusskapazität für Erzeugungsanlagen oder Lasten, in Abhängigkeit der konkreten Netz- und Anschlusssituation, für die Beeinflussbarkeit der Q-Bilanz eines Verteilungsnetzes genutzt werden. Dabei sind zwei Einflussfelder ausschlaggebend:

- Veränderung des Q-Verhaltens der Leitungen durch höhere Auslastung: Werden die betroffenen Stränge höher ausgelastet, ist im Mittel eine Abnahme des kapazitiven Q-Verhaltens bzw. eine Verschiebung hin zu induktiverem Q-Verhalten zu erwarten. Außerdem wird dem Maximalwert (bei Leerlauf) des kapazitiven Q-Bedarfs durch verringerten Netzausbau entgegengewirkt. Dabei sind aber die Spannungen im Netz, die Netzverluste und die Alterung der Betriebsmittel zu beachten.
- Veränderung des Q-Bedarfs durch entstehenden Freiheitsgrad im Q-Verhalten der Erzeugungsanlage :  
Durch den gewonnenen Freiraum innerhalb des vorgegebenen Spannungsbandes können Erzeugungsanlagen entsprechend von der Aufgabe der Spannungshaltung entbunden und das Q-Vermögen für die Netzoptimierung herangezogen werden.

Die Veränderung des Q-Verhaltens der regelbaren Transformatoren bzw. Lösungen zur Spannungslängsregelung durch Impedanzänderung des Transformators im Zuge der Stufung kann mit Blick auf den Q-Bedarf der Leitungen, Erzeuger und Verbraucher von seiner Größe her generell vernachlässigt werden.

#### 5.3.3.1 Umspannwerks-Regelung

In der klassischen Umsetzung wird das Verteilungsnetz am HS/MS-Verknüpfungspunkt auf einen konstanten Wert der Transformatorausgangsspannung geregelt. Wenn zusätzliche Informationen

über die Spannungsverhältnisse im MS-Netz einbezogen werden, kann die Sollwertvorgabe dynamisch gestaltet und damit Spannungsbandreserven effektiver genutzt werden.

Eine gängige Realisierung ist hierbei eine vom Wirklastfluss über den Transformator oder über Netzabgänge abhängige Spannungssollwertvorgabe an der MS-Sammelschiene, s. z. B. [35], welche bei bereits vorhandenen digitalen Transformatorreglern häufig ohne großen Aufwand umgesetzt werden kann.

Unter Nutzung zusätzlicher Netzinformationen aus der Tiefe des Netzes (z. B. Spannungsmesswerte an Schaltwerken oder Erzeugungsanlagen etc.) kann die Regelung weiter verfeinert werden und so der Spannungssollwert z. B. auch abhängig von der Netzsituation geregelt werden. Hierbei ist an Lösungen auch für den Ausfall der Kommunikationstechnik zu denken.

#### 5.3.3.2 rONT-Einsatz

Der Einsatz von rONTs bewirkt eine Entkopplung der Spannung des entsprechenden NS-Netzes vom überlagerten MS-Netz. Dementsprechend können Erzeugungsanlagen im NS-Netz von der Aufgabe der Spannungshaltung entbunden werden und für ein höheres Q-Vermögen sorgen. Das Potenzial hängt wesentlich von der Einsatzstrategie bzw. dem rONT-Durchdringungsgrad ab. Höhere Durchdringungsgrade des rONT führen zu einer zunehmenden spannungsmäßigen Entkopplung des MS-Netzes von den unterlagerten NS-Netzen und ermöglichen so auch im MS-Netz größere Freiräume innerhalb des vorgegebenen Spannungsbandes. Dementsprechend können auch die in einem betreffenden MS-Strang angeschlossenen, weiter vom Umspannwerk entfernten Q-Regelvariablen für die Netzoptimierung herangezogen werden. Im rein theoretischen Fall eines flächendeckenden rONT-Einsatzes könnte man nahezu alle Q-Regelvariablen im gesamten Verteilungsnetz verbessert nutzen. Ein derartiges Netz besäße unter allen Maßnahmen der direkten Spannungsbeeinflussung das größte Potenzial zur Steigerung der Aufnahmefähigkeit sowie das höchstmögliche Q-Vermögen. Weiterführende Informationen finden sich in [14].

#### 5.3.3.3 Lösungen zur Spannungslängsregelung (Strangregler, MS/MS-Transformator)

Wird in einem Strang eine Spannungslängsregelung durchgeführt, kann ebenfalls entsprechend der Spannungsentkopplung kapazitive bzw. induktive Blindleistung durch die Q-Regelvariablen des betreffenden Stranges bereitgestellt werden. Solche Lösungen gibt es für die Nieder- und Mittelspannungsebene.

## 6 Systemanalyse

In diesem Kapitel sind die grundlegenden Vorgänge zusammengefasst, welche notwendig sind, um das eigene Netz hinsichtlich des Istzustandes des Q-Verhaltens und dessen mögliche Weiterentwicklung einschätzen zu können. Dabei sollten folgende Analysen durchgeführt werden (Bild 14):

- Erstellung und Analyse von P-Q-Diagrammen und
- Erstellung und Analyse von Szenarien für die Stark- und Schwachlast jeweils in Kombination mit geringer und hoher Einspeisung.

Im Rahmen einer Systemanalyse können verschiedene Betriebszustände betrachtet werden, z. B.:

- Normalbetrieb (insbesondere für hohe EEG-Einspeisung – d.h. z.B. für sonnige und/oder windreiche Tage – bei Schwachlast bzw. Starklast und geringe EEG-Einspeisung bei Stark- und Schwachlast),
- gestörter Betrieb und
- Netzwiederaufbau.

Der Schwerpunkt liegt hier beim Normalbetrieb. Störungsszenarien in Netzen, Netzteilen oder bei Anschlussnehmern können jedoch dann für die Q-Bilanz von Bedeutung sein, wenn vertragliche Regelungen existieren, welche eine Einhaltung der Vorgaben auch im gestörten Betrieb verlangen. Bei entsprechender Anschlussdichte in einem Netz sollte der Ausfall bzw. das Fehlverhalten eines einzelnen Anschlussnehmers keine signifikante Auswirkung haben.

Zur Bewertung des Systemzustandes sind entsprechende Informationen/Daten des Netzes, der Erzeugungsanlagen und Lasten erforderlich. Diese Daten sollten in geeigneter Form dokumentiert und aktuell gehalten werden.

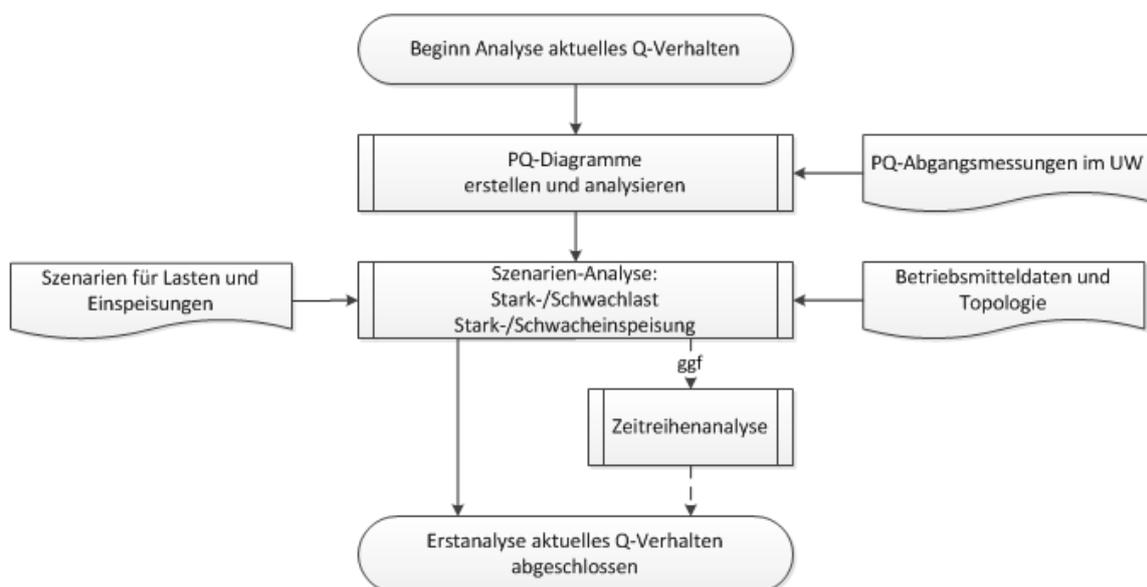


Bild 14: Ablaufdiagramm zur Analyse des Q-Verhaltens

## 6.1 Messwert-basierte Analyse des Q-Verhaltens des eigenen Netzes

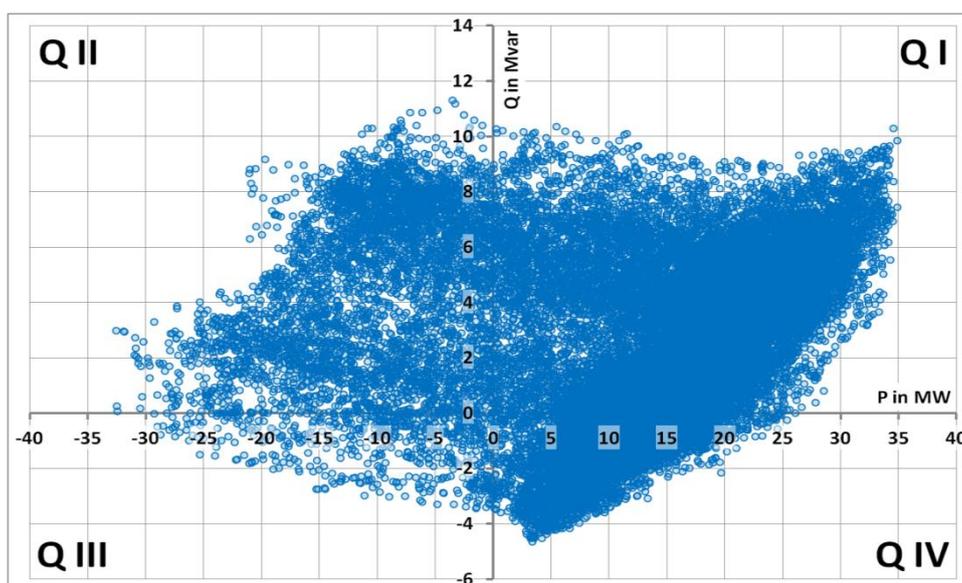
Um den Q-Haushalt eines Netzgebietes bewerten und in Abhängigkeit der gegebenen Rahmenbedingungen beeinflussen zu können, ist eine Bestandsaufnahme der tatsächlichen Verhältnisse notwendig. Als Mittel zur Darstellung und Visualisierung eignen sich Messungen, welche die Wirk- und Blindleistung im 4-Quadranten-System erfassen (P-Q-Diagramme). Wenn entsprechende betriebliche Messungen fehlen, so sollten zumindest an den verrechnungsrelevanten Übergabepunkten zu anderen Netzen geeignete Messwerte zur Verfügung stehen.

Verrechnungsmessungen basieren in der Regel auf einer ¼-Stunden-Arbeitszählung, so dass der zeitliche Rahmen für die meisten Einsatzfälle definiert ist. Betriebliche Messungen (z. B. im Rahmen der Netzführung) bilden ggf. kleinere Messintervalle ab. Dies kann hilfreich sein, wenn es um schnelle Reaktionszeiten bei der Umsetzung von Regelanforderungen hinsichtlich der Blindleistung geht.

Die Bestandsaufnahme lässt sich in folgende wesentlichen Aufgabengebiete unterteilen:

- Erfassung der verrechnungsrelevanten Verknüpfungspunkte zu vorgelagerten Netzbetreibern,
- Erfassung der verrechnungsrelevanten Verknüpfungspunkte zu nachgelagerten bzw. benachbarten Netzbetreibern und Anschlussnehmern,
- Betrachtungen zu eigenen relevanten Teilnetzen aus betrieblichen Messungen.

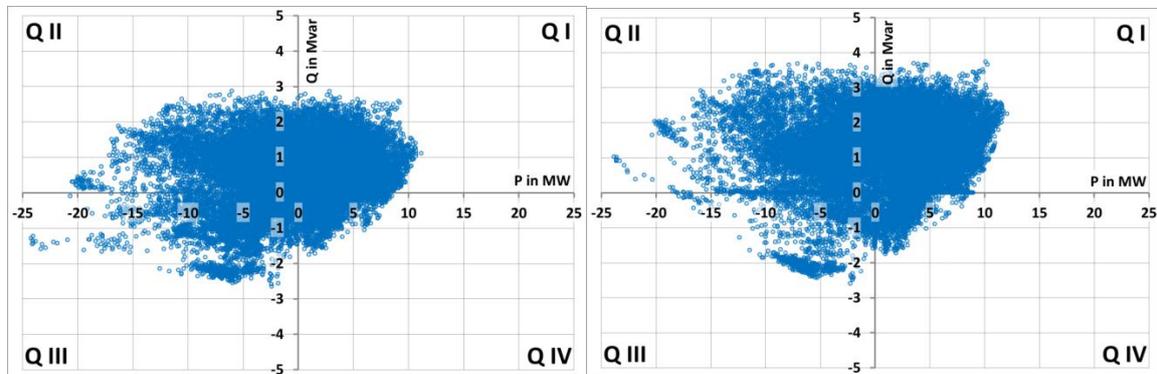
Die Darstellung sollte in einem klassischen P-Q-Diagramm und ggf. zusätzlich in Form von  $\cos\phi$ -Werten erfolgen. Als Zeitintervall für die Mittelung eignet sich die zugrunde liegende Abrechnungsperiode. Üblicherweise wird man als Bezugszeitraum ein Jahr wählen, um möglichst alle für die Grenzen der P-Q-Punktewolke relevanten Betriebszustände erfassen zu können. Bild 15 zeigt zur Veranschaulichung das P-Q-Diagramm eines Netzgebietes.



*Bild 15: P-Q-Diagramm eines Netzgebietes an der Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators gemessen (Umspannwerk mit 2 Transformatoren; Summe der MS-seitigen ¼-h-Messungen über ein Jahr)*

Die Wahl des Verknüpfungs-/Verrechnungspunktes hat einen großen Einfluss auf die Q-Bilanz. So verändert sich der Q-Bedarf auf der Oberspannungsseite von Transformatoren insbesondere

im Bereich hoher Auslastung durch die Transformatorreaktanz. Im nachfolgenden Beispiel eines HS/MS-Transformators verändert sich der maximale Q-Bedarf bei über 20 MW Rückspeisung um ca. 2 Mvar und bei einer Bezugsleistung von über 10 MW um ca. 1 Mvar (Bild 16).

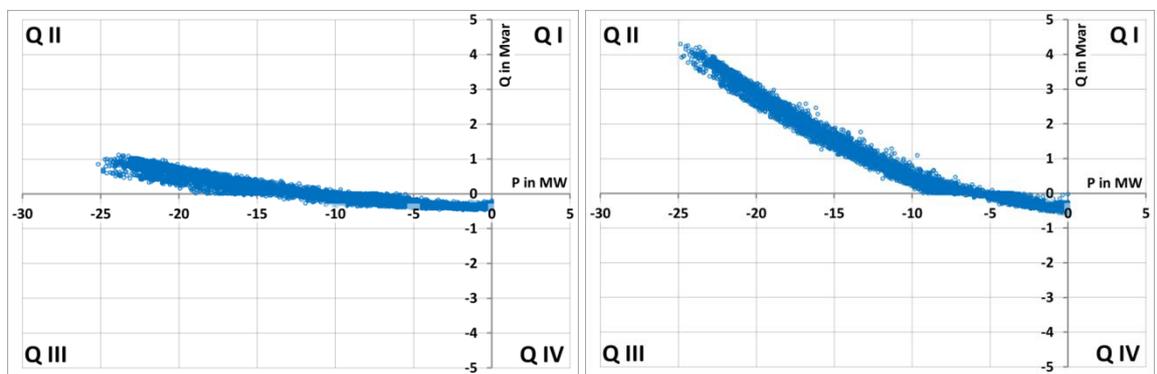


a) Unterspannungsseitige Messung

b) Oberspannungsseitige Messung

**Bild 16:** Beispielhafte P-Q-Diagramme bei unter- und oberspannungsseitiger Messung

Dieser grundsätzliche Einfluss der Transformatoren ist auch beim Anschluss von Erzeugungsanlagen zu berücksichtigen (Bild 17). Dem wird mit den aktuellen Anschlussbedingungen für Erzeugungsanlagen Rechnung getragen, indem explizit die Einhaltung der Q-Vorgaben am Netzanschlusspunkt gefordert wird, d. h. der Q-Bedarf der Anschlusstransformatoren ist durch den Anlagenbetreiber im Rahmen der gültigen Regelwerke auszuregeln.

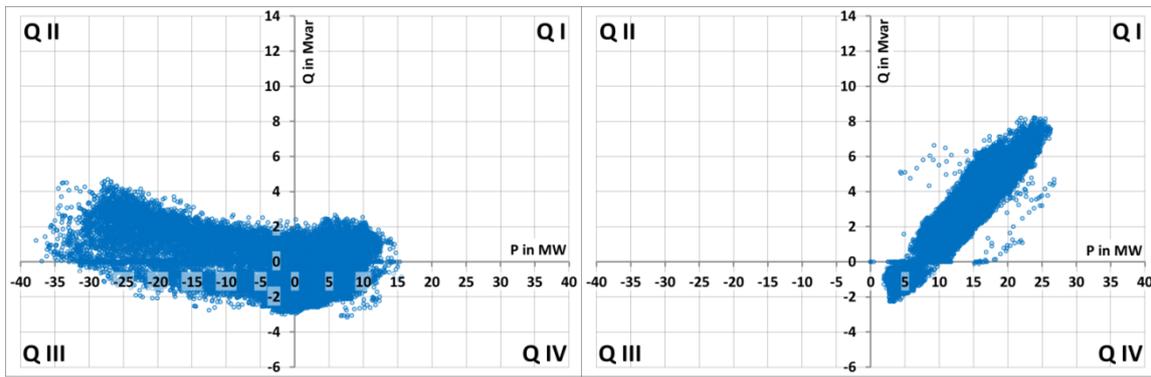


a) Unterspannungsseitige Messung

b) Oberspannungsseitige Messung

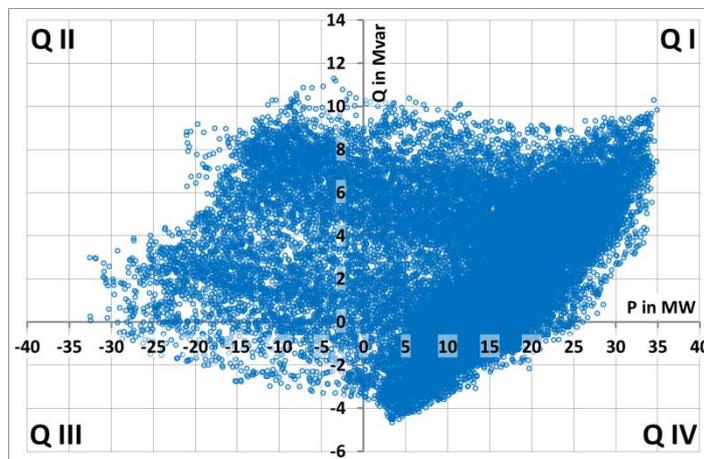
**Bild 17:** Beispielhafte P-Q-Diagramme bei unter- und oberspannungsseitiger Messung am Erzeugungsanlagen-Anschlusstransformator

Weiterhin ist bei Umspannwerken, die Netze mit unterschiedlichen Last- und Einspeise-Charakteristiken versorgen, zu beachten, dass die Überlagerung des P-Q-Verhaltens beider Netze zu einem Verlust von Detailinformationen führt. Die für beide Netze resultierende P-Q-Punktewolke weitet sich deutlich gegenüber den Einzelmessungen auf. Das Bild 18 zeigt beispielhaft eine häufig anzutreffende Konstellation eines Umspannwerks mit 2 Transformatoren. Von diesen versorgt einer das Netz einer Kleinstadt mit Industrie und ein weiterer das ländlich geprägte Umland mit einem hohen Anteil dezentraler Einspeisung. Jedes Netz dominiert einen anderen Quadranten. In der Summe, welche z. B. die Bilanz eines Verteilungsnetzbetreibers gegenüber dem vorgelagerten Netzbetreiber darstellen kann, ergibt sich ein weitaus größeres Spektrum an möglichen Arbeitspunkten als für jedes Teilnetz allein.



a) Landnetz mit sehr hoher Einspeisung

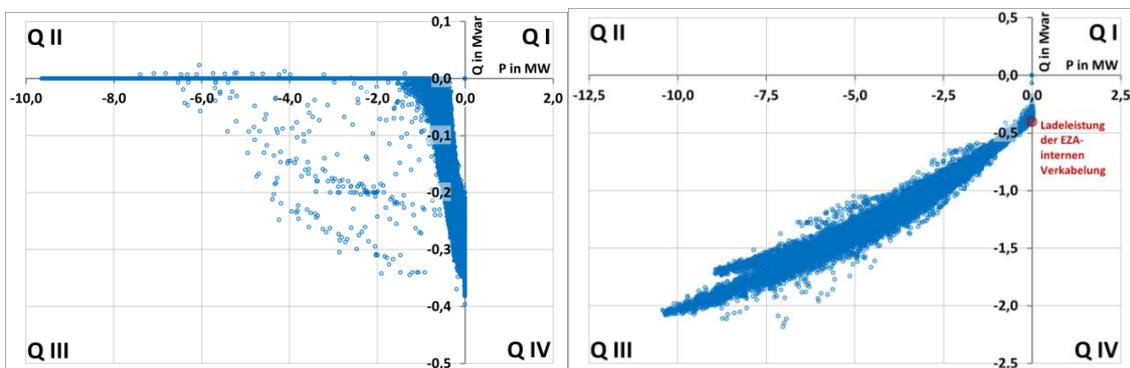
b) Stadtnetz mit hohem Industrieanteil



c) Nettobilanz beider Netze

Bild 18: Beispielhafte P-Q-Diagramme für Stadt- und Landnetze und deren Durchmischung

Ergänzend können die P-Q-Diagramme auch zur Analyse des Verhaltens von Erzeugungsanlagen herangezogen werden. Daraus ist z. B. ersichtlich, ob die Erzeugungsanlage das geforderte Q-Verhalten erfüllt. Nachfolgend wird dies am Beispiel von zwei Erzeugungsanlagen veranschaulicht (Bild 19).



a) mit Park-Regelung auf  $\cos\varphi = 1$

b) Fehlverhalten durch falsche Parametrierung bei der Vorgabe  $\cos\varphi = 0,99$  (Q II) für die EZE in der Erzeugungsanlage

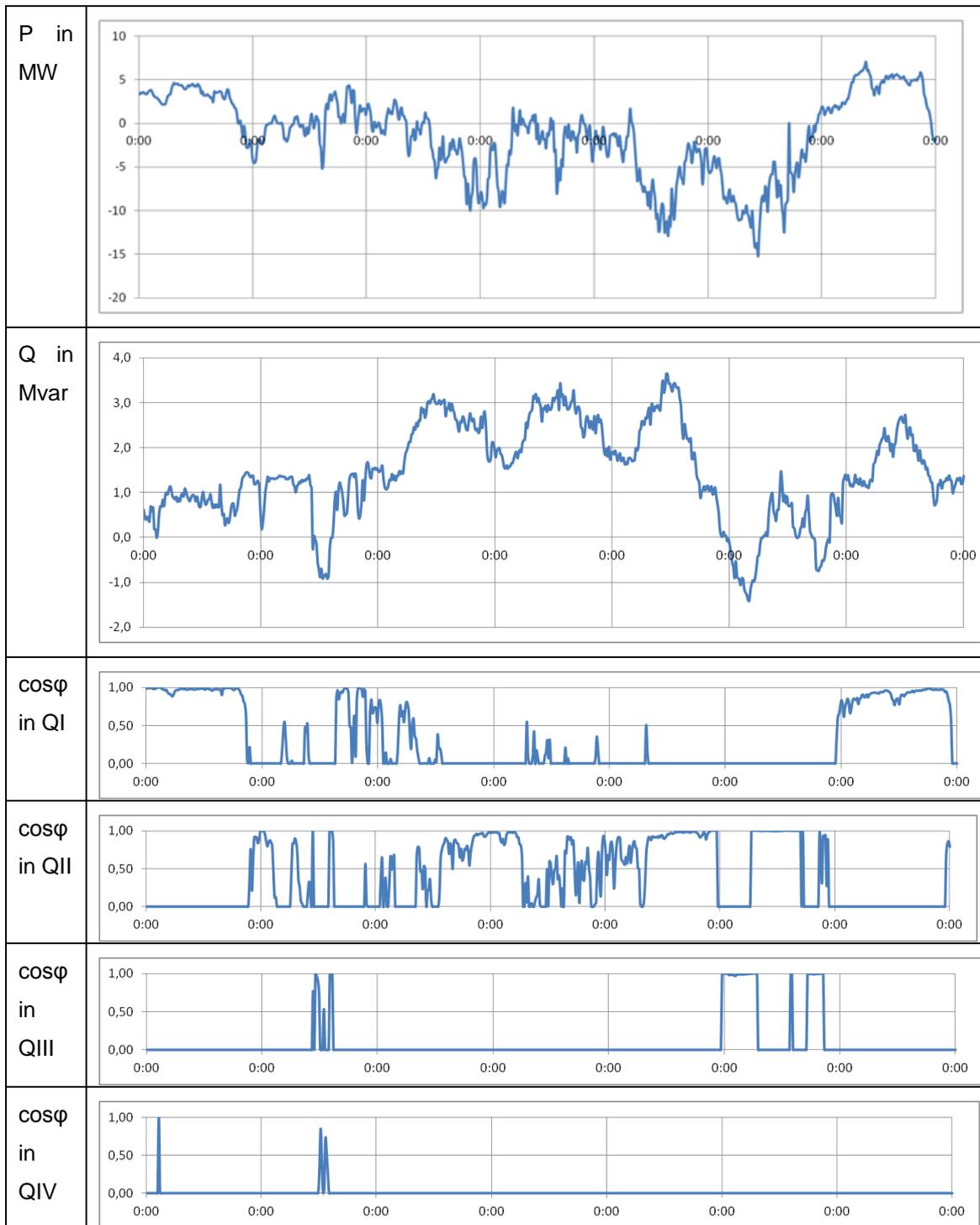
Bild 19: Beispielhafte P-Q-Diagramme für Erzeugungsanlagen

Für die Erzeugungsanlage in Bild 19 a links erkennt man sehr gut das gewollte Verhalten nach der aktuellen BDEW-Richtlinie zum Anschluss von Erzeugungsanlagen an das MS-Netz [6]. Die Vorgabe für diese Erzeugungsanlage lautet  $\cos\phi = 1$  für den Verknüpfungspunkt. Bis zu 10 % seiner Bemessungsleistung von ca. 10 MW, also 1 MW, darf der Blindleistungsbezug bzw. die – abgabe nicht mehr als 10 % der Bemessungsleistung betragen, also 1 Mvar. Dies wird mit -0,4 Mvar eingehalten. Ab 1 MW liegen die meisten Punkte im Bereich der geforderten Genauigkeit von 0,005 für den  $\cos\phi$ . Die ¼-Stundenwerte, welche nicht im gewünschten Bereich liegen, sind von der Anzahl her zu vernachlässigen und resultieren im Wesentlichen aus Mittelungseffekten über die ¼-Stunde beim Übergang vom Betrieb mit hoher Leistung auf geringere Leistung.

Im Bild 19 b rechts ist die resultierende Kennlinie einer älteren Erzeugungsanlage zu sehen. Die Vorgabe lautete hier  $\cos\phi = 0,99$  im Quadranten II für die einzelnen EZE. Durch einen Parametrierfehler befindet sie sich fälschlicherweise im Quadranten III. Dies zeigt, welche Schwierigkeiten in der Praxis immer wieder auftreten können, wenn es darum geht, den Betrieb im gewünschten Quadranten zu definieren. Eine Prüfung des Verhaltens der Bestandsanlagen (Erzeugungsanlagen und Lasten) sollte daher grundsätzlich vor weiteren Maßnahmen zur Beeinflussung des Q-Haushaltes durchgeführt werden.

Gut zu erkennen ist auch die Ladeleistung der Kabelstrecken innerhalb der Erzeugungsanlage von ca. 0,4 Mvar. Diese Ladeleistung kann sich problematisch auf den Betrieb mit schwacher Netzlast auswirken. Dadurch kann ein Verteilungsnetz betriebsmäßig in den Quadranten III oder IV gelangen, ohne dass dem direkt entgegengewirkt werden kann.

Die Darstellung von  $\cos\phi$ -Werten im Zeitbereich für die vier Quadranten zeigt Bild 20. Man erkennt, dass nur in den Fällen, in denen ein ausgeprägtes Last- oder Einspeiseverhalten vorliegt, der  $\cos\phi$ -Wert sinnvollerweise zur Beschreibung des Q-Verhaltens des betrachteten Netzes herangezogen werden kann. Zu Zeitpunkten mit einem relativ geringen Wirkleistungsfluss nimmt der  $\cos\phi$ -Wert hingegen mit hoher Volatilität beliebige Werte zwischen 0 und 1 an. Die Darstellung des zeitlichen P-Q-Verhaltens lässt die darin enthaltenden Korrelationen erkennen. Außerdem gewinnt man detailliertere Aussagen über die Blindleistungssituation zum Zeitpunkt der Stark- und Schwachlast sowie über das saisonale Niveau der Last- und Q-Gänge. Ein weiterer Vorteil liegt darin, besondere Schaltzustände und deren Auswirkungen auf die Q-Bilanz zu identifizieren (Ausreißer).



*Bild 20: Beispielhafte Darstellung von P- und Q-Gängen und den daraus resultierenden cosφ-Werten im Zeitbereich einer Woche für die vier Quadranten*

## 6.2 Simulationsbasierte Analyse des Q-Verhaltens des eigenen Netzes

Die Erstellung und Analyse von Szenarien der Q-Situation in einem Verteilungsnetz ist grundsätzlich jedem Netzbetreiber zu empfehlen. Als Netzbetreiber gewinnt man Informationen zum Q-Verhalten von Netzbetriebsmitteln und Netznutzern. Ein weiterer Vorteil liegt darin, Q-relevante Entwicklungen im Verteilungsnetz frühzeitig erkennen und ggf. gegensteuern zu

können. Neben einer Analyse der Spannungsverhältnisse und Q-Bilanz lassen sich Betriebsmittelbelastungen und Netzverluste aufzeigen und entsprechende Strategien ableiten. In einem ersten Schritt empfiehlt sich die Berechnung des unbeeinflussten Falls, d. h. der Situation, in der noch nicht zu Zwecken der Q-Bilanzierung auf das Q-Verhalten der Betriebsmittel eingewirkt wird.

Dies sei im Folgenden am Beispiel des ländlichen Netzes aus Bild 21 näher ausgeführt. Es ist voll verkabelt und besteht aus 120 Ortsnetzstationen im Abstand von je 1,5 km. Drei MS-Einspeiser sind vorhanden: Zwei Photovoltaik-Parks und der ‚Windpark 1999‘, bestehend aus fünf unkompensierten Käfigläufer-Asynchron-Generatoren zu je 850 kW. Es wurde angenommen, dass sich die Anlagen vom Netz trennen, wenn die Wirkeinspeisung unter 5 % der Bemessungsleistung fällt, um Fälle reinen Q-Verbrauches zu vermeiden. Auf NS-Ebene sind Photovoltaik-Anlagen vorhanden, deren Inbetriebnahme vor 2012 erfolgte und deren installierte Leistung der des Starklastfalls entspricht. Der Umspannwerks-Stufenschalter ist im unbeeinflussten Ausgangsfall spannungsgeregelt auf 1,02 p.u.

Drei Analyse-Schritte werden anhand dieses Netzes im Folgenden veranschaulicht: Erstens, die Bewertung einzelner Netzplanungsfälle für den unbeeinflussten Ausgangsfall. Zweitens, die Analyse einer Zeitreihensimulation für denselben Ausgangsfall. Drittens, die Analyse von Beeinflussungsszenarien mittels Regelung der Erzeugungsanlage.

#### **6.2.1 Charakteristische Lastflusskombinationen (Netzplanungsfälle)**

Bild 22 schlüsselt für die charakteristischen Lastflusskombinationen (‚Szenarienanalyse Starklast/Schwachlast‘) auf, wie sich jeweils das Q-Verhalten des simulierten Netzes zusammensetzt. Eine solche Analyse kann helfen, den im konkreten Netz wirkungsvollsten Hebel zur Q-Beeinflussung zu identifizieren. Im Beispiel ist der Q-Beitrag der NS-Verbraucher auffällig – es wurde ein Verschiebungsfaktor von 0,96 unterstellt. Es ist erkennbar, dass das Netz sich im Schwachlastfall mit NS-Erzeugung noch kapazitiver verhält als im Schwachlastfall ohne Erzeugung. Dies liegt daran, dass in diesem Beispiel die Leitungsbelastung reduziert wird. Hieraus wird deutlich, dass pauschale Aussagen zum Q-Verhalten ohne Szenarienanalyse oftmals nicht möglich sind.

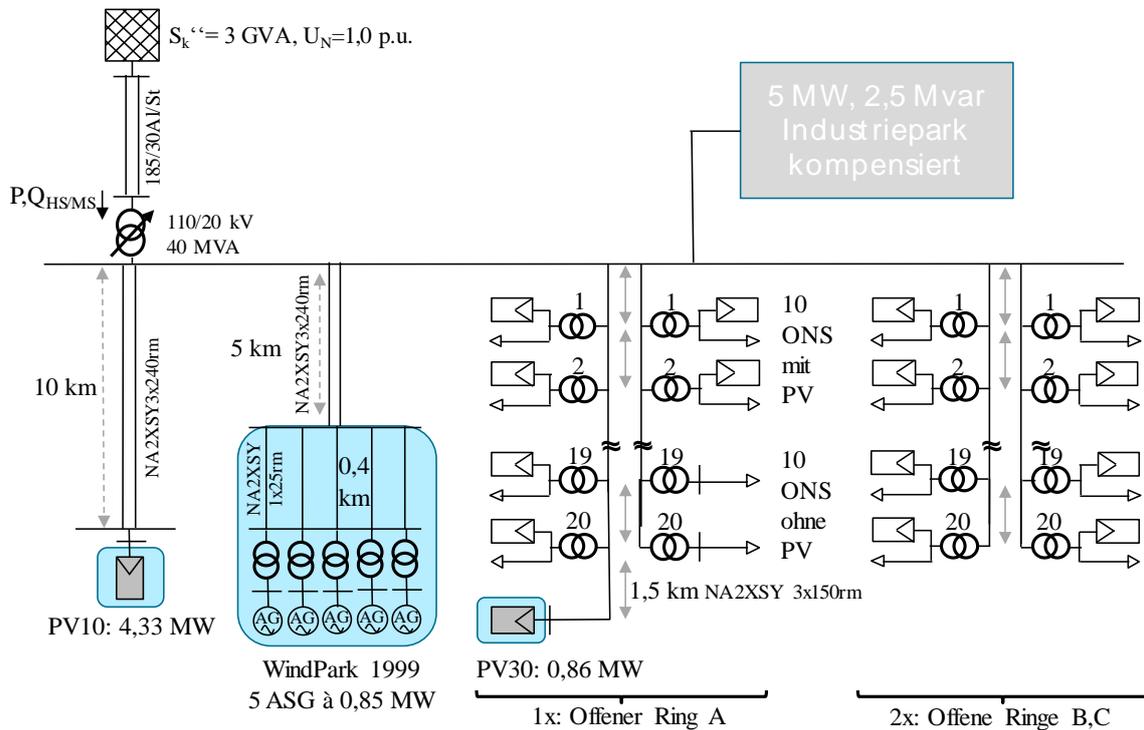


Bild 21: Prinzipskizze des Musternetzes, in Anlehnung an [25]

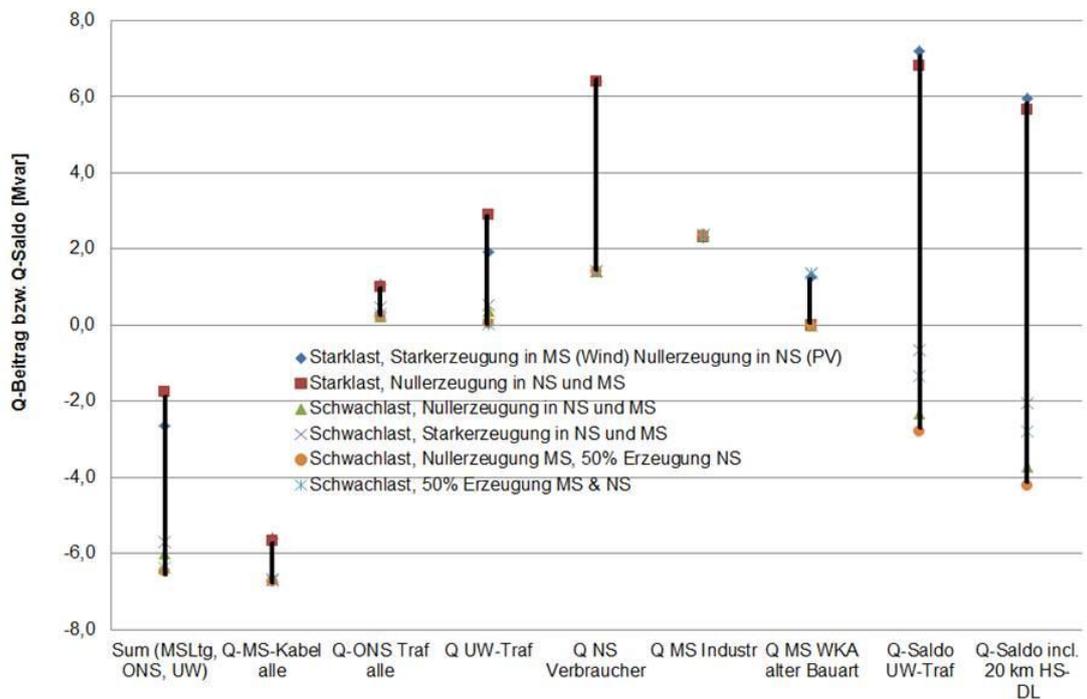


Bild 22: Q-Beiträge für den unbeeinflussten Ausgangsfall

### 6.2.2 Zeitreihenanalyse

Eine Ergänzung der Systemanalyse stellt die Zeitreihenanalyse dar. Mithilfe dieser lassen sich der erwartete Q-Austausch und die sich daraus ergebenden freien Q-Regelbänder für jeden Netznutzungsfall ableiten. Gerade bei situationsabhängigen Q-Anforderungen aus dem überlagerten Netz ist eine solche Analyse unumgänglich. Notwendige Eingangsgrößen für eine Zeitreihenanalyse sind Betriebsmitteldaten und Topologie des Netzes in Form eines lastflussfähigen Datensatzes sowie Last- und Einspeisezeitreihen über einen ausreichend großen Zeitraum.

Bild 23 und Bild 24 reflektieren das Ergebnis einer einfachen Zeitreihenanalyse für einen Tag in 15-min-Schritten für das Beispiel-Netz aus Abschnitt 6.2. Als Grundlage für die Interpretation des Q-Austausches mit dem HS-Netz stellt Bild 23 zunächst die Zusammensetzung des P-Austausches dar. NS-Anschlussnehmer und Industrie mit MS-Anschluss bilden den Verbrauchs-Sockel. Die Komponenten der Einspeisung sind grafisch überlagert.

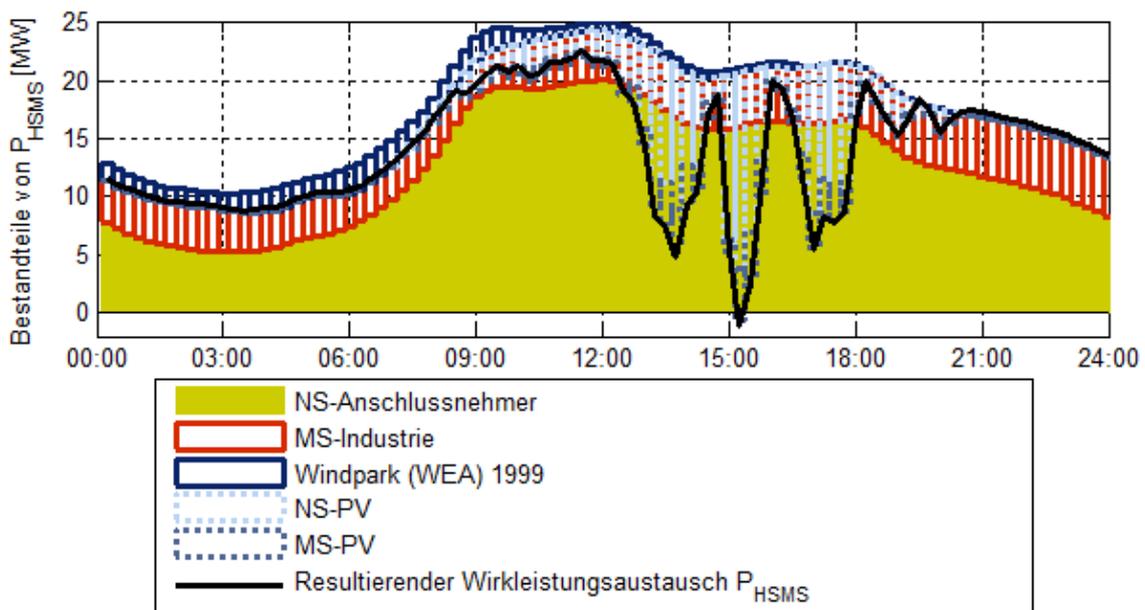


Bild 23: Wirkleistungsbilanz des Musternetzes

Dunkelblau dargestellt ist die Einspeisung des Windparks 1999 (s. Bild 23) – ab ca. 17 Uhr trennen sich dessen Anlagen mangels Wind vom Netz. Der Tag ist von wechselhafter Sonneneinstrahlung geprägt, entsprechend ergeben sich für die Photovoltaik-Einspeisung in NS und MS steile Flanken. Die schwarze Linie kennzeichnet den Saldo des Wirkleistungsflusses am Umspannwerk.

Bild 24 stellt die Zusammensetzung des Q-Austausches dar. Der Saldo des Q-Verhaltens der Kabel – dominiert durch die Ladeleistung – ist hellblau negativ abgetragen. Diese bildet die untere Begrenzung des farblichen Bereiches und schwankt abhängig von der durchschnittlichen Auslastung der Kabel und von Stufenschalterstellungsänderungen sehr geringfügig. Bei den übrigen Q-Beiträgen handelt es sich um Bezug induktiver Blindleistung. Sie sind somit, ausgehend von der Kabel-Ladeleistung bei ca. -7,5 Mvar, positiv abgetragen. Die obere Begrenzung des induktiven Q-Verbrauchs des MS-Windpark 1999 bildet gleichzeitig das resultierende Q-Verhalten des gesamten Netzes ab. Aufgrund der angenommenen niedrigen Auslastung der Ortsnetztransformatoren – 48 % bei Starklast – ist deren Beitrag im vorliegenden Beispiel gering. Der Q-Beitrag des Umspannwerks-Transformators wird zu Zeiten des

Vorzeichenwechsels der Wirkleistung am Umspannwerk erwartungsgemäß nahezu Null. Es zeigt sich, dass aufgrund der Windverhältnisse der Windpark 1999 dazu beiträgt, das nächtliche kapazitive Verhalten des Netzes zu mildern, so dass der blau abgetragene Saldo des Austausches am Umspannwerk nur ca. -2 Mvar beträgt, statt der -3,5 Mvar, die sich einstellen würden, falls der Wind um ca. 3 Uhr für den Betrieb der Anlagen nicht ausreichen würde. Indirekt wird damit bereits das Beeinflussungspotenzial der Erzeugungsanlage zur Blindleistungssteuerung deutlich. Ebenso sticht der Q-Beitrag der Abnehmer als Hebel für etwaige Maßnahmen ins Auge.

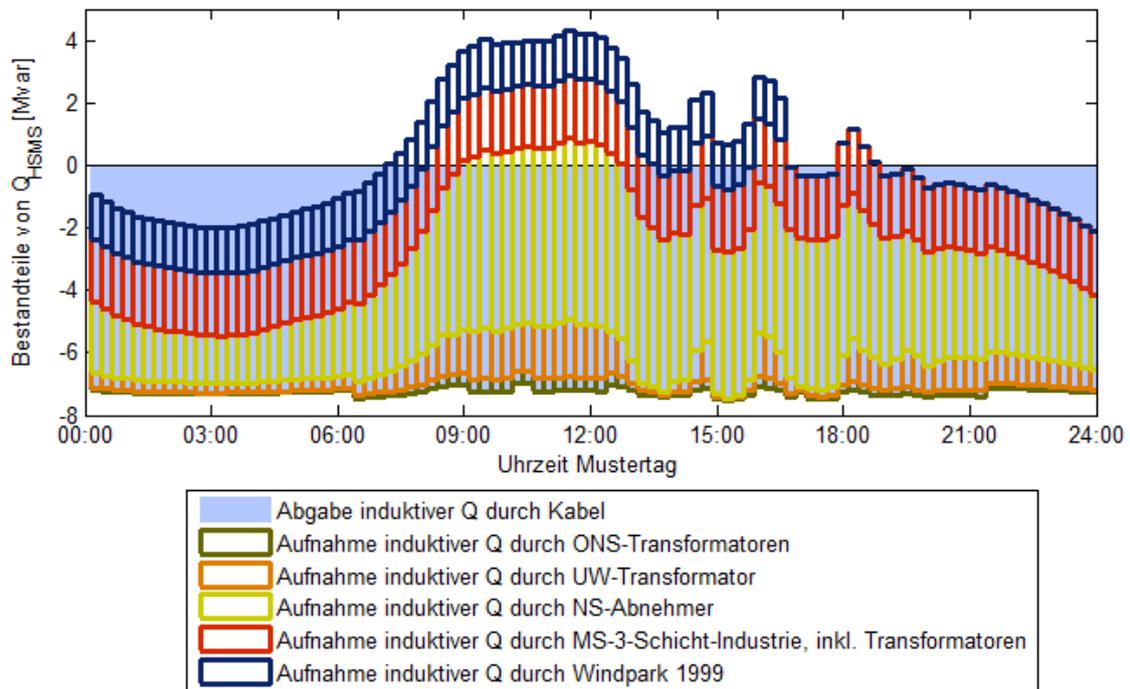


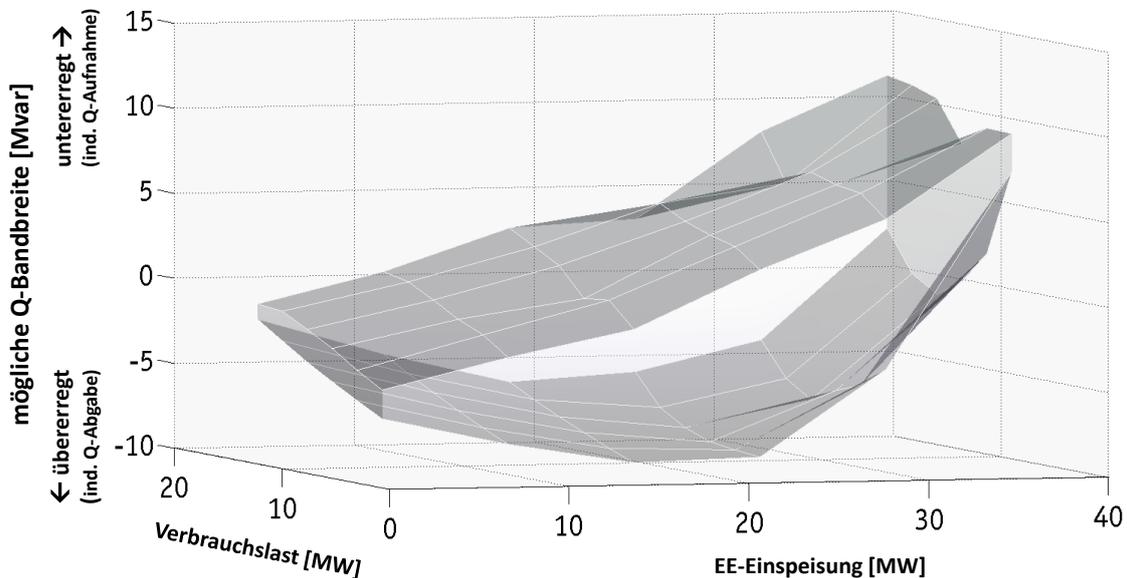
Bild 24: Q-Bilanz des Musternetzes im unbeeinflussten Ausgangsfall

### 6.2.3 Analyse mithilfe probabilistischer Lastflussrechnung

Die Zeitreihenanalyse erfordert einen hohen Rechenaufwand, da für jeden Zeitpunkt eine Parametrierung und eine Lastflussberechnung erforderlich sind. Im Jahresverlauf ähneln sich jedoch viele Netznutzungsfälle, so dass eine Reduktion der zu berechnenden Situationen hilfreich sein kann. Ein praktisches Werkzeug hierfür bietet die probabilistische Lastflussrechnung.

Bei dieser werden Verbraucher und Einspeisungen über Verteilungsfunktionen nachgebildet, die aus Einspeise- bzw. Lastzeitreihen gewonnen werden und gegenseitige Abhängigkeiten über Korrelationen berücksichtigt. Unter Berücksichtigung dieser Modelle wird durch Ziehung zufälliger Wertepaare zeitpunktunabhängig eine hinreichend große Anzahl von Netznutzungsfällen synthetisch generiert und jeweils einer Lastflussrechnung unterworfen [15]. Neben der möglichen Reduktion der Berechnungsanzahl ist ein weiterer Vorteil die hinreichende Abdeckung aller möglichen Szenarien, auch derjenigen, die evtl. im Zeitverlauf eines Jahres nicht enthalten sind. Zusätzlich lassen sich mithilfe des Verfahrens Informationen gewinnen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmter Netznutzungsfall auftritt. Mithilfe weitergehender Lastflussberechnungen ist es möglich, das Q-Vermögen, also die minimale bzw. maximale Blindleistung, die theoretisch aus dem betrachteten Netz für das überlagerte Netz zur Verfügung

gestellt werden kann sowie die daraus ableitbaren freien Q-Regelbänder für jeden Netznutzungsfall in Abhängigkeit der Beeinflussungsmöglichkeiten des Q-Verhaltens (s. Kapitel 5) zu bestimmen.



*Bild 25: Mögliche Q-Bandbreite eines beispielhaften MS-Netzes*

Im Rahmen von [16] wurde beispielhaft die probabilistische Lastflussrechnung für ein synthetisches ländliches MS-Netz (inklusive unterlagerter NS-Netze) mit einem Kabelanteil von ca. 50 % und hoher Durchdringung mit dezentralen Erzeugungsanlagen angewendet (das Beispielnetz unterscheidet sich von dem in Abschnitt 6.2 untersuchten Netz). Darauf basierend wurde das Q-Vermögen in Abhängigkeit von Fundamentaldaten (Verbrauchslast, EE-Einspeisung) bestimmt und in Bild 25 als Bandbreite zwischen den grau schraffierten Flächen dargestellt. Die obere Fläche beschreibt aus Sicht des überlagerten Netzes das maximal mögliche untererregte, die untere Fläche das maximal mögliche übererregte Verhalten des MS-Netzes. Als Beeinflussungsmöglichkeiten des Q-Verhaltens sind hierbei vereinfacht nur die Q-Bereitstellung von Erzeugungsanlagen, die eine gewisse Mindestgröße überschreiten und die Stufenänderung des Umspannwerks-Transformators angenommen.

Im Beispielnetz führt in Fällen geringer EE-Einspeisung eine steigende Last zu zunehmender Belastung der Betriebsmittel und somit zu einem zunehmenden induktiven Q-Bedarf der Leitungen. Das Q-Vermögen verschiebt sich daher bei nahezu gleichbleibender Bandbreite in Richtung untererregter Fahrweise. Die technischen Anschlussregeln für die MS bzw. NS schreiben keinen Phasenschieberbetrieb für Erzeugungsanlagen vor und bei geringer EE-Einspeisung ist die Q-Bereitstellung aufgrund der wirkleistungsabhängigen Grenze des  $\cos\phi$  von 0,95 bzw. 0,9 niedrig. Somit ist die betriebliche Einflussnahme auf den Q-Haushalt im Wesentlichen auf die Stufenänderung des Umspannwerks-Transformators beschränkt (sofern dies regeltechnisch realisiert ist), was die geringe Bandbreite des Q-Vermögens erklärt. Nimmt die EE-Einspeisung und somit auch die Möglichkeit der Vorgabe einer höheren Q-Bereitstellung der Erzeugungsanlage zu, erhöht sich die Bandbreite des Q-Vermögens. Die Spannungshaltung kann bei zunehmender Wirkeinspeisung der EE-Einspeisung und somit steigender Spannung zunächst noch über Stufenänderung des Umspannwerks-Transformators gewährleistet werden,

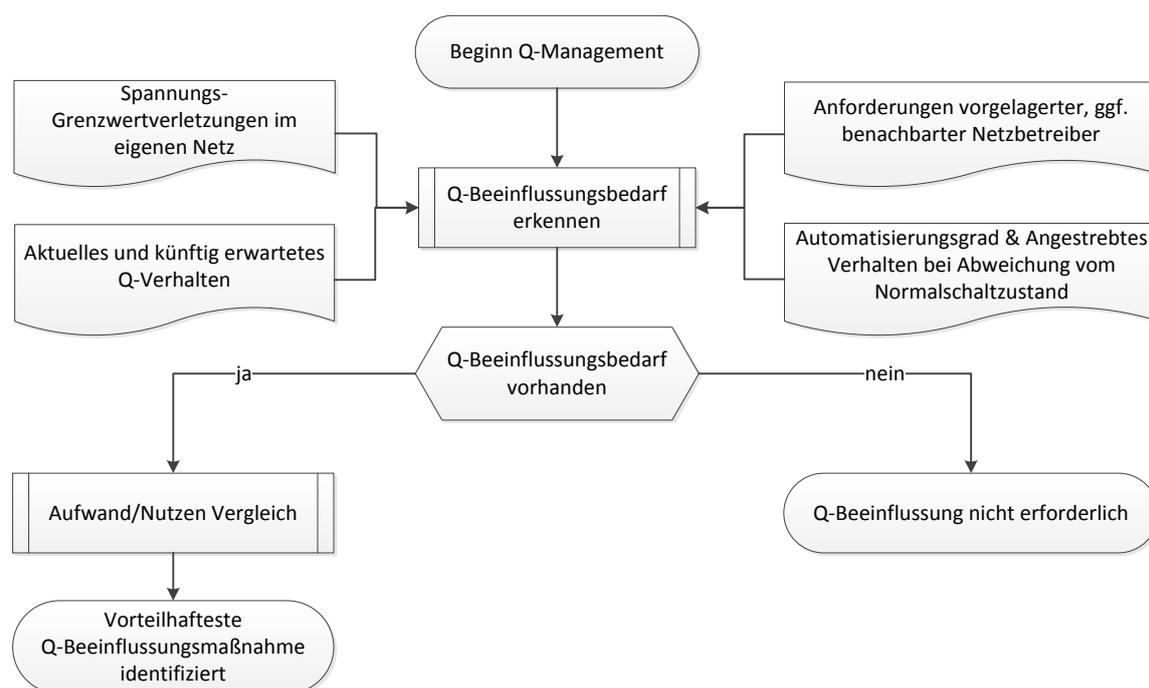
indem die Spannung an der Unterseite des Umspannwerks-Transformators abgesenkt wird. Erreicht der Stufenschalter sein Limit und treten in einzelnen Halbringen mit hoher EE-Durchdringung Spannungsbandverletzungen nach oben auf, kann die Spannungshaltung in diesen Halbringen nur noch über eine untererregte Fahrweise der Erzeugungsanlagen selbst gewährleistet werden. Dies erklärt den in Bild 25 zu erkennenden Knick des unteren Grenzwertes im kapazitiven Bereich und die mit zunehmender starker EE-Einspeisung verbundene Verringerung des aus Sicht des überlagerten Netzes maximal übererregten Q-Vermögens. Für Schwachlastsituationen mit hoher EE-Einspeisung, in denen die Spannungshaltung besonders angespannt ist, verringert sich die Bandbreite des Q-Vermögens nur noch auf einen schmalen Bereich im untererregten Bereich.

Mithilfe der Kenntnis über das situationsabhängige Q-Vermögen des Netzes bekommt der Netzfürer ein Werkzeug zur Hand, mit dem er für jeden Zustand das verbleibende Q-Regelband abschätzen kann, indem er den aktuell vorliegenden Q-Austausch an den Schnittstellen mit den ermittelten Grenzwerten vergleicht. Für nähere Informationen sei auf [16] verwiesen.

## 7 Umsetzung eines Blindleistungs-Managements

Dieses Kapitel umfasst praktische und konkrete Hinweise für ein gezieltes Q-Management in Netzführung und Netzplanung. Nachdem ein Netzbetreiber mit Hilfe der in den vorherigen Abschnitte dargestellten Methoden der Systemanalyse das aktuelle Q-Verhalten seines Netzes festgestellt hat und er die Beeinflussungsmöglichkeiten des Q-Verhaltens kennt, kann ein Q-Management umgesetzt werden (Bild 26). Dazu sind die Schnittstellen bzw. Anforderungen zum vorgelagerten und ggf. benachbarten Netzbetreiber und die Einhaltung der Spannungsgrenzwerte im eigenen Netz zu prüfen, Abschnitt 7.1. Einen Einfluss auf die Ausgestaltung des Q-Managements haben auch der vorhandene Grad an Automatisierung im Netz und das Verhalten bei Störungen und Abweichungen vom Normalschaltzustand, Abschnitt 7.2.

Die Umsetzung eines netzbetreiberübergreifenden Q-Managements erfordert ein geeignetes koordiniertes Zusammenspiel zwischen benachbarten Netzbetreibern, z. B. zwischen Übertragungsnetzbetreiber und Verteilungsnetzbetreiber. Es wäre beispielsweise eine Lösung denkbar, wonach der Übertragungsnetzbetreiber über vereinbarte festgelegte organisatorische Wege auf Q-Variablen im Verteilungsnetz zurückgreifen könnte (s. auch Kaskade).



*Bild 26: Prozessschritt Umsetzung eines Q-Managements*

Im Rahmen eines Aufwand-Nutzen-Vergleichs sollten die unterschiedlichen Q-Variablen unter Berücksichtigung von Verlusten für ihre Verwendung zum Q-Management abgewogen werden. Dabei sollte die Verfügbarkeit des Q-Vermögens bei der Nutzenbewertung berücksichtigt werden. Neben den in Kapitel 5 beschriebenen Maßnahmen zur Q-Beeinflussung, kann ein mögliches Ergebnis sein, dass auf Basis bilateraler Vereinbarungen auf das Q-Vermögen des vorgelagerten Netzes zurückgegriffen werden kann.

Ein Bedarf zur Beeinflussung von Blindleistung kann aus verschiedenen Gründen vorliegen. Insbesondere aufgrund der in den letzten Jahren stark steigenden Anschlusszahlen dezentraler

Erzeugungsanlagen in den Verteilungsnetzen wird ein Q-Management heutzutage verstärkt zur Spannungshaltung im eigenen Netz durchgeführt. Dabei ist zu beachten, dass Wechselwirkungen zu den anderen Einsatzbereichen entstehen, z. B. Veränderung der klassischen Q-Bilanzen durch Spannungshaltung-Q. Diese werden im Abschnitt 7.3 vorgestellt. Die Möglichkeiten der Einbindung eigener und fremder Betriebsmittel in ein Q-Management werden in Abschnitt 7.4 erläutert, bevor in Abschnitt 7.5 auf die Kriterien für die Auswahl von Kennlinien für kommunikationslose (lokale) Regelung von Erzeugungsanlagen und Speichern eingegangen wird. Neben den in Kapitel 4 genannten Einsatzfällen kann ein Q-Management auch zur Verlustminimierung beitragen. Dieses lässt sich i. d. R. nur mit kommunikationsbasierten Regelungsverfahren umsetzen, s. Abschnitt 7.6.

### 7.1 Schnittstelle mit vorgelagertem bzw. benachbarten Netzen

Im Rahmen der Netzplanung muss der Nachweis der Einhaltung aller Netzkriterien einschließlich Spannungshaltung und Q-Haushalt für relevante Belastungs- und Schaltzustände erbracht werden. Hierfür müssen Informationen über den Bedarf von Wirk- und Blindleistung an den Schnittstellen an – bezüglich des Q-Haushaltes – kritischen Tagen und bei charakteristischen Schaltzuständen zur Verfügung gestellt werden. Die Sollwertvorgaben für Wirk- und Blindleistung an den Schnittstellen sollten dokumentiert werden. Durch die skizzierten System-Veränderungen sind die vorgenannten Anforderungen aus [11] zunehmend auch an unterlagerten Schnittstellen zu erfüllen.

Der zulässige Q-Austausch eines Verteilungsnetzes an den vorgelagerten Schnittstellen wird im Normalfall durch vertragliche Regelungen vereinbart. Diese Regelungen sollten an die Realität angepasste P-Q-Diagramme definieren, [36], oder im Rahmen der Kaskade das Q-Verhalten durch Fernwirkzugriff situationsabhängig steuern. Derzeit wird hierzu eine VDE-Anwendungsregel „Maßnahmen für die Systemstabilität und deren Kaskadierung“ in Energieversorgungsnetzen erarbeitet. Es sollen verbindliche Umsetzungsmaßnahmen zur Sicherstellung und Durchführung notwendiger Maßnahmen nach EnWG §§ 13 (2) und 14 (1, 1a) erarbeitet werden.

Weiterhin ist zu beachten, dass es sich um leistungsbezogene Größen handelt, welche zu jedem Zeitpunkt einzuhalten sind. In der Vergangenheit wurden diese technischen Vorgaben ( $\cos\phi$ , o. ä.) in vertraglichen Beziehungen im Rahmen von Stromlieferverträgen häufig über kumulierte Zeiträume (z. B. 1 Monat) verwendet, also auf die elektrische Größe Arbeit angewendet. Dies kann zu vorübergehenden Zuständen führen, welche technisch nicht vertretbar sind, sich aber in der Abrechnung herausmitteln und somit vertragskonform sind. In Anbetracht der für den Netzbetrieb erforderlichen flexiblen Q-Beeinflussung sollten solche Vereinbarungen nicht mehr geschlossen werden.

Außerdem kann empfohlen werden, vertragliche Angaben zur Blindleistung immer mit folgenden Anmerkungen zu versehen:

- Vereinbarung des Verbraucherzählpfeilsystems,
- Darstellung der Quadranten (bildliche Darstellung bzw. Bezug auf die Darstellung in einer technischen Anschlussregel) und
- Verwendung der Begriffe untererregt (Quadrant I und II) und übererregt (Quadrant III und IV).

Sofern es sich um eine Schnittstelle zum Übertragungsnetz handelt, wird in Zukunft der europäische Network Code für Demand Connection [2] Anwendung finden. Dieser gibt nach

momentanem Stand für den unregelmäßigen Blindleistungsaustausch zwar Eckpunkte vor, lässt aber sehr viel Raum für bilaterale Vereinbarungen.

Es kann auch ratsam sein, Q-Grenzen nicht für einzelne MS-Netze zu definieren, sondern für durch den HS-Netzbetreiber definierte Q-Zonen. Hierbei könnte die Initiative auch von dem MS-Netzbetreiber ausgehen. Dies würde der natürlichen Vielfältigkeit des Q-Verhaltens einzelner MS-Netze gerecht, und würde den Aufwand zur Einhaltung der Q-Vorgaben reduzieren, s. [25]. Die Zulässigkeit und Umsetzbarkeit einer solchen Poolbildung, sowie die Verantwortlichkeiten für das resultierende Q-Verhalten der Netze wären hierbei allerdings zu klären.

Bei der Ausgestaltung vertraglicher Vereinbarungen zur Blindleistung sollten nicht nur der Normalbetrieb, sondern ggf. auch abweichende Betriebszustände (z. B. (n-1)-Fälle) berücksichtigt werden.

## **7.2 Verhalten bei abweichenden Schaltzuständen und Störungen**

### **7.2.1 Abweichungen vom Normalschaltzustand**

Abweichungen vom Normalschaltzustand können erheblichen Einfluss auf das Q-Management nehmen. Ziel dieses Abschnittes ist es, einen kurzen Einblick in die Erwägungen im Zusammenhang mit dem Normalschaltzustand zu geben.

In HS- und MS-Netzen ist die (n-1)-Sicherheit für die Versorgung sicherzustellen, jedoch nicht für Erzeugungsanlagen. Ist eine Erzeugungsanlage Umspannwerks-nah angebunden, aber nicht mit direkter Erzeugungsanlagen-eigener Anbindung, so kann es geschehen, dass sie aufgrund von Umschaltungen oder Schutzauslösungen zeitweise nicht mehr elektrisch Umspannwerks-nah, sondern elektrisch Umspannwerks-fern liegt. Die Erzeugungsanlage steht dann ggf. für einen Ausgleich des Q-Haushaltes nicht mehr zur Verfügung. Zudem kann die Erzeugungsanlage aufgrund einer Schutzauslösung (z. B. U>-Schutz) bzw. durch Vorgaben des Netzbetreibers vom Netz getrennt werden. Auch in diesem Fall steht die Blindleistung für einen Ausgleich des Q-Haushaltes dann nicht zur Verfügung. Zudem ist zu beachten, dass es zu wiederholten Resynchronisierungs-Versuchen kommen kann. Hierfür kann der geschickte Einsatz von Blindleistung ebenfalls Abhilfe schaffen, wie Quelle [38] zeigt.

In Abhängigkeit des Anschlusskonzeptes der Erzeugungsanlage kann die (n-1)-Situation auch den auslegungsrelevanten Fall darstellen und bestimmt dann die Q-Vorgaben für Erzeugungsanlagen und Lasten, was insbesondere auch bei den Überlegungen in Abschnitt 7.3 zu berücksichtigen ist.

### **7.2.2 Anlagenverhalten bei Störung oder Kommunikationsausfall**

Bei allen Regelungen und Fernsteuerungen ist neben der Manipulationsgefahr auch zu bedenken, dass systematische Fehler oder Programmfehler in der Steuerung erhebliche Auswirkungen auf das Stromversorgungsnetz haben und entsprechend sicher zu gestalten sind.

Bei jeder Art von Störungen sollten die Anlagen definierte Zustände einnehmen, damit jederzeit ein sicherer Netzbetriebszustand erreicht wird. Bei einem Kommunikationsausfall oder einer eingeschränkten Kommunikation könnte eine geeignete Rückfallebene der Beibehaltung des aktuellen Betriebspunktes vor Eintritt der Störung darstellen. Bei einer Spannungswiederkehr nach einer Versorgungsunterbrechung könnte dagegen ein anderer initialer Betriebspunkt vorteilhaft sein.

### 7.3 Spannungshaltung vs. Blindleistungshaushalt

Vorliegend wird die bereits mehrfach angeklungene Abwägung zwischen Spannungshaltung und Blindleistungshaushalt näher betrachtet. Hierbei zeigt Abschnitt 7.3.1 zunächst grundlegende Zusammenhänge auf, auch mit Blick auf die Wechselwirkungen im Bereich Betriebsmittelauslastung und Verluste. Abschnitt 7.3.2 stellt den Einfluss der Erzeugungsanlagen-Entfernung vom Umspannwerk für die weiteren Entscheidungen des Q-Managements dar.

#### 7.3.1 Mögliche Wechselwirkungen und Auswirkungen eines Q-Managements

Bei der Durchführung von Q-Beeinflussungsmaßnahmen sind verschiedene Wechselwirkungen zu beachten. Es seien hier einige grundsätzliche Zusammenhänge angesprochen:

- Durch induktiven bzw. kapazitiven Bezug von Blindleistung durch Erzeugungsanlagen oder Kompensationsanlagen kann die Spannung im Netz beeinflusst werden. Deshalb ist besonderes Augenmerk auf die Einhaltung der Spannungsbandgrenzen zu richten.
- Blindleistung erhöht die Scheinleistung und damit die Belastung der Netzbetriebsmittel sowie die Netzverluste. Deshalb ist im Besonderen auf deren Stromtragfähigkeit zu achten.
- Eingriffe in das Q-Verhalten der Regelvariablen führen zu geänderten Q-Flüssen, die ihrerseits zur Veränderung der Auslastung und damit des Q-Verhaltens der Netzbetriebsmittel führen.
- Eine Ausweitung der Maßnahmen zur Spannungshaltung (z. B. die Forderung untererregter Fahrweise bei Integration neuer Anlagen) kann sich auf die Q-Bilanz zum vorgelagerten Netz auswirken und ist deshalb zu berücksichtigen [18].
- Die Spannungsänderung der MS-Sammelschienenspannung am HS/MS-Transformator durch Q-regelnde Erzeugungsanlagen darf nicht für die Bewertung von Anschlussbegehren hinsichtlich der statischen Spannungshaltung berücksichtigt werden, weil der Stufenschalter diese ausregelt. Dies gilt im Übrigen auch für den rONT zwischen den Ebenen MS und NS. Hinsichtlich der Bewertung der schnellen Spannungsänderung darf die Beeinflussung der Transformatorspannung durch Q-regelnde Erzeugungsanlagen berücksichtigt werden.
- Wird im Verteilungsnetz die Blindleistung zunehmend für die Spannungshaltung im eigenen Netz eingesetzt, können bei hoher Erzeugungsanlagen-Durchdringung signifikante Q-Flüsse entstehen, welche die Netzverluste erhöhen. Die Auswirkung auf Q-Flüsse in der MS-Ebene hängt ab vom Verkabelungsgrad, der Leitungsauslastung und der Spannungsebene (10, 20 oder 30 kV), vgl. Bild 13.

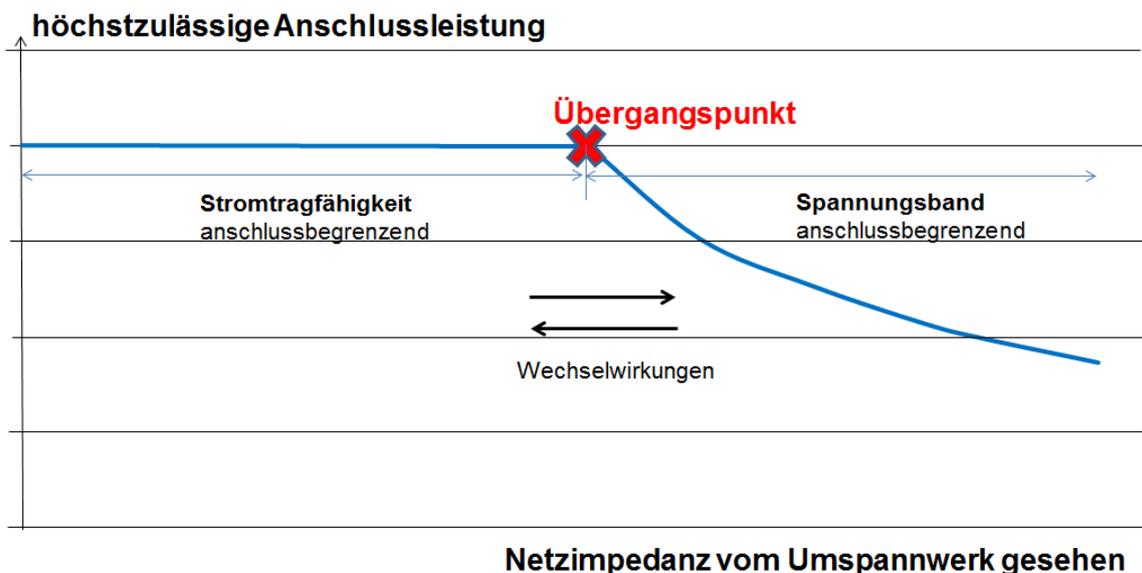
#### 7.3.2 Einfluss der Entfernung der Erzeugungsanlage vom Umspannwerk

Allgemein sollte geprüft werden, ob im (bzw. in unmittelbarer Nähe des) Umspannwerks Möglichkeiten zur Bereitstellung von Blindleistung zum Ausgleich von Umspannwerks-fernen Anlagen und vom Netz bezogener Blindleistung bestehen. So kann häufig eine übererregte Fahrweise von Anlagen im (bzw. in unmittelbarer Nähe des) Umspannwerk sinnvoll sein. Dies wird im Folgenden näher erläutert.

Auf jedem MS- bzw. NS-Strang besteht abhängig vom Leitungstyp (Netzimpedanz) ein Abstand zum Umspannwerk, ab dem das gemäß den technischen Anschlussregeln erlaubte

Spannungsband für die Integration neuer Erzeugungsanlagen anschlussbegrenzend wirkt. Dieser Punkt markiert die Stelle der Leitung, wo eine Einspeisung den maximal möglichen Strom bei der max. möglichen Spannung hervorruft („Übergangspunkt“ in Bild 27). Dieser „Übergangspunkt“ einer MS-Leitung liegt in der Praxis zwischen 0,5 und wenige Kilometer vom Umspannwerk entfernt und wird von folgenden Einflussgrößen bestimmt:

- verwendete Leitungstypen,
- Netztopologie (Anzahl und Länge von Stichen im Netzabgang, Normal-/Sonderschaltzustände, Normaloffenstellen bzw. Trennstellen),
- mögliche Last- und Einspeisesituation (insbesondere Rückspeisungen aus NS-Netzen),
- Parametrierung von Erzeugungsanlagen, z. B. Blindleistungskennlinien oder fester  $\cos\phi$ -Wert,
- zulässige Spannungsanhebung im MS-Strang, die ggf. bei Einsatz von rONTs erhöht werden kann (siehe Abschnitt 5.3.3) und
- installierte Erzeugungsleistung im Netz.



*Bild 27: Darstellung der höchstzulässigen Erzeugungsanlagen-Anschlussleistung einer Leitung in Abhängigkeit der Anschlussentfernung und der Bereiche ihrer anschlussbegrenzenden Kriterien*

Die Fähigkeiten der Q-Regelung von Erzeugungsanlagen hinter diesem Übergangspunkt sollten demnach bevorzugt zur Spannungshaltung eingesetzt werden [13]. Das Spannungsniveau innerhalb der Kundenanlage ist dabei zu berücksichtigen. Zur Spannungshaltung mittels dezentraler Erzeugungsanlagen existiert eine Vielzahl von Untersuchungen, z. B. [13, 17].

Zum Ausgleich des Blindleistungshaushaltes kann versucht werden, Anlagen im vorderen Leitungsabschnitt zur Bereitstellung induktiver Blindleistung heranzuziehen. Dies kann auf Grund der daraus resultierenden Spannungsanhebung zu einer gewissen Verschiebung des Übergangspunktes hin zu geringeren Abständen führen.

Sind keine oder zu wenige Erzeugungsanlagen direkt an der Umspannwerks-Sammelschiene angeschlossen, kommt grundsätzlich auch eine vom Umspannwerk entfernungsabhängige Vorgabe für die Entscheidung, ob die Q-Fahrweise der Erzeugungsanlage für die Verbesserung des Q-Haushaltes herangezogen werden sollte, in Betracht.

#### **7.4 Einsatz eigener und fremder Betriebsmittel**

Durch eigene und fremde Kompensationsanlagen sowie durch Änderung in der Netzstruktur bzw. Maßnahmen im Netzbetrieb (siehe Abschnitt 5.3) kann ebenfalls ein erheblicher und nachhaltiger Einfluss auf das Q-Verhalten des eigenen Netzes und die Spannungshaltung im eigenen Netz genommen werden. Bei fremden Anlagen ist dabei zu klären, ob ein Potenzial und die Bereitschaft zur Q-Beeinflussung vorhanden sind. Bei neuen Betrieben kann im Rahmen des Netzanschlusses, bei bestehenden Betrieben über bilaterale Vereinbarungen eine Erweiterung der fremden Kompensationsanlage angestoßen werden. Die Nutzung fremder Kompensationsanlagen kann für den Netzbetreiber insofern interessant sein, als sich mit einem höheren Kompensationsgrad der Spannungsfall über den Leitungen im Starklastfall reduziert. Ebenso können eine Abnahme des induktiven Q-Bezugs in Starklastzeiten erwartet und damit engere Grenzen im Q-Haushalt realisiert werden. Bei Betrieben mit durchgängiger Produktion kann auch der Abruf von induktiver Blindleistung in Schwachlastzeiten wirtschaftlich interessant sein, wenn sich das kapazitive Verhalten des Verteilungsnetzes dadurch verringern lässt. Ebenso sind derartige Anlagen für die Bereitstellung quasi-stationärer Netzstützungs-Q geeignet. Voraussetzungen für eine Steuerung kundeneigener Kompensationsanlagen wären entsprechende vertragliche Regelungen und die Anbindung der Kundenanlage an die Fernwirktechnik des Netzbetreibers.

Der Einsatz von direkt wirkenden Spannungsregelkonzepten eröffnet teilweise sehr hohe Freiheitsgrade im Q-Management und der Netzoptimierung. Für weitere Informationen siehe Abschnitt 5.3.3 bzw. [14].

Tabelle 6 zeigt einen Überblick über die Wirkungen von Betriebsmitteln auf den Q-Haushalt und die Spannungshaltung. Neben der Abschätzung, ob es sich dabei um kurz-, mittel- oder langfristig realisierbare Maßnahmen handelt, sind Besonderheiten und relevante Aspekte angegeben.

Tabelle 6: Betriebsmittelmatrix hinsichtlich wesentlicher Aspekte für das Q-Management ohne Berücksichtigung der Änderung von Netzverlusten

Betriebsmittel		Wirkung auf Q-Haushalt	U-Haltung	Umsetzung	Besonderheiten Relevanz für	
Topologie-Änderung	Freileitung	i. d. R. induktiver (abhängig vom Belastungsgrad)		Langfristig		
	Netzerweiterung /-ersatz durch Kabel	Grundsätzlich kapazitiver		Mittel- bis lang-fristig	Einfluss auf Erdschlussstrom, Sternpunktbehandlung und höhere Resonanzfähigkeit des Netzes beachten	
	Schaltbare Kabelstrecke	i. d. R. etwas „kapazitiv“ erhöhend		Kurzfristig	Schwachlastfall (kapazitiver Einfluss), nur für MS-Netze anwendbar	
Kompensationsanlagen	eigene	Kondensatoren	Weniger stark induktiv	Spannungshhebend	Mittel-fristig	Starklastfall
		Kompensationsdrosseln	Weniger stark kapazitiv	Spannungsenkend	Mittel-fristig	Schwachlastfall
	fremde	Erhöhung des Kompensationsgrades	Weniger stark induktiv	Spannungshhebend	Mittel-fristig	Starklastfall; Sollwertabsenkung im UW möglich
		Verringerung des Kompensationsgrades	Weniger stark kapazitiv	Spannungsenkend	Mittel-fristig	Schwachlastfall; nur sinnvoll für Betriebe mit kontinuierlicher Lastabnahme
Sonstige Betriebsmittel und -konzepte	eigene	rONT, MS-, NS-Zwischen- transformation (Strangregler), UW-Regelung	Direkte Wirkung nur auf Spannung;  Indirekter Einfluss auf Q-Haushalt durch größere Freiheitsgrade bei den Q-Quellen, sofern Restriktionen z. B. bzgl. der Spannung nicht verletzt werden	Kurz- bis Mittel-fristig		

## 7.5 Erzeugungsanlagen und Speicher

### 7.5.1 Grundsätzlich verfügbare Möglichkeiten der Q-Beeinflussung

Im Folgenden werden mögliche Einsatzweisen von Erzeugungsanlagen/Speichern im Rahmen der Umsetzung eines Q-Managements beschrieben, wobei stellvertretend nachfolgend nur noch von Erzeugungsanlagen gesprochen wird. Grundsätzlich ist zu beachten, dass Speicher

gekoppelte Erzeugungsanlagen (auf Umrichter-Basis) hinsichtlich des Q-Managements besondere Vorteile bieten (Q auch bei Nichtverfügbarkeit des Primärenergiedargebots). Hierbei konzentriert sich der vorliegende Abschnitt auf die aktuell übliche Situation: Erzeugungsanlagen-Regelung und Regelung des Umspannwerks-Stufenschalters sind voneinander unabhängig implementiert. Die folgend untersuchten Q-Management-Maßnahmen bestehen in der Auswahl der vorteilhaftesten Kombination verschiedener Erzeugungsanlagen-Regelungen.

Für eine systematische Unterteilung werden vier Kategorien der Blindleistungsbeeinflussung mittels einer Erzeugungsanlage eingeführt:

- **Lokale Parametrierung**  
Die Erzeugungsanlage ist mit einer „festen“ Q-Fahrweise ausgestattet, die keiner lokalen Regelung unterliegt.
- **Lokale Regelung in Abhängigkeit des lokalen Netzzustandes**  
Die Q-Fahrweise der Erzeugungsanlage kann in Abhängigkeit der momentanen Höhe der Netzspannung am Verknüpfungspunkt variieren.
- **Lokale Regelung in Abhängigkeit der Wirkeinspeisung der Erzeugungsanlage**  
Die Q-Fahrweise der Erzeugungsanlage kann in Abhängigkeit der momentanen Wirkleistungseinspeisung variieren.
- **Kommunikationsbasierte Regelung.** Diese wird in Abschnitt 7.6 behandelt.

In Tabelle 7 werden den drei erstgenannten Kategorien die möglichen Q-Parametrierungen der Erzeugungsanlage (vgl. Abschnitt 5.1) zugeordnet sowie deren netztechnischen Auswirkungen und Besonderheiten im Überblick genannt. Für weitergehende Lektüre sei auf [20, 21] verwiesen.

Tabelle 7: Möglichkeiten der Q-Beeinflussung mittels Erzeugungsanlage (üb=übererregt; un=untererregt)

Art der Q-Beeinflussung	Beispielverfahren	Auswirkung auf Spannungshaltung	Auswirkung auf Q-Haushalt	Besonderheiten
Lokale Parametrierung	Feste $\cos\varphi$ -Vorgabe	Ständig spannungssenkend (wenn $\cos\varphi_{un}$ )	Induktiver Q-Bezug (wenn $\cos\varphi_{un}$ )	Keine Abhängigkeit von Betriebsparametern des Netzes und vom Einspeisezustand
	Feste Q-Vorgabe	Ständig spannungsanhebend (wenn $\cos\varphi_{üb}$ )	Induktive Q-Bereitstellung (wenn $\cos\varphi_{üb}$ )	Besonders vorteilhaft mit Fernparametrierung  Einhaltung einer Q-Vorgabe abhängig von Wirkeinspeisung  Im Hinblick auf Spannungsqualität zeigen sich Betriebserfahrungen mit $\cos\varphi$ eher unvorteilhaft
Lokale Regelung in Abhängigkeit des lokalen Netzzustandes	Kennlinien: - Q(U) - $\cos\varphi(U)$	Spannungssenkende/ spannungsanhebende Wirkung abhängig vom tatsächlichen lokal vorliegenden Netzzustand	Q-Bezug/Q-Bereitstellung in Abhängigkeit der Kennlinie	Achtung: gegenseitige Q-Beeinflussung möglich! (Pendelung v. a. in MS-Netzen)
Lokale Regelung in Abhängigkeit der Wirkleistungseinspeisung der Erzeugungsanlage	Kennlinien: $\cos\varphi(P)_{un}$ $\cos\varphi(P)_{üb}$ Q(P)	Spannungssenkende/ spannungsanhebende Wirkung steigt mit zunehmender Einspeisung	Q-Bezug/Q-Bereitstellung in Abhängigkeit der Kennlinie	Einhaltung einer Q-Vorgabe abhängig von Wirkeinspeisung. Q-Schwankung infolge Schwankender P

### 7.5.2 Stabilität bei spannungsabhängiger Regelung

Wird die Blindleistung in Abhängigkeit von der Spannung (z. B. Q(U)-Regelung) an mehreren Stellen in einem Strang geregelt, bedarf es einer geeigneten Parametrierung, um Blindleistungspendelungen bzw. Spannungs-Blindleistungsschwingungen zu vermeiden. Ergebnisse hierzu finden sich beispielsweise in [22], geeignete Parameter zur Vermeidung von Schwingungen sind z. B. in [31] zu finden. Für weitergehende Informationen sei auf eine FNN-Studie verwiesen, deren Ergebnisse voraussichtlich Ende 2014 vorliegen.

Stabilität der Q(U)-Regelungen muss gegeben sein, um schwingungsfähige Systeme zu vermeiden. U. a. kann es zwischen Erzeugungsanlagen und Umspannwerk bzw. rONT-Regelungen zu ungewollten Wechselwirkungen kommen, die entsprechend berücksichtigt und vermieden werden müssen vgl. hierzu z. B. [19].

### **7.5.3 Kombination Q-Regelungs- und - Steuerungsverfahren bei mehreren Erzeugungsanlagen in einem Netz**

Eine geeignete Blindleistungsparametrierung der Erzeugungsanlage ist im Besonderen von der Position der Anlage im Netz abhängig. Hierbei kann unterschieden werden zwischen Umspannwerks-nahen, d. h. Erzeugungsanlagen mit Direktanschluss oder elektrisch nah am Umspannwerk angeschlossen, und Umspannwerks-fernen Anlagen. Wie bereits in Abschnitt 7.3.2 erwähnt, steht bei Umspannwerks-fernen Anlagen (i. d. R. im MS-Netz angeschlossene Anlagen) ein Q-Management im Hinblick auf Spannungshaltung im Vordergrund, wohingegen Umspannwerks-nahe Anlagen (i. d. R. Anlagen mit Anschluss an der MS-Sammelschiene) vorteilhaft für eine Bereitstellung der vom Netz oder von Umspannwerks-fernen Anlagen bezogenen induktiven Blindleistung verwendet werden können.

Tabelle 8 gibt Aufschluss über einige mögliche Kombinationen von Q-Regelungs- bzw. Q-Steuerungsverfahren von Erzeugungsanlagen in Abhängigkeit ihrer elektrischen Entfernung vom Umspannwerk. Zu berücksichtigen sind bei der Wahl geeigneter Kombinationen je nach Spannungsebene ebenfalls die im Kapitel 4 und Abschnitt 5.1 jeweils in der Tabelle 1 und Tabelle 3 genannten Verfahren und Grenzwerte. Die Kombinationsmöglichkeiten verschiedener Verfahren sind mit den Bezeichnungen A1 bis C3 versehen. Sie werden anschließend in Tabelle 9 hinsichtlich ihrer Vorteile und Besonderheiten analysiert. Die Analyse fasst beispielhaft erste bisherige Erkenntnisse aus der Netzpraxis zusammen. Vertiefende Untersuchungen sind empfehlenswert.

#### **Hinweis zu den Kombinationen A2, B2, C2**

Die Nutzung der spannungsabhängigen Regelung der Erzeugungsanlage ist in direkter Nähe zum Umspannwerk aufgrund der Spannungsregelung der Umspannwerks-Transformatoren nicht sinnvoll und wird daher nicht weiter betrachtet. Sie wäre ggf. bei Abweichung vom Normalschaltzustand zu aktivieren. Für alle anderen Kombinationen gilt, dass die Umspannwerks-fernen Erzeugungsanlagen in den Netzausläufern zur Spannungshaltung und gleichzeitig die Umspannwerks-nahen Erzeugungsanlagen zum Ausgleich des Q-Haushaltes im jeweiligen Versorgungsbereich eingesetzt werden.

Tabelle 8: Kombinationen von Q-Regelungs- bzw. -Steuerungsverfahren

<p><b>Umspannungs-nahe Erzeugungsanlage</b> (d. h. elektrische Entfernung zum Umspannwerk sehr gering)</p>		<p><b>Lokale Parametrierung</b></p>	<p><b>Lokale Regelung in Abhängigkeit des Netzzustandes</b></p>	<p><b>Lokale Regelung in Abhängigkeit der Wirkleistungseinspeisung der Erzeugungsanlage</b></p>
		<p>Feste Q-Vorgabe: Bei stets induktivem Q-Bedarf am UW (z. B. durch EZA-Q-Fahrweise, Q-Bedarf des Netzes) übererregter Betrieb</p> <p>Bei stets induktivem Q-Überschuss untererregter Betrieb</p>	<p>(Spannungsregelung der UW-Trafos lässt wenig Änderungen der Spannungswerte am UW-nahen Verknüpfungspunkt zu)</p>	<p>Q-Kennlinie: Bei induktivem Q-Bedarf am UW übererregte Kennlinie Bei induktivem Q-Überschuss untererregte Kennlinie</p>
<p><b>Umspannungs-ferne Erzeugungsanlage</b> (d. h. elektrische Entfernung zum Umspannwerk groß)</p>	<p>Wirkung der EZA soll immer spannungssenkend oder spannungsanhebend wirken ohne zulässige Spannungsgrenzen zu verletzen</p>	<p><b>A1</b></p>	<p><b>(A2)</b></p>	<p><b>A3</b></p>
		<p>Bei Anschlusspunkten mit hoher Spannungsvolatilität (z. B. lastgangbedingt): - Netzausläufer - Gefahr der Verletzung der zulässigen Spannungsbandgrenzen</p>	<p><b>B1</b></p>	<p><b>(B2)</b></p>
<p><b>Lokale Parametrierung</b></p>	<p>Anschlusspunkte mit erwarteten Spannungsproblemen bei Einspeisung der EZA</p>	<p><b>C1</b></p>	<p><b>(C2)</b></p>	<p><b>C3</b></p>
<p><b>Lokale Regelung in Abhängigkeit des Netzzustandes</b></p>				
<p><b>Lokale Regelung in Abhängigkeit der Wirkleistungseinspeisung der EZA</b></p>				

Tabelle 9: Vorteile/Besonderheiten der Kombinationsmöglichkeiten von Erzeugungsanlagen-Regelungsstrategien

Kombi- nation	Vorteile dieser Kombinationsmöglichkeit	Einschränkungen / Besonderheiten
<b>A1</b>	<p>Robuste Variante mit berechenbaren Auswirkungen</p> <p>Anwendbar, wenn Bedarf an Spannungs- bzw. Q-Haushaltsbeeinflussung bei Einspeisung der EZA weitestgehend konstant ist (z. B. wenn Lastgangeinfluss gering)</p> <p>Gut kontrollierbar, nahezu für alle Anlagen umsetzbar</p>	<p>Geringere Flexibilität bei Netzveränderungen:</p> <p>Q-Vorgabe bei größeren und/oder dauerhaften Netzveränderungen (z. B. neue Großkunden, Ringschluss) erneut zu überprüfen</p>
<b>A3</b>	<p>Weitgehende Automatisierung durch abgestimmtes Kennlinien-Verfahren für UW-nahe EZA möglich (Kennlinienvorgabe abgestimmt auf berechenbare feste Q-Vorgabe der UW-fernen EZA)</p>	<p>Geringere Flexibilität bei Netzveränderungen für UW-ferne EZA:</p> <p>Vorgabe bei größeren und/oder dauerhaften Netzveränderungen (z. B. neue Großkunden, Ringschluss) zu überprüfen</p>
<b>B1</b>	<p>Weitgehende Automatisierung auch bei variierenden Schaltzuständen (Berücksichtigung der Spannung)</p>	<p>Fehlen größere EZA in unmittelbarer Nähe zum UW, muss die benötigte Blindleistung für die EZA in den Netzausläufern anderweitig bereitgestellt werden u.U. vom vorgelagerten Netz (steigende Netzverluste)</p> <p>→ Ständige Überwachung der Einstellung der UW-nahen EZA</p> <p>Gegenseitige Q-Beeinflussung durch Kennlinien möglich</p>
<b>B3</b>	<p>Weitgehende Automatisierung durch aufeinander abgestimmte Kennlinien-Verfahren möglich</p>	<p>Funktioniert gut bei annähernd gleichem Einspeiseverhalten der UW-fernen und UW-nahen EZA</p> <p>Zeitversatz zwischen Q-Bedarf und – bereitstellung kann zu Problemen führen</p>
<b>C1</b>	<p>Q-Verhalten zur Spannungshaltung und zum Ausgleich des lokalen Q-Haushalts voneinander entkoppelt</p>	<p>Funktioniert gut bei annähernd gleichem Einspeiseverhalten der UW-fernen und UW-nahen EZA und im Normalschaltzustand (Spannung nicht berücksichtigt)</p> <p>→ Ständige Überwachung der Einstellung der UW-nahen EZA</p> <p>→ Siehe auch B1</p>
<b>C3</b>	<p>Weitgehende Automatisierung durch aufeinander abgestimmte Kennlinien-Verfahren möglich</p>	<p>Funktioniert gut bei annähernd gleichem Einspeiseverhalten der UW-fernen und UW-nahen EZA und im Normalschaltzustand (Spannung nicht berücksichtigt); Zeitversatz zwischen Q-Bedarf und – Bereitstellung kann zu Problemen führen</p> <p>→ Siehe auch B1</p>

Grundsätzlich wird empfohlen, die geforderten Einstellungen im Q-Verhalten der Erzeugungsanlage gemeinsam mit dem Anlagenbetreiber regelmäßig zu überprüfen.

#### 7.5.4 Bewertung der Kennlinienverfahren

Lokal parametrisierte Kennlinienverfahren erlauben eine lokale Regelung des Q-Verhaltens. Bei einer Q(U)-Regelung der Erzeugungsanlage ist zu beachten, dass sich deren Q-Beitrag bei Schaltzustandsänderungen ebenfalls ändern kann. Wird zum Beispiel eine zuvor einseitig gespeiste Leitung nach einer Umschaltung zweiseitig gespeist, so ändert sich der Spannungspegel entlang der Leitung und damit auch der Q-Beitrag der jeweiligen einzelnen spannungsgeregelten Erzeugungsanlage.

Insbesondere bei Windenergieanlagen und Photovoltaik-Anlagen, kann es zu raschen Wechsel der Wirkleistungseinspeisung kommen. Sofern diese Erzeugungsanlage eine wirkleistungsabhängige Q-Regelung haben, z. B.  $\cos\varphi(P)$ , kann es zu entsprechend hohen Schwankungen des Q-Verhaltens der Erzeugungsanlage sowie der betroffenen Netzbetriebsmittel kommen.

Weil der Q-Einfluss aber stark von der örtlichen Erbringung und den lokalen Gegebenheiten abhängt, sind generelle Handlungsempfehlungen hinsichtlich geeigneter Technologien bzw. Maßnahmen nur schwer ableitbar: Eine pauschale Vorgabe einer für die Q-Bilanz vorteilhaften Kennlinie ist derzeit noch nicht möglich. Für die Bewertung der Kennlinienverfahren bei Abweichung vom Normalschaltzustand wird auf Abschnitt 7.2.1 verwiesen.

#### 7.6 Ausblick: Kommunikations-basiertes Blindleistungsmanagement

Ist eine Kommunikationsverbindung zur Erzeugungsanlage bzw. weiteren Q-Variablen, wie eigenen Kompensationsanlagen, verfügbar, so kommen auch weitere Spielarten des Q-Management in Frage.

##### 7.6.1 Manuelle oder automatisierte Vorgaben aus der Netzführung

Die Vorgabe / Aktualisierung von Blindleistungswerten oder Kennlinienparametern aus der Leitstelle hat den Vorteil, dass die Netzführung auf die aktuelle Netzsituation eingehen kann (insbesondere auch etwaige Anforderungen des vorgelagerten Netzbetreibers berücksichtigen kann).

Im Rahmen dieses Q-Managements könnte auch eine Vorgabe  $Q_{EZA}(Q_{UW})$ -Regelung für Erzeugungsanlagen mit direktem Anschluss am Umspannwerk durchgeführt werden. Basierend auf der Messung des Q-Flusses über den HS/MS-Transformator und die gezielte Einspeisung einer entsprechend entgegen gerichteten Blindleistung durch die Erzeugungsanlage könnte so die Q-Bilanz beeinflusst werden. Mit dieser Möglichkeit existieren derzeit noch kaum Erfahrungen und sie wäre näher zu untersuchen.

##### 7.6.2 Zukunftsmusik: Zustandsschätzung und optimierte, automatisierte Vorgaben

Sind mehrere Messungen pro MS-Netz verfügbar, bietet sich eine Aufbereitung durch die sogenannte Verteilungsnetz-Zustandsschätzung an. Diese führt eine messtechnisch unterstützte Abschätzung der aktuellen Spannungs- und Auslastungswerte sowie der Schaltzustände im MS-Netz durch.

Anhand der solchermaßen erhaltenen Schätzung des aktuellen Netzzustandes lässt sich dann eine Spannungs-Blindleistungsoptimierung durchführen. Diese sorgt nicht nur für die Einhaltung der betrieblich gewünschten Spannungsbandbreiten und des vorgegebenen Blindleistungshaushaltes, sondern sie minimiert darüber hinaus auf Wunsch auch die

Netzverluste. Es werden situationsabhängige Sollwerte für die Erzeugungsanlage errechnet und über die Kommunikationsverbindung übertragen. Es bietet sich in diesem Fall an, auch den Umspannwerks-Stufensteller in das optimierte Q-Management einzubeziehen. Hierzu existiert bereits eine Vielzahl von Untersuchungen, z. B. [23-30].

Im [Anhang C](#) wird anhand des in Abschnitt 6.1 entwickelten MS-Musternetzes im Sinne eines Ausblickes gezeigt, welches Q-Verhalten mittels solchermaßen kommunikationsbasierter, optimierter Aussteuerung Q-regelfähiger Erzeugungsanlagen zukünftig realisierbar sein könnte.

Die skizzierte Vorgehensweise lässt sich auch auf HS-Netze übertragen, mit der Erleichterung, dass dort die Messwerterfassung nicht mehr ausgebaut werden muss, sondern bereits weitestgehend vorhanden ist. Für eine Diskussion eines möglichen Q-Management-Szenarios für HS-Netze unter Diskussion der Schnittstelle zum Übertragungsnetzbetreiber sei auf [39] verwiesen.

## 8 Zusammenfassung

Ziel ist es, das elektrische Energieversorgungssystem gemäß den EnWG-Vorgaben zu betreiben. Daher müssen die Änderungen in der Erzeugungs- und Laststruktur sowie in der Netzstruktur und in der Netzführung entsprechend berücksichtigt werden. Der FNN-Hinweis soll die Netzplanung und Netzführung dabei unterstützen, das Q-Potenzial in den Verteilungsnetzen zu erschließen, zu nutzen und aktiv in ein Q-Management zu überführen.

Dieser FNN-Hinweis beschreibt zunächst die Vorgehensweise einer notwendigen Systemanalyse zur Bestandsaufnahme des Q-Verhaltens des eigenen Netzes. Weiterhin werden die Beeinflussungsmöglichkeiten des Q-Verhaltens und die zu koordinierenden Maßnahmen im eigenen Netz bzw. zwischen benachbarten MS-Verteilungsnetzbetreibern und gegenüber den vorgelagerten HS/HöS-Netzbetreibern oder den nachgelagerten NS-Netzbetreibern als Beitrag zur Spannungshaltung im eigenen Netz und zu einem Ausgleich des Q-Haushalts vorgestellt.

Mit Hilfe der im Verteilungsnetz vorhandenen Q-Variablen lässt sich eine merkliche Beeinflussung der Q-Bilanz unter Berücksichtigung der Spannungshaltung erzielen, sofern diese steuerbar oder regelfähig sind. Regelbare Transformatoren können über Einwirkung auf das verfügbare Spannungsband den Spielraum für das Blindleistungsmanagement weiter erhöhen. Bei Erzeugungsanlagen ist zu beachten, ob im Bedarfsfall ausreichend Blindleistung zur Verfügung gestellt werden kann (i. d. R. abhängig von Primärenergie). Die Durchmischung des Netzes mit Q-regelfähigen Anlagen unterschiedlicher regenerativer Energieträger – hier Wind und Sonne – sowie ggf. mit Speichern erhöht die Verfügbarkeit regelfähiger Blindleistung.

Es ist wünschenswert, die Regelung der Anlagen an ihren tatsächlichen Fähigkeiten zu orientieren, die bei neueren Anlagen nennenswert über die Vorgaben der Netzanschlussregeln hinausreichen können. Die Vorgabe von Online-Sollwerten eröffnet weiteren Spielraum für das Q-Management. In heutigen MS-Netzen sind allerdings viele Bestandsanlagen noch nicht in der Blindleistung regelfähig, bzw. können Online-Sollwertvorgaben der Blindleistung noch nicht verarbeiten.

## Literaturverzeichnis

- [1] ZVEI Beitrag industrieller Blindleistungs-Kompensationsanlagen und –Verbraucher für ein innovatives Blindleistungs-Management in der Stromversorgung Deutschlands. Frankfurt a. M., September 2013
- [2] EU Network-Code „Demand Connection Code“ (NC DCC) (derzeit ist der Entwurf hierzu im Komitologieverfahren)
- [3] CSRES, VDN, VEÖ, VSE Technische Regeln zur Beurteilung von Netzzrückwirkungen, 2007
- [4] CSRES, VDN, VEÖ, VSE Technische Regeln zur Beurteilung von Netzzrückwirkungen Ergänzungsdokument zur Beurteilung von Anlagen für den Anschluss an Hochspannungsverteilernetze, 2012
- [5] FNN VDE-AR-N 4105 Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz – Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz
- [6] BDEW Technische Richtlinie – Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz  
Richtlinie für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz, Ausgabe Juni 2008 (samt Ergänzungen)
- [7] FNN E VDE-AR-N 4120 Technische Bedingungen für den Anschluss und Betrieb von Kundenanlagen an das Hochspannungsnetz (TAB Hochspannung)
- [8] BMWi NAV, vom 1.11.2006
- [9] BDEW TAB Niederspannung 2007
- [10] BDEW TAB Mittelspannung 2008
- [11] VDN TransmissionCode 2007 – Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber, Version 1.1, August 2007
- [12] FGW Technische Richtlinien für Erzeugungsanlagen  
Teil 8: Zertifizierung der Elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und –anlagen am Mittel-, Hoch- und Höchstspannungsnetz, Revision 6
- [13] Meuser Verbesserte Ausnutzung bestehender Netzstrukturen zur Integration elektrischer Erzeugungsanlagen, Dissertation RWTH Aachen, Aachener Beiträge zur Energieversorgung, Band 143, Klinkenberg Verlag, Aachen, 2012
- [14] rONT-Kompendium [www.rONT.info](http://www.rONT.info)
- [15] Meuser, Vennegeerts, Schäfer Impact of Voltage Control by Distributed Generation on Hosting Capacity and Reactive Power Balance in Distribution Grids, CIREN Workshop 2012, Integration of Renewables into the Distribution Grid, Lissabon / Portugal, Proceedings, 29.30.05.2012
- [16] Schäfer, Krahl, Vennegeerts, Moser Spannungsebenenübergreifendes Regelungskonzept für Blindleistung“, ETG-Fachtagung, Berlin, 2013
- [17] Stetz, Kraiczy, Braun, Schmidt Technical and Economical Assessment of Voltage Control Strategies in Distribution Grids“, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, DOI: 10.1002/pip.2331,
- [18] Stetz, Kraiczy, Diwold et al Netzparallelbetrieb von Photovoltaikanlagen und regelbaren Transformatoren“, VDE ETG Konferenz, Berlin, 2013.
- [19] Kraiczy, Braun, Stetz, Brantl, Schmidt Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen der lokalen Spannungsregelung des Umspannwerks-Transformators und der lokalen Blindleistungsregelung dezentraler Erzeugungsanlagen im Verteilungsnetz, 28. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, März 2013
- [20] von Appen, Stetz, Braun, Schmiegel Local Voltage Control Strategies for PV Storage Systems in Distributed Grids, IEEE Transactions on Smart Grids: Special

- [21] von Appen, Braun, Kneiske Issue Energy Storage Applications Voltage Control Using PV Storage Systems in Distribution Systems, CIRED 2013, Stockholm, June 2013
- [22] Hau Robuste Spannungsregelung von Windparks mit Q(U) Kennlinie“, at – Automatisierungstechnik, 5/2013, pp. 359-373
- [23] Abdel-Majeed, Wang, Braun, Schöllhorn Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen mit Hilfe von Smart Metern“, VDE Kongress, Stuttgart, 5.-6. November 2012
- [24] Marten, Diwold, Löwer, Faiella, Hochloff, Hansen, Braun Analysis of a Q exchange between distribution and transmission grids“, accepted at the IEEE International Workshop on Intelligent Energy Systems (IWIES) 2013, November 2013, Vienna.
- [25] Kämpf, Schmidt, Walther, Wildenhues, Eggemeyer, Brantl, Braun Einhaltung definierter Blindleistungsbänder an HS/MS-Übergabestellen durch Einsatz der Blindleistungsfähigkeit dezentraler Einspeiser,“ VDE ETG Kongress, Berlin, 5.-6.11.2013
- [26] Barth, Hidalgo, Marten, Pohlemann, Braun, Hansen, Knudsen Technical and Economical Assessment of Q Provision from Distributed Generators, IEEE PowerTech Conference, Grenoble 2013
- [27] Diwold, Yan, Braun Koordinierte Spannungsregelung anhand einer Zustandsschätzung im Verteilnetz“, VDE Kongress, Stuttgart, 5.-6. November 2012
- [28] Wanik, Erlich, Mohamed et al. Predictive Var Management of Distributed Generators“, 9th International Power & Energy Conference, Oct 2010, Singapore
- [29] Idlbi, Diwold, Stetz, Wang, Braun Cost-Benefit Analysis of Central and Local Voltage Control Provided by Distributed Generators in MV Networks; IEEE Power Tech Conference, Grenoble, June 2013
- [30] Ilo, Schaffer, Rieder, Dzafic Dynamische Optimierung der Verteilnetze, VDE Kongress, Stuttgart, November 2012
- [31] Bayernwerk AG Ergänzungen der Bayernwerk AG zur Technischen Richtlinie des BDEW “Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz“, Stand Dezember 2013
- [32] EU Network Code “Requirements for Grid Connection Applicable to all Generators” (NC RfG)
- [33] dena dena-Studie Systemdienstleistungen 2030. Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Berlin, Februar 2014
- [34] Kaempf, Braun, Schweer, Becker, Halbauer, Berger Reactive Power Provision by Distribution System Operators, 2014 Cigre Session, Paris, August 2014.
- [35] Bock Automatische Spannungsregelung in MS-Netzen mit hoher Einspeiseleistung, ew Heft 6, 2012
- [36] Kummer, Fuchs Spannungshaltung im Übertragungsnetz unter dem Einfluss hoher dezentraler Energieerzeugung, Internationaler ETG Kongress 2013, Berlin.
- [37] DKE IEV Deutsche Online-Ausgabe des IEV
- [38] Schmidt, Premm PV-Systeme auf Gewerbebetrieben - Eigenverbrauch, Blindleistungsmanagement und Einbindung in den Netzbetrieb, VDE Kongress, Frankfurt, Oktober 2014
- [39] Kaempf, Abele, Stepanescu, Braun Reactive Power Provision by Distribution System Operators – Optimizing Use of Available Flexibility, IEEE ISGT Europe 2014

## Anhang A Mögliche Blindleistungsflüsse heute und morgen

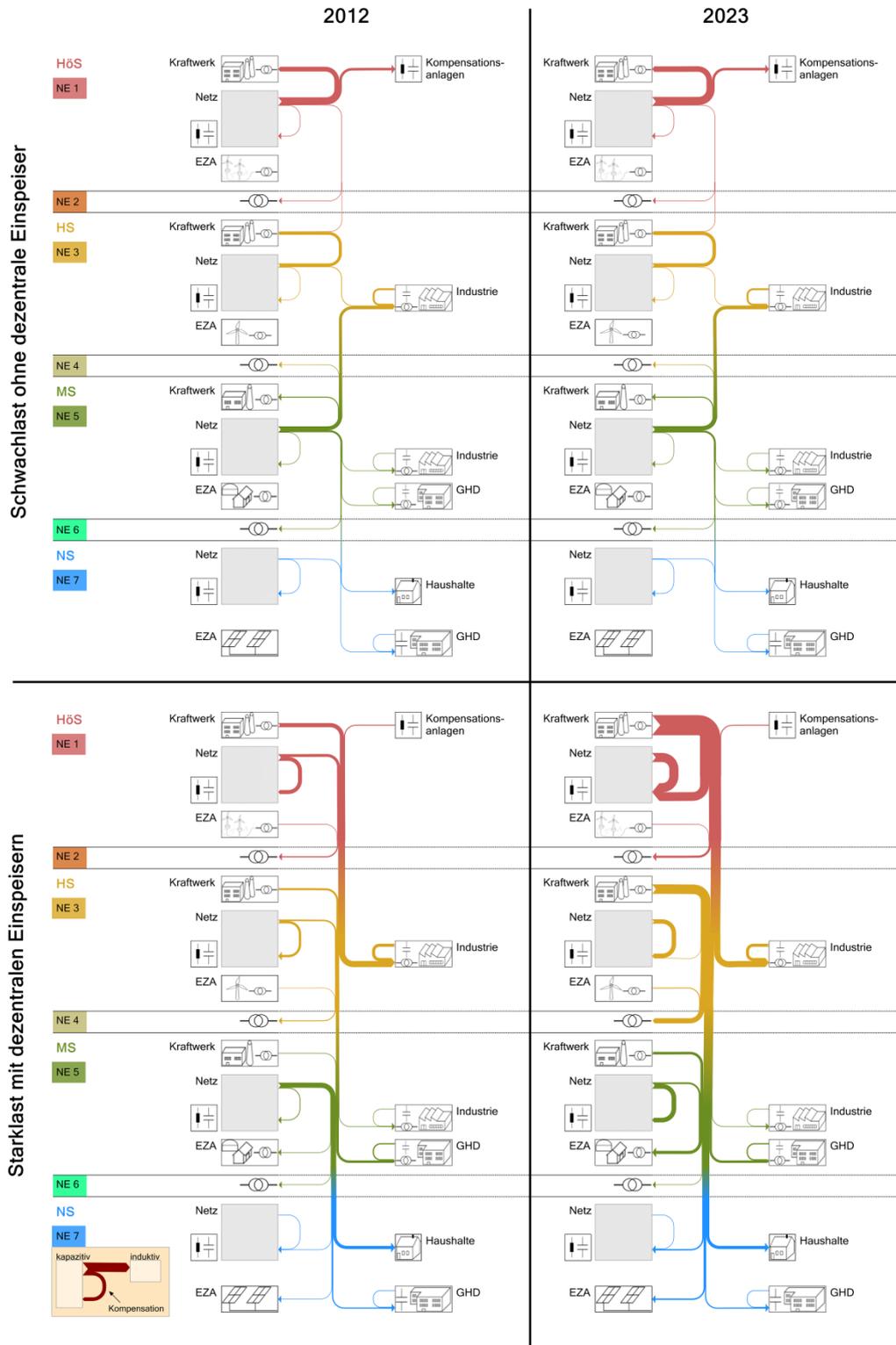


Bild 28: Blindleistungsflüsse zwischen den Spannungsebenen für den Stark- und Schwachlastfall

## Anhang B Informationen zu Schnittstellen

### Schnittstelle zu Erzeugungsanlagen

Übergabe der Signale (in beide Richtungen):

- analoge Schnittstellen (z. B. 4 ... 20 mA), (Skalierung),
- digitale Kontakte und
- Protokolle (z. B. IEC 60870-5-104, IEC 61850-7-420).

### Schnittstellenfunktionen

Tabelle 10: Übersicht zu den Funktionen und deren Anwender

Funktion	Beschreibung	Erklärung	Anwender
Einspeisemanagement	Reduktion/Begrenzung der Wirkleistung einer EZA	100%, 60%, 30%, 0%	Netzbetreiber, Betreiber von EZA
Kennlinien	Q(U), cosφ(P), Q(P), Fahrpläne	Vorgabe/Aktivierung einer Kennlinie.  Ggf. Anpassung (z. B. Referenzspannung bei Q(U)).  Ggf. Bestätigung an Netzbetreiber	EZA, Verbrauchsanlagen, Netzbetreiber (auch untereinander)
Feste Vorgaben	Q, cosφ		EZA, Verbrauchsanlagen, Netzbetreiber (auch untereinander)
Istwerte (Rückmeldung)	P, Q, cosφ, U, I		EZA, Netzbetreiber (auch untereinander)
Anlagenvermögen	P, Q	Betriebsbereite Leistung und daraus resultierendes Q-Vermögen	EZA, Netzbetreiber (auch untereinander)
Anlagenstatus	ungestörter/gestörter Betrieb		EZA, Verbrauchsanlagen, Netzbetreiber (auch untereinander)
Klimadaten	Temperatur, Windgeschwindigkeit, Einstrahlung, ...		EZA, Netzbetreiber (auch untereinander)

## Anhang C Simulation optimierter Aussteuerung von MS-Erzeugungsanlagen und Stufensteller

Bild 29 stellt den Q-Haushalt des Musternetzes in verschiedenen Beeinflussungsfällen dar. Die Fälle 'WEA1999' (grau) enthalten noch immer den Windpark 1999. Der Fall 'NeuWEA-MS-RL' (blau) simulieren an dessen Stelle einen Windpark gleicher Leistung, aber konform mit der BDEW MS-RL:  $\cos\phi(P)$  zwischen 0.95 untererregt und 0.95 übererregt. Der Fall 'NeuWEA Phasenschieber' zeigt, welcher Q-Austausch sich ergäbe, wenn der Windpark neuester Bauart wäre und dessen technische Möglichkeiten bis zur Phasenschieberfähigkeit ausgenutzt würden.

Als Basisfall gilt jeweils der Fall ohne Q-Beitrag der Erzeugungsanlagen (durchgezogene Linie). Gepunktet und strichliert dargestellt sind die Fälle, in denen der Q-Beitrag der Q-regelfähigen Erzeugungsanlagen und die Stufenstellung des Umspannwerks-Transformators bestmöglich so aufeinander abgestimmt sind, dass der Q-Austausch mit der HS-Ebene minimiert wird, unter Einhaltung aller betrieblichen Belastungs- und Spannungsgrenzen im Netz.

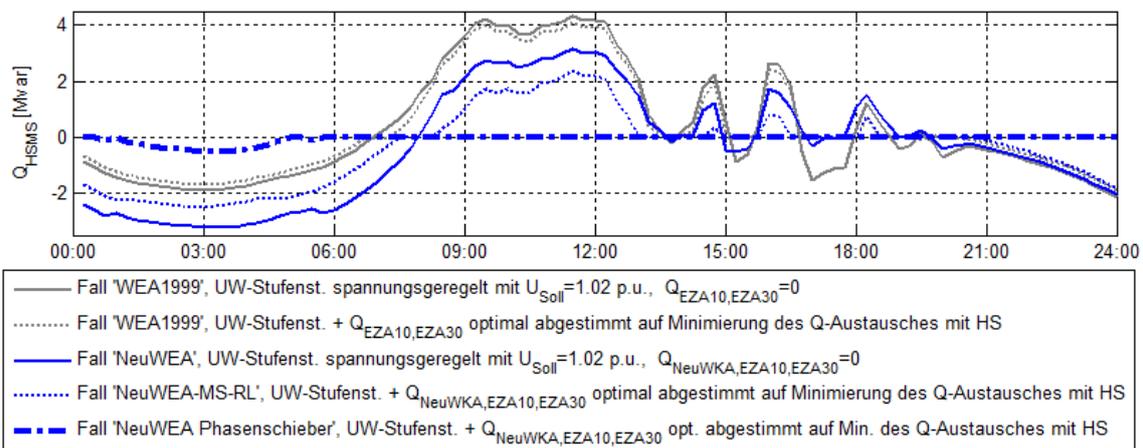


Bild 29: Q-Bilanz des Musternetzes in verschiedenen Beeinflussungsfällen

Bild 30 stellt unterstützend für den Fall 'NeuWEA-MS-RL' den Q-Beitrag der einzelnen Erzeugungsanlagen zusammen mit dem jeweiligen aktuellen Q-Vermögen dar. Erwartungsgemäß kann die Q-Regelfähigkeit aufgrund von Netzrestriktionen teilweise nicht vollständig ausgeschöpft werden. Es wird deutlich, dass für das hier unterstellte Regelziel eines ausgeglichenen Q-Haushaltes dieselbe Erzeugungsanlage situationsabhängig zeitweise kapazitiv und zeitweise induktiv angesteuert werden müsste.

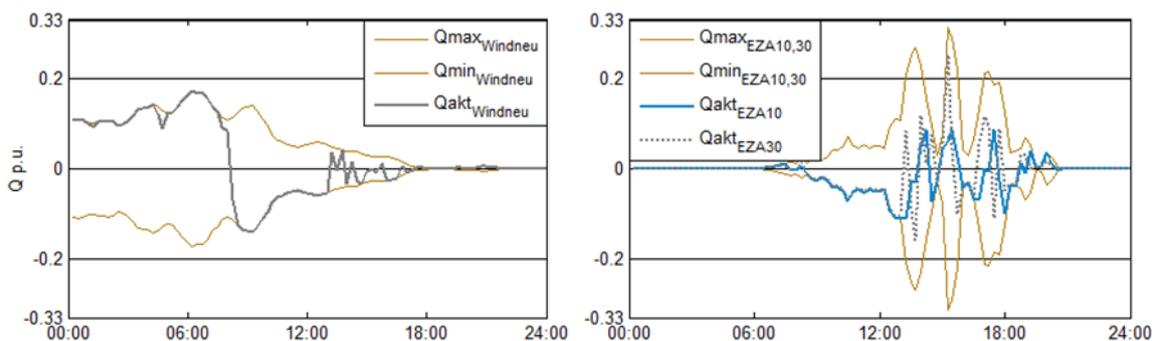


Bild 30: Q-Vermögen und Q-Beitrag der Erzeugungsanlagen bei Q-Vermögen gem. BDEW MS-RL [6]