

# **Blindleistungsmanagement in Mittelspannungsnetzen – Ausgewählte Ergebnisse des Forschungsprojektes SyNErgie**

Reinhard Kreuzer, Prof. Dr.-Ing. Oliver Brückl  
OTH Regensburg, Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher (FENES)  
Seybothstraße 2, 93053 Regensburg  
E-Mail: reinhard2.kreuzer@oth-regensburg.de  
Internet: [www.fenes.net](http://www.fenes.net)

Rainer Bäsmann  
MDN Main-Donau Netzgesellschaft mbH  
Sandreuthstraße 21, 90441 Nürnberg  
E-Mail: rainer.baesmann@main-donau-netz.de  
Internet: [www.main-donau-netz.de](http://www.main-donau-netz.de)

## **1 Einleitung**

Die Energiewende führt zu neuen Herausforderungen für Verteilungsnetzbetreiber hinsichtlich der Erbringung von Systemdienstleistungen, der Integrationsfähigkeit weiterer Erzeugungsanlagen und Lasten sowie bei der Gewährleistung einer hohen Versorgungssicherheit. Die Deckung der steigenden Blindleistungsbedarfe seitens der Netzbetriebsmittel, Verbraucher und Erzeuger gewinnt durch den Wegfall der Großkraftwerke für Netzbetreiber zunehmend an Bedeutung. Das abgeschlossene und vom BMWi geförderte Projekt SyNErgie (Laufzeit von 03/2015 bis 05/2018) beschäftigt sich mit der Entwicklung von Blindleistungsmanagementsystemen für Mittelspannungsnetze (MS-Netze). Ziel dabei ist es, das bisher ungenutzte, freie Blindleistungspotenzial betrieblicher Kompensationsanlagen und dezentraler Erzeugungsanlagen (allg.: Q-Quellen) zu nutzen, um die Blindleistungsänderungsfähigkeit<sup>1</sup> eines Verteilungsnetzes zu erhöhen. Diese Veröffentlichung stellt ausgewählte Einzelergebnisse und Erfahrungen des Projektes vor, welche u. a. über zahlreiche Messungen in MS-Netzen bei Firmen mit Anschlusspunkt in der MS-Ebene, Netzsimulationen und mathematische Modelle abgeleitet wurden.

## **2 Ausgewählte Einzelergebnisse**

Im Rahmen des Projektes wurden einerseits die Grundlagen zur simulationsgestützten Bewertung von MS-Netzen verbessert, um über die resultierenden Netzmodelle detaillierte Netzanalysen mittels rekonstruierten Leistungsflüssen der MS-Ebene durchführen zu können (siehe [2]-[4]). Andererseits wurden umfangreiche Messungen in MS-Betrieben durchgeführt, um deren Blindleistungspotenziale zu bestimmen. Zur Erschließung der Potenziale wurden dezentrale und zentrale Regelungsstrategien entwickelt und erprobt

---

<sup>1</sup> Die Blindleistungsänderungsfähigkeit eines Netzes beschreibt die Fähigkeit, das Q-Verhalten des Netzes zum momentanen Arbeitspunkt zu ändern. Sie kann für jeden Arbeitspunkt unterschiedlich hoch ausfallen (vgl. [1])

(siehe [4]-[7]). Im Folgenden werden die ermittelten Q-Potenziale von Betrieben und dezentralen Erzeugungsanlagen sowie die Konzepte, mit denen die Erschließung dieser Potenziale zur Blindleistungshaushaltsbeeinflussung erfolgen kann, vorgestellt. Weitere und detailliertere Ausführungen zu Ergebnissen aus dem Projekt sind im Forschungsbericht [8] enthalten. Diese beinhalten unter anderem Erkenntnisse zu den Themen Netzmodellierung, Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Regelungen, Gleichzeitigkeitsfaktoren, Skalierung von Standardlastprofilen und belastbare Q-Lastgänge für Haushalte.

### **3 Blindleistungspotenzial von dezentralen Erzeugungsanlagen und Betrieben mit Kompensationsanlagen**

Der folgende Abschnitt beschreibt die verwendeten Methoden zur Potenzialbestimmung von dezentralen Erzeugungsanlagen und Betrieben mit Kompensationsanlagen.

#### **3.1 Dezentrale Erzeugungsanlagen**

Dezentrale Erzeugungsanlagen (EZA) können ihr Q-Potenzial direkt zur zielgerichteten Beeinflussung der Blindleistungsbilanz eines MS-Netzes einsetzen. Für eine blindleistungsbilanzbedingte Q-Regelung durch MS-EZA müssen diese

- Q-fähig sein und
- ihre Q-Fähigkeit noch nicht vollständig für die Spannungshaltung einsetzen (z. B. elektrisch nahe am Umspannwerk angeschlossen).

Begünstigt wird ihre Eignung durch eine hohe Nennleistung und somit Wirkung. Zur Bestimmung des theoretischen Q-Potenzials von EZA kann die MS-Richtlinie (Q-Fähigkeit von EZA) herangezogen werden. Dabei ist zu beachten, dass die Vorgabe einer Q-Fähigkeit für MS-EZA erst ab 01.01.2009 gilt und dadurch ältere EZA nicht davon betroffen sind. Durch Untersuchung von Messdaten und Simulationszeitreihen einer EZA-geprägten Netzgruppe kann gezeigt werden, dass der induktive Bedarf der Netzgruppe bei Rückspeisung vor allem durch das resultierende induktive Q-Verhalten der Netzbetriebsmittel infolge der hohen Wirkleistungsflüsse hervorgerufen wird. Von den maximal 6 MVar sind ca. 2 MVar auf den induktiven Q-Bezug der EZA zur Spannungshaltung zurückzuführen, welcher wiederum hauptsächlich von den PV-Anlagen in der NS-Ebene durch deren  $\cos\phi(P)$ -Steuerung verursacht wird. Aus den direkt in der MS-Ebene angeschlossenen EZA wird dagegen kaum Blindleistung zur Spannungshaltung abgerufen. Netzoptimierungen, wie das Schließen von MS-Ringen und die Nutzung der Spannungssollwertanpassung am HS/MS-Transformator führen dazu, dass die Spannungshaltung trotz installierter EZA-Leistung von ca. 55 MW auf ca. 600 km<sup>2</sup> mit nur geringem Einsatz von induktiver Blindleistung vonstattengeht. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die installierte Q-Fähigkeit von ca. 13 MVar überwiegend ungenutzt ist. Dies bestätigt die im Projekt getroffene Annahme, dass auch auf Seiten der MS-EZA Potenziale für ein Q-Management gehoben werden können. Allerdings hängt das Q-Potenzial von Natureinflüssen (z. B. Solareinstrahlung und Windgeschwindigkeit) ab und ist deshalb als ungesichert zu betrachten. Bei der Auswertung von Biogasanlagen zeigt

sich, dass auch Asynchrongeneratoren eingesetzt werden. Um die nach TAB geforderte Q-Fähigkeit aufzuweisen, sind in diesen Fällen Kompensationsanlagen installiert, die den induktiven Bedarf des Generators teil-/kompensieren und darüber hinaus noch ein kapazitives Verhalten des Gesamtsystems einstellen können. Dies bedeutet letztendlich, dass unabhängig von der Erzeugung kapazitive Blindleistung bereitgestellt werden kann. Aufgrund der hohen zeitlichen Verfügbarkeit der Biogasanlagen weisen diese ein allgemein hohes zeitlich verfügbares Potenzial auf Seiten der Q-Bereitstellung auf, sofern diese Q-fähig sind und geeignet angesteuert werden können.

Die durchgeführten Analysen zeigen, dass auch MS-EZA ein relevantes freies Q-Potenzial zur Q-Bilanzoptimierung aufweisen können. Trotz eines betragsmäßig hohen Potenzials, muss die Bewertung einer MS-EZA bezüglich einer blindleistungsbilanzbedingten Q-Regelung die zeitliche Korrelation von Q-Bedarf und Q-Potenzial der EZA berücksichtigen. Eine pauschale Q-Vorhaltung für den Q-Bilanzausgleich ist somit nicht sinnvoll.

### **3.2 Betriebe mit Kompensationsanlagen**

Durch eine Messkampagne mittels mobiler Netzanalysatoren wurden Q-Potenziale von Betrieben mit betrieblichen Kompensationsanlagen (BKA) ermittelt. Dazu wurden sechs Betriebe mit insgesamt 33 einzelnen BKA und einer installierten Kompensationsleistung von ca. 13 MVar vermessen. Die Untersuchungen zeigen, dass der Ausnutzungsgrad bezogen auf die installierte Kompensationsleistung eines Betriebs unter 60 % liegt, was die These bestätigt, dass vor allem kapazitives Potenzial durchwegs vorhanden ist. Dies zeigt sich auch an den im Messzeitraum (zwischen 2 bis 3 Wochen je Betrieb) aufgetretenen Extrema der Blindleistungspotenziale, die in **Abbildung 1** dargestellt sind. Durchgehende induktive Potenziale können nur bei den beiden Betrieben B1 und B2 ausgewiesen werden, kapazitives Potenzial dagegen bei allen sechs. Das induktive Potenzial korreliert mit der Wirkleistungsaufnahme eines Betriebs, d. h. je höher der Wirkleistungsbezug, desto größer ist das zu erwartende Blindleistungspotenzial. Das Zeitverhalten des induktiven Blindleistungspotenzials orientiert sich somit am Wirkleistungsbezug. Bei Schwachlast (z. B. nachts oder an Wochenenden) tritt somit das minimale induktive bzw. maximale kapazitive Potenzial auf, bei Starklast genau umgekehrt. Über die Zeitspanne eines Jahres sind somit vor allem Feiertage relevant, um das minimale induktive Potenzial eines Betriebs zu beschreiben, da dann aufgrund von Betriebsruhezeiten die Minimallast auftritt. Die Auswertung der betriebsinternen Netzrestriktionen ergibt, dass es keine Limitierung des Blindleistungsabrufs durch Strom- und Spannungsgrenzen im Netz der Betriebe gibt, da deren Netze sehr großzügig ausgelegt werden.

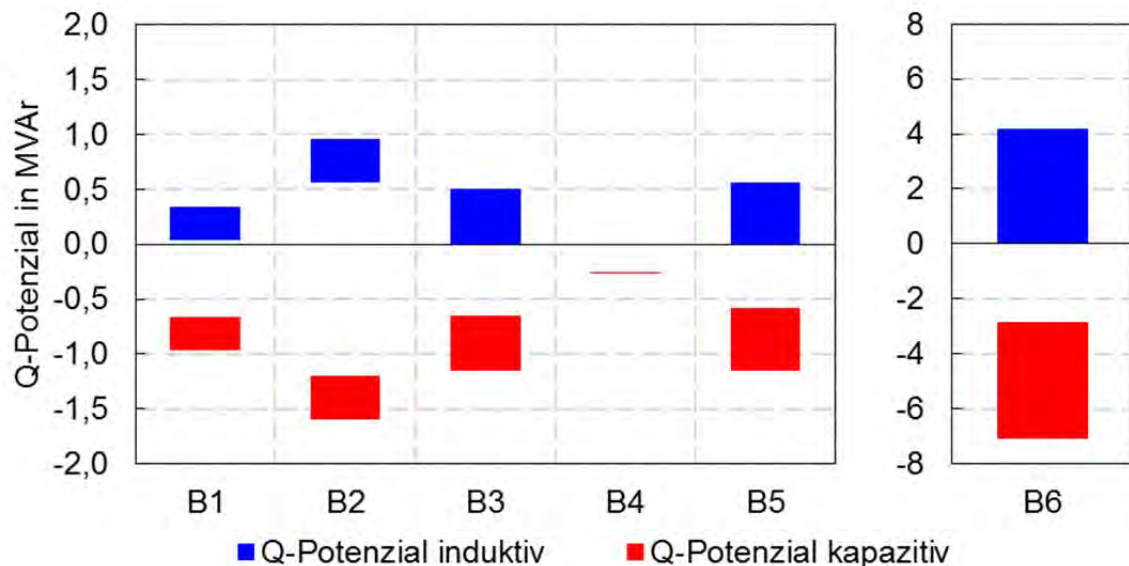


Abbildung 1: Blindleistungspotenziale der sechs vermessenen MS-Betriebe mit BKA

Parallel zu den temporären Messungen wurde eine Langzeitmessung bei einem Betrieb (B6) durchgeführt. Von der dort installierten Kompensationsleistung in Höhe von 8 MVAR wurden ca. 7 MVAR messtechnisch erfasst. Der Messzeitraum reicht vom 30.08.2017 bis zum 05.03.2018. **Abbildung 2** zeigt einen exemplarischen Verlauf der Q-Potenziale für eine Woche im Januar. Aufgrund eines Dreischichtbetriebs zeichnen sich zwei charakteristische Potenzialniveaus (Werktags und Wochenende) ab. Interessanterweise fällt das induktive Potenzial in dieser Woche nicht auf null ab, sondern liegt bei minimal ca. 650 kVAR und stünde somit zum Ausgleich des kapazitiven Bedarfs der Netzgruppe bei Schwachlast (Wochenende oder nachts) zur Verfügung.

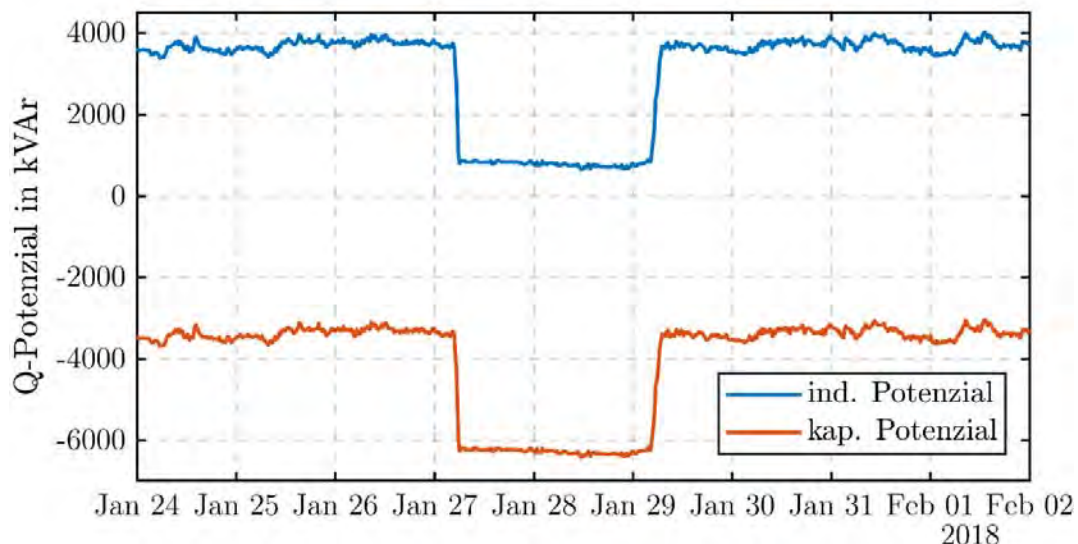


Abbildung 2: Exemplarischer Wochenverlauf des gemessenen induktiven und kapazitiven Potentials eines MS-Betriebs

Besonderes Augenmerk bei der Potenzialbestimmung durch Messungen muss auf mögliche Wechselwirkungen zwischen BKA und EZA mit aktiver Spannungsblindleistungsregelung gelegt werden. Diese Wechselwirkung konnte im Rahmen einer Messung nachgewiesen sowie deren Ursache dafür identifiziert und

behooben werden. Konkret wird bei falsch gewähltem Messpunkt der BKA-Regelung das induktive (gewollte) Verhalten der EZA miterfasst und somit von der BKA ganz oder teilweise ausgeregelt. Dies hat nicht nur negativen Einfluss auf die Spannungshaltung im Netz (da der Netzplaner die Spannungsblindleistungsregelung der EZA einplant), sondern auch auf die Anzahl an Schaltspielen und somit den Verschleiß der BKA. Die Wechselwirkung wird zudem dadurch verstärkt, dass als Regelgröße der BKA der  $\cos\varphi$  verwendet wird. Dieser sinkt sowohl durch das induktive Verhalten der EZA als auch durch den aufgrund der EZA-Einspeisung gesunkenen Wirkleistungsbezug. Konventionelle BKA sind meist mit Totzeiten versehen, welche die Schaltspiele der Schütze niedrig halten sollen. In Kombination mit schnellen  $\cos\varphi$ -Änderungen (z. B. aufgrund des Einbruchs der Wirkleistungseinspeisung einer PV-Anlage) kann temporär sogar kapazitives Verhalten entstehen, da der vermeintlich induktive Bedarf kurzzeitig überkompensiert wird. Diese Wechselwirkungen waren i. d. R. darauf zurückzuführen, dass die BKA und ihre Regelung bei der Nachrüstung von EZA nicht berücksichtigt wurden. Ein entsprechender Hinweis wurde durch den Projektverbund erfolgreich in den Entwurf der VDE-AR-N 4110 eingebracht.

#### **4 Konzepte zur Erschließung von Blindleistungsquellen mit Anschlusspunkt in der MS-Ebene**

Um die Q-Potenziale von BKA und EZA für ein Q-Management zu erschließen, sind sowohl ein dezentrales als auch ein zentrales Regelverfahren vorstellbar. Diese Konzepte werden im Folgenden erläutert und deren Wirkung anhand von Anwendungsbeispielen demonstriert.

##### **4.1 Dezentraler Ansatz**

In großflächigen MS-Netzen kann sich aufgrund der fehlenden Kommunikationstechnik und der räumlichen Verteilung von potenziellen Blindleistungsquellen die Entwicklung eines dezentralen autarken Regelkonzeptes eignen. Ziel ist es, die Blindleistungsquellen zu Zwecken des Blindleistungsbilanzausgleichs nur über lokal verfügbare Informationen (Messgrößen) und/oder historische Messdaten zu steuern. Damit entfällt eine aufwendige und ggf. kostenintensive Kommunikationsanbindung zur Netzleitstelle. Um einen dezentralen Blindleistungsabruf, wie er in **Abbildung 3** dargestellt ist, in Abhängigkeit einer definierten Kompensationszielsetzung  $Q_{\text{Soll}}$  an der jeweiligen Blindleistungsquelle koordinieren zu können, bedarf es geeigneter Methoden zur Prognose des Ist-Blindleistungsverhaltens  $Q_{\text{Ist}}$  am Umspannwerktransformator, auf die im nachfolgenden Abschnitt kurz eingegangen wird. Zudem ist der Einfluss eines Blindleistungsabrufs auf das Netz planerisch abzuschätzen bzw. abzusichern (Sicherstellung von Spannungs- und Auslastungsgrenzen). Weitere Informationen zu den Prognosemethoden sind in [6] und [8] angeführt.

Im Projekt wurden zwei Prognosemethoden betrachtet:

1. Prognose mittels Regressionsanalyse
2. Prognose mittels Zeitreihenanalyse

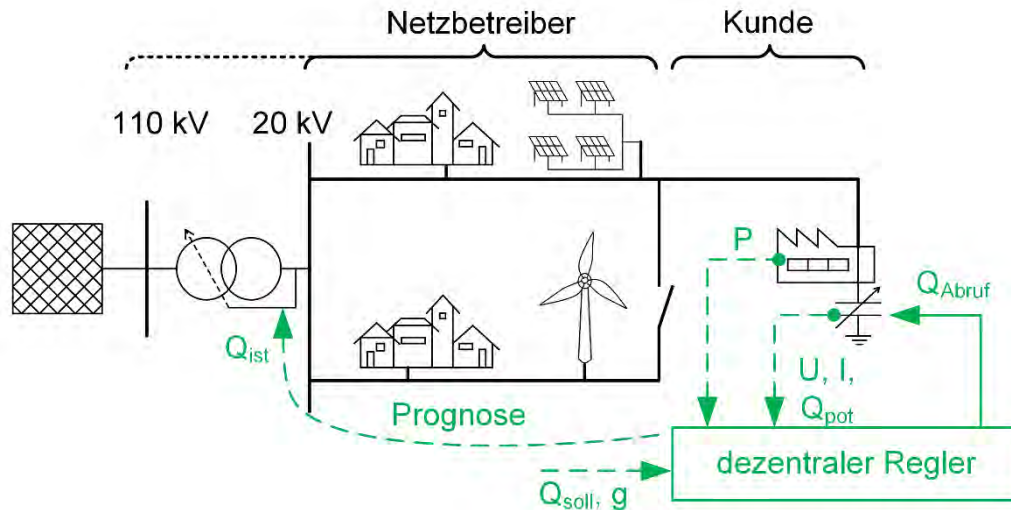


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Funktionsweise des dezentralen Ansatzes mit Informationsfluss (gestrichelt) und Befehlsfluss (durchgezogen)

Unter Regression versteht man die Beschreibung einer einseitig gerichteten stochastischen Abhängigkeit. Mit einer Regressionsfunktion lässt sich die Abhängigkeit der Zufallsvariable  $Q_{Prognose}$  von einer (= einfache Regression) oder mehreren anderen (= multiple Regression) Variablen (= Führungsgrößen)  $x_k$  ( $k = 1, \dots, m$ ) approximieren. Nach der Feststellung eines Zusammenhangs zwischen den Führungsgrößen und der Zufallsvariable mittels einer Korrelationsanalyse besteht die Aufgabe der Regression darin, diesen identifizierten Zusammenhang mathematisch zu beschreiben. Im Falle einer multiplen linearen Regression wird eine Regressionsgleichung der Form

$$Q_{Prognose} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_mx_k, \quad k = 1, \dots, m \quad (1)$$

aufgestellt. Die sogenannte Regressionskonstante  $b_0$  dient als Ausgleichskonstante und gibt den Schnittpunkt der Regressionshyperebene mit der Ordinatenachse an. Die Regressionsparameter  $b_1, \dots, b_m$  geben den mittleren partiellen Einfluss der Führungsgrößen  $x_k$  ( $k = 1, \dots, m$ ) an und werden so gewählt, dass die mittleren quadratischen Abweichungen der Messpunkte minimal sind [9]. Als Führungsgrößen werden lokale Messgrößen an der Q-Quelle (z. B.  $P_{NAP}$ ,  $U_{NAP}$ ,  $I_{MS-Ltg}$ ,  $v_{Wind}$ ,  $E_{Solar}$ ,  $T_{Umgebung}$ ) in der Regressionsgleichung verwendet. Damit wird aufgrund von lokal (dezentral) verfügbaren Messgrößen das Blindleistungsverhalten der MS-Netzgruppe prognostiziert. Eine Unterscheidung zwischen Werktagen, Wochenenden und Feiertagen verbessern die Prognosegenauigkeit. Untersuchungen von unterschiedlichen Netztypen haben ergeben, dass Netzgruppen mit hoher EZA-Durchdringung gut durch diese Methode prognostiziert werden können. Dies gilt besonders dann, wenn ein hoher Anteil an Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) vorherrscht, wobei deren Wirkleistungseinspeisung als Führungsgröße dient.

Als Alternative zur regressionsbasierten Prognosemethode wird die Zeitreihenanalyse mit dem additiven Komponentenmodell betrachtet. Dabei wird das bekannte zeitliche Verhalten  $Q_{ist}(t)$  nach dem klassischen Komponentenmodell der Zeitreihenanalyse in die

Bestandteile Zyklus- (Z), Trend- (T) und Restkomponente ( $\epsilon$ ) zerlegt, die sich additiv überlagern [10].

$$Q_{ist}(t) = Z(t) + T(t) + \epsilon(t) \quad (2)$$

Die zyklische Komponente  $Z(t)$  beschreibt Werte, die aus dem gemittelten Wochenverlauf eines Jahres für jeden 15-Minuten-Wert resultieren. Diese Komponente gibt die tageszeitlichen und uhrzeitabhängigen Schwankungen in einer Woche wieder und beinhaltet in diesem Fall den Gleichanteil des zeitlichen Verhaltens  $Q(t)$ . Die Trendkomponente  $T(t)$  wird nach der Methode des einfachen zentrierten gleitenden Durchschnitts mit gerader Ordnung ermittelt. Der Trend spiegelt damit den jahreszeitlichen Einfluss außerhalb der zyklischen Komponente wieder, indem die langfristige systematische Veränderung des mittleren Niveaus der Zykluskomponente bestimmt wird. Die Restkomponente  $\epsilon(t) = Q(t) - [Z(t) + T(t)]$  fasst Einflüsse und Störungen zusammen, die nicht durch die beiden anderen Ursachenkomponenten erklärt werden können [10]. Für die Prognose des darauffolgenden Jahres wird konstatiert, dass die drei Komponenten unverändert bleiben. Jeder 15-Minuten-Wert wird additiv aus der Zyklus- und Trendkomponente errechnet. Da das Verhalten der Restkomponente stochastischer Natur ist, wird diese bei der Berechnung der zu prognostizierenden Zeitreihe ausgeschlossen und somit ein Erwartungswert verwendet.

$$Q_{Prognose}(t) = Z(t) + T(t) \quad (3)$$

Diese Methode eignet sich besonders gut, um lastgeprägte Netzgruppen zu prognostizieren, da das Vorjahresverhalten der Lasten überwiegend bestehen bleibt.

Die beiden vorgestellten Prognosemethoden wurden im Rahmen des Forschungsprojektes anhand realer Messdaten aus einem Feldversuch mit dem bereits erwähnten Betrieb B6 evaluiert. Dazu wurden die Wirkleistungsbezüge des Betriebs  $P_{Betrieb}$ , die PV-Einspeisung  $P_{PV}$  und das Ist- Blindleistungsverhalten am Umspannwerktransformator  $Q_{Ist}$  gemessen. Die beiden lokalen Wirkleistungsflüsse dienen als Führungsgrößen für die regressionsbasierte Prognose. In **Abbildung 4** sind die Prognoseabweichungen der beiden Methoden im Vergleich zu den Messdaten abgebildet. Es kann konstatiert werden, dass beide Verteilungen der Prognoseabweichungen annähernd normalverteilt und damit stochastischer Natur sind. Dabei ist in diesem Anwendungsfall die Prognose mittels Zeitreihenanalyse präziser. Zu erkennen ist dies an der geringeren Standardabweichung und an einem zentralen Mittelwert nahe 0 kVAr. Der Mittelwert der Prognoseabweichungen der Regression zeigt, dass diese Prognosemethode in diesem Fall zu einer leicht überhöhten Prognose gegenüber den realen Blindleistungsverhalten neigt. Für den betrachteten Anwendungsfall lässt sich auf Basis der Ergebnisse festhalten, dass grundsätzlich beide Prognosemethoden geeignet sind. Der Grund dafür ist, dass das Netz, in dem sich der betrachtete Betrieb befindet, hinsichtlich installierter Erzeuger- und Verbraucherleistung ausgeglichen ist. Die Prognose mittels Zeitreihenanalyse liefert präzisere Prognoseergebnisse. Das Blindleistungsverhalten dieses Netzes ist also verstärkt vom zeitlichen Verhalten der angeschlossenen Betriebe abhängig.

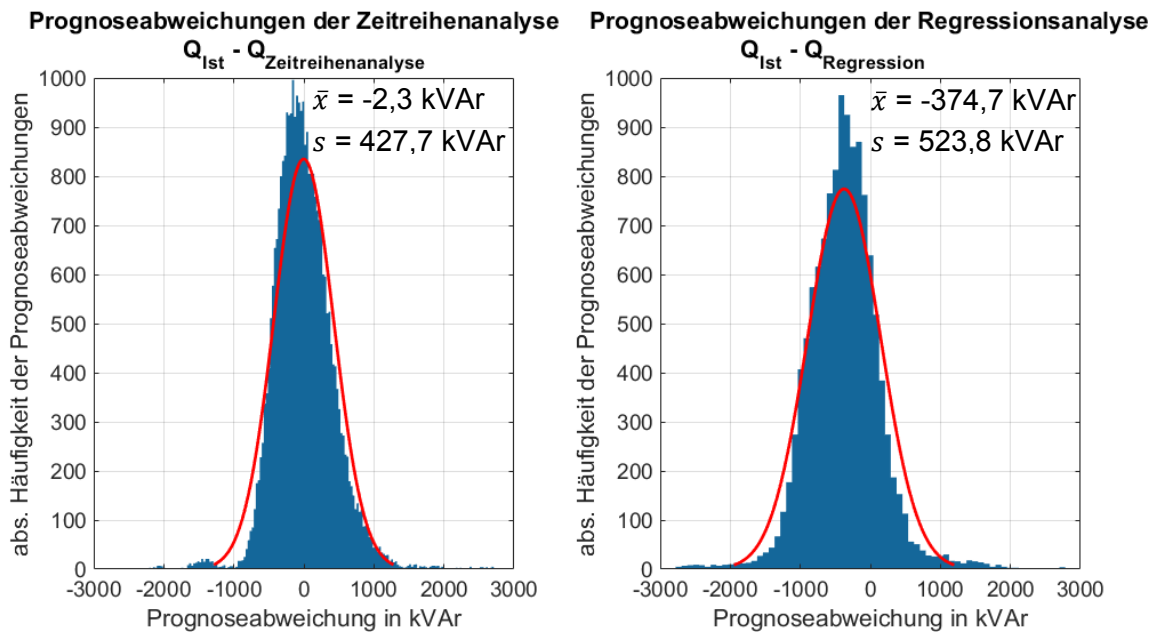


Abbildung 4: Prognoseabweichungen der beiden vorgestellten Methoden im Vergleich zu den Messdaten

Bei einem Blindleistungssollwert von null (komplette Kompensation) ergibt sich der Blindleistungsabruf aus einer Q-Quelle durch Negierung der Blindleistungsprognose ( $Q_{\text{Abruf}} = -Q_{\text{Prognose}}$ ). Der Q-Abruf wird durch die im Netz vorherrschenden Spannungs- und Auslastungsrestriktionen und die Q-Fähigkeit der Q-Quelle begrenzt. Die Restriktionen können mithilfe einer Sensitivitäts- und Restriktionsanalyse ermittelt werden [5]. Der Blindleistungsabruf aus mehreren Q-Quellen ist in [7] ausgeführt.

In SyNErgie wurde zur Demonstration der Funktionsfähigkeit des dezentralen Ansatzes ein Feldversuch durchgeführt, wobei der BKA-Regler in Betrieb B4 nach dem beschriebenen Vorgehen parametrisiert wurde. Der Einfluss der blindleistungsbilanzbedingten Regelung ist in **Abbildung 5** in blau dargestellt. Mit dem kapazitiven Q-Potenzial der BKA von 250 kVAr (s. Abb. 1) konnte der Maximalwert im induktiven Q-Verhalten der Netzgruppe um 250 kVAr reduziert werden. Während der Versuchslaufzeit wurden keine Spannungs- oder Auslastungsgrenzwertverletzungen verletzt. Als Vergleich zum realen Feldversuch wurde auch ein virtueller Feldversuch (bilanzielle Rechnung) mit dem Betrieb B6 durchgeführt, der sich in der gleichen Netzgruppe befindet und dessen maximales Q-Potenzial bei +4 bzw. -7 MVar liegt. Durch das höhere Potenzial ist die Wirkung des Betriebs auf den Q-Haushalt deutlich größer. Das induktive Maximum kann um bis zu 1 MVar reduziert werden. Allerdings kann auch hier keine vollständige Kompensation erreicht werden. Dies liegt zum einen an der Prognoseungenauigkeit, die im Bereich der Schwachlast zunimmt und somit zu einem falschen Q-Abruf führt und zum anderen an der ungenügenden zeitlichen Korrelation zwischen Q-Bedarf und Q-Potenzial.



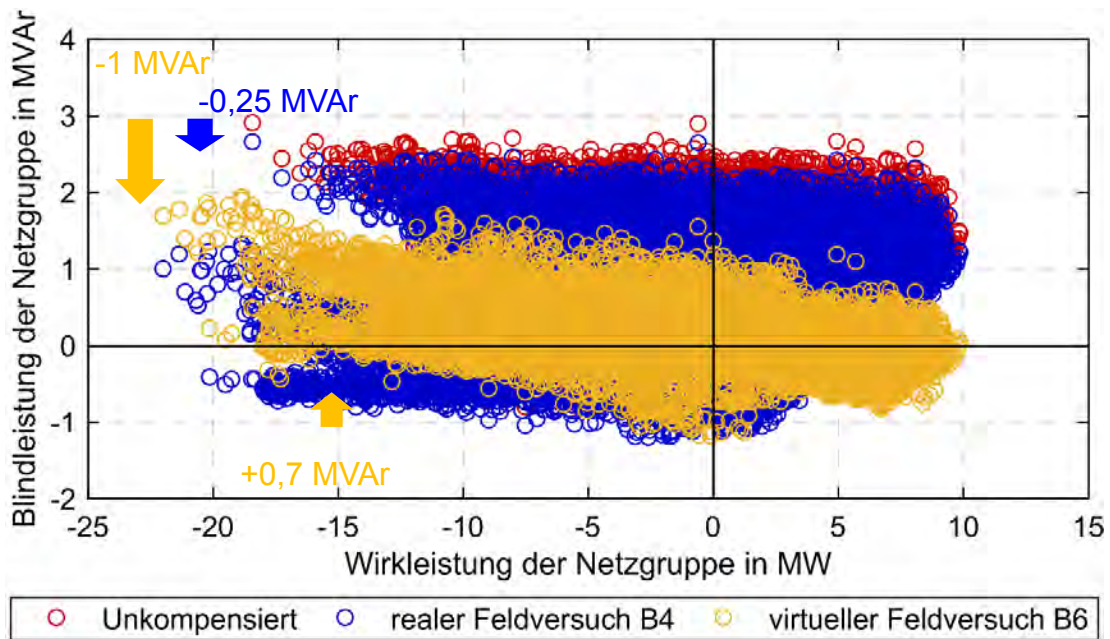


Abbildung 5: Gegenüberstellung von P-Q-Wolken des realen Feldversuchs mit Betrieb B4 (blau) und des virtuellen Feldversuchs mit B6 (gelb) im Vergleich zum unkompensierten Verhalten (rot) für ein ganzes Jahr

## 4.2 Zentraler Ansatz

Im Rahmen der zentralen Q-Regelung wird das Q-Verhalten der Netzgruppe hinsichtlich einer definierten Zielsetzung vom Netzbetreiber bewertet und ein netzdienlicher Q-Abruf abgeleitet. Der resultierende Q-Abruf wird direkt vom Netzbetreiber an die Regelung der BKA übertragen und kann dort umgesetzt werden. Bei der zentralen Blindleistungsregelung regelt eine zentrale Instanz „Zentralrechner“ in Echtzeit den Blindleistungsabruf der Q-Quellen im MS-Netz und besitzt Informationen zum Zustand des Netzes (z. B. Spannungsverhältnisse und Leitungsauslastungen). Letzterer kann über Messungen in Verbindung mit einem Netzmodell, über das fehlende notwendige Größen bestimmt werden, ermittelt werden. Eine ausführliche Darstellung des zentralen Ansatzes kann [8] und [11] entnommen werden. **Abbildung 6** zeigt schematisch die beschriebene Funktionsweise des zentralen Ansatzes.

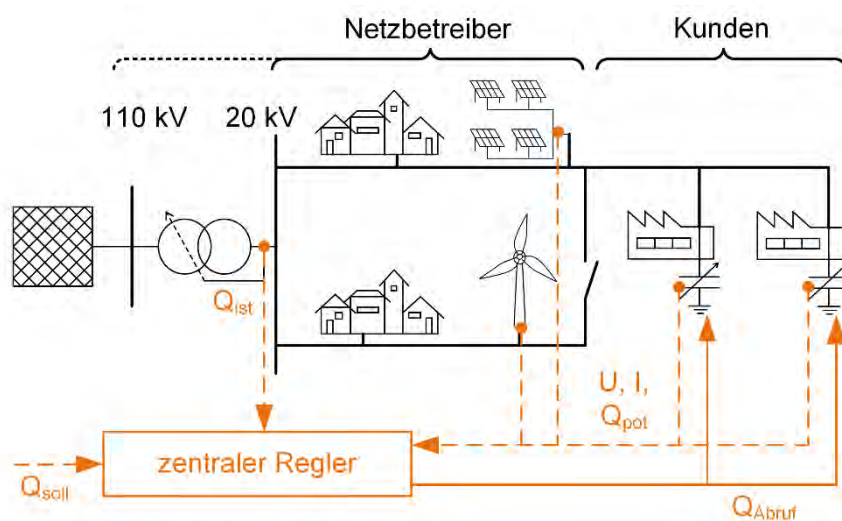


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Funktionsweise des zentralen Ansatzes mit Informationsfluss (gestrichelt) und Befehlsfluss (durchgezogen)

**Abbildung 7** zeigt die Simulationsergebnisse einer beispielhaften Anwendung des zentralen Regelverfahrens in einer lastgeprägten Netzgruppe. In diesem Beispiel wurden drei Q-Quellen mit einem gemeinsamen maximalen Q-Potenzial von +3,7 und -5,1 MVar verwendet. Dabei lässt sich ein solides Kompensationsvermögen von etwa 2,4 MVar im induktiven Abruffall feststellen, während die Kompensationswirkung im kapazitiven Bereich von ca. 0,2 MVar deutlich geringer ist. Ursache hierfür ist ein fehlendes gesichertes induktives Potenzial von zwei Q-Quellen. Die Spannungs- und Auslastungsgrenzwerte werden zu jeder Zeit eingehalten, siehe [12]. Weitere Anwendungsfälle und detailliertere Untersuchungsergebnisse zur zentralen Blindleistungsregelung sind in [12] dargelegt.

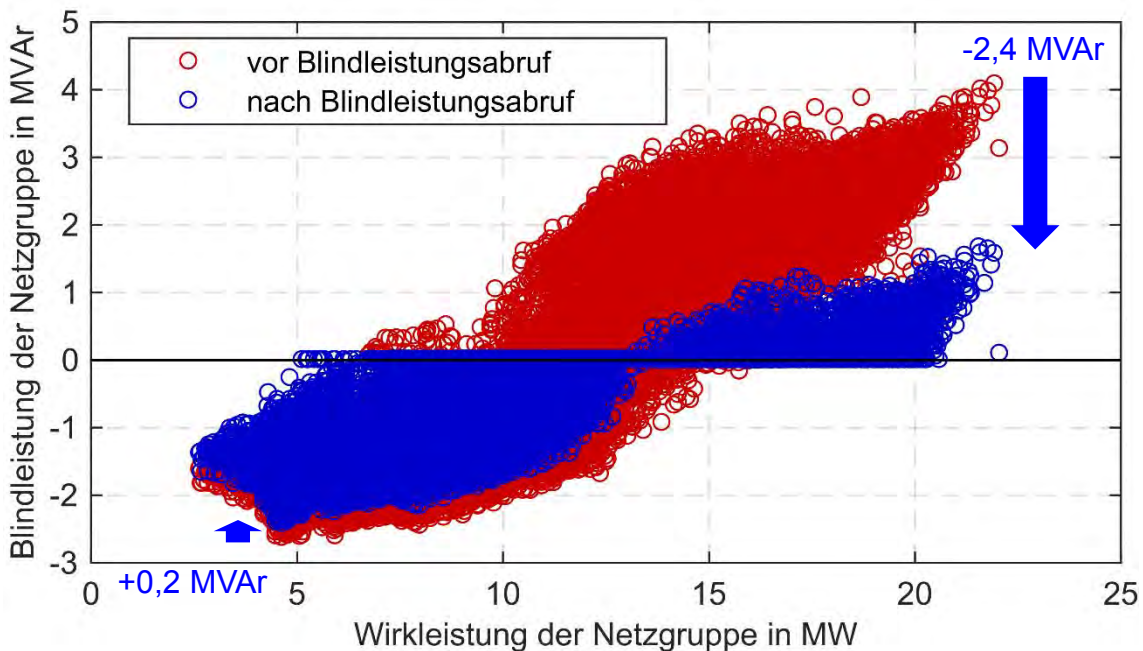


Abbildung 7: Gegenüberstellung des simulativ ermittelten Wirk-Blindleistungsverhaltens der Netzgruppe vor (rot) und nach (blau) Anwendung des zentralen Regelverfahrens für ein ganzes Jahr

## 5 Weitere netzbetreiberorientierte Ergebnisse

Ein weiterer Fokus der Projektarbeit lag auf der Überprüfung und Verbesserung der Annahmen für die Netzplanung. Ziel war es zum einen, freie Planungsreserven zu identifizieren und für die Erhöhung des Q-Potenzials zu erschließen. Andererseits muss auch der Bedarf des Netzes möglichst exakt ermittelt werden. Basis für diese Schritte war eine sehr detaillierte und realitätsnahe Nachbildung eines 20-kV-Netzbereiches auch anhand einer Vielzahl vorhandener Messwerte in 1-min-Auflösung über einen langen Zeitraum.

Die in einem Netz wirksame und damit die für die Netzauslegung relevante Erzeugungsleistung von EZA unterscheidet sich abhängig von der Durchmischung der Anlagen durchaus signifikant von der installierten Leistung der EZA. Für die Nachbildung dieser Reduzierung in der Netzberechnung wurden die Gleichzeitigkeitsfaktoren für die unterschiedlichen Primärenergieträger exakt bestimmt und mit den bereits angewandten Erfahrungswerten verglichen. Die Untersuchung hat auch ergeben, dass Faktoren wie die

Dachneigung und die Südausrichtung von PV-Dachanlagen keinen signifikanten Einfluss hat.

Durch die sehr detaillierte Berücksichtigung der SLP-Kunden sowohl über das Netzmodell als auch über aufwändige Messreihen im Netz wurde erkannt, dass eine signifikante Abweichung der Bezugsleistung vom H0-SLP im Jahresverlauf vorhanden sein dürfte. Um die unabhängig davon wirkarbeitsrichtige Nachbildung von SLP-Kunden beizubehalten, ist ein denkbarer Ansatz, die 1/4-h-Leistungen im Jahresverlauf so zu variieren, dass in der Summe die Jahresarbeit konstant bleibt. Ein weiterer Aspekt betrifft das Blindleistungsverhalten. Auch hier deutet sich an, dass die klassische Annahme eines Leistungsfaktors von 0,9 induktiv nicht mehr ganz zutreffend ist. Sowohl hinsichtlich der Wirkleistung als auch der Blindleistung sind noch weitere Untersuchungen notwendig, bevor eine konkrete Aussage getroffen werden kann. Auch ist offen, inwieweit es sich hier um kundenspezifische Effekte handelt und ob eine generelle Aussage zu diesem Thema überhaupt möglich ist.

Sehr großen Einfluss auf die Netzplanung hat auch die exakte Nachbildung des Q(U)-Verhaltens der EZA im 20-kV-Netz. Bei der klassischen worst-case-Betrachtung kann noch von einem maximalen  $\cos\varphi$  gemäß den einschlägigen TAR ausgegangen werden. Bei einer in diesem Projekt für die Ermittlung des Q-Potenzials von EZA zwingend erforderlichen Zeitreihenbetrachtung ist eine konstante Nachbildung nicht ausreichend. Die entsprechende, in den Netzberechnungsprogrammen mögliche Nachbildung des Regelverhaltens  $Q = f(U)$  hat dann gezeigt, dass es bei EZA, die in unmittelbarer Nähe einer Umspannanlage mit einer lastflussabhängigen Spannungssollwertregelung angeschlossen sind, zu einer unerwünschten Beeinflussung der Q(U)-Regelung kommen kann.

Eine ausführliche Beschreibung dieser und weiterer Ergebnisse kann [8] entnommen werden.

## **6 Fazit zum Q-Potenzial von MS-Betrieben und deren Erschließung**

Die Auswertungen von zahlreichen Abrechnungsmessdatensätzen sowie zusätzlich aufgenommener Informationen von MS-Betrieben (wie z. B. der installierten Kompensationsleistung) deuten darauf hin, dass vor allem das kapazitive Potenzial der Betriebe netzdienlich verwertbar wäre. Die Nutzung induktiver Q-Potenziale ist ebenfalls möglich, jedoch nur in geringerem Umfang. Durch die Einstellung höherer Kompensationsgrade bis hin zur Überkompensation könnten Betriebe vor allem als regelbare kapazitive Q-Quelle eingesetzt werden. Das induktive Potenzial der Betriebe, welches durch Abschalten der BKA-Stufen abrufbar wäre, ist durch Modernisierungen eher als rückläufig einzustufen. Des Weiteren ist anzumerken, dass die durchgeführten Messungen ausschließlich das Potenzial von konventionellen Kompensationsanlagen („Kondensatoren“) erfassen. Zukünftig kann es zielführend sein, auch bei den Betrieben

befindliche blindleistungsfähige Wechselrichter zu erfassen, die perspektivisch die Höhe und die zeitliche Verfügbarkeit der vorgefundenen Potenziale verbessern würden.

Es lässt sich festhalten, dass der hier beschriebene dezentrale Ansatz zielführend ist und durch relativ einfache Mittel ein durchaus signifikanter Einfluss auf den Q-Haushalt der MS-Netzgruppe erreicht werden kann. Allerdings ist dieser Ansatz strenggenommen weniger als eine Regelung, sondern vielmehr als eine Vorsteuerung des Blindleistungshaushalts aufzufassen.

Der in SyNErgie entwickelte zentrale Ansatz erschließt das vorhandene Potenzial der Q-Quellen deutlich besser als der dezentrale Ansatz. Dadurch ist eine bessere Beeinflussung des Blindleistungshaushalts möglich. Allerdings beschränkt auch hier, wie beim dezentralen Ansatz, die zeitliche Korrelation zwischen Bedarf und Potenzial die Wirkung. Des Weiteren bedarf es beim zentralen Ansatz an einer möglichst störungsfreien und ggf. kostenintensiven Mess- und Kommunikationstechnik im Netz.

Im Rahmen des Projektes SyNErgie konnten vor allem Hinweise für die Bewertung von Q-Potenzialen im Rahmen der Netzplanung abgeleitet werden. Darüber hinaus konnten technische Konzepte zur Erschließung von Blindleistungspotenzialen entwickelt und mittels Prototypen erprobt werden (dezentrale/zentrale Q-Regelung). Zur letztendlichen Implementierung in der Praxis fehlen primär regulatorische Rahmenbedingungen und wirtschaftliche Anreize, um auf deren Basis weitere Entwicklungsarbeiten für kommerzielle Werkzeuge/Dienstleistungen zur

- einfachen Q-Potenzialbewertung von Q-Quellen,
- technischen Definition und Bewertung der Verfügbarkeit (z. B. im (n-1)-Fall) von Q-Quellen und
- technischen und wirtschaftlichen Bewertungen der Q-Quellen über mehrere U-Ebenen hinweg (z. B. aggregiert für HS- und MS-Ebene)

leisten zu können.

Im Rahmen des Nachfolgeprojekts Q-Integral werden u. a. die Thematiken zum spannungsebenenübergreifenden Blindleistungsmanagement und dessen wirtschaftliche Analyse ab April 2019 weiterverfolgt. Des Weiteren werden die in SyNErgie angefangenen Messungen von Haushaltsskollektiven mit der Main-Donau Netzgesellschaft mbH weitergeführt, vgl. [8].

## Literaturverzeichnis

- [1] VDE|FNN, „Blindleistungsmanagement in Verteilungsnetzen,“ Forum Netztechnik / Netzbetrieb im VDE (FNN), Berlin, 2014.
- [2] R. Kreuzer, M. Haslbeck, und O. Brückl, „Modellierung von Mittelspannungsnetzen zur verbesserten Nachbildung von Wirk- und Blindleistungsflüssen“, in *Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien 30. und 31. Januar 2018*, Berlin, 2018, S. 504–509.
- [3] A. Berling, M. Haslbeck, und Brückl, Oliver, „Interpretation und Relevanz verschiedener Blindleistungsarten für die Modellierung von Niederspannungsnetzen in der Netzplanung“, in *Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien 30. und 31. Januar 2018*, Berlin, 2018, S. 467–474.
- [4] M. Haslbeck, B. Vogl, und Brückl, Oliver, „Interpretation von P-Q-Wolken als Hilfsmittel zur Bewertung von Mittelspannungsnetzen“, in *4. OTTI-Konferenz: Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien*, Berlin, 2017.
- [5] M. Haslbeck und O. Brückl, „Netzplanungsprozess zur dezentralen Nutzung von Blindleistungsquellen in Verteilungsnetzen“, in *Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien 30. und 31. Januar 2018*, Berlin, 2018, S. 178–193.
- [6] J. Rauch, M. Klitsman, M. Haslbeck, und O. Brückl, „Entwicklung von Methoden zur Prognose der Blindleistungsbilanz von Mittelspannungsnetzen zur Steuerung eines dezentralen Blindleistungsabrufs“, in *Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien 30. und 31. Januar 2018*, Berlin, 2018, S. 524–535.
- [7] M. Haslbeck, „Beeinflussung der Blindleistungsbilanz von Mittelspannungsnetzen durch Steuerung von Blindleistungsquellen am Beispiel betrieblicher Kompensationsanlagen“, unv. Diss., TU Clausthal.
- [8] Haslbeck M., Kreuzer R., Rauch J., Brückl O., Günther A., Bäsman R., Rietsche H., Tempelmeier A., „Schlussbericht SyNERgie,“ TIB, Hannover, 2018.
- [9] B. Rönz, Regressions- und Korrelationsanalyse. Wiesbaden: Gabler, 1992.
- [10] R. Schlittgen, Zeitreihenanalyse. München u.a.: Oldenbourg, 1984.
- [11] J. Rauch, O. Brückl, „Entwicklung eines Regelverfahrens für einen optimierten und zentralen Blindleistungsabruf zur Beeinflussung des Blindleistungshaushalts von Mittelspannungsverteilungsnetzen unter Einhaltung von Netzrestriktionen“, in *Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien 30. und 31. Januar 2019*, Berlin, 2019
- [12] J. Rauch, „Entwicklung eines Regelverfahrens für einen optimierten und zentralen Blindleistungsabruf zur Beeinflussung des Blindleistungshaushalts von Mittelspannungsnetzen unter Einhaltung von Netzrestriktionen,“ Masterthesis, Regensburg, 2018.