

Entwicklung eines Regelkonzeptes für einen optimierten Blindleistungsabruf auf Basis von Blindleistungspotentialanalysen bei Industriebetrieben im Mittelspannungsnetz

Philipp Schweiberer, Johannes Rauch, Oliver Brückl

OTH Regensburg, FENES

Seybothstraße 2, 93053 Regensburg

Tel.: 0941 943-9885

E-Mail: philipp.schweiberer@oth-regensburg.de

Internet: <https://www.fenes.net>

Industrielle Blindleistungspotentiale

Im Zuge der Energiewende ergibt sich ein Wandel in der Struktur des Elektrizitätsversorgungsnetzes. Die Verschiebung der Erzeugungsleistung von konventionellen Großkraftwerken in höheren Netzebenen hin zu dezentralen erneuerbaren Energieanlagen in niedrigeren Netzebenen resultiert sowohl in bidirektionalen Lastflüssen als auch in schwankenden Einspeisecharakteristiken. Des Weiteren folgen durch den Wegfall von Großkraftwerken als Blindleistungsquellen Leistungsdefizite in der Übertragungsnetzebene, die kompensiert werden müssen. Daraus resultieren Herausforderungen an einen sicheren und zuverlässigen Betrieb der Verteil- und Übertragungsnetze. Neue Konzepte müssen für die Erbringung von Blindleistung entwickelt werden, es soll mehr Blindleistung aus dem Verteilungsnetz zur Verfügung gestellt werden, um die Systemstabilität zu wahren [1]. Im Rahmen des Projektes *Q-Integral* wird das Thema „Blindleistung“ (Q) ganzheitlich untersucht. Es werden dazu verschiedene Erbringungsoptionen für Blindleistung hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Potentiale untersucht, die in ein funktionales und effizientes Blindleistungsmanagement eingebracht werden. Die Untersuchungsansätze dafür sind sowohl spannungsebenen-übergreifend als auch netzbetreiber-übergreifend.

Ein Ansatzpunkt des Projektes ist die Betrachtung der Blindleistungsbereitstellung von Industriebetrieben [2]. Dazu wird das Potential von Betrieben, die an das Verteilnetz angeschlossen sind und Blindleistung durch Kompensations- oder Erzeugungsanlagen bereitstellen können, untersucht. Ziel ist es, das gesicherte und maximale induktive sowie kapazitive Potential zu bestimmen. Das gesicherte kapazitive Potential kann genutzt werden, um Aussagen darüber zu treffen, wie stark dem Spannungsfall im vorgelagerten Netz zu Starklastzeiten entgegengewirkt werden kann. Anhand des gesicherten induktiven Potentials kann ein Spannungsanstieg während Schwachlastzeiten ausgeglichen werden kann.

In diesem Beitrag werden Ergebnisse aus dem Projekt *Q-Integral* vorgestellt. Dazu werden zuerst die Berechnungsgrundlagen der induktiven und kapazitiven Blindleistungspotentiale aufgezeigt und die Ergebnisse der Berechnungen vorgestellt. Die gewonnenen Ergebnisse entstammen aus Messungen an einem Industriebetrieb mit Blindleistungskompensationsanlagen (BKA), den entsprechenden Reglern der Anlagen und einer installierten Kompensationsleistung von 1600 kvar. Sowohl die Lastgänge als auch das Schaltverhalten der einzelnen Kompensationsanlagen liegen den Berechnungen zugrunde. Um den Austausch der Blindleistung an der Übergabestelle des Betriebs zum Mittelspannungsnetz netzdienlich einzustellen, bedarf es eines geeigneten Regelkonzepts, das neben den BKAs auch weitere Q-Quellen berücksichtigt. Deshalb wird abschließend ein Regelkonzept vorgestellt, das den technisch-optimierten Blindleistungsabruf unter Berücksichtigung mehrerer Blindleistungsquellen behandelt.

Berechnung der Blindleistungspotentiale

Für die Berechnung des induktiven und kapazitiven Blindleistungspotentials wird vom Lastgang des Transformators $Q(t)_{\text{Transformator}}$, der während des Normalbetriebs, also während des tatsächlich gemessenen Betriebs, anfällt auf den unkompensierten (1) bzw. überkompensierten (2) Lastgang geschlossen.

Um den unkompensierten Fall zu berechnen, werden vom Lastgang im Normalbetrieb die Stufenleistungen der BKAs, die zu den jeweiligen Zeitpunkten geschaltet sind, subtrahiert [3]:

$$Q(t)_{\text{unkompensiert}} = Q(t)_{\text{Transformator}} - Q(t)_{\text{BKA}} \quad (1)$$

Für den überkompensierten Lastgang wird die maximal installierte Kompensationsleistung zum unkompensierten Lastgang addiert:

$$Q(t)_{\text{überkompensiert}} = Q(t)_{\text{unkompensiert}} + Q(t)_{\text{inst.BKA}} \quad (2)$$

Das induktive Änderungspotential der einzelnen Stationen ergibt sich aus Formel (3):

$$dQ(t)_{\text{ind}} = -Q(t)_{\text{BKA}} \quad (3)$$

Das kapazitive Änderungspotential wird durch (4) definiert:

$$dQ(t)_{\text{kap}} = Q(t)_{\text{inst.BKA}} - Q(t)_{\text{BKA}} \quad (4)$$

Um das gesamte induktive und kapazitive Änderungspotential des Industriebetriebs zu bestimmen, werden die Änderungspotentiale der einzelnen Stationen addiert ((5) und (6)):

$$dQ(t)_{ind,ges} = \sum_1^m dQ(t)_{ind,m} \quad (5)$$

$$dQ(t)_{kap,ges} = \sum_1^m dQ(t)_{kap,m} \quad (6)$$

Die beiden Änderungspotentiale beschreiben demnach, in welchem Maße das Blindleistungsverhalten um einen bestimmten Arbeitspunkt herum verändert werden kann.

In **Abbildung 1** sind das induktive und das kapazitive Änderungspotential als Pfeil grafisch dargestellt. Die Änderungspotentiale ergeben sich als Unterschied zwischen dem Normalbetrieb und dem überkompensierten Betrieb (für das kapazitive Änderungspotential) und dem Unterschied zwischen dem unkompensierten Betrieb und dem Normalbetrieb (für das induktive Änderungspotential).

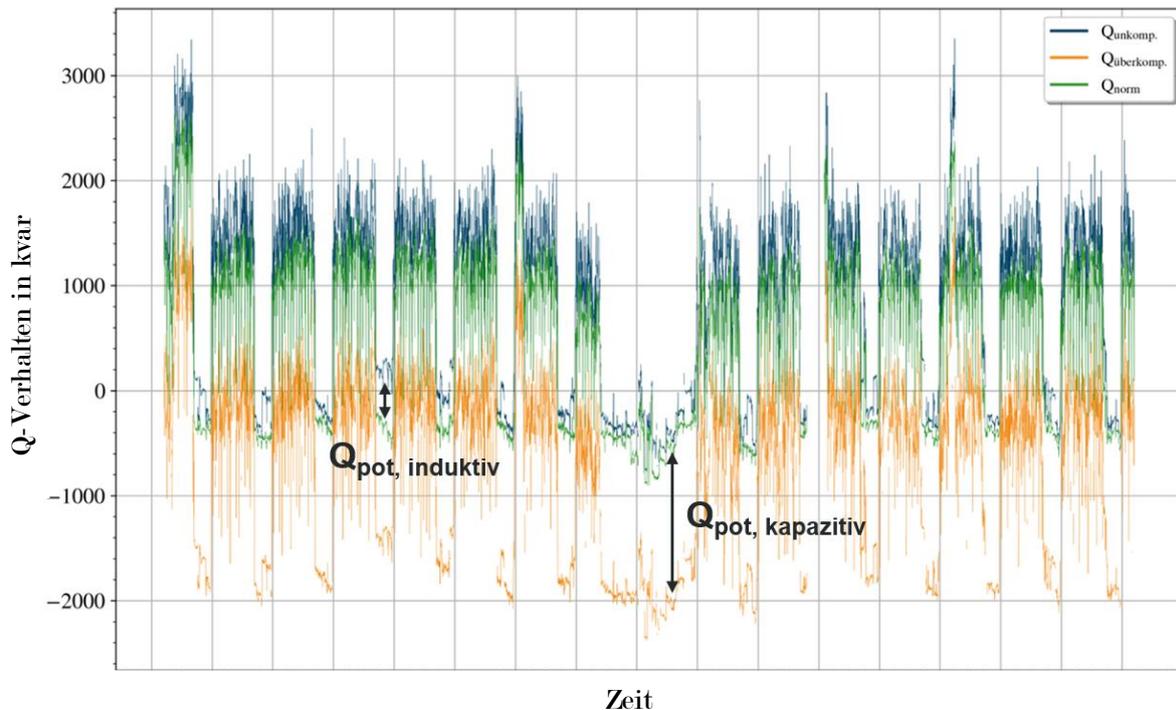
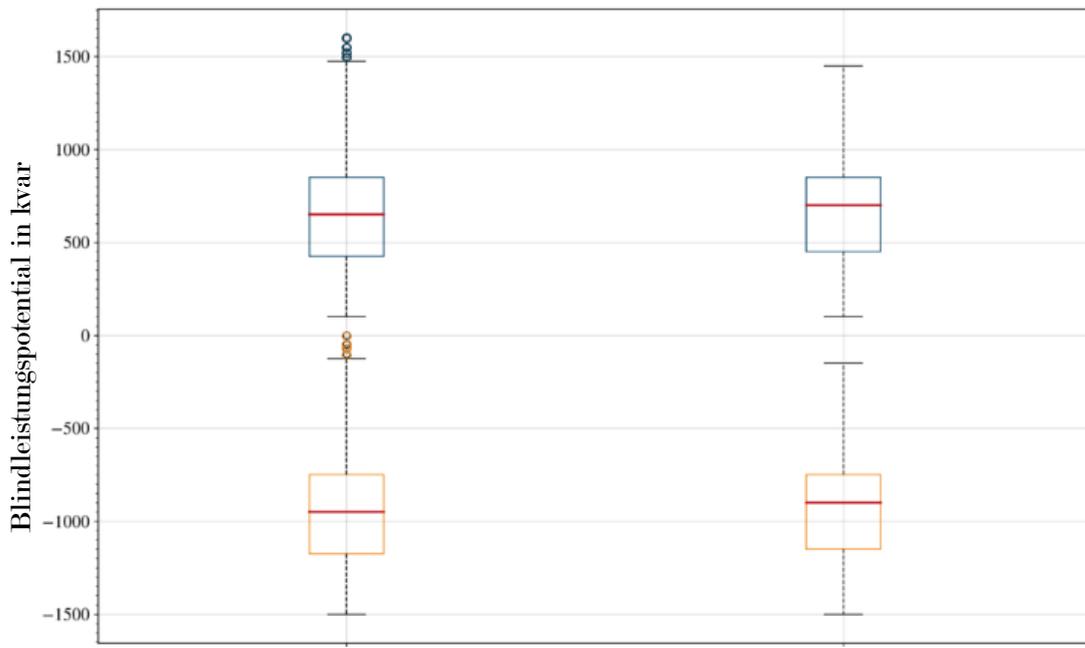


Abbildung 1: Blindleistungsverhalten des Betriebes für den normalen (grün), unkompensierten (blau) und überkompensierten (orange) Betrieb über den Zeitraum vom 03.11.2020 bis zum 01.12.2020

Ergebnisse zu den Berechnungen der Blindleistungspotentiale

Restriktionsfreie Blindleistungspotentiale

Der Begriff „restriktionsfrei“ beschreibt in diesem Zusammenhang die Vernachlässigung von Grenzen, die sich aus der maximalen Auslastung von Betriebsmitteln oder Spannungsbandgrenzen ergeben. Aus **Abbildung 2**, die die Verteilung der induktiven und kapazitiven Potentiale an Werktagen und Wochenenden in Form von Boxplots und Histogrammen zeigt, lässt sich erkennen, dass ein dauerhaftes induktives Potential von 100 kvar vorhanden ist und von insgesamt 1600 kvar installierter Blindleistung (in Form von BKAs) ein Potential von maximal 1500 kvar abgerufen werden. Ein gesichertes induktives Potential von 100 kvar kann bereitgestellt werden, da die ersten Stufen der Kompensationsanlagen dauerhaft dazugeschaltet sind. Des Weiteren zeigt sich, dass an Wochenenden ein maximales Potential von insgesamt 1350 kvar abgerufen werden kann und ebenfalls ein dauerhaft induktives Potential von 100 kvar vorhanden ist. Das maximal abrufbare kapazitive Potential beträgt sowohl an Werktagen als auch an Wochenenden 1600 kvar. Im Gegensatz zum dauerhaft gesicherten induktiven Potential ist kein gesichertes kapazitives Potential vorhanden, da das geringste Potential sowohl an Werktagen als auch an Wochenenden 0 kvar beträgt.



Werktag

Wochenende

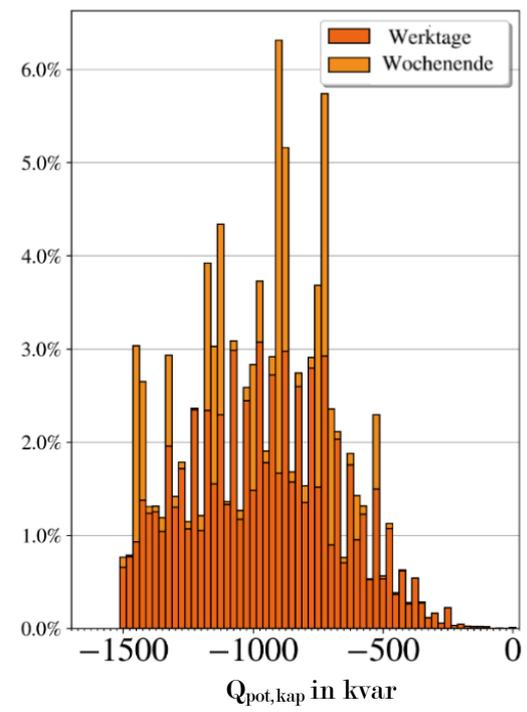
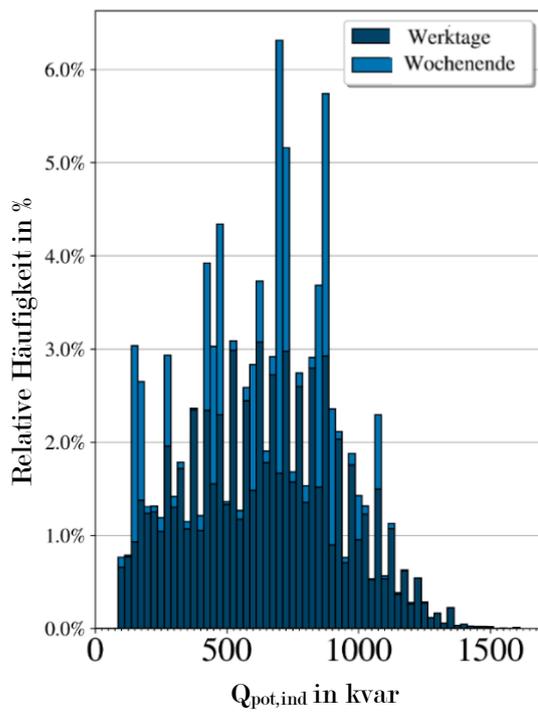


Abbildung 2: Verteilung des induktiven (blau) und kapazitiven (orange) Blindleistungspotentials an Werktagen und Wochenenden als Boxplot und Histogramm

Restriktionsbezogene Blindleistungspotentiale

Bei der Bestimmung der restriktionsbezogenen Potentiale werden Auslastungsgrenzen der Betriebsmittel sowie Spannungsbandgrenzen berücksichtigt. Mit Hilfe einer Simulation des betrachteten Industrienetzes können der über- und unkompenzierte Betrieb simuliert und somit mögliche Restriktionsverletzungen erkannt werden. In **Abbildung 3** sind die maximalen Auslastungen der Betriebsmittel, in deren Strang die vorhandenen Kompensationsanlagen angeschlossen sind, bei normalem Betrieb (grün) sowie bei Abruf des maximalen induktiven (unkompensierter Betrieb, blau) und kapazitiven Potentials (überkompensierter Betrieb, orange) zu sehen. Es zeigt sich, dass es zu keiner Überlastung von Transformatoren oder Kabeln beim Abruf der Blindleistungspotentiale kommt.

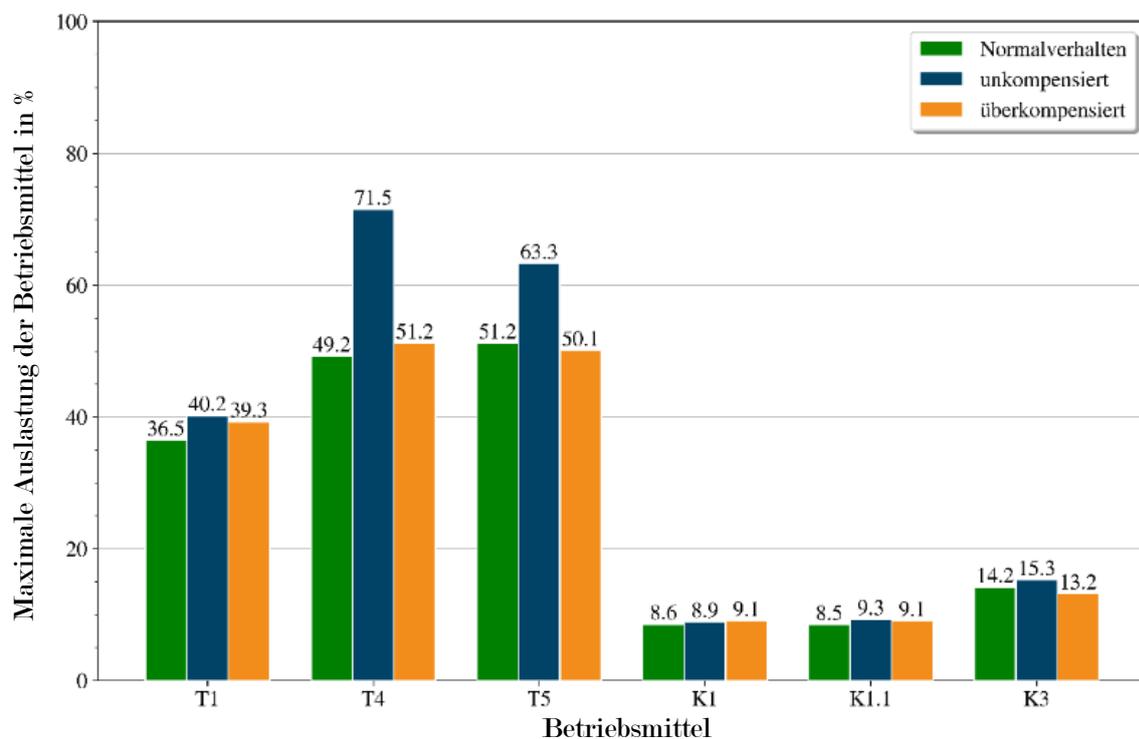


Abbildung 3: Größte Auslastungsänderungen von Transformatoren und Kabeln bei normalem (grün), unkompenzierten (blau) und überkompensierten (orange) Betrieb

Daraus folgt, dass die restriktionsbezogenen Potentiale den restriktionsfreien Potentialen entsprechen, wenn ausschließlich die Auslastungen der Betriebsmittel berücksichtigt werden. Die Auswirkung der Potentialabrufe auf Spannungsrestriktionen kann daraus nicht abgeleitet werden und muss noch untersucht werden.

Regelkonzept zur Steuerung des Abrufs von Blindleistungspotentialen mit Berücksichtigung verschiedener Blindleistungsquellen

Die Eingangsdaten für das Regelkonzept bestehen aus den verfügbaren Blindleistungspotentialen, die durch die vorhandenen Regler an den BKAs gemessen werden. Diese Daten werden über eine OPCUA-Schnittstelle an einen zentralen Rechner übermittelt, auf dem die Simulation des Industrienetzes stattfindet. Anhand der übermittelten Daten können die Blindleistungsquellen bestimmt werden, deren Blindleistungspotential nicht vollständig abgerufen wird und die somit zur Verfügung stehen. Durch die Vorgabe von dynamischen Regelcharakteristiken werden aus diesen Blindleistungsquellen diejenigen ausgewählt, die die dynamischen Anforderungen erfüllen. Mit Hilfe einer Netzsimulation werden im nächsten Schritt Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um zu ermitteln, welche Blindleistungsquellen am technisch-effizientesten eingesetzt werden können. Anhand der Analysen kann eine Merit-Order der einzelnen Blindleistungsquellen, aber auch verschiedener Kombinationen der Quellen erstellt werden, welche iterativ durchlaufen wird. Für jede Blindleistungsquelle oder jede Kombination aus Blindleistungsquellen wird eine lastflussbasierte Restriktionsanalyse simuliert, um mögliche Restriktionsverletzungen wie Betriebsmittelüberlastungen oder Verletzungen der Spannungsgrenzen zu erkennen. Sollte eine Restriktionsverletzung festgestellt werden, wird in der Merit-Order-Liste die nächste Stelle simuliert. Dieser Schritt wird so lange wiederholt, bis keine Restriktionsverletzungen mehr auftreten. Danach wird eine Handlungsempfehlung basierend auf der ersten, technisch umsetzbaren Lösung als Blindleistungsabruf ausgesprochen. Die Handlungsempfehlung wird wiederum über eine OPCUA-Schnittstelle, die es ermöglicht, mehrere Blindleistungsregler miteinander zu vernetzen, vom zentralen Rechner zu den Reglern der Kompensationsanlagen zurückgesendet. **Abbildung 4** zeigt das oben beschriebene Regelkonzept als Flussdiagramm.

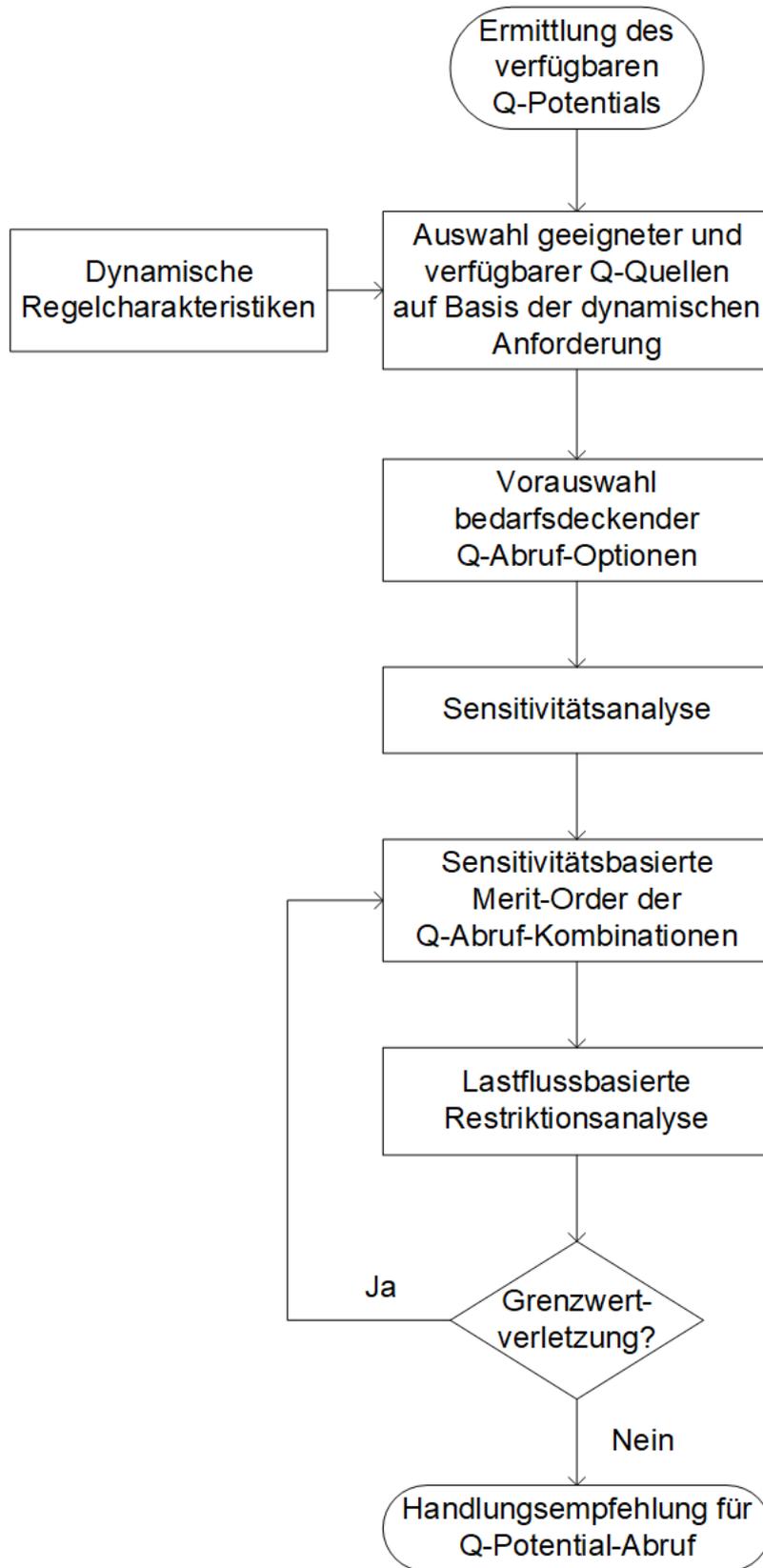


Abbildung 4: Regelkonzept für einen technisch optimierten Abruf des Blindleistungspotentials eines Industriebetriebes unter Berücksichtigung mehrerer Blindleistungsquellen

Zusammenfassung und Fazit

In diesem Bericht wurden die Grundlagen für die Berechnung des induktiven und kapazitiven Blindleistungspotentials dargestellt und die Berechnung der restriktionsfreien Blindleistungspotentiale für einen Industriebetriebs durchgeführt. Des Weiteren wurden die maximalen Auslastungen der Betriebsmittel im normalen, unkompensierten und überkompensierten Betrieb bestimmt, um Aussagen über das restriktionsbezogene Potential treffen zu können.

Die Berechnungen der Blindleistungspotentiale haben ergeben, dass das induktive sowie das kapazitive Potential an Werktagen größer ist als an Wochenenden. Außerdem konnte gezeigt werden, dass die erste Stufe bei allen BKAs dauerhaft dazugeschaltet ist, was in einem gesicherten induktiven Potential resultiert, das der Summe der ersten Stufenleistungen der BKAs entspricht (insgesamt 100 kvar).

Daraus resultiert:

$$\min(Q_{pot,ind,i}(t)) \neq 0 \quad (4.1)$$

Weiterhin hat sich gezeigt, dass kein gesichertes kapazitives Potential vorhanden ist, da für jede potentialrelevante Station gilt:

$$\min(Q_{pot,kap,i}(t)) = 0 \quad (4.2)$$

Die Untersuchungen hinsichtlich der maximalen Betriebsmittelauslastungen haben ergeben, dass die Transformatoren an den potentialrelevanten Stationen sowohl im überkompensierten als auch im unkompensierten Betrieb nicht über 100 % ausgelastet werden. Daraus lässt sich folgern, dass sowohl der maximale induktive als auch der maximale kapazitive Abruf hinsichtlich der Betriebsmittelauslastungen zulässig sind. Weiterhin wurde ein Konzept gezeigt, um den Blindleistungsabruf technisch-effizient zu gestalten. Dabei wurden sowohl dynamische Vorgaben als auch Restriktionen in Form von Auslastungen der Betriebsmittel oder Grenzen des Spannungsbandes mit einbezogen.

Literatur

- [1] Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher, OTH Regensburg: *Q-Integral – Aktives Blindleistungsmanagement mit dynamischen Blindleistungsquellen an der Schnittstelle Verteilungsnetz und Übertragungsnetz*. Verfügbar unter: <https://www.fenes.net/forschung/energienetze/laufende-projekte/q-integral/>.
- [2] Technische Universität Braunschweig, „Q-Integral: Aktives Blindleistungsmanagement mit dynamischen Blindleistungsquellen an der Schnittstelle Verteilungsnetz und Übertragungsnetz“, 2018.
- [3] Rauch J. und Brückl O.: *A Reactive Power Control Strategy based on Linear Programming for Medium Voltage Distribution Grids using the Reactive Power Potential of Industrial Compensation Systems*, unveröffentlicht.