

Zusammenfassung

Mit dem Umbau des Energiesystems zur Klimaneutralität steigt insbesondere der Anteil der fluktuierenden regenerativen Energieträger an der Stromerzeugung. Der damit einhergehende zunehmende Bedarf an Flexibilität stellt das Stromsystem zunehmend vor Herausforderungen. Demand Response bzw. Lastmanagement ist hier ein Baustein zur Bereitstellung zusätzlicher Flexibilitätskapazitäten. Insbesondere die energieintensiven Industrieprozesse, mit ihrem hohen und über das Jahr konstanten Bedarf an elektrischer Leistung, verfügen über hohe Potenziale. Ein wichtiger Prozess in diesem Zusammenhang ist die Chlor-Alkali-Elektrolyse mit umfangreichen Anlagenkapazitäten in Europa. Zahlreiche wissenschaftliche Studien zeigen, dass hier ein bedeutendes theoretisches Potenzial für Demand Response besteht. Jedoch ist eine weitgehend noch unbeantwortete Frage, in welchem Umfang diese in der Industrie umsetzbar sind. Eine entscheidende Rolle spielen dabei die prozesstechnischen als auch betriebswirtschaftlichen Limitierungen und Hemmnisse des flexiblen Betriebs. Daher untersucht diese Arbeit, mittels vier aufeinander aufbauender Publikationen, welche technischen Restriktionen durch die Chlorwertschöpfungsketten entstehen und unter welchen Voraussetzungen Demand Response wirtschaftlich umsetzbar ist. Diese offene Forschungsfragen stehen bisher einer Flexibilisierung des Chlor-Alkali-Prozesses im großen Maßstab in der Praxis entgegen.

Die Einbeziehung der Chlorwertschöpfungskette bei der Bewertung der Demand Response Potenziale ist in der eingeschränkten Speicherbarkeit von Chlor begründet. In der Folge wird der flexible Betrieb durch einen fluktuierenden Chlorstrom an die Folgeprozesse weitergegeben. Diese Arbeit analysiert die Flexibilität der einzelnen Chlorwertschöpfungsketten bezüglich des Chlorstroms und ermittelt die daraus resultierenden Einschränkungen für das Lastmanagement des Prozesses. Da Chlor eine Grundchemikalie für eine Vielzahl von Produkten ist, werden zunächst die Wertschöpfungsketten priorisiert. Die anschließende Bewertung der Prozessflexibilität des jeweiligen Chlorfolgeprodukts erfolgt auf Basis eines hier entwickelten Ansatzes. Dabei zeigt sich, dass 45 % der Demand Response Potenziale durch die Chlorwertschöpfungsketten nicht oder kaum begrenzt werden. Darin ist Polyvinylchlorid mit dem Zwischenprodukt Ethylendichlorid die Wertschöpfungskette mit den höchsten Demand Response Potenzialen. Dem gegenüber stehen die 49 % der Demand Response Potenziale, die durch die Restriktionen der Chlorfolgeprozesse stark eingeschränkt werden und die 6 % deren Umsetzung vollständig verhindert wird.

Die ökonomische Betrachtung - bestehend aus einer Kostenanalyse und einer wirtschaftlichen Bewertung - bezieht sich aufgrund der vorangegangenen Ergebnisse auf den Chlorfolgeprozess Ethylendichlorid. Das Ergebnis der Kostenanalyse stellt die Zusammenhänge zwischen den Parametern der Laständerungen und den entstehenden Kosten dar. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf die wirtschaftlich induzierten Restriktionen bei den Laständerungen. So beschränken die Kosten für verringerte Laugenqualität das Potenzial der Lastreduzierung und die Investitionskosten in Überkapazität das der Lasterhöhung. In der wirtschaftlichen Bewertung werden die erhobenen Kosten den Erlösen einer Vermarktung der Demand Response-Potenziale am EPEX SPOT Day-Ahead Markt gegenübergestellt. Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen zeigen, dass unter der Voraussetzung stark volatiler Strompreise Demand Response für den betrachteten Prozess wirtschaftlich umsetzbar ist.

Abstract

The transformation of the energy system towards climate neutrality results in a greater proportion of fluctuating renewables in power generation. The challenge then is to meet a growing demand for flexibility in the power system. Demand response or load management is one component of increased flexibility capacity. Energy-intensive industrial processes, in particular, have great potential due to their consistently high demand for electrical power throughout the year. Chlor-alkali electrolysis is one of the most significant processes, with large plant capacities in Europe. Numerous studies have shown that chlor-alkali electrolysis offers a high demand response potential. However, more needs to be known about the potentials that could be realised in industry, or the technical and economic limitations of flexible operation. This thesis investigates, through four related publications, the technical limitations along chlorine value chains and the economic viability of demand response. In practice, the lack of knowledge of both issues currently prevents widespread flexibilization of chlor-alkali electrolysis.

The demand response potential is impaired by the difficulties involved in storing chlorine. As a result, the flexible operation is passed through the downstream processes via a fluctuating chlorine flow. This work analyzes the flexibility of the individual chlorine value chains in terms of chlorine flow and determines the resulting limitations for chlor-alkali process load management. Since chlorine is used for a wide range of products, the value chains are first prioritized in terms of their share of total chlorine demand. Following that, the flexibility of the most important chlorine products is evaluated using a method developed here. The results show that approximately 45 % of the demand response potentials are only marginally limited by the chlorine value chains. Polyvinyl chloride, with the intermediate ethylene dichloride, is the value chain with the highest demand response potential. In contrast, the restrictions of the subsequent chlorine processes severely limit some 49 % of the potentials and completely prevent some 6 % of the potentials.

The economic review—which consists of a cost analysis and an economic evaluation—focuses on the downstream ethylene dichloride process. The cost analysis reveals the relationships between the load changes and costs. This makes it possible to draw conclusions about the economic restrictions on load changes. For example, the losses due to reduced sodium hydroxide brine quality limit the load reduction potential, while the need to invest in excess capacity constrains the potential load increase. The economic evaluation compares the identified costs and the revenues generated by marketing the DR potentials on the EPEX SPOT Day-ahead market. Assuming highly volatile electricity prices, demand response is economically viable for the polyvinyl chloride process considered here.