
Flex-Efficiency

Ein Konzept zur Integration von Effizienz
und Flexibilität bei industriellen Verbrauchern

IMPULSE

Agora
Energiewende



Flex-Efficiency

IMPRESSUM

IMPULSE

Ein Konzept zur Integration
von Effizienz und Flexibilität
bei industriellen Verbrauchern

ERSTELLT IM AUFTRAG VON

Agora Energiewende
Rosenstraße 2 | 10178 Berlin

PROJEKTLEITUNG

Alexandra Langenheld
alexandra.langenheld@agora-energiewende.de

Dr. Barbara Praetorius, Agora Energiewende
barbara.praetorius@agora-energiewende.de

Andreas Jahn, The Regulatory Assistance Project (RAP)
ajahn@raponline.org

DURCHFÜHRUNG DER STUDIE

Dr. Christian Nabe – Ecofys,
unter Mitarbeit von Marian Bons

Ecofys Germany
Albrechtstraße 10c | 10117 Berlin

Korrektorat und Satz: oekom verlag
Titelbild: Fotolia / Westend61 / Dieter Heinemann

093/01-S-2016/DE

Veröffentlichung: März 2016

Bitte zitieren als:
Ecofys (2016): *Flex-Efficiency.*
Ein Konzept zur Integration von Effizienz und
Flexibilität bei industriellen Verbrauchern.
Studie im Auftrag von Agora Energiewende

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

Energieeffizienz ist eine konstituierende Säule der Energiewende: Je sparsamer industrielle Produktionsprozesse und private Haushalte mit Strom umgehen, desto weniger Kraftwerke werden benötigt. Mit dem wachsenden Anteil an Solar und Windstrom steigt zugleich der Flexibilitätsbedarf im Stromsystem. Schon in wenigen Jahren werden Situationen auftreten, in denen das Stromangebot der Erneuerbaren die Nachfrage deckt oder sogar übersteigt. Umgekehrt wird es Zeitpunkte geben, in denen der Wind nicht weht und die Sonne nicht scheint.

Bei den Energieverbrauchern, allen voran bei den Großverbrauchern in der Industrie, schlummern erhebliche Potenziale für mehr Flexibilität. Bei einem Anteil von bald mehr als 50 Prozent Erneuerbaren Energien schwankt zugleich der Systemwert von Energieeffizienz und Flexibilität im Tages- und im Jahresverlauf. Das hat Auswirkungen auf die Strommärkte und -preise. Effizienz und Flexibilität setzen also voraussichtlich zunehmend Anreize für unternehmerische Entscheidungen.

Wenn Effizienz und Flexibilität im Rahmen von Flex-Efficiency künftig zusammengedacht werden, kann das sowohl zu Synergien führen als auch Wechselwirkungen haben. Wir haben uns deshalb gefragt, was Flex-Efficiency konkret

für die unternehmerische Praxis heißt. Welche technischen und wirtschaftlichen Optionen bestehen überhaupt für eine Optimierung auf der Ebene der Unternehmen? Welche Rahmenbedingungen und Anreize wären erforderlich, damit die Unternehmen die aus volkswirtschaftlicher Sicht richtigen Betriebs- und Investitionsentscheidungen treffen und dem Stromsystem Effizienz und Flexibilität im kosteneffizienten Umfang anbieten? Denn bisher wurden industrielle Anlagen vor allem im Hinblick auf ihren Energieverbrauch je Produktionseinheit optimiert, maßgeblich durch eine gleichmäßige Maschinenauslastung und damit einen ebenso gleichmäßigen Stromverbrauch.

Diese Herausforderungen sind für die industriellen Verbraucher bisher noch nicht systematisch durchdacht worden. Deshalb haben wir das Beratungsunternehmen Ecofys gebeten, eine praxisnahe Grundsatzbetrachtung vorzunehmen und die Idee der Flex-Efficiency anhand von Fallbeispielen zu erläutern sowie Potenziale und Hemmnisse zu analysieren. Die Studie soll damit den Startpunkt für Vertiefungen an der richtigen Stelle setzen.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre!
Ihr Patrick Graichen,
Direktor Agora Energiewende

Die Ergebnisse auf einen Blick

1

Effizienz und Flexibilität wachsen zusammen zu einem gemeinsamen Konzept: Flex-Efficiency. Denn mit immer mehr Erneuerbaren Energien in der Stromversorgung bekommt Effizienz eine zeitliche Komponente: Wenn die Sonne nicht scheint oder der Wind nicht weht, steigen die Strombörsenpreise – und Stromeffizienz wird wertvoller als in Zeiten hoher Erneuerbare Energien-Stromproduktion.

2

Flex-Efficiency wird zum Paradigma für Design und Betrieb von Industrieanlagen. Mit zunehmenden Anteilen von Wind- und Solarstrom werden die Preisschwankungen an der Strombörse steigen. Bei der Entwicklung neuer Industrieanlagen sollten Energieeffizienz und Flexibilität schon heute gemeinsam gedacht werden, um in Zukunft von den Stunden mit niedrigen Preisen zu profitieren.

3

Die Flexibilitätsmärkte und deren Produkte sollten weiter verbessert werden. Marktzugang, Marktstrukturen und die richtigen Produkte (zum Beispiel abschaltbare Lasten und weiteres Demand Side Management) sind entscheidend dafür, dass Marktpreissignale einen aus Systemsicht optimierten und zugleich wirtschaftlichen Betrieb der Anlagen oder entsprechende Investitionen anregen.

4

Investitionen in Flex-Efficiency brauchen eine Kombination von marktlichen und anderen Anreizen. Marktpreise generieren gute Anreize für die Optimierung und den Betrieb großer, energieintensiver Anlagen. Sie versagen jedoch oft bei „durchschnittlichen“ Prozessen, Speichern und Querschnittstechnologien. Ergänzende Instrumente sind erforderlich, um dieses Potenzial zu heben.

Inhalt

Vorwort	1	
Zusammenfassung	5	
Summary	8	
<hr/>		
1	Flex-Efficiency: Hintergrund und Zielsetzungen	11
1.1	Hintergrund	11
1.2	Ziel und Aufbau der Kurzstudie	12
<hr/>		
2	Das Konzept der Flex-Efficiency	15
2.1	Analysedimensionen und Definitionen von Effizienz und Flexibilität	15
2.2	Technische Umsetzung von Flexibilität und Effizienz in einer Anlage	16
2.3	Ausprägungen von Synergien und Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Effizienz einer Anlage	17
2.4	Wirkungen von Flexibilität und Effizienz von Anlagen im Gesamtsystem	21
2.5	Optimale Einsatzmengen von Flexibilität und Effizienz	23
2.6	Statische Effizienz	24
2.7	Dynamische Effizienz	25
2.8	Zwischenfazit	25
<hr/>		
3	Effizienz und Flexibilität in der betrieblichen Praxis: zwei Fallstudien	27
3.1	Fallstudie Aluminium-Elektrolyse bei Trimet	27
3.2	Fallstudie Pumpenanlagen	29
3.3	Zwischenfazit	31
<hr/>		
4	Anreize und Hemmnisse für optimale Flex-Efficiency	33
4.1	Die Rolle von Preissignalen für Flexibilität und Effizienz	33
4.2	Hemmnisse für die Wirksamkeit von Preissignalen	34
4.3	Auswirkungen der Hemmnisse auf die dargestellten Fallbeispiele	37
4.4	Zwischenfazit	38
<hr/>		
5	Wie können die Anreize für Flex-Efficiency verbessert werden? Zusammenfassung und Perspektiven	41
5.1	Wechselwirkungen von Flexibilität und Effizienz: Zusammenfassung der Analyse	41
5.2	Ansätze zur Überwindung der Hemmnisse für Flex-Efficiency	42
5.3	Anknüpfungspunkte in der betrieblichen Praxis	43
5.4	Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf	44
<hr/>		
6	Literaturverzeichnis	47

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1	Schematische Darstellung von operativer und investiver Wechselwirkung	18
Abbildung 2	Energie- und CO ₂ -Einsparung durch 70 technische Endenergieeinsparmöglichkeiten	20
Abbildung 3	Geordnete Jahresdauerlinien der Residuallast	22
Abbildung 4	Gradient einer modellierten Residuallast im Jahr 2030	23
Abbildung 5	Darstellung des Zusammenhangs zwischen Flexibilisierung und Effizienz von zwölf Elektrolyse-Öfen der Aluminiumproduktion durch den Einsatz von Wärmetauschern der TRIMET Aluminium SE	28
Abbildung 6	Schematische Darstellung der Auswirkungen des Ersatzes einer bestehenden, überdimensionierten Pumpe durch eine kleinere, effizientere Pumpe	30
<hr/>		
Tabelle 1	Synergien und Wechselwirkungen technischer Maßnahmen	19
Tabelle 2	Zusammenfassung der Preisanreize für Flexibilität und Effizienz aus dem Strom-Großhandelsmarkt	34

Zusammenfassung

Bei der Umsetzung der CO₂-Minderungsziele spielt die Nachfrageseite eine wichtige Rolle.

Zur Erreichung der CO₂-Minderungsziele im Stromsektor sind Maßnahmen sowohl aufseiten der Nachfrage als auch der Stromerzeugung erforderlich. Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz wirken direkt auf die Nachfrageseite. Aber auch steigende Anteile von Erzeugung aus Wind und Sonne beeinflussen die Nachfrageseite indirekt, denn in dem Maße, in dem die Erzeugung von Strom vermehrt auf fluktuierende Energieträger abstellt, sollte also auch die Nachfrageseite die Potenziale zur flexiblen Anpassung einbringen. Dabei entsteht auf der Nachfrageseite eine Wechselwirkung von Flexibilitätsmaßnahmen mit Effizienzmaßnahmen.

In der Regel besteht eine Wechselwirkung zwischen Flexibilität und Energieeffizienz.

In dieser Studie wurde zunächst untersucht, welche Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Effizienz auf Anlagenebene existieren. Bei vielen Anlagen besteht die Wechselwirkung darin, dass höhere Energieeffizienz mit einer geringeren Flexibilität erkaufte werden muss. Dies liegt darin begründet, dass Verbraucher bei der Variation der Last sich vom Optimalpunkt ihrer Prozessauslastung wegbewegen oder verlustbehaftete Zwischenspeicher genutzt werden. Dies betrifft zunächst den Betrieb von bestehenden Anlagen. Aber auch durch Investitionen in die Anlage kann oft das Verhältnis zwischen Flexibilität und Effizienz verändert werden. Für Investitionen stellt sich die Frage, in welchem Ausmaß Flexibilität und/oder Effizienz der bestehenden Anlage gesteigert werden sollen. Von praktischer Relevanz sind diese Wechselwirkungen vor allem im Bereich der Querschnittstechnologien. Aber auch bei bestimmten Produktionsprozessen beeinflussen sich Flexibilität und Effizienz gegenseitig.

Der Systemwert von Flexibilität und Effizienz variiert zeitlich im Tages- und Jahresverlauf.

Die Anforderungen nach Flexibilität und Energieeffizienz werden durch die Anforderungen des gesamten Strom-

versorgungssystems definiert. Sie sind zeitlich variabel. So kann der Systemwert einer eingesparten Kilowattstunde abhängig vom Zeitpunkt einen unterschiedlichen Wert haben, der von der Residuallast abhängt. Der Wert einer Effizienzmaßnahme könnte auch null werden, wenn keine Verwertungsmöglichkeiten für Überschussstrom vorliegen (Zeiten negativer Residuallast). Umgekehrt hat Stromesparung dann einen höheren Wert, wenn weniger Wind- und/oder Sonnenstrom verfügbar sind, also die Residuallast hoch ist. In diesen Zeiten hoher Residuallast können dann beispielsweise effizientere Produktionsprozesse und Geräte die Residuallast dauerhaft senken, wohingegen Lastverlagerung, zum Beispiel durch die flexiblere Fahrweise von Industrieprozessen, insbesondere in Zeiten des schnellen oder unerwarteten Angebots- oder Lastwechsels oder des Überschusses, wirkt. Auch der Wert der Flexibilität ist abhängig vom Zeitpunkt. Die höchsten Flexibilitätsanforderungen ergeben sich an Situationen extremer Residuallast, das heißt sowohl im negativen Bereich als auch im Spitzenlastbereich in Verbindung mit dynamischen Anforderungen, die aus steilen Gradienten und schnellen Wechseln der Residuallast entstehen. Diese Extrema prägen sich im Zeitverlauf stärker aus.

Preissignale können theoretisch die Signale zum optimalen Einsatz von Flexibilität und Effizienz liefern

Die zeitlich unterschiedlichen Wertigkeiten von Energieeffizienz und Flexibilität resultieren aus der Anforderung, dass im gesamten Stromversorgungssystem ein Kostenminimum erreicht wird. Dies gilt sowohl für den laufenden Betrieb, als auch für Investitionsentscheidungen in Verbraucher und Erzeuger. Dies funktioniert im theoretischen Idealfall über Märkte und Preissignale für definierte Produkte. Deshalb sollten die bestehenden (Flexibilitäts-) Märkte zur Liquiditätssteigerung zusammengefasst und nicht durch regulierte Preise (abschaltbare Lasten) verzerrt werden. Entsprechende Preissignale stellen im operativen Betrieb dann Knappheitssignale dar, die Einsatzentscheidungen von Erzeugungsseite, aber auch der Verbrauchsseite steuern. Aber auch in der dynamischen Betrachtung

können Preise die Signale für Investitionen in Flexibilität und Energieeffizienz liefern.

In der Praxis allerdings wird die Wirkung des Preissignals gehemmt.

Betriebswirtschaftlich erfolgt die Auslegung von technischen Anlagen im Hinblick auf Effizienz und Flexibilität nicht immer so, wie sie aus Sicht des Stromsystems insgesamt optimal wäre. Dafür sind verzerrte Preissignale und verschiedene weitere Hemmnisse verantwortlich. Ausnahme- und Sonderregelungen liefern betriebswirtschaftliche Anreize, die die Preissignale des Strom-Großhandelsmarktes oder von Flexibilitätsmärkten verzerren. Hinzu kommen Informationsmängel, Unsicherheit über die künftige Preisentwicklung und eine geringe Relevanz des Energieverbrauchs als Produktionsfaktor. Verzerrungen können zu einer veränderten Wahl des Betriebspunktes im Status quo oder zu einem veränderten Investitionsverhalten führen und damit zu einer Abweichung vom volkswirtschaftlichen Optimum.

Vor allem bei der Dimensionierung von Investitionen in Flexibilität und Effizienz existieren große Unsicherheiten.

Vor allem im investiven Fall ist ein Optimum nur unter sehr großen Unsicherheiten zu identifizieren beziehungsweise wird von anderen Hemmnissen für unverzerrte Marktsignale beeinflusst. Allerdings existieren hier große Unterschiede in der Praxis. Dazu wurden zwei Fallstudien betrachtet. Während im Beispiel der Aluminiumelektrolyse operative und investive Entscheidungen relativ unverzerrt zu treffen sind, ist dies bei kleinen Anlagen bzw. Querschnittstechnologien nicht der Fall. Diese Technologien stellen aber gleichzeitig einen bedeutenden Teil des Effizienz- und auch Flexibilitätspotenzials.

Die Rahmenbedingungen sollten so modifiziert werden, dass sie möglichst unverzerrte Anreize setzen.

Die Steuerung von Investitionen in Effizienz und Flexibilität muss auf Basis von Preissignalen erfolgen, die den zeitlichen Verlauf des Bedarfes reflektieren. Diese Preissignale der Märkte müssen möglichst unverzerrt auf die unternehmerischen Akteure einwirken können und stabile Anreize

für Investitionen in das richtige Verhältnis von Flexibilität und Energieeffizienz bieten. Wenn dies nicht der Fall ist, können regulatorische Maßnahmen angebracht sein. Diese regulatorischen Maßnahmen beziehen sich auf Zugangsvoraussetzungen zu Flexibilitätsmärkten oder eine möglichst verzerrungsfreie Struktur von Netzentgelten oder sonstige staatlich veranlasste Preisbestandteile. Weiterhin sollte geprüft werden, wo Effizienz- und Flexibilitätsanforderungen kombiniert werden können (zum Beispiel als Mindeststandards) in Effizienz-Ausschreibungen.

Unternehmen sollten Flexibilität und Effizienz schon heute integriert betrachten.

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht können Erkenntnisse dieser Studie bereits heute in die Praxis umgesetzt werden. Im Rahmen einer auf ein Energiemanagementsystem aufbauenden Ist-Analyse sollten nicht nur Effizienzpotenziale, sondern auch Flexibilitätspotenziale ermittelt werden. Diese Anforderung könnte in die Energiemanagementnorm ISO 50001 mit einbezogen werden. Flex-Efficiency in einem Unternehmen zu berücksichtigen, könnte daher heißen, dass sich das Unternehmen der vorhandenen Flexibilitäten und der relevanten, sie beschreibenden Parameter bewusst ist, um im zeitlichen Verlauf Anpassungen zur betriebswirtschaftlichen Optimierung vorzunehmen.

Im Hinblick auf Investitionsentscheidungen ist das Konzept von Flex-Efficiency weiter zu fassen. Hier wird es notwendig, dass in die Investitionsentscheidungen die künftigen Flexibilitätsanforderungen des Gesamtsystems optimal einbezogen werden. Dies könnte in Form von Szenarioanalysen geschehen, in denen die möglichen Angebote von Flexibilität und die dafür realisierbaren Umsätze einbezogen werden.

Diese Anforderung ist jedoch nicht nur aus Sicht von investierenden Unternehmen zu stellen, sondern auch bei Konstrukteuren und Anlagenplanern zu verankern. Hier muss unter Umständen von jahrelang eingeschliffenen Vorgehensweisen der betriebswirtschaftlichen Optimierung abgewichen werden, Anlagen auf Dauerbetrieb und geringen Energieverbrauch auszulegen. Stattdessen sollten auch Flexibilitätsoptionen mit berücksichtigt werden.

Die Wirkungen von Anreizen für Flex-Efficiency müssen praxisnah weiter erforscht werden.

Die Erforschung der Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Effizienz steht erst am Anfang. Daher ist weiterer Forschungsbedarf deutlich erkennbar, der zur Entwicklung von Handlungsoptionen dient. Darunter zählt vor allen Dingen eine detailliertere Quantifizierung von Wechselwirkungen und Potenzialen, die in dieser Studie nur angerissen werden konnte. Dazu müssen weitere techni-

sche Fallgruppen detaillierter auf Wechselwirkungen untersucht werden, um die Ergebnisse auf Deutschland hochrechnen zu können. Auch müsste die Relevanz der Wirkungen für das Gesamtsystem im Sinne von möglichen Kostenersparnissen quantifiziert werden. Schließlich sollten im Rahmen von Pilotvorhaben praktische Erfahrungen in verschiedenen Branchen oder Technologieklassen gesammelt werden, Effizienz und Flexibilität gemeinsam zu optimieren.

Summary

In implementing the CO₂ reduction targets, the demand side plays an important role.

In order to achieve the CO₂ reduction targets in the electricity sector, measures on both the demand side as well as the electricity generation side are required. Measures to increase energy efficiency have a direct effect on the demand side. But increasingly large shares of generation from wind and solar influence the demand side indirectly because the potential for flexible adaptation on the demand side needs to be realised. This produces an interaction of flexibility measures with efficiency measures on the demand side.

Generally there is an interaction between flexibility and energy efficiency.

In this study, we first investigated which interactions between flexibility and efficiency exist at the installation level. In many installations the interaction is evident in that higher energy efficiency has to be bought at a lower flexibility. This is due to the fact that with variation in the load, consumers move away from the optimal point of process utilisation or lousy storage is used. This concerns primarily the operation of existing installations, but also investment in the installation can often alter the relationship between flexibility and efficiency. For investments, the question arises to what extent flexibility and/or efficiency of the existing plant is to be increased. In a practical sense these interactions are particularly relevant in the area of cross-cutting technologies but flexibility and efficiency also influence each other in certain production processes.

The system value of flexibility and efficiency varies with the time of day and throughout the course of the year.

The demands for flexibility and energy efficiency are defined by the needs of the entire power supply system. They vary depending on time, so the system value of a saved kilowatt hour may have a different value at different times and depends on the residual load.

The value of an efficiency measure could also be zero if there is no utilisation possibility for surplus power (during times when there is a negative residual load). Conversely, electricity savings then have a higher value when less wind and/or solar power are available, meaning the residual load is high. In these times of high residual load, for example, more efficient production processes and equipment can permanently reduce the residual load, whereas load shift, for example through the flexible operation of industrial processes is applied especially in times of rapid or unexpected supply or load change. The value of flexibility is also dependent upon timing. The highest flexibility requirements arise in situations of extreme residual load, that is both in the negative-region and the peak load in connection with steep gradients and rapid changes of the residual load. These extremes become more pronounced over time.

Price signals can theoretically provide the signals for the optimal use of flexibility and efficiency.

The time-varying value of energy efficiency and flexibility results from the requirement that a minimum cost is achieved in the entire power supply system. This applies to both ongoing operations, as well as investment decisions of consumers and producers. This works in the ideal case through wholesale electricity and flexibility markets by price signals. Therefore, the existing flexibility markets should be aggregated to increase liquidity and must be not distorted by regulated prices (which is the case for interruptible loads). Undistorted price signals can provide appropriate scarcity signals for operational decisions of generation and consumption. They also provide efficient signals for investment decisions in flexibility and energy efficiency.

In practice, however, different barriers counteract the price signal.

However in practise investment decisions with respect to efficiency and flexibility, not always done in a way that

would be optimal for the entire power system. Distorted price signals and various other obstacles are responsible for this. Exceptions and special rules provide economic incentives that distort the price signals of the wholesale electricity market or flexibility markets. This is exacerbated by a lack of information, uncertainty about future price developments, and low relevance of energy consumption as a factor of production. Distortions can lead to changes in the operating point in the status quo or to changes in investment behaviour, and as a result, cause deviation from the economic optimum.

There are large uncertainties, especially when dimensioning investment in flexibility and efficiency.

Especially with respect to investment decisions, an optimum can only be identified with very large uncertainties or is influenced by other barriers to undistorted market signals. Here, however, there are major differences in practice as shown by two case studies. While in the aluminium electrolysis example operating and investment-decisions are made in a relatively undistorted manner, this is not the case with small plants and cross-sectional technologies. At the same time, these technologies represent a significant part of the efficiency and flexibility potential.

The framework conditions should be modified so that incentives that are as undistorted as possible.

Investments in efficiency and flexibility must take place on the basis of price signals that reflect their temporal variation. These price signals of the markets must be as undistorted as possible and provide stable incentives to invest in the right balance of flexibility and energy efficiency. If this is not the case, regulatory measures may be appropriate. These regulatory measures might refer to conditions for access to flexibility markets or a structure of network tariffs or other government-induced price components to make them distortion-free as possible. Further consideration should be given to where efficiency and flexibility requirements can be combined (for example as a minimum standard) in efficiency tenders.

Companies should already regard flexibility and efficiency as integrated.

From a business perspective, findings of this study can be put into practice already today. Analysis of energy management systems should identify not only efficiency gains, but also flexibility potentials. This requirement could be incorporated in the energy management standard ISO 50001. Considering Flex-Efficiency for a company means that the company is aware of existing flexibilities and the relevant parameters of their use in order to optimise their deployment within operative decisions.

With regard to investment decisions, the concept of Flex Efficiency is to be taken further. It is necessary that in the investment decisions, future flexibility requirements of the entire system are considered. This could take the form of scenario analysis, in which the potential offers of flexibility and the corresponding realizable revenues are included.

This requirement, however, is not only to be made from the perspective of investing companies, but should also be anchored in the work of design engineers and installation planners. It might be necessary to deviate from years of ingrained business practices of optimisation and constructing installations fit for continuous service and low energy consumption and instead take flexibility options into account.

The effects of incentives for Flex Efficiency in practice must be further explored.

Research into the interaction between flexibility and efficiency is only just beginning. Therefore, it is apparent that further research is needed, which serves the development of various courses of action. Among them is, above all, a more detailed quantification of interactions and potentials that could only be briefly touched upon in this study. For this purpose, more technical applications must be studied in detail for interactions in order to extrapolate the results to Germany. The relevance of the effects for the entire system in terms of potential cost savings should be quantified. Finally, in the framework of pilot projects, practical experience in different industries or technology classes should be collected to jointly optimize efficiency and flexibility.

1. Flex-Efficiency: Hintergrund und Zielsetzungen

1.1 Hintergrund

Zur Erreichung der CO₂-Minderungsziele im Stromsektor sind Maßnahmen aufseiten der Nachfrage und der Stromerzeugung erforderlich. Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz wirken direkt auf die Nachfrageseite.

Aber auch steigende Anteile von Erzeugung aus Wind und Sonne beeinflussen die Nachfrageseite indirekt.

Höhere Energieeffizienz senkt die Kosten für das Gesamtsystem, wenn in volkswirtschaftlich sinnvollem Umfang Investitionen in Kraftwerke und Infrastruktur reduziert und zugleich CO₂-Emissionen vermieden werden. In der Agora-Studie »Positive Effekte von Energieeffizienz auf den deutschen Stromsektor« wurden die Auswirkungen von Effizienz auf verschiedene Elemente des Gesamtsystems analysiert (Prognos AG und IAEW 2014). Es wurde gezeigt, dass eine Steigerung der Energieeffizienz nicht nur Einsparungen von CO₂ bewirkt, sondern erhebliche Kostenersparnisse mit sich bringt. Neben Brennstoffkosten werden Investitionen in Kraftwerkskapazität sowie Übertragungs- und Verteilnetze vermieden.

In dem Maße, in dem die Erzeugung von Strom vermehrt auf fluktuierende Energieträger abstellt, sollte also auch die Nachfrageseite die Potenziale zur flexiblen Anpassung einbringen.

Dabei entsteht eine Wechselwirkung der Flexibilitätsmaßnahmen mit Effizienzmaßnahmen.

Bei steigenden Anteilen von Wind- und Sonnenstrom wird Flexibilität sowohl auf der Erzeugungs- als auch auf der Nachfrageseite zum zentralen Paradigma des Stromsystems. Das Stromsystem muss die Synchronisation von Angebot und Nachfrage auch in extremeren Situationen bewältigen: Bei hoher Residuallast, bei der eine große Stromnachfrage mit einer geringen Produktion von Wind- und Sonnenstrom zusammenfällt, müssen flexible Erzeuger, Speicher oder Stromimporte das Angebot erhöhen, aber auch flexible Verbraucher ihre Stromnachfrage reduzieren.

Im umgekehrten Falle einer niedrigen Residuallast, das heißt geringe Stromnachfrage, aber eine hohe Erzeugung von Wind- und Sonnenstrom, kann es neben Speicherung und Export sinnvoll sein, flexiblen Verbrauch in diese Zeiten zu verlagern.

Daraus ergibt sich der Zusammenhang zwischen Energieeffizienz und Flexibilität: Abhängig vom Zeitpunkt kann der Systemwert einer eingesparten Kilowattstunde unterschiedlich sein (»Time-Of-Use-Aspekt« von Effizienzmaßnahmen). Dies bedeutet, dass eine Effizienzmaßnahme einen unterschiedlichen Wert haben kann, der von der Residuallast abhängt. Der Wert einer Effizienzmaßnahme könnte auch null werden, wenn keine Verwertungsmöglichkeiten für Überschussstrom vorliegen (Zeiten niedriger Residuallast). Umgekehrt hat Stromeinsparung dann einen höheren Wert, wenn weniger Wind- und/oder Sonnenstrom verfügbar sind, also die Residuallast hoch ist. In diesen Zeiten hoher Residuallast können dann beispielsweise effizientere Produktionsprozesse und Geräte die Residuallast dauerhaft senken, wohingegen Lastverlagerung, zum Beispiel durch die flexiblere Fahrweise von Industrieprozessen insbesondere in Zeiten des Überschusses wirkt.

Die Anpassung des Systems an unterschiedliche zeitliche Wertigkeiten des Stroms wird mit dem Aspekt der Flexibilität adressiert. Effizienz und Flexibilität müssen daher zunehmend zusammengedacht werden. Dieses Konzept wird nachfolgend »Flex-Efficiency« genannt. Es beinhaltet, dass beide Aspekte sowohl bei operativen wie auch investiven Entscheidungen im Gesamtsystem berücksichtigt werden sollten. Damit kann es praktische Relevanz aufseiten der Nachfrage entfalten und sollte beispielsweise bei der Neuausrichtung von Produktionsstätten und Industrieprozessen, aber auch beim Design neuer Anlagen und Geräte die Leitplanken setzen: Diese sollten künftig auf Effizienz ausgelegt werden (Niveausenkung), zusätzlich aber auch auf zeitliche Anpassungsfähigkeit (Flexibilität).

Forschungsstand

Diese zeitliche Dimension von Effizienzmaßnahmen wurde bislang kaum untersucht. So wurden beispielsweise bei der oben zitierten Studie im Auftrag von Agora Energiewende die dynamischen Auswirkungen von Effizienzmaßnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten noch nicht berücksichtigt. Hier steht die Diskussion noch am Anfang. Auch in der energiepolitischen Diskussion wurde das Konzept bislang kaum aufgegriffen, und in der Praxis fehlen gegenwärtig die Anreize für eine solche Neuausrichtung von Industrieprozessen sowie den zugehörigen Investitionsentscheidungen.

Die Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Effizienz werden jedoch bereits im Weißbuch »Ein Strommarkt für die Energiewende« des BMWi aufgegriffen (BMWi 2015). Dort wird thematisiert, dass der Bedarf an Effizienz und Flexibilität abhängig von der Residuallast ist. Dem Weißbuch zufolge können die Systemkosten in Zeiten einer geringen Einspeisung aus Windenergie und Photovoltaik und einer hohen Nachfrage durch Energieeffizienzmaßnahmen und Flexibilität tendenziell gesenkt werden. In Zeiten einer hohen Stromerzeugung aus Windenergie und Photovoltaik und einer geringen Nachfrage sinkt hingegen der Wert der Energieeffizienz. Die gezielte Erhöhung der Nachfrage – zum Beispiel durch Zuschalten von hocheffizienten Wärmepumpen oder Elektromobilität zur Ladung von Wärme- und Batteriespeichern – kann dabei zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Um diese konzeptionellen Überlegungen operationalisierbar zu machen, ist zu klären,

- inwieweit Effizienz und Flexibilität in technischen Maßnahmen eher Synergien darstellen oder in einem Spannungsfeld stehen,
- wie auf volkswirtschaftlicher Ebene Effizienz und Flexibilität im Gesamtsystem idealerweise kombiniert oder miteinander abgewogen werden sollten (volkswirtschaftliches Optimum),
- welche Hemmnisse auf betriebs- oder volkswirtschaftlicher Ebene einem systemdienlichen Verhalten der Verbraucher entgegenstehen,

- welche Maßnahmen geeignet sind, um die Hemmnisse abzubauen und eine Optimierung von Flexibilität und Effizienz in die Praxis umzusetzen, und
- was Unternehmen schon heute tun können, um die Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Effizienz in ihren Entscheidungen angemessen zu berücksichtigen.

Diese Fragestellungen werden in dieser Studie adressiert. Sie soll Erkenntnisse dazu liefern, wie die verschiedenen Perspektiven in Einklang gebracht werden können, indem Rahmenbedingungen und Anreize für Unternehmen so gesetzt werden, dass ein volkswirtschaftliches Optimum erreicht werden kann.

1.2 Ziel und Aufbau der Kurzstudie

In dieser Kurzstudie wird das Thema zunächst grundsätzlich strukturiert. Es werden Grundsystematik und -gedanken ausformuliert und diskutiert, auf deren Basis Maßnahmen und weiterer Handlungsbedarf zur Anpassung des Marktrahmens aufgezeigt werden. Damit soll eine Grundlage für eine weiterführende Diskussion von Flex-Efficiency als Paradigma mit Stakeholdern und der Politik geschaffen werden. Schließlich wird herausgestellt, welche weiterführenden Untersuchungen eventuell notwendig sind, um die diskutierten Zusammenhänge näher zu beleuchten oder Maßnahmenvorschläge detaillieren zu können. Dazu werden in den einzelnen Kapiteln die Zusammenhänge zwischen Effizienz und Flexibilität aus verschiedenen Perspektiven analysiert.

In Kapitel 2 wird das Konzept der Flex-Efficiency vorgestellt. Dazu werden die Synergien und Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Effizienz zunächst aus technischer und techno-ökonomischer Perspektive betrachtet und anschließend auf Systemebene diskutiert. Es werden das theoretische Optimum zwischen Energieeffizienz und Flexibilität im System und die Rolle von Preissignalen zum Erreichen des Optimums aufgezeigt. In Kapitel 3 werden Effizienz, Flexibilität und ihre Zusammenhänge aus einer betriebswirtschaftlichen Perspektive anhand von zwei Fallstudien erläutert. In Kapitel 4 werden Anreize und Hemmnisse zur Umsetzung von Flex-Efficiency darge-

stellt. Schließlich werden in Kapitel 5 Schlussfolgerungen gezogen, was Politik und Wirtschaft tun können, um die Hemmnisse zu überwinden, und offene Fragen sowie Forschungsbedarf formuliert.

2. Das Konzept der Flex-Efficiency

In diesem Kapitel wird das Konzept von Flex-Efficiency vorgestellt. Dabei werden die Rollen von Flexibilität und Effizienz in einem zukünftig von Wind und Sonne geprägten Stromversorgungssystem illustriert und damit Synergien und Wechselwirkungen zwischen ihnen in verschiedenen Sichtweisen aufgezeigt.

Am Anfang der Betrachtung werden die Analysedimensionen für Effizienz und Flexibilität vorgestellt. Anschließend werden Flexibilität und Effizienz einer Anlage aus technischer und techno-ökonomischer Sicht definiert. Darüber hinaus wird die jeweilige technische Umsetzung von Flexibilität und Effizienz dargestellt und auf mögliche Wechselwirkungen eingegangen.

Darauf erfolgt eine Systembetrachtung. Es wird gezeigt, welche Rolle Flexibilität und Effizienz in einem System mit hohen Anteilen Erneuerbarer Energien in welchen Situationen spielen. Es wird auf die Rolle von Preissignalen zum Erreichen eines optimalen Verhältnisses eingegangen. Abschließend erfolgt eine Betrachtung der Auswirkungen von Unvollkommenheiten des Marktes und weiteren Hemmnissen, die ein Erreichen des Optimums verhindern.

2.1 Analysedimensionen und Definitionen von Effizienz und Flexibilität

Die Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität werden in dieser Studie aus technischer, techno-ökonomischer, volkswirtschaftlicher und schließlich aus betriebswirtschaftlicher Perspektive diskutiert. Diese Perspektiven zeichnen sich durch eine Variation der Analysedimensionen aus. Bei diesen Analysedimensionen handelt es sich um

- die Systemgrenze (zum Beispiel Anlage, Unternehmen, Volkswirtschaft, Stromversorgungssystem),
- die betrachteten Parameter (zum Beispiel Energiemengen, Kosten, Geldströme),

- den Betrachtungszeitraum (zum Beispiel Momentanwerte, Minuten- bis Stundenbetrachtung, Jahresbetrachtung) und
- die Wahl einer statischen vs. einer dynamischen Betrachtung (zum Beispiel operative Sichtweise vs. Einbeziehung von Investitionen).

Abhängig von der Wahl der Parameter und damit der Perspektive ergeben sich unterschiedliche Freiheitsgrade und Zielfunktionen einer Optimierung. So ist beispielsweise bei der statischen Betrachtung der Anlage eines Unternehmens eine andere Anlagenauslegung optimal hinsichtlich des Verhältnisses von Flexibilität und Effizienz als in einer dynamischen Betrachtung des gesamten Stromversorgungssystems.

Zur Betrachtung von Effizienz und Flexibilität aus einer techno-ökonomischen Perspektive wird die Systemgrenze zunächst um eine einzelne Anlage oder eine andere technische Einrichtung gezogen. Bezogen auf die Anlage werden dann ihre technischen Eigenschaften beschrieben, die sich auf die Energieumwandlung (im Hinblick auf Effizienz) oder um die mögliche Variation der Last (Flexibilität) beziehen. Diese technischen Eigenschaften können anschließend mit Kosten hinterlegt werden. Damit wird die rein technische Betrachtung zu einer techno-ökonomischen Betrachtung erweitert. Die Betrachtung erfolgt differenziert für den statischen und den dynamischen Fall.

Flexibilität

Flexibilität auf der Seite der Stromverbraucher ist hier definiert als die Fähigkeit, den Verbrauch zeitlich oder der Höhe nach zu variieren. Die meisten Erzeuger oder Verbraucher im Stromversorgungssystem weisen Inflexibilitäten auf. Dies bedeutet, dass technische und/oder wirtschaftliche Restriktionen existieren, sodass Anlagen ihre Erzeugung oder ihren Verbrauch nicht von einem Moment zum nächsten beliebig anpassen können (intertemporale Restriktionen). Flexibilität im engeren Sinne bedeutet also,

dass diese intertemporalen Restriktionen fehlen oder vernachlässigbar klein sind.

Aus technischer Sicht kann Flexibilität mit den Parametern maximale Leistungsänderungsgeschwindigkeit und Regelungsbereich beschrieben werden. Der Regelungsbereich gibt an, innerhalb welcher Leistungsgrenzen im Betrieb der Anlage die Leistung angepasst werden kann (beispielsweise 60 Prozent bis 100 Prozent). Oft macht es jedoch keinen Sinn, Leistungsänderungsgeschwindigkeiten rein technisch zu betrachten, denn in vielen Fällen gehen hohe Leistungsänderungsgeschwindigkeiten mit hoher Abnutzung oder sonstigen Verlusten einher. Das Gleiche gilt für eine Überschreitung des Regelungsbereiches. Daher sind die daraus folgenden ökonomischen Konsequenzen mit abzubilden. Die rein technische Betrachtung von Flexibilität wird damit zu einer techno-ökonomischen Betrachtung erweitert.

Im Rahmen dieser techno-ökonomischen Betrachtung können weitere Parameter von Flexibilität einbezogen werden. So ist im Hinblick auf die Einbindung der Anlage in einen Produktionsprozess zu beurteilen, welche Leistungsänderung wie oft, über welchen Zeitraum und in welchem zeitlichen Abstand und zu welchen Kosten durchgeführt werden kann. Diese Parameter in Kombination definieren die Kosten der Flexibilität der Anlage.

Effizienz

Die *technische* Effizienz einer Anlage beziehungsweise eines Energiewandlers in Bezug auf Energieverbrauch kann auf verschiedenen Ebenen definiert werden. Die Energieeffizienz im engeren Sinne bezeichnet das Verhältnis zwischen Energieinput und Produktionsoutput. Die Produktionseffizienz gibt dabei den Energieeinsatz pro Mengeneinheit des produzierten Gutes an.

Auch bei der Effizienz kann die technische Betrachtung hin zu einer techno-ökonomischen Betrachtung erweitert werden. Ökonomische Effizienz bedeutet die Erreichung eines bestimmten Nutzens unter minimalem Mitteleinsatz. Die Übertragung des Begriffs auf die Energieeffizienz heißt, dass die Bereitstellung des Produktionsoutputs mit einem kostenminimalen Energieeinsatz einhergeht.

Erfolgt die techno-ökonomische Betrachtung innerhalb der Rahmenbedingungen, in denen ein Unternehmen agiert, so gelangt man zu einer betriebswirtschaftlichen Betrachtung, zum Beispiel in einem *Business Case*. So wird eine Ersatzinvestition in eine technisch effizientere Anlage dann betriebswirtschaftlich effizient, wenn unter Zugrundelegung der Investitionskosten und Endkunden-Strompreise eine geforderte betriebswirtschaftliche Kenngröße erreicht wird (zum Beispiel ein bestimmter interner Zinsfuß).

Schließlich kann Effizienz auf Systemebene betrachtet werden. Hier wird die Systemgrenze beispielsweise um das Stromversorgungssystem gezogen. Gleichzeitig wird ein längerer Zeitraum betrachtet (ein Jahr, oder unter Einbeziehung von Investitionen auch mehrere Jahre). Die Systembetrachtung wird in Kapitel 2.4 weiter vertieft.

2.2 Technische Umsetzung von Flexibilität und Effizienz in einer Anlage

Verbrauchseitige Flexibilität heißt Verschiebung oder Verzicht auf Verbrauch in einer Anlage. Das erstere kann am einfachsten mithilfe von Zwischenspeichern realisiert werden. Wenn diese die zeitlichen Leistungsänderungen auffangen, so wird der gleiche Produktionsoutput pro Zeiteinheit geliefert. Dieser Fall wird auch als *load shifting* bezeichnet. Eine Erhöhung der Flexibilität kann über die Vergrößerung der Zwischenspeicher erfolgen. Zwischenspeicher können beispielsweise in folgenden Formen auftreten:

- Wärmespeicher
- Kältespeicher
- Druckluftspeicher
- Wasserspeicher
- Gasspeicher
- Materialspeicher (Zwischenspeicherung des Produktionsoutputs)

Der Verzicht von Verbrauch wird auch als *load shaving* bezeichnet. Für diesen Fall ist auch kein Zwischenspeicher erforderlich. Aufgrund des Produktionsverzichts geht er mit höheren variablen Kosten einher.

Die technische Umsetzung von Energieeffizienz kann in verschiedenen Anwendungsbereichen und in unterschiedlicher Art und Weise erfolgen. Die folgenden Punkte stellen beispielhaft einige Optionen zur Steigerung der Energieeffizienz dar:

- Prozessdimensionierung: Eine gezielte Auslegung der Größe eines Prozesses unter Abstimmung der einzelnen Prozesskomponenten ermöglicht die Reduzierung der Fahrweise in ineffizienten Teillastbereichen.
- Moderne Anlagentechnik: Der Ersatz alter Anlagen durch weiterentwickelte, energiesparsamere Anlagen reduziert den Energiebedarf.
- Isolierung: Die Isolierung industrieller, wärmebasierter Prozesse reduziert die Wärmeverluste. Ebenso kann Isolierung im Gebäudebereich die Heizwärmeverluste verringern.
- Prozessumstellung: Die Umstellung eines Prozesses auf einen energieeffizienteren Alternativprozess (zum Beispiel mechanische statt thermische Trocknung).
- Prozesskopplung: Die Kopplung separierter Prozesse kann zur Steigerung der Energieeffizienz führen. Im Stromsektor ist die Kraft-Wärme-Kopplung ein Beispiel für die Steigerung der Energieeffizienz durch die Kopplung von zwei einzelnen Prozessen, der Strom- und der Wärmeerzeugung.
- Verringerung von Strömungswiderständen: Niedrigere Strömungswiderstände verringern den Energie- und Leistungsbedarf zur Bewegung eines Volumenstroms. Auch die Verkürzung von Transportwegen zwischen einzelnen Prozessstufen reduziert den Energiebedarf für den Transport.
- Anpassung an Nutzungszeiten: Einzelne Teilprozesse und technische Anlagen werden teilweise nicht zurückgefahren trotz geringerer Nutzungszeiten. Pumpen in Heizungssystemen werden beispielsweise häufig durchgehend auf Nennleistung betrieben. Eine Anpassung der Betriebszeiten an die tatsächlichen Nutzungszeiten reduziert den Energiebedarf.

2.3 Ausprägungen von Synergien und Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Effizienz einer Anlage

Für den Betrieb einer Anlage, also im statischen beziehungsweise operativen Fall ohne Berücksichtigung von Investitionen sind folgende Synergien und Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Effizienz denkbar:

Der ungleichmäßige Betrieb einer Anlage unter Nutzung eines Zwischenspeichers kann dazu führen, dass das Verhältnis zwischen Produktionsoutput und verbrauchter Energiemenge ungünstiger wird. Beispielsweise können Ineffizienzen wie Teillast- oder Speicherverluste steigen. Wird beispielsweise durch eine Anlage, die üblicherweise mit einem konstanten Produktionsoutput läuft, Flexibilität in Form einer Verbrauchsreduzierung bereitgestellt, so muss ein Zwischenspeicher entleert werden. Die Nutzung eines Zwischenspeichers geht jedoch typischerweise mit Verlusten beziehungsweise Energieaufwand einher. Beispielsweise entstehen Wärmeverluste in einem Wärmespeicher oder durch die Zwischenlagerung eines Produktionsoutputs wird zusätzlich Energie verbraucht. Außerdem läuft die Anlage nicht in einem optimalen Betriebspunkt. In diesem Fall besteht eine negative Wechselwirkung zwischen Flexibilität und Effizienz.

Dieser Fall kann verallgemeinert werden. Viele technische Prozesse besitzen einen Arbeitspunkt, an dem das Verhältnis zwischen Produktionsoutput und -input optimal ist und somit auch die höchste Energieeffizienz erreicht wird. Wird dieser Optimalpunkt verlassen, um Flexibilität bereitzustellen, so verringert sich die Effizienz zugunsten der Flexibilität.

Wird der dynamische Fall betrachtet, also zusätzlich die Möglichkeit, durch Investitionen den Anlagenpark zu verändern, so erhöhen sich die Freiheitsgrade erheblich. So ist es möglich, dass durch eine Investition

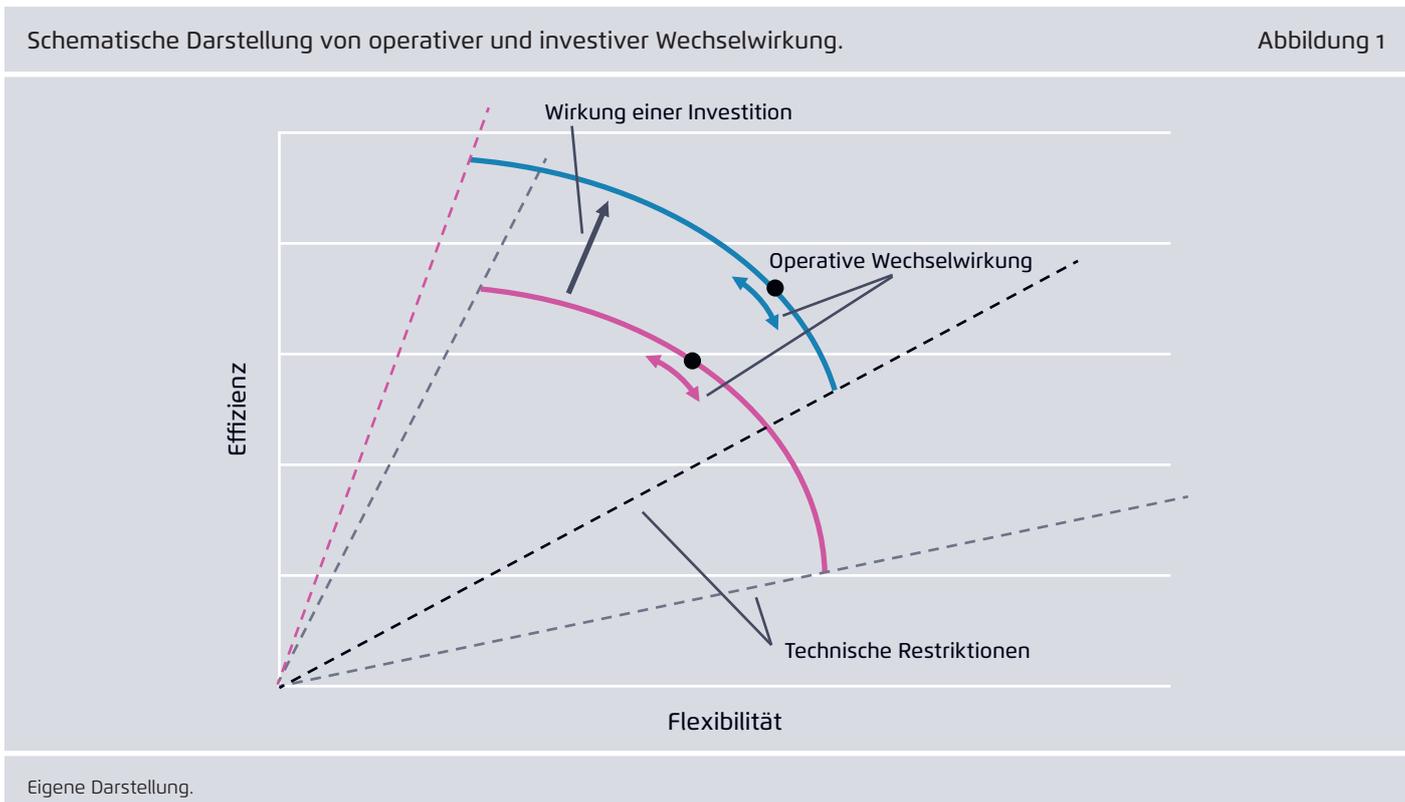
- A. sowohl Flexibilität als auch Effizienz gesteigert werden (Synergiefall),

- B. ein Beitrag zur Energieeffizienz geleistet wird, diese Investition aber die Flexibilität reduziert (Wechselwirkung), oder umgekehrt
- C. die Flexibilität erhöht wird, sich dadurch aber die Energieeffizienz vermindert (Wechselwirkung),
- D. keine Wechselwirkung zwischen einer Erhöhung der Energieeffizienz und einer Flexibilitätserhöhung besteht.

In den Fällen A bis C werden Investitionsentscheidungen getroffen, die zukünftig mögliche Kombinationen aus Effizienz und Flexibilität festlegen. Das bedeutet im Fall A, der Synergie zwischen Effizienz und Flexibilität, dass hier in der Regel Freiheitsgrade bei der Entscheidung bestehen, in welchem Verhältnis Flexibilität und Effizienz gesteigert werden können. In den Fällen B und C ist es ebenso denkbar, dass Abwägungen zwischen Flexibilität und Effizienz zu treffen sind. Hier ist eine Auswahl zwischen Entscheidungen über die künftige Anlagenkonfiguration zu treffen, bei denen unterschiedliche Ausmaße der Reduzierung des einen Faktors gegen den anderen Faktor abzuwägen sind.

Die operative und investive Betrachtung kann auch an einem Diagramm veranschaulicht werden. Die beiden Linien in Abbildung 1 zeigen zwei operative Kennlinien, die diese innerhalb von technischen Restriktionen möglichen Kombinationen zwischen Flexibilität und Effizienz darstellen.

Werden zusätzlich investive Entscheidungen in die Betrachtung einbezogen, ergibt sich ein zusätzlicher Freiheitsgrad. Durch die Investition kann die operative Kennlinie verschoben werden. Diese Verschiebung kann dazu führen, dass sowohl Flexibilität als auch Effizienz gesteigert werden. In einigen dieser Fälle kann noch das Verhältnis der Steigerung von Flexibilität und Effizienz festgelegt werden. So stellt in Abbildung 1 die blaue Linie schematisch eine Verschiebung der roten Linie hin zu höherer Flexibilität und Effizienz dar, die durch eine Investition ermöglicht wurde. In dem in dieser Abbildung dargestellten Fall werden sowohl Flexibilität als auch Effizienz erhöht (Fall A).



Synergien und Wechselwirkungen technischer Maßnahmen.

Tabelle 1

Nr.	Technisches Element/ Maßnahme	operativ vs. investiv	Beitrag zur Energieeffizienz	Beitrag zur Flexibilisierung	Wechselwirkungen? (Typ)	Beschreibung der Beziehung
1	Einführung, Verbesserung Kontroll- und Steuerungstechnologien	investiv	+	+	Synergie (Typ A)	Durch Prozesssteuerung kann sowohl Energieeffizienz verbessert als auch Lastverlagerung gesteuert werden.
2	Erhöhung der Speicherfähigkeit durch Isolierung	investiv	+	+	Synergie (Typ A)	Isolierung vermindert Wärmeverluste und erhöht damit gleichzeitig die Speicherfähigkeit und damit die Flexibilität.
3	Umstellung des Prozesses auf alternatives, effizienteres Verfahren	investiv	+	+	Synergie (Typ A)	Die Umstellung auf einen flexibleren Prozess kann zur Erhöhung der Effizienz führen.
4	Reduzierung der Überdimensionierung bei Strömungsmaschinen	investiv	+	-	Wechselwirkungen (Typ B)	Wird die Überdimensionierung reduziert und in neue Maschinen investiert, reduziert sich die Flexibilität, aber die Effizienz erhöht sich.
5	Anpassung der Prozessintensität	operativ	-	+	Wechselwirkungen (Typ C)	Der Prozess wird hinsichtlich seiner Intensität variiert und aus seinem Optimalpunkt herausgefahren.
6	Fahren im Teillastbereich bei überdimensionierter Anlagenauslegung bei Strömungsmaschinen	operativ	-	+	Wechselwirkungen (Typ C)	Durch abnehmenden Wirkungsgrad von Strömungsmaschinen im Teillastbereich reduziert sich die Effizienz.
7	Investition in oder Vergrößerung von Energiespeichern	investiv	-	+	Wechselwirkungen (Typ C)	Speicher erhöhen Flexibilität. Dabei treten möglicherweise Speicherverluste auf, die die Effizienz verringern.
8	Vergrößerung von Materialspeichern im Produktionsprozess	investiv	0	+	Neutral	Materialspeicher verursachen in der Regel höchstens geringe Effizienzverluste.
9	Wärmerückgewinnung Abwärme	investiv	+	0	Keine Beziehung (Typ D)	Durch Wärmerückgewinnung wird die Flexibilität nicht beeinflusst.
10	Erhöhung der Effizienz von Strömungsmaschinen	investiv	+	0	Keine Beziehung (Typ D)	Bei Investition in gleichdimensionierte, effizientere Maschinen erhöht sich die Effizienz, die Flexibilität wird nicht beeinflusst.
11	Erhöhung der Effizienz der Leuchtmittel	investiv	+	0	Keine Beziehung (Typ D)	Durch die bessere Lichtausbeute wird die Flexibilität nicht beeinflusst.
12	Verringerung der Strömungsverluste in Rohrleitungssystemen	investiv	+	0	Keine Beziehung (Typ D)	Durch Verringerung der Strömungsverluste wird Flexibilität nicht beeinflusst.

Legende: Zusammenhang ist + positiv, 0 neutral, - negativ. Eigene Darstellung.

Es existieren aber auch zahlreiche technische Konstellationen, bei denen durch Investitionsentscheidungen Effizienz oder Flexibilität auf Kosten der jeweils anderen Eigenschaft gesteigert werden. Bei dieser Verschiebung der Kennlinie ist über das Ausmaß der Verschiebung zu entscheiden.

In der Tabelle 1 werden ausgewählte technische Maßnahmen allgemein auf Synergien und Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität analysiert und übersichtlich dargestellt. Die Tabelle ist nach den oben definierten Fallgruppen A bis D sortiert.

Die Auswahl der technischen Maßnahmen basiert auf den Optionen zur Steigerung der Energieeffizienz nach Peht (2010) und ist um Optionen zur Steigerung der Flexi-

bilität basierend auf den Fallbeispielen nach Kapitel 3 erweitert. Hierbei werden operative Anpassungen von investiven Anpassungen unterschieden.

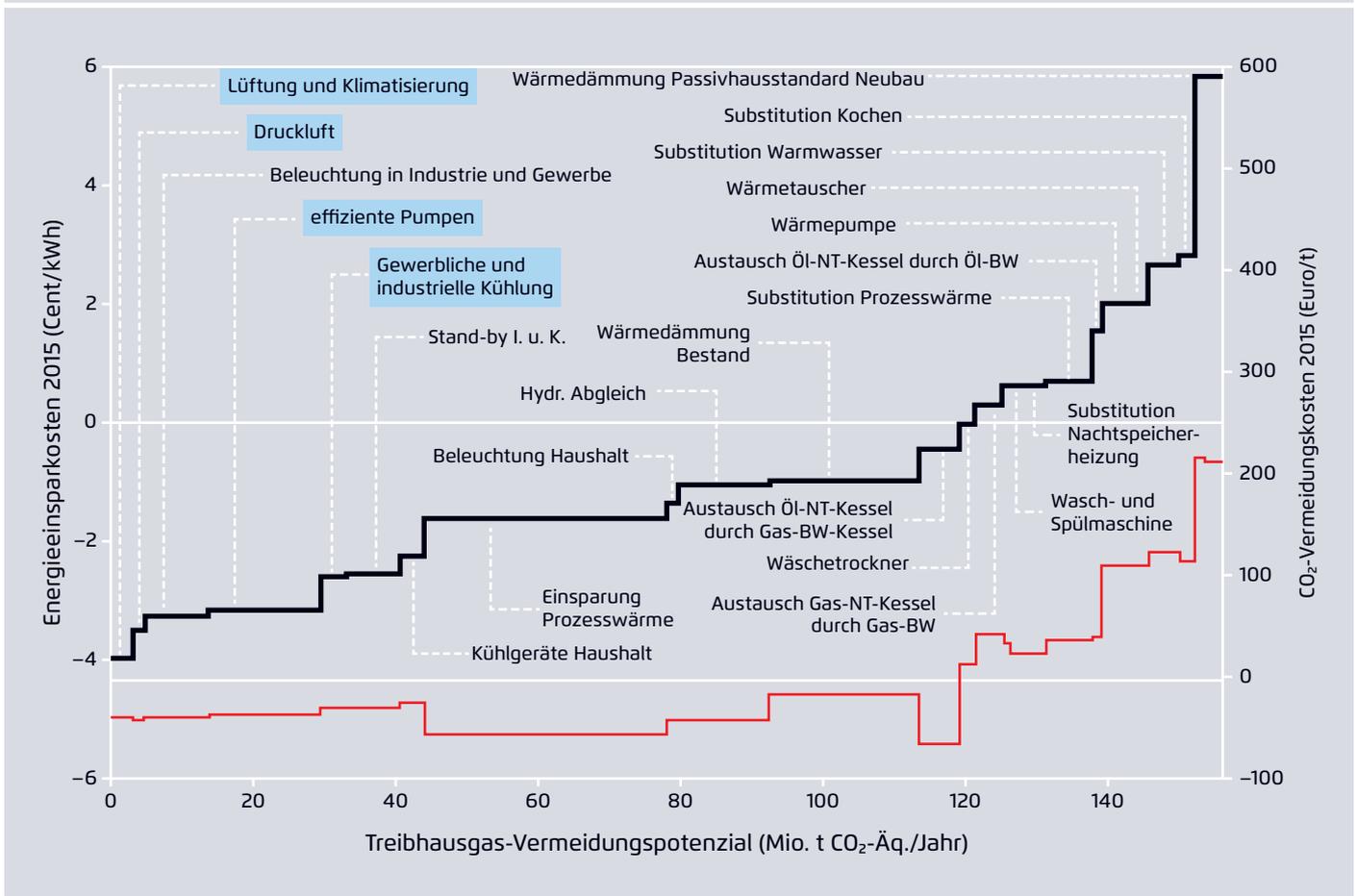
Erste Einschätzung der Bedeutung der Wechselwirkungen

Für eine erste Einschätzung der Bedeutung der Wechselwirkungen müssen die für Deutschland identifizierten Potenziale für verbraucherseitige Flexibilität und Effizienz gemeinsam betrachtet werden.

Hohe Potenziale für verbraucherseitige Flexibilität finden sich vor allem im Bereich der Produktionsprozesse der energieintensiven Industrie. Gemäß Fraunhofer ISI und FfE 2013 werden dort Lastverschiebungspotenziale vor allem

Energie- und CO₂-Einsparung durch 70 technische Endenergieeinsparmöglichkeiten.

Abbildung 2



Wuppertal Institut 2006, zitiert in Peht 2010, Markierung ergänzt.

im Bereich der Chlorelektrolyse und in der Stahlerzeugung identifiziert. Eine Hochrechnung auf Deutschland zeigt, dass das Potenzial für diese Technologien bei insgesamt 1,7 GW bei zweistündiger Verschiebung liegt (Tim Buber et al. 2013a). Ein weiterer Schwerpunkt der Flexibilitätspotenziale liegt im Bereich der Querschnittstechnologien (1,4 GW bei einstündiger Verschiebung).

Effizienzpotenziale wurden unter anderem 2006 in einer Studie des Wuppertal Instituts erhoben und sehr anschaulich in Form einer Kosten-Potenzial-Kurve für die Treibhausgasvermeidung dargestellt (Abbildung 2). In der Abbildung zeigen sich hohe Effizienzpotenziale im Bereich der Querschnittstechnologien. Die Studie spezifiziert die Höhe der Potenziale wie folgt: »Lüftung und Klimatisierung« (5 TWh/a), »Druckluft« (2 TWh/a), »effiziente Pumpen« (21 TWh/a) sowie »gewerbliche und industrielle Kühlung« (2 TWh/a) (Wuppertal Institut 2006). Die derzeit wirtschaftlichen Effizienzpotenziale in diesem Bereich betragen somit in Summe 30 TWh/a.

Im Bereich der Querschnittstechnologien existieren damit sowohl erhebliche Potenziale im Bereich Flexibilität, als auch im Bereich Energieeffizienz. Diese Überschneidung bedeutet, dass vermutlich für eine große Anzahl von Anlagen sowohl eine Bereitstellung von Flexibilität möglich ist, als auch Effizienzpotenziale existieren. In Tabelle 1 wurden mögliche Synergien und Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Effizienz für verschiedene technische Maßnahmen aufgezeigt. Für Querschnittstechnologien sind die meisten der dargestellten Fälle anwendbar. In diesen Fällen ergeben sich überwiegend Wechselwirkungen, insbesondere wenn Investitionen getätigt werden. Daraus ist ableitbar, dass für Querschnittstechnologien das Konzept der Flex-Efficiency prinzipiell relevant ist. Im Rahmen von näheren Untersuchungen müsste ermittelt werden, welche Wechselwirkungen für welche Querschnittstechnologien in welchem Umfang relevant sind.

Da Produktionsprozesse sehr spezifische Eigenschaften haben, ist eine allgemeine Aussage über die Relevanz der Wechselwirkungen von Flexibilität und Effizienz schwieriger zu treffen. Hier ist durch nähere Untersuchungen für

spezifische Prozesse abzuwägen, inwieweit sich Flexibilitäts- und Effizienzpotenziale überschneiden und welche Synergien und Wechselwirkungen relevant sind.

2.4 Wirkungen von Flexibilität und Effizienz von Anlagen im Gesamtsystem

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Flexibilität und Effizienz von einzelnen Anlagen betrachtet. In den folgenden Abschnitten wird die Relevanz der Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Effizienz auf der Ebene des Stromversorgungssystems betrachtet.

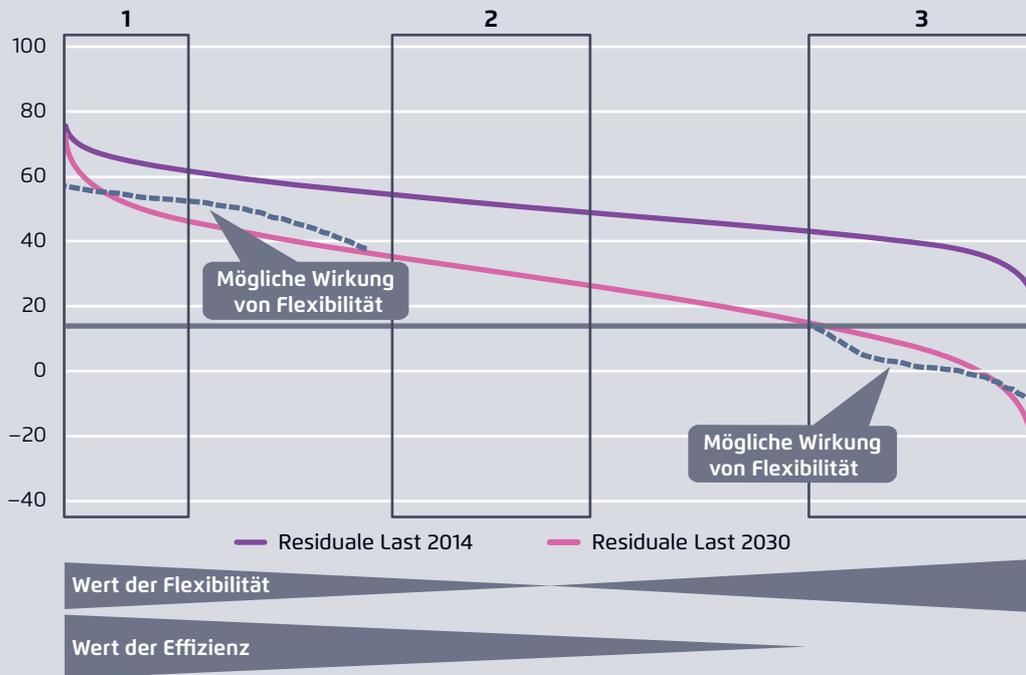
Das zukünftige Stromsystem wird durch einen wachsenden Anteil Erneuerbarer Energien geprägt sein. Im Fokus stehen hierbei die Windenergie und die Photovoltaik, da diese die geringsten Kosten unter den Erneuerbaren Energien aufweisen. Diese Technologien sind dargebotsabhängig, das heißt, ihre Einspeisung fluktuiert. Zur Synchronisation von Erzeugung und Verbrauch muss Flexibilität vorgehalten werden, sowohl auf der Angebots- als auch auf der Nachfrageseite (Agora Energiewende 2012). Flexibilität ist bislang eine Neben- oder Randbedingung, um Inflexibilität anderer Systemelemente auszugleichen.

Abbildung 3 stellt eine mögliche Entwicklung der Residuallast anhand von Jahresdauerlinien dar. Diese zeigen jeweils geordnet über alle Stunden eines Jahres die Differenz zwischen Verbrauch und fluktuierender Stromerzeugung. Im heutigen System ist die Residuallast durchgehend positiv. Dies bedeutet, dass der Verbrauch zu jeder Zeit höher als die fluktuierende Erzeugung ist. In Bezug auf die zukünftigen Kernkomponenten des Systems, Wind und Sonne, liegt somit heute noch ein Bedarf an konventioneller Kraftwerksleistung vor, da diese die Nachfrage noch nicht vollständig decken können. Dieser Bedarf kann durch eine erhöhte Energieeffizienz oder den Einsatz von Flexibilität reduziert beziehungsweise behoben werden.

Zukünftig steigt die Energieerzeugung aus Windenergie und Photovoltaik und führt – bei Fortschreibung der heutigen Lastkurven – zu Stunden mit Erzeugungsüberschüssen beziehungsweise einer negativen Residuallast. Diese Situa-

Geordnete Jahresdauerlinien der Residuallast.

Abbildung 3



Norbert Krzikalla et al. 2013, Ergänzungen durch Ecofys.

tionen nehmen zukünftig zu, werden extremer und umfassen längere Zeiträume. Dieser Bereich der Jahresdauerlinie ist in Abbildung 3 mit Ziffer 3 beschrieben. In diesem Bereich von Überschusssituationen nimmt der Wert von Flexibilität zu, da hier durch eine gezielte Lastverlagerung beziehungsweise Laststeigerung eine größere Menge an Strom genutzt werden kann und die Nutzung in Zeiten höherer (und teurer) Residuallast vermieden wird. Mögliche Wirkungen des Einsatzes von Flexibilität sind in Abbildung 3 an der Jahresdauerlinie der Residuallast im Jahr 2030 eingezeichnet. Hier zeigt sich, dass durch Lastverschiebung der Verlauf der Jahresdauerlinie in der Form verändert wird, sodass extreme Situationen der Residuallast vermieden werden.¹

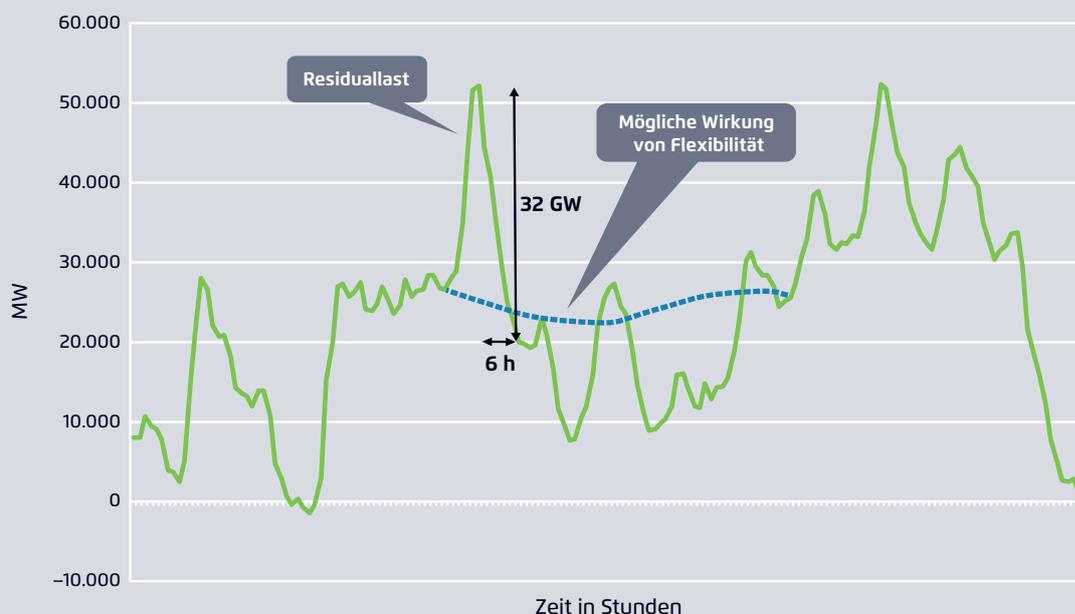
1 Diese Betrachtung bezieht sich nur auf den Unterfall der Lastverschiebung. Der Einsatz einer Flexibilität von Lastverzicht wirkt sich als Verschiebung der Jahresdauerlinie der Residuallast nach unten aus. Diese Auswirkung entspricht damit der von Effizienz.

In der gleichen Abbildung ist am linken Rand mit Ziffer 1 ein Bereich mit hoher Residuallast gekennzeichnet, das heißt Wind und Sonne stehen in diesen Stunden nicht oder kaum zur Verfügung. Wie aus dem Verlauf der Jahresdauerlinien zu erkennen ist, wird in zunehmend weniger Stunden eine hohe Leistung aus konventionellen Kraftwerken erforderlich. In diesen Stunden haben sowohl Flexibilität als auch Effizienz eine hohe Wertigkeit, denn beides hilft, hohe Betriebskosten der Spitzenlastkraftwerke zu reduzieren und damit vor allem Investitionen in neue Spitzenlastkraftwerke, aber auch in Infrastruktur zu vermeiden.

Mit Ziffer 2 ist ein mittlerer Bereich ausgewiesen, in dem Flexibilität und Effizienz eine geringere Wertigkeit im Vergleich zu den anderen beiden dargestellten Fällen haben.

Gradient einer modellierten Residuallast im Jahr 2030 und mögliche Wirkung von Flexibilität.

Abbildung 4



Eigene Darstellung.

Die Darstellung der Jahresdauerlinien kann jedoch nur eine Aussage über die ausgleichende Systembilanz treffen. Es existieren aber auch dynamische Systemanforderungen aus zeitlichen Änderungen (Gradienten) der Residuallast. Abbildung 4 zeigt einen modellierten Verlauf der Residuallast im Jahr 2030. Hier ist ein starker Gradient erkennbar. Weiterhin ist schematisch eingezeichnet, welche Wirkung der Einsatz von Flexibilität auf den Residuallastverlauf haben kann.

Die dazu notwendige Flexibilität kann durch die Angebotsseite oder aber auch durch die Flexibilität der Nachfrageseite bereitgestellt werden. Diese Anforderung kann in jedem Bereich der drei illustrierten Fälle, das heißt auch im mittleren Bereich, auftreten. Die Wertigkeit der Flexibilität der Nachfrageseite ist dabei abhängig davon, welche Flexibilitätsnachfrage, das heißt dynamische Anforderung, besteht und inwieweit der konventionelle Kraftwerkspark beziehungsweise flexible Verbraucher diese Anforderung mit welchen Aufwendungen bedienen können.

2.5 Optimale Einsatzmengen von Flexibilität und Effizienz

Während im vorangegangenen Abschnitt betrachtet wurde, wofür Flexibilität und Effizienz von Anlagen im Gesamtsystem eingesetzt werden und welchen Wert sie zu unterschiedlichen Zeitpunkten für das Gesamtsystem haben, wird in diesem Kapitel betrachtet, wie hoch die effiziente Menge der eingesetzten Flexibilität ist. Die Betrachtung erfolgt im statischen und dynamischen Fall.

Der auf Anlagen bezogene Effizienzbegriff wurde bereits in Kapitel 2.2 definiert. Auf das gesamte Stromversorgungssystem bezogen, kann der Effizienzbegriff wie folgt ausgeweitet werden:

Die Effizienz eines Stromversorgungssystems bezieht sich auf die Deckung einer Lastkurve zu minimalen Kosten. In einem effizienten System wird der kostenminimale

Dispatch erreicht, indem Kraftwerke (konventionelle sowie erneuerbare) und verbrauchsseitige Flexibilitäten optimal eingesetzt werden. Diese Betrachtung wird oft in Optimierungsmodellen eingesetzt, bei denen das Stromversorgungssystem modelliert und das operative Kostenminimum ermittelt wird. Typischerweise wird in einer derartigen Betrachtung ein Jahr als Betrachtungszeitraum verwendet. Der Bestand an Kraftwerken oder Flexibilitätsoptionen wird nicht verändert, sodass hierbei also die **statische Effizienz** des Gesamtsystems ermittelt wird.

In einer weitergehenden Betrachtung sollte der Bestand an Kraftwerken oder Flexibilitätsoptionen als veränderbar beziehungsweise dynamisch dargestellt werden und neben der operativen eine investive Betrachtung mit eingeschlossen werden. **Dynamisch effizient** ist ein System, wenn das Kostenminimum in einer mehrperiodischen Betrachtung erreicht wird.

2.6 Statische Effizienz

Um aus statischer, das heißt operativer Sicht ein Kostenminimum beim bestehenden Anlagenbestand und bei den Prozessen zu erreichen, ist das Verhältnis zwischen vorhandener Flexibilität und Effizienz im aktuellen Betrieb zu optimieren. Der optimale Arbeitspunkt, also das optimale Verhältnis zwischen Flexibilität und Effizienz, ist dann erreicht, wenn das Verhältnis des Grenznutzens von Flexibilität und Effizienz dem Verhältnis der Grenzkosten der Angebotsseite entspricht.

Der Nutzen von Flexibilität und Effizienz drückt sich in niedrigeren Kosten für das Stromversorgungssystem aus. Dabei wird vor allen Dingen die Kraftwerksfahrweise beeinflusst, bei der variable Kosten eingespart werden. Variable Kosten sind vorwiegend Brennstoffkosten. Daneben werden sonstige variable Betriebskosten sowie An- und Abfahrtskosten reduziert. Schließlich wird auch die Nutzung der nachfrageseitigen Ressourcen mit optimiert.

Die genaue Ersparnis und damit der Wert von Flexibilität und Effizienz hängen wiederum stark von der Erzeugungs-

und Nachfragesituation ab, wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben: In Überschusssituationen erhält Flexibilität einen höheren Wert, wohingegen Effizienz gegebenenfalls einen geringeren Wert hat. Dies drückt sich auch in höheren Preisen am Markt für Flexibilitätsprodukte und niedrigeren Börsen- beziehungsweise Großhandelspreisen aus. Entsprechend diesem Wertverhältnis des Nutzens für das System sollten sich im optimalen Fall auch angebots- und nachfrageseitige Ressourcen ausrichten. Das bedeutet, dass in Überschusssituationen maximale Flexibilität bereitgestellt wird.

Diese durch die Nachfrage bereitgestellte Flexibilität muss nun nicht mehr durch ein konventionelles Kraftwerk vorgehalten werden, was nur zu diesem Zweck auf dem Niveau seiner Mindesterzeugung gefahren wird. Durch zum Beispiel die Brennstoffkostensparnisse ergibt sich eine Systemkostensparnis beziehungsweise eine höhere statische Effizienz. Gleichzeitig muss abgewogen werden, ob Reserveprodukte, die durch die Verbraucherseite bereitgestellt werden, durch ihre starke Aggregation vieler kleiner Einheiten die gleichen oder sogar höhere Zuverlässigkeitsraten erreichen können als durch konventionelle Kraftwerke bereitgestellte Flexibilität.

In Situationen mittlerer Residuallast hat Flexibilität einen geringeren Wert, sofern nicht besondere dynamische Anforderungen an das System bestehen (siehe Erläuterungen in Kapitel 2.4). Sie kann beispielsweise aus ohnehin betriebsbereiten konventionellen Kraftwerken bereitgestellt werden, sofern dies volkswirtschaftlich sinnvoll ist. Operative Effizienz des Gesamtsystems wird dadurch erreicht, dass der Stromverbrauch und damit auch der Brennstoffverbrauch des konventionellen Kraftwerksparks durch den energieeffizienten Betrieb der eingesetzten Prozesse minimiert werden.

In Mangelsituationen haben sowohl Flexibilität als auch Effizienz einen höheren Wert. Hier kommt es auf die exakten Verhältnisse an, ob Flexibilität bereitgestellt und vom optimalen Betriebspunkt abgewichen wird oder die Anlagen im Betriebsoptimum gefahren werden.

Die Wertigkeiten von Flexibilität beziehungsweise Effizienz werden durch Preissignale an den jeweiligen Teilmärkten angezeigt. Diese führen zu einer Anpassung des operativen Betriebs im Sinne von Flex-Efficiency im Status quo.

2.7 Dynamische Effizienz

Wird die vorangegangene Betrachtung der statischen Effizienz auf mehrere Perioden ausgedehnt und werden Investitionen zugelassen, erhöhen sich die Freiheitsgrade der Betrachtung. Im mehrperiodigen Fall können Investitionen vorgenommen werden, die das Verhältnis von Effizienz und Flexibilität verschieben, wie in Abbildung 1 dargestellt wurde. Wie bereits angedeutet, ist es denkbar, dass durch unterschiedliche Investitionen die rote »Status-quo«-Linie nicht nur hin zu einer bestimmten blauen Linie verschoben wird, sondern eine Schar blauer Linien mit unterschiedlichen Investitionsniveaus und unterschiedlichen Beziehungen zwischen Effizienz und Flexibilität existiert. Somit ist zu entscheiden, welche dieser möglichen Investitionen im Hinblick auf ein langfristiges Kostenminimum des Gesamtsystems zu wählen ist. Im mehrperiodigen, investiven Fall der dynamischen Effizienz ist also ein Systemkostenminimum über einen Zeitraum zu betrachten, der die Lebensdauer dieser Investitionen mindestens abdeckt.

Der mehrperiodige Fall unter Berücksichtigung von Investitionen wird dadurch komplex, dass nicht nur Investitionen in Flexibilität beziehungsweise Effizienz auf der Nachfrageseite möglich sind, sondern auch Investitionen auf der Angebotsseite, zum Beispiel in Kraftwerkskapazitäten (konventionelle sowie erneuerbare) oder alternative Flexibilitätsoptionen wie Transportnetze möglich sind. Diese Investitionen beeinflussen sich gegenseitig. Beispielsweise wird die Flexibilität der Angebotsseite einen geringeren Wert haben, wenn davon ausgegangen werden kann, dass Investitionen in nachfrageseitige Flexibilitäten erfolgen oder Ausgleichseffekte durch Netzausbau genutzt werden können. Das Optimierungsproblem besteht damit aus zwei Teilen: Einerseits muss ein kostenminimaler Kraftwerkeinsatz erfolgen (Minimierung der Brennstoffkosten und anderer variabler Betriebskosten), und zusätzlich müssen die benötigten Investitionskosten minimiert werden.

Die volkswirtschaftliche Ableitung des optimalen Verhältnisses von Effizienz und Flexibilität im dynamischen Fall wird durch Unsicherheiten bezüglich der künftigen Entwicklung des Wertes von Flexibilität und Effizienz erschwert. Wie bereits gezeigt wurde, liegen wesentliche Werttreiber für Flexibilität in den Extrema der Residuallastkurve. Diese werden vom Ausbau der fluktuierenden Erneuerbaren Energien und von den weiteren im System vorhandenen Flexibilitäten wie vom Netzausbau und den Entwicklungen auf den Strommärkten im Ausland geprägt. Langfristige und stabile Aussagen über diese Entwicklung sind schwierig zu treffen.

2.8 Zwischenfazit

Bei vielen technischen Anlagen existieren Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Effizienz.

Bei der Betrachtung der Wechselwirkungen ist die kurzfristige, operative von der mittel- und langfristigen, investiven Sichtweise zu unterscheiden. Aus operativer Sicht besteht die Wechselwirkung meist darin, dass eine höhere Effizienz mit einer geringeren Flexibilität erkaufte werden muss. Dies liegt darin begründet, dass sich Verbraucher bei der Variation der Last vom technischen oder betrieblichen Optimalpunkt ihrer Prozessauslastung entfernen oder verlustbehaftete Zwischenspeicher genutzt werden.

Über das Ausmaß und die Richtung der optimalen operativen und investiven Anpassungen des Verhältnisses von Flexibilität und Effizienz ist vor dem Hintergrund der Systemanforderungen zu entscheiden. Die Systemanforderungen im Hinblick auf Flexibilität und Effizienz können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die höchsten Flexibilitätsanforderungen ergeben sich an Situationen extremer Residuallast, das heißt sowohl im negativen Bereich als auch im Spitzenlastbereich. Diese Extrema prägen sich im Zeitverlauf stärker aus. Dazu kommen dynamische Anforderungen.
- Der Wert der Energieeffizienz wird besonders für die Situationen hoher Residuallast deutlich, da Einsparungen im Bereich der Betriebskosten von Spitzenlastkraft-

werken, Investitionskosten in Kraftwerksleistungen sowie Infrastrukturkosten erzielbar sind (Prognos AG und IAEW 2014).

Die Herausforderung besteht also darin, die operativen und investiven Entscheidungen über das realisierte Ausmaß von Flexibilität und Effizienz mit den sich zeitlich ändernden Systemanforderungen in Einklang zu bringen. Denn wenn Flexibilität und Effizienz in volkswirtschaftlich optimaler Weise eingesetzt werden, helfen sie, ein Kostenminimum für das Stromversorgungssystem zu erreichen. Dies gilt insbesondere, wenn dies stärker von volatiler Erzeugung geprägt ist. Dabei gilt es zunächst, operative Allokationsaufgaben zu lösen, das heißt einen optimalen Einsatz von Kraftwerken und nachfrageseitigen Optionen zu ermöglichen. In einer dynamischen Betrachtung ist darüber hinaus auch über Investitionen zu entscheiden. Dies sind auf der einen Seite Investitionen in Erneuerbare Energien

oder konventionelle Kraftwerke. Auf der anderen Seite muss das optimale Niveau an Energieeffizienz und verbraucherseitiger Flexibilität bereitgestellt werden, sodass erzeugungs- und verbraucherseitige Investitionen zu einem Gesamtkostenminimum führen.

Das Konzept von Flex-Efficiency bedeutet daher, vor dem Hintergrund der Anforderungen eines Stromversorgungssystems mit hohen Anteilen Erneuerbarer Energien die Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Effizienz zu erkennen, die zeitlich unterschiedlichen Anforderungen des Stromversorgungssystems nach Flexibilität und Effizienz zu berücksichtigen und so sicherzustellen, dass zu jedem Zeitpunkt das optimale Ausmaß von Flexibilität und Effizienz von Anlagen realisiert wird. Anders ausgedrückt, sollten Flexibilität und Effizienz in optimaler Höhe und in einem optimalen Verhältnis zueinander und zum optimalen Zeitpunkt eingesetzt werden.

3. Effizienz und Flexibilität in der betrieblichen Praxis: zwei Fallstudien

In diesem Kapitel wird in zwei Fallstudien veranschaulicht, wie sich die in Kapitel 2 diskutierten Synergien und Wechselwirkungen von Flexibilität und Effizienz bei konkreten technische Anlagen und Prozessen darstellen. Es werden der statische Fall (operative Anpassung) und dann der dynamische Fall (investive Anpassungen) jeweils separat betrachtet. Bei der Darstellung dieser Beispiele wird von betriebswirtschaftlichen Effekten abstrahiert, die sich durch Netzentgelte, Umlagen und Abgaben ergeben. Vielmehr handelt es sich um eine technisch getriebene Analyse. Als erste Fallstudie wurde ein konkreter Prozess in einem Unternehmen, die Aluminium-Elektrolyse bei der Firma Trimet, ausgewählt. Aufgrund seiner hohen Energieintensität kommt dem Prozess große Aufmerksamkeit sowohl innerhalb des Unternehmens als auch im Rahmen von Studien, die das gesamte Stromversorgungssystem betreffen, zu. Das Unternehmen hat im Rahmen einer Investitionsentscheidung eine Abwägung zwischen Effizienz und Flexibilität vorgenommen.

Als zweite Fallstudie wurden Pumpenanlagen ausgewählt. Hierbei handelt es sich nicht um die Anlage eines bestimmten Unternehmens, die Darstellung bezieht sich vielmehr auf Pumpenanlagen als allgemeine Querschnittstechnologie. Bereits in Kapitel 2.3 wurde aufgezeigt, dass Querschnittstechnologien hohe Energieeffizienzpotenziale aufweisen. Aber auch für das Angebot von Flexibilität sind sie relevant, denn in Pumpenanlagen sind Zwischenspeicher gut nutzbar.

3.1 Fallstudie Aluminium-Elektrolyse bei Trimet

Das erste Fallbeispiel bezieht sich auf die Aluminiumherstellung durch Elektrolyse des Herstellers Trimet Aluminium SE am Standort Essen. Die Aluminiumherstellung zählt zu den energieintensiven Prozessen. Insgesamt haben die Elektrolyseanlagen von Trimet eine Anschlussleistung am Standort Essen von 280 MW bei 360 Elektrolyseöfen in

drei Produktionslinien. Aufgrund der hohen installierten Leistung und des hohen Energieverbrauchs hat die energieintensive Industrie einen hohen Einfluss auf die Effizienz und die Flexibilität des Stromsystems. Die Flexibilisierung der Nachfrage in diesem Bereich kann zu einer signifikanten Steigerung der zur Verfügung stehenden Flexibilität im Stromsektor beitragen.

Der Elektrolyseprozess ist auf eine annähernd konstante Betriebstemperatur von ca. 1.000 Grad Celsius angewiesen. Die Temperaturabweichung darf maximal fünf Grad Celsius betragen. Zur Einhaltung dieser Toleranz der Betriebstemperatur ist eine konstante elektrische Leistung notwendig.

Wechselwirkungen im operativen Fall

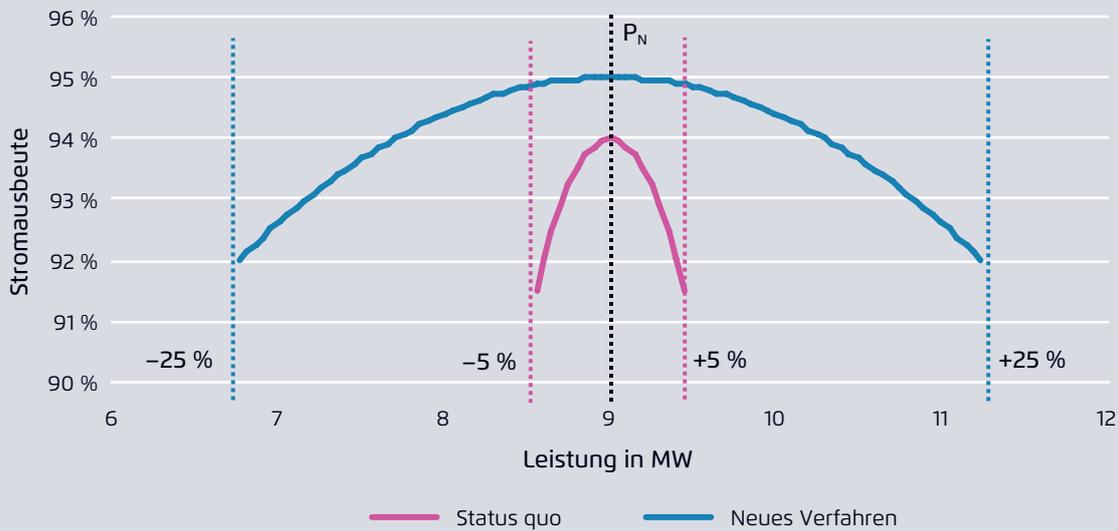
Die branchenübliche Kennziffer zur Bewertung der Effizienz der Aluminiumherstellung ist die Stromausbeute. Diese bildet sich aus dem Verhältnis aus Energieinput für das fertige Produkt und dem minimal möglichen Energieeinsatz für das fertige Produkt nach dem faradayschen Gesetz. Die Stromausbeute beschreibt damit die Produktionseffizienz. In der weltweiten Praxis wird eine Stromausbeute zwischen 93,5 und 95 Prozent erreicht. Trimet weist eine Stromausbeute von circa 94 Prozent auf.

Die Flexibilität des Prozesses der Aluminiumherstellung ist gering. Üblicherweise werden die Elektrolyseöfen das gesamte Jahr über bei konstanter Nennleistung betrieben. Eine Abweichung von der Nennleistung hat dabei signifikante Auswirkungen auf die Stromausbeute und somit auf die Effizienz des Prozesses. Trimet kann die Leistung der Öfen um maximal fünf Prozent variieren. Bei größeren Abweichungen ist die konstante Betriebstemperatur und somit die Aufrechterhaltung des Prozesses nicht sichergestellt.

Abbildung 5 stellt die Auswirkungen einer Nennleistungsabweichung auf die Stromausbeute am Beispiel von zwölf

Darstellung des Zusammenhangs zwischen Flexibilisierung und Effizienz von zwölf Elektrolyse-Öfen der Aluminiumproduktion durch den Einsatz von Wärmetauschern der TRIMET Aluminium SE

Abbildung 5



Eigene Darstellung.

Öfen von Trimet grafisch dar. Die X-Achse zeigt die Leistungsaufnahme und ihre mögliche Variation (Flexibilität), während die Y-Achse mit der Stromausbeute die Effizienz darstellt. Die zwölf Öfen haben eine Nennleistung von insgesamt neun MW, von der im Status quo, das heißt ohne investive Maßnahmen, um fünf Prozent abgewichen werden kann, die also um diesen Prozentsatz flexibel ist. Die Stromausbeute beträgt heute (ohne Investition) bei Nennleistung 94 Prozent. Eine Abweichung der Leistung um fünf Prozent führt bereits zu einer Reduzierung der Stromausbeute auf 91 Prozent, wie die rote Linie in der Abbildung zeigt. Diese Abweichung ist vor dem Hintergrund einer weltweiten Stromausbeute zwischen 93,5 und 95 Prozent signifikant. Die rote Linie illustriert somit die operative Wechselwirkung zwischen Effizienz und Flexibilität. Es handelt sich hier um einen negativen Zusammenhang.

Synergien bei investiven Maßnahmen

Zur Steigerung der Flexibilität des Prozesses und der gleichzeitigen Erhöhung der Energieeffizienz erprobt Trimet bei zwölf Öfen ein neues Verfahren. Im bisherigen

Verfahren erfolgt die Wärmeabfuhr der Elektrolyse ungesteuert. Im neuen Verfahren wird durch den Einsatz von Wärmetauschern der Wärmeaustausch aus den Öfen gesteuert. Dieses Verfahren stellt neben der Variation der Stromstärke eine weitere Möglichkeit zur Steuerung der Betriebstemperatur dar. Darüber hinaus wird die bisher auf einen konstanten Eintrag und Austrag von Material ausgelegte Prozesssteuerung optimiert.

Abbildung 5 stellt die erwartete² Stromausbeute des neuen Verfahrens in Abhängigkeit der Leistung für die zwölf Öfen anhand der blauen Linie dar und stellt diese dem Status quo gegenüber. Durch den optimierten Prozess könnte die Stromausbeute bei Nennleistung auf 95 Prozent gesteigert werden. Darüber hinaus wird mittels der gesteuerten Wärmeabfuhr durch den Einsatz von Wärmetauschern die Leistungsanpassung und somit die Flexibilität der Öfen

2 Das Verfahren wird derzeit erprobt. Alle hier dargestellten Werte zur Flexibilität des Systems und zur Stromausbeute basieren auf Einschätzungen von Trimet. Erste Ergebnisse werden im zweiten Halbjahr 2015 erwartet.

voraussichtlich von bisher fünf auf 25 Prozent erhöht. Die Stromausbeute würde auch bei Abweichungen von der Nennleistung deutlich höher liegen als im Status quo. Die investive Maßnahme zur Flexibilisierung des Elektrolyseprozesses wirkt sich in dieser Fallstudie also auch positiv auf die Effizienz aus. Durch die Optimierung des Systems wird die Stromausbeute bei Nennbetrieb erhöht und darüber hinaus liegt die Effizienz bei maximalem Einsatz des Flexibilitätpotenzials höher als im Status quo. Es treten somit Synergien zwischen Flexibilität und Effizienz auf.

Als Alternativinvestition hätte Trimet ausschließlich in eine Steigerung der Effizienz investieren können. Dies hätte ebenfalls zu einer Stromausbeute von 95 Prozent bei Nennleistung geführt. Die Flexibilität des Prozesses wäre durch die Investition nicht betroffen gewesen. Die Durchführung der Alternativinvestition wäre mit geringeren Investitionskosten verbunden gewesen. Trimet hat sich jedoch für die Investition in Effizienz und Flexibilität über den Einsatz von Wärmetauschern entschieden, um Erlöse auf den Flexibilitätsmärkten realisieren zu können.

3.2 Fallstudie Pumpenanlagen

Die zweite Fallstudie bezieht sich auf Pumpenanlagen. Ihre grundsätzlichen Wirkungsmechanismen können auf viele Querschnittstechnologien übertragen werden. Sie verdeutlicht ebenfalls die Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Effizienz. Neben der operativen Abwägung zwischen dem Abruf von Flexibilität und einer hohen Effizienz treten auch hier im investiven Fall Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Effizienz auf.

Querschnittstechnologien in der Industrie und im Gewerbe können zur Bereitstellung von Flexibilität durch Lastmanagement genutzt werden. Zu den Querschnittstechnologien zählen unter anderem Pumpen, Kompressoren und Ventilatoren. Die Bereitstellung von Flexibilität über Querschnittstechnologien ist aus folgenden Gründen bei der Erschließung der Potenziale interessant:

- Es fallen nahezu keine Aktivierungskosten selbst für einen kurzzeitigen und seltenen Abruf der Flexibilität an,
- die Transaktionskosten sind aufgrund der breiten Verwendung in verschiedenen Branchen gering und
- es besteht eine hohe zeitliche Verfügbarkeit und eine hohe geografische Verbreitung.

Das Potenzial für die Bereitstellung von Flexibilität durch Querschnittstechnologien ist hoch. In Deutschland beträgt die mittlere Last der Querschnittstechnologien tagsüber werktags 12,8 GW. Hiervon könnten 2,8 GW über einen Zeitraum von fünf Minuten, 1,4 GW über eine Stunde und 0,6 GW über vier Stunden abgeschaltet werden (Tim Buber et al. 2013b). Darüber hinaus bestehen Effizienzpotenziale im Bereich der Querschnittstechnologien. Diese können im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Flexibilität Synergien aufweisen oder aber in Wechselwirkung zueinander stehen.

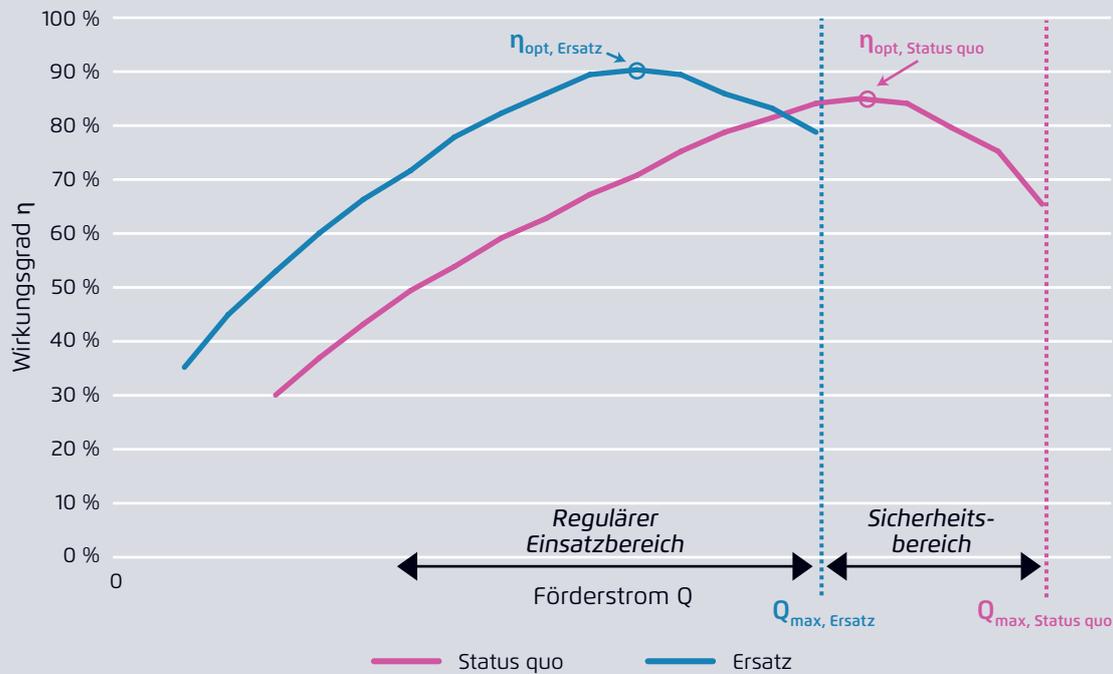
Im Folgenden wird beispielhaft der Einsatz einer Pumpe im operativen Fall sowie der Ersatz einer Pumpe in der investiven Betrachtung im Hinblick auf die Wechselwirkungen von Flexibilität und Effizienz untersucht. Pumpen werden in vielen Anwendungsgebieten in der Industrie genutzt, wie zum Beispiel für das Fördern von Kühlmitteln, Abwasser oder Heizöl. Dabei entfallen 30 Prozent des von elektrischen Motoren verbrauchten Stroms in der Industrie auf Pumpen. Effizienzmaßnahmen zur Energieeinsparung können an verschiedenen Komponenten des Systems vorgenommen werden. Es können Anpassungen beim drehzahlgeregelten Antrieb oder bei der Auslegung des Systems vorgenommen werden.

Wechselwirkungen im operativen Fall

Abbildung 6 zeigt beispielhaft den Wirkungsgradverlauf einer Pumpe in Abhängigkeit des Förderstroms. Im Status quo, dargestellt durch die rote Linie, erreicht die eingesetzte Pumpe einen maximalen Wirkungsgrad von 85 Prozent ($\eta_{\text{opt, Status quo}}$). Bei hohen Förderströmen und insbesondere im unteren Teillastbereich bei geringen Förderströmen sinkt der Wirkungsgrad jedoch stark ab. Eine hohe Effizienz wird somit durch den Einsatz im Betriebsbereich nahe des maximalen Wirkungsgrads erreicht.

Schematische Darstellung der Auswirkungen des Ersatzes einer bestehenden, überdimensionierten Pumpe durch eine kleinere, effizientere Pumpe.

Abbildung 6



Eigene Darstellung.

Pumpen sind oft überdimensioniert beziehungsweise werden häufig mit einem großen Sicherheitsbereich ausgelegt, sodass die Förderung eines hohen Volumenstroms zu jeder Zeit gewährleistet ist (Blesl und Kessler 2013). Dies ist in Abbildung 6 durch die Kennzeichnung »Regulärer Einsatzbereich« sowie »Sicherheitsbereich« deutlich gemacht. Dieser »Sicherheitsbereich« der Pumpe wird jedoch meist nur in Ausnahmefällen genutzt beziehungsweise ist bei entsprechender Steuerung nicht notwendig. Der reguläre Einsatzbereich der Pumpe liegt im Bereich geringerer Förderströme.

Diese Überdimensionierung führt einerseits zu einem Betrieb in geringen Wirkungsgradbereichen, also zu niedriger Effizienz. Andererseits kann die Pumpe je nach Anwendungsgebiet insbesondere in Verbindung mit einem Speicher flexibel eingesetzt werden. Es existiert in diesen Fällen ein sofort mobilisierbares Flexibilitätspotenzial.

Dieses Flexibilitätspotenzial wird allerdings durch eine verminderte Effizienz „erkauft“, es handelt sich hiermit also nicht um eine Synergie, sondern um eine Wechselwirkung.³

Wechselwirkungen bei investiven Maßnahmen

In der folgenden Betrachtung wird eine übliche Maßnahme zur energetischen Optimierung vorgestellt. Die bestehende Pumpe wird durch eine kleinere Pumpe ersetzt, die außerdem eine höhere Effizienzklasse aufweist. Die Wirkung dieser Maßnahme ist mit einer blauen Linie dargestellt. Diese Pumpe weist einen maximalen Wirkungsgrad von 90 Prozent auf ($\eta_{opt, Ersatz}$) und wird in einem günstigeren Wirkungsgradbereich betrieben.

3 Im Sinne der Kategorisierung der Wechselwirkung, die in Kapitel 2.3 vorgenommen wurde, existieren hier Wechselwirkungen vom Typ C.

Der hohe Sicherheitsbereich der vorher installierten, überdimensionierten Pumpe wird reduziert. Durch den veränderten Wirkungsgradverlauf wird die Pumpe im regulären Einsatzbereich mit einer höheren Effizienz betrieben. Der Betrieb im niedrigen Teillastbereich wird stark reduziert. Darüber hinaus liegt der maximale Wirkungsgrad oberhalb der vorher installierten, älteren Pumpe.

Der Erhöhung der Effizienz durch die Ersatzmaßnahme steht allerdings eine Wechselwirkung mit der Flexibilität des Pumpensystems gegenüber. Die im Status quo installierte, überdimensionierte Pumpe bietet die Möglichkeit, die Pumpe in Verbindung mit einem Speicher flexibel einzusetzen. Durch die geringere Dimensionierung der neuen Pumpe sinkt die Leistung der Pumpe und somit deren Flexibilitätspotenzial, da weniger Leistung zur Verfügung steht, die (vorhandenen) Speicher in kürzerer Zeit zu füllen. Die Erhöhung der Effizienz führt in diesem Fallbeispiel somit zu einer Reduzierung der Flexibilität.

Das geschilderte Verhältnis zwischen Effizienz und Flexibilität ist jedoch nicht starr, sondern kann durch die Art der investiven Maßnahme variiert werden. Ein Ersatz einer alten Pumpe durch eine neue, effizientere Pumpe gleicher Leistung kann beispielsweise zu einer Erhöhung der Effizienz ohne Beeinträchtigung des Flexibilitätspotenzials führen. Darüber hinaus sind die Nutzung des Flexibilitätspotenzials und die Auswirkungen auf die Effizienz vom operativen Einsatz der Pumpe abhängig.

3.3 Zwischenfazit

Die zwei Fallstudien zeigen, dass Wechselwirkungen und Synergien zwischen Effizienz und Flexibilität in unterschiedlichen technischen Anlagen praktische Relevanz haben. Bei der Charakterisierung dieser Wechselwirkungen ist der statische Fall (operative Anpassung) und der dynamische Fall (investive Anpassung) zu unterscheiden.

In beiden Fallbeispielen führt im Status quo die Nutzung der Flexibilität der Anlagen und Prozesse zu Abweichungen vom optimalen Betriebspunkt und damit zu einem Betrieb mit geringerem Wirkungsgrad: Entweder sinkt die Strom-

ausbeute der Elektrolyse beim Verlassen des Optimalpunktes oder der Wirkungsgrad der Pumpenanlage sinkt. In der operativen Betrachtung gibt es daher in beiden Fällen eine negative Wechselwirkung.

Weiterhin wurden in beiden Fallstudien die Wechselwirkungen und Synergien von investiven Maßnahmen auf Flexibilität und Effizienz betrachtet. Hier zeigt sich, dass Wechselwirkungen, aber auch Synergien zwischen Effizienz und Flexibilität auftreten können. Im Fall von Trimet wird durch die investive Maßnahme sowohl eine Steigerung der Effizienz als auch der Flexibilität erreicht. Dagegen geht im Beispiel der Pumpenanlage die Effizienzsteigerung mit einer geringeren Flexibilität einher.

Einer investiven Maßnahme steht in der Regel eine große Anzahl von Alternativinvestitionen gegenüber. Jede Alternativinvestition kann zu einem anderen Verhältnis zwischen Flexibilität und Effizienz führen. Eine verhältnismäßig höhere Steigerung der Effizienz kann beispielsweise zu einer geringeren Steigerung der Flexibilität führen. Bei Durchführung einer investiven Maßnahme muss daher das optimale Verhältnis zwischen der erreichbaren Effizienz und Flexibilität bestimmt werden.

Die Herausforderung ist dabei, das aus Systemsicht optimale Verhältnis mit der Sicht der Investoren in Einklang zu bringen. Trimet hat in Erwartung einer steigenden Nachfrage nach Flexibilität eine höhere Investition getätigt. Für die Investoren in Querschnittstechnologien stellt sich der Fall zumeist anders dar, da sie den Systemvorteil einer höheren Investition zur Erreichung von mehr Flexibilität und Effizienz auf betrieblicher Ebene selten aktivieren können. Die konkreten Hemmnisse dahinter werden im nächsten Kapitel diskutiert. Es wird anschließend darauf eingegangen, was getan werden muss, um die bestehenden Markthemmnisse zu beseitigen und gesamtwirtschaftlich sinnvolle Investitionen zu ermöglichen.

4. Anreize und Hemmnisse für optimale Flex-Efficiency

In diesem Kapitel steht die Frage im Mittelpunkt, welche Anreize für die Auslegung und den Betrieb von Anlagen in einer systemorientierten optimalen Form bestehen. Ausgehend von einem ökonomischen Verständnis der Wirkung von Preissignalen auf unternehmerische Entscheidungen (4.1) werden bestehende Hemmnisse für Flex-Efficiency analysiert (4.2) und für die beiden Fallstudien konkretisiert (4.3).

4.1 Die Rolle von Preissignalen für Flexibilität und Effizienz

Effizienz und Flexibilität auf der Nachfrageseite werden im theoretischen Optimum so eingesetzt, dass sie – im Zusammenspiel mit den Optionen der Angebotsseite – eine volkswirtschaftlich effiziente Systemauslegung ergeben. Dazu ist ein Allokationsmechanismus nötig, der den Einsatz (Dispatch) und die Investitionen in Effizienz und Flexibilität koordiniert. Diese Koordinationsfunktion übernimmt im Idealfall der Strommarkt über kurz- und langfristige Preissignale. Auf den Strommärkten werden definierte Stromprodukte gehandelt; Knappheiten beziehungsweise Wertigkeiten werden durch die Höhe der Preise ausgedrückt. Konkret wird der kurzfristige Bedarf an Effizienz und Flexibilität durch die Strompreise an der Strombörse oder an den Regelenergiemärkten signalisiert, während längerfristige Signale beispielsweise durch Terminmärkte gesetzt werden. Die energiewirtschaftliche Praxis folgt diesem Idealfall, weicht von der Theorie jedoch an mancher Stelle ab.

Märkte, Preissignale und Produkte für Effizienz

Der Wert der Effizienz liegt kurzfristig in der Senkung der Nachfrage (kWh) und langfristig in der Senkung des Niveaus der notwendigen Leistungsbereitstellung (kW).

Der operative (kurzfristige) Einsatz von Effizienz folgt den Knappheitssignalen des Marktes, das heißt den Spotmarktpreisen. In Situationen hoher Residuallast sind es in der Regel die hohen Grenzkosten von Spitzenlast-

kraftwerken, die die Preise setzen. Hohe Preise bieten einen hohen Anreiz, Effizienzmaßnahmen durchzuführen. Somit signalisiert der Großhandelspreis auch die optimalen Zeitpunkte für den Einsatz von Effizienz. Weitere Anreize für Effizienzmaßnahmen bestehen in der Vermeidung von Steuern, Abgaben und Entgelten.

Aus investiver Perspektive – wenn Effizienzmaßnahmen mit Investitionen einhergehen – reichen die Schwankungen des Spotmarkts nicht aus; hier sind langfristig verlässliche Preissignale von größerer Bedeutung. Energieeffizienz wird langfristig vorwiegend auf Forward-Märkten vergütet, da Industrieunternehmen ihre Strombeschaffung zur Vermeidung von Beschaffungsrisiken überwiegend über einen gewissen Zeitraum im Voraus tätigen.

Parallel zu den Kurz- und Terminmärkten werden aktuell weitere Märkte und Effizienzprodukte entwickelt, um Investitionen in zusätzliche Effizienzpotenziale zu mobilisieren. Im Rahmen des Nationalen Aktionsplans Energieeffizienz (NAPE) werden Pilotvorhaben zur Realisierung von Ausschreibungsmodellen für Energieeffizienz durchgeführt. Mit dem Ausschreibungsmodell »STEP up!« (Stromeffizienzpotenziale nutzen!) sollen Akteure individuell Stromeffizienzmaßnahmen identifizieren und sie bei einem Wettbewerb um Förderzuschüsse einreichen. Es erhalten diejenigen Maßnahmen den Zuschlag, die die höchste Stromeinsparung pro »Förder-Euro« erreichen. Auf diese Weise soll das Programm die Akteure motivieren, wirtschaftliche Einsparmöglichkeiten aufzudecken und Effizienzmaßnahmen zu ergreifen.

Märkte, Preissignale und Produkte für Flexibilität

Der Wert der Flexibilität liegt in der Fähigkeit, kurzfristig den Strombezug oder die Strombereitstellung (kWh) anzupassen. Dieser Wert wird maßgeblich über den schwankenden Spotmarktpreis ausgedrückt. Dabei existiert ein fließender Übergang zwischen Flexibilitätsprodukten und Stromprodukten; eine einheitliche Definition für Flexi-

bilitätsprodukte existiert nicht und Flexibilität wird in verschiedenen Märkten gehandelt.

Als reine Flexibilitätsprodukte können Produkte bezeichnet werden, die gezielt als Instrumente zur Sicherstellung der Systembilanz, zum Beispiel bei Prognosefehlern, Kraftwerksausfällen oder hohen Residualastrampen eingesetzt werden. Beispiele sind die Reserveprodukte wie Primärregelleistung, Sekundärregelleistung oder Minutenreserve. Die Verordnung über Vereinbarungen zu abschaltbaren Lasten (AblaV) definiert ein weiteres Spezialprodukt, welches von Übertragungsnetzbetreibern kontrahiert wird. Als Spiegelbild der Reserveleistungsmärkte ist die Nutzung von Flexibilität zum Management eigener Bilanzkreise, das heißt zur Vermeidung von Ausgleichsenergie relevant. Schließlich können sehr kurzfristige Märkte wie Intraday-Märkte auch als Märkte für Flexibilität bezeichnet werden, da die hohe Preisvolatilität dieser Märkte von flexiblen Verbrauchern genutzt werden kann. Damit ist der Markt für Flexibilität zersplittert. Arbitrage wird durch Regulierung verhindert.

Preiserwartungen und die Preise langfristiger Stromprodukte signalisieren theoretisch den langfristigen Bedarf an Effizienz und Flexibilität. In diesem Bereich sind die Produktentwicklung und die Liquidität der entsprechenden

Märkte jedoch erst am Anfang. Ein erster Schritt in Richtung spezialisierte Produkte ist der von der deutschen Strombörse EEX im September 2015 eingeführte »Cap Future«. Dieses Produkt sichert den Intraday-Preis mit einem Cap von 60 €/MWh ab.

Zusammenfassend zeigt Tabelle 2, welche Preisanreize aus dem Großhandelsmarkt kurz- und langfristig auf operative und investive Niveaus von Flexibilität und Effizienz wirken. Da sich die Preisanreize für Effizienz und Flexibilität überlagern, besteht die Herausforderung für die Verbraucher darin, auf dieser Basis die optimale Einsatz- und Investitionsentscheidung zu treffen.

4.2 Hemmnisse für die Wirksamkeit von Preissignalen

Auch wenn Preissignale theoretisch optimale Anreize für den Einsatz von Flexibilität und Effizienz liefern könnten, existiert in der Praxis doch eine Reihe von Hemmnissen dafür, dass sich auf betrieblicher Ebene das aus Systemsicht optimale Verhältnis von Flexibilität und Effizienz einstellt.⁴

Ein Teil dieser Hemmnisse bezieht sich direkt auf die Preissignale des Großhandelsmarktes wie

- die fehlende Weitergabe des Preissignals aus dem Großhandelsmarkt an die Endverbraucher,
- Defizite im Marktdesign von Flexibilitätsmärkten,
- Fehlanreize durch die Struktur der Netznutzungsentgelte und
- Fehlanreize bedingt durch Abgaben, Umlagen und sonstige Entgelte.

Daneben hemmen grundsätzliche Kategorien von Hemmnissen (Marktunvollkommenheiten) volkswirtschaftlich sinnvolle Investitionen in Energieeffizienz;⁵ dazu zählen

- 4 Barrieren und Hemmnisse auf den Märkten für Flexibilität werden für den Fall des Lastmanagements auch in Connect (2015) im Auftrag von Agora Energiewende beschrieben.
- 5 Diese wurden beispielsweise in der Studie »Energieeffizienz als Geschäftsmodell« im Auftrag von Agora Energiewende analysiert (ifeu und LBD 2014).

Zusammenfassung der Preisanreize für Flexibilität und Effizienz aus dem Strom-Großhandelsmarkt		
	Effizienzanreiz	Flexibilitätsanreiz
Kurzfristig (operativ)	Niveau von Spot- und Intraday-Preisen	Volatilität von Spot- und Intraday-Preisen; Preise für Flexibilitätsprodukte
Langfristig (investiv)	Forward-Preise; evtl. zukünftig: Effizienzmärkte	Langfristig erwartete Volatilität der Großhandelspreise; langfristig erwartete Preise für Flexibilitätsprodukte

Eigene Darstellung.

- Informationsmängel und Unsicherheit über künftige Entwicklungen,
- Technisch-ökonomische Unteilbarkeiten und Inflexibilitäten (Anpassungsmängel) sowie
- das sogenannte Investor/Nutzer-Dilemma, das allerdings vor allem für den Bereich von Wärmeeffizienz im Wohnungssektor relevant ist.

Die relevanten Hemmnisse werden nachfolgend ausführlicher diskutiert und Ansätze zu ihrer Überwindung erörtert.

Fehlende Weitergabe des Preissignals

Im vorangegangenen Kapitel wurde gezeigt, dass der Großhandels-Strompreis als wichtiges Koordinationsinstrument dient, operative Entscheidungen über den Einsatz von Flexibilität und Effizienz zu fällen. Dazu ist es jedoch erforderlich, dass der Endkunde ein differenziertes Preissignal zur Verfügung gestellt bekommt und sein Verbrauch auch nach diesem Preissignal abgerechnet wird. Bei einer festen Tarifstruktur handelt es sich dabei um »Time-Of-Use (TOU)«-Tarife; wenn diese Tarifstruktur an den laufenden Großhandelsstrompreis angepasst wird, handelt es sich um »Real-Time-Pricing (RTP)«. Für ein System mit einem hohen Anteil fluktuierender Erneuerbarer Energien ist ein RTP-Tarif im Vergleich zu TOU besser geeignet, da sich zunehmend weniger feste tägliche Preismuster herausbilden.

Der Einführung von RTP stehen jedoch Hemmnisse gegenüber. Zunächst muss die Zähl- und Abrechnungsinfrastruktur vorhanden sein, um die Verbrauchsstruktur zeitlich differenziert zu erfassen. Dies ist gegenwärtig nur bei Kunden mit einem Jahresverbrauch von mehr als 100 MWh der Fall. Erst mit dem geplanten Rollout von Smart Metern und der Einführung der Zählerstandsgangmessung wird dies auch bei Kundengruppen mit kleinerem Verbrauch der Fall sein. Erst dann kann auch von der Belieferung nach Standardlastprofil abgewichen werden.

Jedoch ist auch im Status quo bei Kundengruppen mit höherem Verbrauch das RTP nicht verbreitet. Aufgrund der gegenwärtig noch relativ geringen Volatilität des Großhandels-Strompreises sind die Preisanreize noch zu gering

(Ecofys 2014), dies umzusetzen. Damit reagieren Verbraucher mit Effizienzmaßnahmen nur auf ein mittleres Strompreisniveau und können nicht auf die zeitliche Variation mit dem Einsatz der Einsparung, also mit der Flexibilität, reagieren. Ihr Flexibilitätsangebot beschränkt sich daher auf die Bereitstellung von Flexibilitätsprodukten, die im nächsten Abschnitt besprochen werden.

Defizite im Marktdesign von Flexibilitätsmärkten

Neben Preissignalen des Großhandelsmarktes wirken Preissignale von Märkten in denen definierte Flexibilitätsprodukte gehandelt werden. Dazu zählt beispielsweise der Regelenenergiemarkt oder der Markt für abschaltbare Lasten. Über weitere explizite Flexibilitätsprodukte wird gegenwärtig diskutiert. Dazu zählen Märkte für zuschaltbare Lasten oder auch regionale Flexibilitätsmärkte, die Verteilnetzbetreibern zum lokalen Netzengpassmanagement dienen.

Zwei Kategorien von Hemmnissen im Marktdesign sind in Bezug auf den Grundgedanken von Flex-Efficiency relevant und erschweren das Erreichen des volkswirtschaftlichen Optimums von Flexibilität und Effizienz.

Einerseits existieren auf diesen expliziten Flexibilitätsmärkten Marktzugangsbeschränkungen, die in Form einer geforderten Präqualifikation der teilnehmenden Anlagen auftreten. Auch Produktdefinitionen die eine lange Bereitstellungsdauer der Flexibilität vorsehen, wirken wie eine Zugangsbeschränkung. Diese Beschränkungen führen zu einem geringeren Angebot an diesen Märkten und zu einer relativen Bevorzugung von Effizienz gegenüber Flexibilität. Beispielsweise sind die Produktdefinitionen im Regelenenergiemarkt ursprünglich auf die Eigenschaften von thermischen Kraftwerken ausgelegt gewesen. Erst im Laufe der letzten Jahre wurde die Teilnahme kleinerer Einheiten durch Poolung ermöglicht. Eine weitere Senkung von Marktzugangsbeschränkungen ist daher anzustreben. Auch im Markt für abschaltbare Lasten existieren erhebliche Marktzugangsbeschränkungen, wie zum Beispiel die geforderte Mindestgröße eines Pools von maximal fünf Anlagen an einem Höchstspannungsknoten von 50 MW.

Andererseits kann die teilweise regulierte Vergütung von Flexibilitätsprodukten zu Marktverzerrungen und Fehlanreizen führen, wenn die Vergütungen von vergleichbaren Produkten in unterschiedlichen Märkten deutlich voneinander abweichen. Beispielsweise wurde festgestellt, dass die Vergütungen im Markt für abschaltbare Lasten attraktiver als die des Regelenergiemarktes sind. Diese Märkte stehen wiederum in einem Arbitrageverhältnis zu Intraday und Spotmärkten. Überdurchschnittliche Vergütungen in einem Flexibilitätsmarkt führen beispielsweise dazu, dass kein für das Gesamtsystem optimales Verhältnis zwischen Flexibilität und Effizienz erreicht werden kann.

Fehlanreize durch die Netznutzungsentgelte

Das bestehende Netzentgeltsystem sowie bestehende Sonderregelungen führen dazu, dass die Preissignale des Großhandelsstrommarktes oder von Flexibilitätsmärkten nur vermindert bei den Verbrauchern ankommen. Folglich führt das Preissignal zu einer Verzerrung des Preisverhältnisses zwischen Flexibilität und Effizienz.

Beispielsweise reduzieren die Vermeidung von Bezugsspitzen oder eine hohe Anzahl von Benutzungsstunden die Netzentgelte. Beides wirkt als Hemmnis für die Nutzung von Flexibilität auf den Energiemärkten, da potenzielle Erlöse aus diesen Märkten durch erhöhte Netzentgelte bestraft werden. Dies gilt insbesondere im Bereich der niedrigen Residuallast, in dem marktdienliche Lasterhöhungen zu erhöhten Netzentgelten führen, obwohl sie gleichzeitig netzdienlich sein können. Ähnliche Fehlanreize durch die Netzentgeltstruktur bestehen auch beim Abruf von Regelleistung, die Verbraucher bereitstellen.

Auch auf die Effizienz hat die Netzentgeltstruktur Auswirkungen. So kann die Ausnahmeregelung für stromintensive Verbraucher nach § 19 (2) Satz 2 ff. StromNEV sogar Mehrverbrauchsanreize auslösen, wenn der für die Nutzung dieser Regelung erforderliche Strombezug von mindestens 10 GWh/a nicht erreicht wird.

Fehlanreize bedingt durch Abgaben, Umlagen und sonstige Entgelte

Neben Netznutzungsentgelten enthalten die Endkundentarife weitere Aufschläge. Dazu zählen die Konzessionsabgabe, die Stromsteuer und die maßgeblichen Umlagen gemäß EEG, KWKG, AbLaV und § 19 (2) StromNEV. Sie belasten jede bezogene Kilowattstunde gleichmäßig und führen dazu, dass in Zeiten geringer Residuallast unter Umständen eine vorhandene Flexibilität zur systemoptimalen Lasterhöhung nicht genutzt wird und stattdessen auf alternative, das heißt fossile Energieträger in der Eigenerzeugung zurückgegriffen wird, die mit diesen Abgaben und Umlagen nicht belastet sind.

Verbrauchsbezogene Netzentgelte, Umlagen und Abgaben führen weiterhin dazu, dass Effizienz stärker angereizt wird als Flexibilität. Dies verstärkt die zuvor beschriebene Verzerrung von Preissignalen zulasten von Flexibilität zusätzlich.

Informationsmängel und Unsicherheit über künftige Entwicklungen

Informationsmängel wirken vor allem als Barriere für Investitionen, da sie mögliche Investitionen nicht erkennen lassen oder Risikoaufschläge nach sich ziehen.

Der künftige Wert von Flexibilität ist sehr schwierig zu bestimmen. Denn neben den erwähnten nachfrageseitigen Einflussfaktoren wie dem Ausbaupfad der Erneuerbaren Energien oder Ausgleichseffekten durch den künftigen Netzausbau sind insbesondere Informationen über alternative angebotsseitige Faktoren von großen Unsicherheiten geprägt. Dazu zählen beispielsweise technologische Entwicklungen von Flexibilitäten (Kostendegression von Speichern), Bereitstellung von Flexibilität durch Erneuerbare Energien, oder auch die Brennstoffpreisentwicklung und damit auch die Merit-Order-Kurve des Strommarktes.

Auch für Energieeffizienz sind Informationsmängel relevant. Dies betrifft einerseits Informationen über mögliche Maßnahmen zur Energieeinsparung, aber auch Unsicherheiten über die Höhe der zukünftig relevanten Strompreise beziehungsweise Einsparungen insgesamt.

Neben der Unsicherheiten über zukünftige Entwicklungen von Strommärkten liegen Informationsmängel über Investitionsmöglichkeiten in Flexibilität und Effizienz vor. Dies gilt vor allem für kleinere Akteure im gewerblichen Bereich und in Industrien, in denen der Stromverbrauch nur einen relativ unbedeutenden Teil der Produktionskosten ausmacht.

Technisch-ökonomische Unteilbarkeiten oder Inflexibilitäten

Technisch-ökonomische Unteilbarkeiten oder Inflexibilitäten sind sowohl für Flexibilität als auch für Effizienz relevant, wenn Investitionen nicht beliebig teil- oder skalierbar sind und technische oder ökonomische Restriktionen für die schnelle Anpassung an die Preissignale der Märkte bestehen. Im Beispiel der Aluminiumelektrolyse erscheinen Investitionen gut skalierbar, da sich die Gesamtanschlussleistung auf viele kleine Einheiten verteilt, die individuell umgerüstet werden können. Es sind jedoch auch Fälle denkbar, in denen das ideale Effizienzbeziehungsweise Flexibilitätsniveau nicht realisiert werden kann.

Weiterhin kann eine Verzerrung zwischen Investitionen in Flexibilität und Effizienz dadurch erfolgen, dass für Investitionen in erzeugungs- und verbrauchsseitige Flexibilität unterschiedliche Amortisationszeiten zugrunde gelegt werden. Während im Bereich von Kraftwerken Amortisationszeiten von über zehn Jahren akzeptiert werden, werden für Investitionen im Bereich Energieeffizienz oder verbraucherseitige Flexibilität Amortisationszeiten von weniger als fünf Jahren gefordert. Aus diesen ungleichen Rahmenbedingungen ergibt sich eine Bevorzugung der erzeugerseitigen Flexibilität gegenüber sowohl nachfrageseitiger Flexibilität als auch Investitionen in Energieeffizienz.

4.3 Auswirkungen der Hemmnisse auf die dargestellten Fallbeispiele

4.3.1 Elektrolyse bei Trimet

Das Unternehmen Trimet kann als energieintensives Industrieunternehmen von Sonderregelungen zu Netzentgelten Gebrauch machen. Auch ist es von sonstigen Um-

lagen und Abgaben weitgehend befreit. Die Struktur des Stromlieferungsvertrages für Trimet ist nicht öffentlich, doch aufgrund seiner Abnahmemenge ist es möglich, dass ein Großhandelsstrompreis an das Unternehmen weitergereicht wird, beziehungsweise Trimet kann selber am Großhandelsmarkt Strom beziehen.

Aufgrund seiner hohen Leistung konnte sich Trimet zur Bereitstellung abschaltbarer Lasten nach AblAV qualifizieren und nimmt als eines von sehr wenigen Unternehmen an diesem Markt teil. Gemäß AblAV gelten Ausnahmeregelungen für die Netzentgelte bei Abruf der Regelleistung, sodass die zuvor beschriebenen Hemmnisse für Trimet nicht wirksam sind. Bei der Teilnahme am Sekundärregelungs- oder Minutenreservemarkt würde jedoch auch für Trimet die Gefahr bestehen, bei Leistungsabruf höhere Netzentgelte zahlen zu müssen. Aufgrund des sehr hohen Energieverbrauchs von Trimet besteht aus Sicht des Unternehmens auch nicht das Risiko, unter eine Mindestverbrauchsgrenze zu fallen und damit eine Begünstigung zu verlieren.

Falls jedoch beispielsweise die AblAV-Regelungen und Erlöse wegfallen sollten, könnte Trimet seine Flexibilität an anderen Märkten veräußern. In diesem Fall könnte es zu einer Wechselwirkung mit dem Netzentgeltregime kommen. Als Konsequenz könnte Trimet weniger Flexibilität anbieten und stattdessen die Stromausbeute der Produktion erhöhen. Auch wäre es möglich, dass die beschriebenen Investitionen in Flexibilität und Effizienz nur in geringerem Umfang stattfinden beziehungsweise nicht auf die übrigen Öfen ausgeweitet werden.

Aufgrund der Höhe des Stromverbrauchs ist Trimet ein Fallbeispiel, bei dem der Großhandelsstrompreis relativ unverzerrt auf das Unternehmen wirkt. Aufgrund des hohen Anteils der Stromkosten an seiner Wertschöpfung ist es sensibel für die Erhöhung der Energieeffizienz. Informationsmängel liegen somit nicht vor. Ebenfalls aufgrund seiner Größe kann das Unternehmen seine Flexibilität optimal auf Flexibilitätsmärkten vermarkten und ist nicht von Markteintrittsbarrieren betroffen.

Da im Falle von Trimet kaum Hemmnisse für die Wirkung von Preisanreizen aus dem Großhandels-Strommarkt vorliegen, kann es auch sensibel auf die Preissignale, die die Wechselwirkungen aus Flexibilität und Effizienz wiedergeben, reagieren. Dieser Zusammenhang wurde hier genau untersucht und eine Investitionsentscheidung getroffen, die ein neues Verhältnis zwischen Flexibilität und Effizienz definiert.

4.3.2 Pumpenanlagen

Im Unterschied zum vorherigen Beispiel ist hier von Bedeutung, dass Pumpenanlagen einen deutlich geringeren Stromverbrauch haben als die Anlage im ersten Fallbeispiel der Aluminium-Elektrolyse. Als Querschnittstechnologie stehen sie nicht im direkten Fokus des Produktionsprozesses des Unternehmens. Daraus folgen eine Reihe von Konsequenzen für die Wechselwirkung zwischen Flexibilität und Effizienz, die dazu führen, dass es dem Unternehmen deutlich erschwert wird, im Sinne des Gesamtsystems optimale Abwägungen zwischen Effizienz und Flexibilität (operativ und investiv) vorzunehmen.

Wenn das Preissignal des Großhandelsmarktes nicht direkt auf das Unternehmen wirkt, wird auch keine operative Anpassung des Verhältnisses zwischen Flexibilität und Effizienz stattfinden. Dies bedeutet, dass beispielsweise laufend Flexibilität vermarktet wird und die Anlage in einem ungünstigeren Betriebspunkt läuft, obwohl es zum Beispiel gesamtwirtschaftlich günstiger wäre, zu bestimmten Zeitpunkten darauf zu verzichten und in einem effizienteren Betriebspunkt zu fahren.

Die Struktur der Netznutzungsentgelte könnte zu finanziellen Einbußen beim Reserveabruf führen. Dieses Szenario hätte zur Folge, dass auf den Einsatz von Flexibilität verzichtet wird und beispielsweise stattdessen eine höhere Energieeffizienz erzielt wird. Dieses Hemmnis würde den operativen Einsatz von Flexibilität betreffen, könnte aber dazu führen, dass Investitionen eher in Maßnahmen zur Erhöhung von Energieeffizienz als in die Vergrößerung der Flexibilität der Anlage gelenkt werden.

Auch bestehen Hemmnisse für den Marktzugang zu Flexibilitätsmärkten. Das Unternehmen ist auf Aggregatoren angewiesen, um seine Flexibilität als Produkt zu vermarkten. Falls Aggregatoren vom Lieferanten unabhängige Unternehmen sind, benötigen diese einen Zugang zum Bilanzkreis des Lieferanten, was eine Hürde darstellt.

Für investive Entscheidungen über Flexibilität und Effizienz sind weitere Hemmnisse von Bedeutung. So können für Pumpenanlagen Informationsmängel sehr relevant sein. Während die Effizienz von Pumpen in der Regel gut dokumentiert ist, ist dies für Flexibilitätspotenziale von Pumpenanlagen nicht der Fall. Da die Nutzung von Flexibilitäten in einer Pumpenanlage komplexe Regelungs- und Steuerungstechnologien erfordert, ist die Information des Herstellers von Regelungstechnik über künftig erforderliche Regelungstechnologien sehr wichtig. Besonders relevant dürfte sowohl das Informationsdefizit an sich als auch die Unsicherheit über zukünftige Ertragsmöglichkeiten aus der Bereitstellung von Flexibilitäten sein.

4.4 Zwischenfazit

Die Abwägung zwischen Flexibilität und Effizienz funktioniert idealerweise über Strommärkte und Preissignale für definierte Produkte. Die Preissignale stellen im operativen Betrieb Knappheitssignale dar, die Einsatzentscheidungen von Erzeugungsseite, aber auch der Verbrauchsseite steuern. Aber auch in der dynamischen Betrachtung, unter Berücksichtigung von Investitionsentscheidungen, sollten Preise die Investitionssignale auch für Investitionen in Flexibilität und Effizienz liefern.

In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass aus einer Reihe von Gründen eine Abwägung zwischen Effizienz und Flexibilität von technischen Anlagen nicht in einer Weise stattfindet, wie sie für das Stromversorgungssystem insgesamt optimal wäre. Dafür sind die Verzerrung von Preissignalen und verschiedene weitere Hemmnisse verantwortlich.

So kommen die geringen Preissignale für Flexibilität kaum bei den Endkunden an oder werden zusätzlich durch

Ausnahme- und Sonderregelungen abgeschwächt. Diese Verzerrung kann zu einer veränderten Wahl des Betriebspunktes im Status quo oder zu einem veränderten Investitionsverhalten führen und damit zu einer Abweichung vom volkswirtschaftlichen Optimum. Daneben existieren zahlreiche Informationsmängel, die dazu führen, dass keine optimalen Abwägungen zwischen Flexibilität und Effizienz sowie operativen und investiven Fällen durchgeführt werden.

Aus der Diskussion der Fallstudien wurde deutlich, dass diese Verzerrungen von Preissignalen und weiteren Hemmnissen in der Praxis sehr unterschiedlich stark ausgeprägt sein können. Während im Beispiel der Aluminiumelektrolyse operative und investive Entscheidungen relativ unverzerrt zu treffen sind, ist dies bei kleinen Anlagen beziehungsweise Querschnittstechnologien nicht der Fall. Diese Technologien stellen aber gleichzeitig einen bedeutenden Teil des Effizienz- und auch Flexibilitätspotenzials.

5. Wie können die Anreize für Flex-Efficiency verbessert werden? Zusammenfassung und Perspektiven

In diesem Kapitel werden zunächst die wesentlichen Aussagen der vorangegangenen Kapitel der Studie kurz zusammengefasst (5.1). Anschließend werden erste Ansätze für Maßnahmen skizziert, die geeignet sind, die beschriebenen Hemmnisse für den optimalen Einsatz von Flexibilität und Effizienz abzubauen (5.2). Schließlich wird ein Ausblick gegeben, der auch den weiteren Forschungsbedarf aufzeigt (5.3).

5.1 Wechselwirkungen von Flexibilität und Effizienz: Zusammenfassung der Analyse

Bei der Betrachtung der Wechselwirkungen von Flexibilität und Effizienz von technischen Anlagen ist die operative von der investiven Sichtweise zu unterscheiden. Aus operativer Sicht besteht die Wechselwirkung meist darin, dass eine höhere Energieeffizienz mit einer geringeren Flexibilität einhergeht. Durch eine Investition kann die operative Kennlinie verschoben werden, die die erreichbaren Verhältnisse zwischen Flexibilität und Effizienz anzeigt. Diese Verschiebung kann dazu führen, dass sowohl Flexibilität als auch Effizienz gesteigert werden. Es existieren aber auch zahlreiche technische Konstellationen, bei denen durch Investitionsentscheidungen entweder die Effizienz oder die Flexibilität auf Kosten der jeweils anderen Eigenschaft gesteigert wird. Damit ergibt sich auch hier eine Verschiebung der Kennlinie und es ist über das Ausmaß der Verschiebung zu entscheiden. Dazu braucht der Investor geeignete Kriterien beziehungsweise Anreize.

Die höchsten Flexibilitätsanforderungen aus Systemsicht ergeben sich in Situationen extremer Residuallast beziehungsweise bei Residuallaständerungen. Diese Extrema prägen sich im Zeitverlauf stärker aus. Der Wert der Energieeffizienz wird besonders für die Situationen hoher Residuallast deutlich. Energieeffizienz führt ebenfalls zu Einsparungen im Bereich der Betriebskosten von Spitzen-

lastkraftwerken, Investitionskosten in Kraftwerksleistungen sowie Infrastrukturkosten. Die Herausforderung besteht also darin, die operativen und investiven Entscheidungen über das realisierte Ausmaß von Flexibilität und Effizienz mit den sich zeitlich ändernden Systemanforderungen in Einklang zu bringen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Wert von Flexibilität im Zeitverlauf aufgrund der zunehmenden Extrema der Residuallast und damit der Nachfrage nach Flexibilität voraussichtlich steigt. Dieser Anstieg kann stärker sein, als der Anstieg des Wertes von energetischer Effizienz.

Verzerrte Preissignale und weitere Hemmnisse führen dazu, dass eine Abwägung zwischen Effizienz und Flexibilität von technischen Anlagen häufig nicht in einer Weise stattfindet, wie sie für das Stromversorgungssystem optimal wäre. Die gilt vor allem für den investiven Fall. Allerdings existieren hier große Unterschiede in der Praxis. Im Beispiel der Aluminiumelektrolyse sind operative und investive Entscheidungen relativ unverzerrt zu treffen, da die Anlagen aufgrund ihrer Leistung an den Flexibilitätsmärkten direkt teilnehmen können und von verzerrenden Bestandteilen des Strompreises weitgehend befreit sind. Dies ist bei kleinen Anlagen beziehungsweise Querschnittstechnologien nicht der Fall, weil die Anlagen aufgrund ihrer relativ geringeren Bedeutung im Wertschöpfungsprozess nicht im Fokus stehen, zur Verwertung der Flexibilität aggregiert werden müssen und schließlich keine unverzerrten Preissignale erhalten. Diese Technologien stellen aber gleichzeitig einen bedeutenden Teil des Effizienz- und auch Flexibilitätspotenzials. Daher sind schwerpunktmäßig für dieses Segment Ansätze aufzuzeigen, wie welche Maßnahmen geeignet sind, um die Hemmnisse abzubauen und eine Optimierung von Flexibilität und Effizienz in die Praxis umzusetzen.

5.2 Ansätze zur Überwindung der Hemmnisse für Flex-Efficiency

Das Konzept der Flex-Efficiency zielt darauf, dass Flexibilität und Effizienz auf der Nachfrageseite aus Systemperspektive in optimaler Höhe und in einem optimalen Verhältnis zueinander sowie zum optimalen Zeitpunkt eingesetzt werden. Die Analyse hat gezeigt, dass noch große unerschlossene Potenziale für Energieeffizienz und Flexibilität existieren. Die Nutzung dieser Potenziale wird im künftigen Stromversorgungssystem wichtiger. Allerdings wurde eine Reihe von Hemmnissen identifiziert, die der Umsetzung von Flex-Efficiency entgegenstehen. Sie wirken zugleich unterschiedlich je nach Technologietypus (spezifische Anlagen oder Querschnittstechnologie) sowie Verbrauchergruppen (industrielle oder private Verbraucher; energieintensive oder durchschnittlich stromverbrauchende Wirtschaft).

Maßnahmen zur Überwindung der Hemmnisse müssen daher auf die jeweils betroffene Verbrauchergruppe sowie die technisch-ökonomischen Eigenschaften der jeweiligen Flex-Efficiency-Potenziale zugeschnitten werden.

Nachfolgend werden die Hemmnisse und mögliche Ansätze zu ihrer Überwindung schematisch differenziert betrachtet. Der Schwerpunkt liegt in der Identifikation der Maßnahmen, die effiziente investive Entscheidungen in Flexibilität oder Sparsamkeit auch für kleinere Anlagen (zum Beispiel Querschnittstechnologien) ermöglichen.

Verbesserte Preissignale

Die Preissignale des Großhandelsmarktes müssen möglichst unverzerrt auf die unternehmerischen Akteure einwirken können und stabile Anreize für Investitionen in das richtige Verhältnis von Flexibilität und Energieeffizienz bieten. Wenn dies nicht der Fall ist, können regulatorische Maßnahmen angebracht sein.

In Kapitel 4.2 wurde ausgeführt, dass die Mess- und Abrechnungsprozesse bei Abnehmern mit einem Verbrauch von mehr als 100 MWh pro Jahr die Einführung von Real-Time-Pricing erlauben würden. Diese Möglichkeit wird

aufgrund derzeit geringer Preisvolatilitäten nicht ausgenutzt. Erst eine künstliche Verstärkung dieser Anreize, beispielsweise durch eine zeitlich dynamische EEG-Umlage könnte eventuell Lieferanten motivieren, solche Tarife anzubieten. Da die Anreize auf dem Großhandelsstrompreis beruhen, würde nur das Verhältnis zwischen Flexibilität und Effizienz verändert. Der Investitionsanreiz in Flexibilität würde jedoch verstärkt. Somit müsste geprüft werden, ob eine solche Verstärkung aufgrund von einhergehenden Transaktionskosten und Wechselwirkungen angemessen erscheint. Da sehr große Stromverbraucher teilweise oder ganz von der Zahlung der EEG-Umlage befreit sind, hätte diese Verstärkung hier eine geringere Anreizwirkung als für die nicht privilegierten Kundengruppen.

Verbessertes Marktdesign von Flexibilitätsmärkten

Märkte für Flexibilitätsprodukte liefern im Idealfall die richtigen Preissignale für die Nachfrage nach Flexibilität. Wird den Verbrauchern der Zugang zu den Märkten erschwert, kann sich kein aus Systemsicht optimales Niveau einstellen.

Die beschriebenen Marktzutritts hemmnisse durch Präqualifikationsanforderungen und Produktdefinition sollten dazu weiter reduziert werden, um das Flexibilitätspotenzial der Nachfrageseite auszunutzen.

Bestehende und zukünftige Flexibilitätsmärkte sollten soweit möglich zusammengefasst werden, um ihre Liquidität zu erhöhen und stabilere Preissignale zu vermitteln. Gleichzeitig sollte vermieden werden, dass bestimmte Flexibilitäten (wie abschaltbare Lasten) durch regulierte Preise gegenüber anderen Flexibilitäten bevorzugt werden.

Spezielle Märkte für Effizienz befinden sich noch in einem Anfangsstadium. Liegen ausreichend Erfahrungen mit Effizienzmärkten vor, sollte geprüft werden, ob Effizienzmärkte mit Flexibilitätsanforderungen (zum Beispiel als Mindeststandards) in Ausschreibungen ergänzt werden können. Diese Überlegung fußt auf der Annahme, dass in bestimmten Konstellationen Preisanreize kein ausreichendes Signal für Investitionen in Flexibilität und/oder Effizienz liefern können, sondern ordnungspolitische Instru-

mente eingesetzt werden sollten. Dies könnte der Fall sein, wenn zahlreiche der hier beschriebenen Hemmnisse parallel auftreten.

Überprüfung von Netznutzungsentgelten und weiteren Abgaben und Umlagen

Netznutzungsentgelte, aber auch Abgaben und Umlagen verzerren systematisch das Preissignal des Großhandelsmarktes. Effizienz wird durch energiebezogene Abgaben überproportional angereizt. Für den marktdienlichen Einsatz von Flexibilität wiederum bestehen Hemmnisse durch Netzentgelte entsprechend der Jahreshöchstlast.

Eine neue Strukturierung der Netzentgelte sowie der Abgaben und Umlagen ist eine komplexe Aufgabe, bei der die Anreizwirkungen auf Flexibilität und Effizienz zu berücksichtigen sind. Neben diesen Aspekten existieren jedoch weitere Anforderungen, die bei einer Neustrukturierung ebenfalls zu beachten sind. Im Weißbuch Strommarkt hat das BMWi daher vorgeschlagen, ein konsistentes Zielmodell für die Struktur dieser Kostenelemente zu entwickeln.

Überwindung von Informationsmängeln und Unsicherheit

Die Analysen haben gezeigt, dass Informationsmängel in mehreren Richtungen die Umsetzung von Flex-Efficiency behindern. Diesen Informationsmängeln ist daher auf mehreren Ebenen zu begegnen:

Informationsmängel, die die operativen und investiven Wechselwirkungen von Effizienz und Flexibilität bei verschiedenen Anlagen betreffen, können durch finanziell geförderte Pilotprojekte oder durch Ausschreibungen vermindert werden. Pilotprojekte können Vorbildwirkung für verschiedene Akteure entfalten. Darunter sind Unternehmen der gleichen Branche wie auch bei Herstellern von Anlagen und Regelungstechnik, aber auch Lieferanten und Aggregatoren. Auch Ausschreibungen können das Risiko des Investors mindern; dem Bereich der Querschnittstechnologien sollte hierbei besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Gerade im Bereich der Energieeffizienz zielen viele der bislang eingesetzten Instrumente darauf ab, Informationsmängel zu beheben. Allerdings wird im Rahmen dieser Projekte das Thema Flexibilität nicht parallel adressiert. Vielmehr sind zum Beispiel die durch den NAPE im Hinblick auf Energieeffizienz definierten Maßnahmen relativ unabhängig von den Flexibilitätsmaßnahmen, die durch das Weißbuch Strommarkt adressiert werden. Hier wäre eine engere Verzahnung von Maßnahmen nützlich.

Schließlich sollte durch aufbereitete Studien zur möglichen mittelfristigen Entwicklung von Flexibilitätsmärkten den Marktteilnehmern eine Einschätzung der Flexibilitäts- und Effizienznachfrage sowie der zu erwartenden Preise ermöglicht werden.

Umgang mit Unteilbarkeiten (und sonstigen Anpassungsmängeln)

Unteilbarkeiten erscheinen ein praktisch wenig bedeutendes Hemmnis zu sein. Anpassungsmängel in Form von unterschiedlichen Renditeerwartungen für verschiedene Investitionen lassen sich mit wirtschaftspolitischen Instrumenten nur schwierig beseitigen. Allenfalls wäre hier denkbar, dass Investitionen in bestimmte Flexibilitäts- oder Effizienzmaßnahmen subventioniert werden, um die erzielbaren Renditen auszugleichen. Allerdings wäre hier eine schwierige Abgrenzung zu treffen, welche Art von Investitionen bezuschusst werden sollten.

5.3 Anknüpfungspunkte in der betrieblichen Praxis

Für Schlussfolgerungen in der betrieblichen Praxis sollten die beiden Perspektiven, operativer Betrieb und Investition, zunächst separat betrachtet werden.

Operativer Betrieb

Um optimale Abwägungen zwischen der Nutzung von Flexibilitäten und Verbräuchen und den damit einhergehenden Effizienzverlusten durchführen zu können, ist zunächst eine Informationsbasis zu schaffen. Existierende Umweltmanagementsysteme, die in der Regel auch Energiemanagementsysteme integrieren, zielen auf Stromver-

brauchsmengen und die damit einhergehenden Umweltwirkungen ab. Sie aggregieren jedoch Jahresgrößen und berücksichtigen nicht die Einbettung des Unternehmens in ein Gesamtsystem, das Strom zu unterschiedlichen Zeiten unterschiedliche Wertigkeiten und auch Emissionen zuweist. So wird beispielsweise in Umweltberichten Energieverbrauch mit mittleren Primärenergiefaktoren bewertet, obwohl der Primärenergiefaktor des Stroms zeitlich mit den eingesetzten Erzeugungstechnologien variiert. Daher sollte die Perspektive von Flexibilität in Energiemanagementsysteme integriert werden.

Im Rahmen einer auf ein Energiemanagementsystem aufbauenden Ist-Analyse sollten nicht nur Effizienzpotenziale, sondern auch Flexibilitätspotenziale ermittelt werden. Diese Anforderung könnte in die Energiemanagementnorm ISO 50001 mit einbezogen werden. Operative Flex-Efficiency für ein Unternehmen könnte daher heißen:

- Das Unternehmen ist sich der vorhandenen Flexibilitäten und der relevanten, sie beschreibenden Parameter bewusst,
- es kennt den Einfluss auf die Effizienz, wenn die Flexibilität eingesetzt wird, und
- es kann im zeitlichen Verlauf Anpassungen vornehmen, das heißt das Verhältnis zwischen Effizienz und Flexibilität laufend verändern.

Investitionsentscheidungen

Im Hinblick auf Investitionsentscheidungen ist das Konzept von Flex-Efficiency weiter zu fassen. Hier wäre wünschenswert, dass in die Investitionsentscheidungen künftige Flexibilitätsanforderungen des Gesamtsystems optimal mit einbezogen werden. Dies könnte in Form von Szenarioanalysen geschehen, in denen die möglichen Angebote von Flexibilität und die dafür realisierbaren Erträge einbezogen werden.

Diese Anforderung ist jedoch nicht nur aus Sicht von investierenden Unternehmen zu stellen, sondern auch bei Konstrukteuren und Anlagenplanern zu verankern. Hier muss unter Umständen von jahrelang eingeschliffenen Vorgehensweisen der betriebswirtschaftlichen

Optimierung abgewichen werden, Anlagen auf Dauerbetrieb und geringen Energieverbrauch auszulegen und stattdessen auch Flexibilitätsoptionen mit zu berücksichtigen.

5.4 Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf

Im Rahmen dieser explorativen Kurzstudie konnte das Thema Flex-Efficiency nur angerissen werden. Die Untersuchung folgender Themenbereiche ist notwendig, um weitere Schritte zur Operationalisierung des Themas in Unternehmen sowie zur Schaffung der notwendigen Rahmenbedingungen zu unternehmen.

Quantifizierung von Wechselwirkungen und Potenzialen

Im Rahmen dieser Studie wurden Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Effizienz grundsätzlich dargestellt, jedoch nur an zwei Fallstudien konkretisiert. Für eine Abschätzung der Relevanz des Themas wäre es nötig, weitere Quantifizierungen vorzunehmen. Dazu müssen weitere technische Fallgruppen detaillierter auf Wechselwirkungen untersucht werden, um die Ergebnisse auf Deutschland hochrechnen zu können. So wäre zu untersuchen: Wie und wo finden sich die Überschneidungsbereiche? Wie relevant sind die Wechselwirkungen? Ergeben sich neue technische Möglichkeiten beziehungsweise Entwicklungen aus der Optimierung?

Wirkungen von Flex-Efficiency im Gesamtsystem

Werden Effizienz- und Flexibilitätspotenziale so optimal genutzt, wie in dieser Studie theoretisch abgeleitet, so hätte dies Auswirkungen auf die künftigen Systemkosten der Stromerzeugung. In welchem Ausmaß diese durch die Anwendung des Konzeptes von Flex-Efficiency gesenkt werden können, wäre durch eine Modellierungsstudie zu ermitteln.

Praktische Erprobung

Im Rahmen von Pilotvorhaben sollten praktische Erfahrungen in verschiedenen Branchen oder Technologieklassen gesammelt werden, Effizienz und Flexibilität gemeinsam zu optimieren. Dazu wären entsprechende Pilotprojekte zu konzipieren.

Vertiefende Analyse der Wirksamkeit von Preissignalen und weiteren Hemmnissen

Die Funktionsfähigkeit der Strommärkte konnte in dieser Studie nur grob beschrieben werden. Hier könnte die existierende, getrennte Literatur für die Analyse von Hemmnissen im Effizienz- und Flexibilitätsbereich auf einer detaillierteren Ebene zusammengeführt werden, um genauer zu analysieren, inwieweit sich die Tatbestände ähneln oder ob bei einer übergreifenden Optimierung von Flexibilität und Effizienz neue Marktunvollkommenheiten auftreten. Darauf aufbauend können Vorschläge zur Anpassung oder Neuentwicklung von wirtschaftspolitischen Instrumenten unterbreitet werden.

Des Weiteren sind Instrumente zur verbesserten Weitergabe von Preissignalen des Großhandelsmarktes wie die dynamische EEG-Umlage oder dynamische Netzentgelte

in ihrer Wirkung auf Effizienz und Flexibilität näher zu analysieren. Die operativen und investiven Auswirkungen auf Flexibilität und Effizienz müssten detaillierter untersucht werden, um Chancen und Risiken genauer beurteilen zu können.

Ergänzende Instrumente entwickeln und analysieren

Es existiert eine Vielzahl an Vorschlägen für ergänzende Instrumente, darunter Ausschreibungen, die bisher für den Bereich der Effizienz und der Flexibilität separat betrachtet wurden. Diese sollten daraufhin analysiert werden, inwieweit sie das Konzept der Flex-Efficiency unterstützen oder in die jeweilige Maßnahme integriert werden können, beispielsweise der Nachweis eines definierten Maßes an Flexibilität als Voraussetzung für die Teilnahme an Ausschreibungen für Energieeffizienzmaßnahmen.

6. Literaturverzeichnis

Agora Energiewende (2012): 12 Thesen zur Energiewende. Ein Diskussionsbeitrag zu den wichtigsten Herausforderungen im Strommarkt (Langfassung). Berlin.

Blesl, Markus; Kessler, Alois (2013): Energieeffizienz in der Industrie. Springer, Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://gso.gbv.de/DB=2.1/PPNSET?PPN=757313736>, zuletzt geprüft am 01. 07. 2015.

BMWi (2015): Ein Strommarkt für die Energiewende. Ergebnispapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Weißbuch), zuletzt geprüft am 28. 08. 2015.

Ecofys (2014): Der Spotmarktpreis als Index für eine dynamische EEG-Umlage. Vorschlag für eine verbesserte Integration Erneuerbarer Energien durch Flexibilisierung der Nachfrage, Kurzstudie im Auftrag von Agora Energiewende. Berlin, zuletzt geprüft am 17. 09. 2015.

Fraunhofer ISI; Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE) (2013): Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland. Endbericht einer Studie von Fraunhofer ISI und der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft. Agora Energiewende.

ifeu; LBD (2014): Energieeffizienz als Geschäftsmodell. Ein marktorientiertes Integrationsmodell für Artikel 7 der europäischen Energieeffizienzrichtlinie. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, zuletzt geprüft am 15. 09. 2015.

Krzikalla, Norbert; Achner, Sigg; Brühl, Stefan (2013): Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus Erneuerbaren Energien. Studie im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbare Energie. BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH. Online verfügbar unter http://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/Plattform/BEE-Plattform-Systemtransformation_Ausgleichsmoeglichkeiten.pdf, zuletzt geprüft am 09. 10. 2015.

Pehnt, Martin (Hg.) (2010): Energieeffizienz. Ein Lehr- und Handbuch. 1., korrigierter Nachdr. Springer, Berlin. Online verfügbar unter <http://gso.gbv.de/DB=2.1/PPNSET?PPN=656560401>, zuletzt geprüft am 02. 07. 2015.

Prognos AG; IAEW (2014): Positive Effekte von Energieeffizienz auf den deutschen Stromsektor. Endbericht einer Studie von der Prognos AG und dem Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft im Auftrag der Agora Energiewende. Berlin, zuletzt geprüft am 08. 09. 2015.

Buber, Tim; Gruber, Anna; Klobasa, Marian; von Roon, Serafin (2013a): Lastmanagement für Systemdienstleistungen und zur Reduktion der Spitzenlast. In: DIW Vierteljahreshefte zur Wirtschaftsforschung 3.

Buber, Tim; Gruber, Anna; Klobasa, Marian; von Roon, Serafin (2013b): Lastmanagement für Systemdienstleistungen und zur Reduktion der Spitzenlast. In: DIW Vierteljahreshefte zur Wirtschaftsforschung 3.

Wuppertal Institut (2006): Optionen und Potenziale für Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen. Kurzfassung, Endbericht im Auftrag der E.ON AG, bearbeitet von Thomas, Stefan et al., Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH.

Connect (2014): Aktionsplan Lastmanagement. Studie im Auftrag von Agora Energiewende.

AUF DEUTSCH

12 Thesen zur Energiewende

Ein Diskussionsbeitrag zu den wichtigsten Herausforderungen im Strommarkt (Lang- und Kurzfassung)

Aktionsplan Lastmanagement

Endbericht einer Studie von Connect Energy Economics

Auf dem Weg zum neuen Strommarktdesign: Kann der Energy-only-Markt 2.0 auf Kapazitätsmechanismen verzichten?

Dokumentation der Stellungnahmen der Referenten für die Diskussionsveranstaltung am 17. September 2014

Ausschreibungen für Erneuerbare Energien

Welche Fragen sind zu prüfen?

Das deutsche Energiewende-Paradox. Ursachen und Herausforderungen

Eine Analyse des Stromsystems von 2010 bis 2030 in Bezug auf Erneuerbare Energien, Kohle, Gas, Kernkraft und CO₂-Emissionen

Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2014

Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2015

Die Entwicklung der EEG-Kosten bis 2035

Wie der Erneuerbaren-Ausbau entlang der langfristigen Ziele der Energiewende wirkt

Die Rolle des Emissionshandels in der Energiewende

Perspektiven und Grenzen der aktuellen Reformvorschläge

Die Rolle der Kraft-Wärme-Kopplung in der Energiewende

Status quo, Perspektiven und Weichenstellungen für einen sich wandelnden Strom- und Wärmemarkt

Der Spotmarktpreis als Index für eine dynamische EEG-Umlage

Vorschlag für eine verbesserte Integration Erneuerbarer Energien durch Flexibilisierung der Nachfrage

Die Sonnenfinsternis 2015: Vorschau auf das Stromsystem 2030

Herausforderung für die Stromversorgung in System mit hohen Anteilen an Wind- und Solarenergie

Effekte regional verteilter sowie Ost-/West-ausgerichteter Solarstromanlagen

Eine Abschätzung systemischer und ökonomischer Effekte verschiedener Zubauszenarien der Photovoltaik

Elf Eckpunkte für einen Kohlekonsens

Konzept zur schrittweisen Dekarbonisierung des deutschen Stromsektors

Erneuerbare-Energien-Gesetz 3.0

Konzept einer strukturellen EEG-Reform auf dem Weg zu einem neuen Strommarktdesign

Energieeffizienz als Geschäftsmodell

Ein marktorientiertes Integrationsmodell für Artikel 7 der europäischen Energieeffizienzrichtlinie

Kapazitätsmarkt oder Strategische Reserve: Was ist der nächste Schritt?

Eine Übersicht über die in der Diskussion befindlichen Modelle zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit in Deutschland

Klimafreundliche Stromerzeugung: Welche Option ist am günstigsten?

Stromerzeugungskosten neuer Wind- und Solaranlagen sowie neuer CCS- und Kernkraftwerke auf Basis der Förderkonditionen in Großbritannien und Deutschland

Kostenoptimaler Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland

Ein Vergleich möglicher Strategien für den Ausbau von Wind- und Solarenergie in Deutschland bis 2033

Publikationen von Agora Energiewende

Negative Strompreise: Ursache und Wirkungen

Eine Analyse der aktuellen Entwicklungen – und ein Vorschlag für ein Flexibilitätsgesetz

Netzentgelte in Deutschland

Herausforderungen und Handlungsoptionen

Positive Effekte von Energieeffizienz auf den deutschen Stromsektor

Endbericht einer Studie von der Prognos AG und dem Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft (IAEW)

Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien

Handlungsvorschläge basierend auf einer Analyse von Potenzialen und energiewirtschaftlichen Effekten

Stromspeicher für die Energiewende

Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz

Transparenzdefizite der Netzregulierung

Bestandsaufnahme und Handlungsoptionen

Wie kommt Öko-Strom zum Verbraucher?

Eine Analyse von Stand und Perspektiven des Direktvertriebs von gefördertem Erneuerbare-Energien-Strom

AUF ENGLISCH

12 Insights on Germany's Energiewende

An Discussion Paper Exploring Key Challenges for the Power Sector

Benefits of Energy Efficiency on the German Power Sector

Final report of a study conducted by Prognos AG and IAEW

Comparing Electricity Prices for Industry

An elusive task – illustrated by the German case

Comparing the Cost of Low-Carbon Technologies: What is the Cheapest Option?

An analysis of new wind, solar, nuclear and CCS based on current support schemes in the UK and Germany

Cost Optimal Expansion of Renewables in Germany

A comparison of strategies for expanding wind and solar power in Germany

Increased Integration of the Nordic and German Electricity Systems

Modelling and Assessment of Economic and Climate Effects of Enhanced Electrical Interconnection and the Additional Deployment of Renewable Energies

Power Market Operations and System Reliability

A contribution to the market design debate in the Pentilateral Energy Forum

The Danish Experience with Integrating Variable Renewable Energy

Lessons learned and options for improvement

The Integration Cost of Wind and Solar Power

An Overview of the Debate of the Effects of Adding Wind and Solar Photovoltaics into Power Systems

Understanding the Energiewende

FAQ on the ongoing transition of the German power system

Wie gelingt uns die Energiewende?

Welche konkreten Gesetze, Vorgaben und Maßnahmen sind notwendig, um die Energiewende zum Erfolg zu führen? Agora Energiewende will helfen, den Boden zu bereiten, damit Deutschland in den kommenden Jahren die Weichen richtig stellt. Wir verstehen uns als Denk- und Politiklabor, in dessen Mittelpunkt der Dialog mit den relevanten energiepolitischen Akteuren steht.



Agora Energiewende

Rosenstrasse 2 | 10178 Berlin | Germany

T +49 (0)30 284 49 01-00

F +49 (0)30 284 49 01-29

www.agora-energiewende.de

info@agora-energiewende.de

