

# Strategische Flexibilität im Fokus: Eine qualitative Analyse energieintensiver Industriestandorte in Österreich

Vanessa Zawodnik<sup>1</sup>, Jasmin Pflieger<sup>2</sup>, Jana Reiter<sup>3</sup>, Kerstin Pflieger-Schopf<sup>4</sup>,  
Martin Zaversky<sup>5</sup>, Thomas Kienberger<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, Montanuniversität Leoben, Parkstraße 31,  
+43 3842 4025420, vanessa.zawodnik@unileoben.ac.at, www.evt-unileoben.at

<sup>2</sup>AEE INTEC, Feldgasse 19, 8200 Gleisdorf,  
+43 3112 5886 464, j.pflieger@aee.at, www.aee-intec.at

<sup>3</sup>AEE INTEC, Feldgasse 19, 8200 Gleisdorf,  
+43 3112 5886 453, j.reiter@aee.at, www.aee-intec.at

<sup>4</sup> Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, Montanuniversität Leoben, Parkstraße 31,  
+43 3842 4025409, kerstin.pflieger-schopf@unileoben.ac.at, www.evt-unileoben.at

<sup>5</sup>Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, Montanuniversität Leoben, Parkstraße 31,  
+43 3842 4025405, martin.zaversky@unileoben.ac.at, www.evt-unileoben.at

<sup>6</sup>Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, Montanuniversität Leoben, Parkstraße 31,  
+43 3842 4025400, thomas.kienberger@unileoben.ac.at, www.evt-unileoben.at

**Kurzfassung:** In einem klimaneutralen Energiesystem der Zukunft spielen Flexibilitäten sowohl auf der Seite der Energieerzeugung als auch des Energieverbrauchs eine entscheidende Rolle. Mit dem verstärkten Ausbau erneuerbarer Energieträger ergibt sich ein Paradigmenwechsel in der Art und Weise, wie Energie bereitgestellt wird. [1] Flexibilität ist einer von mehreren Bausteinen zur Realisierung der Energiewende und zur nachhaltigen Integration von erneuerbaren Energien. [2] Neben der Herausforderung der Integration von bestehenden und neuen Technologien muss sich auch das Konsumverhalten der Verbraucher im Energiesystem anpassen, um zu jedem Zeitpunkt Versorgungssicherheit gewährleisten zu können. [3,4] Insbesondere im Hinblick auf flexibles Verbraucherverhalten liegt ein besonderes Augenmerk auf energieintensiven Industriesektoren, die in Österreich etwa ein Drittel des Gesamtenergiebedarfs ausmachen. [5] Im Rahmen des Forschungsprojekts DSM\_OPT werden zwei repräsentative Use-Cases – ein Elektrostahlwerk und eine Großbäckerei – betrachtet, um zu eruieren, wie sich die für Demand Side Management (DSM) nutzbaren Flexibilitäten an diesen Industriestandorten a) unterscheiden und b) nutzen lassen. Dieser Beitrag analysiert die Betriebscharakteristik der Prozesse der beiden Use-Cases und identifiziert und kategorisiert im Anschluss mögliche qualitative Flexibilitätpotenziale.

**Keywords:** Flexibilitäten, Demand Side Management, Industrie, Eisen- und Stahlindustrie, Lebensmittelindustrie

# 1 Begriffsdefinition, Material und Methodik

In diesem Abschnitt werden zunächst die Begriffe „Flexibilität“, „Demand Side Management“ und „Flexibilitätspotenzial“ diskutiert. Neben einer allgemeinen Begriffserklärung wird auch eine Kategorisierung von Flexibilitäten vorgestellt, auf die sich die Beurteilung der Flexibilitätspotenziale der beiden Industriestandorte stützt. Anschließend erfolgt die Vorstellung der beiden Standorte und die berücksichtigten Prozesse bzw. Anlagen für die Analyse.

## 1.1 Flexibilität

Flexibilität bezeichnet grundsätzlich die Fähigkeit von Verbrauchern, ihren Energiebezug durch interne Maßnahmen an Markt- oder Systemsignale anzupassen. [2] Im industriellen Kontext ist Flexibilität auf verschiedenen Ebenen zu verstehen und zu bewerten. Eine einheitliche Kategorisierung fehlt in der Literatur. Die vorliegende Arbeit stützt sich auf die Einteilung von Flexibilität nach Sethi und Sethi (1990) [6], die grundsätzlich drei Ebenen (mit Unterkategorien) unterscheiden. Zur besseren Anwendbarkeit wurden die ursprünglichen Bezeichnungen der Ebenen angepasst und in Komponenten-, System- und Gesamtsystemebene umbenannt:

1. Komponentenebene (Maschinen / Anlage)
  - Maschinenflexibilität: bezieht sich auf die verschiedenen Arbeitsvorgänge, die eine Maschine bzw. eine Anlage ausführen kann, ohne dass der Wechsel von einem Vorgang zum anderen mit hohem Aufwand verbunden ist.
  - Materialflussflexibilität: beschreibt die Menge der möglichen Material- oder Produktwege und damit die Fähigkeit, verschiedene Produkte oder Einsatzstoffe effizient im Produktionsprozess zu verschieben, einzusetzen und zu verarbeiten.
  - Operationsflexibilität: bezieht sich darauf, dass das Produkt auf verschiedene Arten hergestellt werden kann, z.B. Änderung der Reihenfolge oder Substitution von Herstellungsschritten.
2. Systemebene (Produktionssysteme)
  - Prozessflexibilität: bezeichnet die Möglichkeit, unterschiedliche Produkte herstellen zu können, ohne dass dabei bedeutende Umrüstungen erforderlich sind oder hohe Kosten anfallen.
  - Produktflexibilität: bezieht sich auf den Aufwand, der betrieben werden muss, um neue Produkte zu integrieren oder alte Produkte zu ersetzen.
  - Routenflexibilität: ist die Fähigkeit eines Systems, Produkte über alternative Herstellungsrouten zu produzieren.
  - Volumenflexibilität: beschreibt die Fähigkeit eines Systems, wirtschaftlich auf verschiedenen Auslastungsniveaus betrieben zu werden.
  - Expansionsflexibilität: bezieht sich auf das Potenzial zur Steigerung der Kapazität und Leistungsfähigkeit eines Systems.
3. Gesamtsystemebene (Produktionsstätte)
  - Programmflexibilität: beurteilt, ob eine Produktionsstätte für eine gewisse Zeit unbeaufsichtigt betrieben werden kann.
  - Produktionsflexibilität: beschreibt das gesamte Produktportfolio, das am Standort hergestellt werden kann, ohne dass zusätzliche Maßnahmen erforderlich sind.
  - Marktflexibilität: erfasst die Fähigkeit einer Produktionsstätte, auf sich ändernde Marktbedingungen zu reagieren.

## 1.2 Demand Side Management und Potenzialbegriff

Das Konzept des DSM umfasst ein breites Portfolio von Maßnahmen zur Steuerung von Verhaltensmustern auf der Nachfrageseite. Das reicht von der Verbesserung der Energieeffizienz über zeitgebundene Energietarife zur Beeinflussung bestimmter Nutzerverhaltensweisen bis hin zu Reaktionen auf dynamische Marktentwicklungen in Echtzeit. Ein bedeutender Vorteil von DSM liegt darin, dass es in den meisten Fällen kostengünstiger ist, Lasten intelligent zu beeinflussen, als neue flexible Energieerzeugungseinheiten oder Speicher zu bauen. [7] Darüber hinaus gilt DSM als sehr effiziente Maßnahme zur Steigerung der Flexibilität, da z.B. im Vergleich zum Betrieb von Speichern keine Umwandlungsverluste auftreten. [8] Grundlegende Voraussetzungen für die erfolgreiche Integration von DSM-Maßnahmen sind das Vorhandensein von Flexibilitätspotenzialen, Anreize durch geeignete Marktmechanismen [9] und die aktive Teilnahme von Industriestandorten am Strommarkt. [10]

Beim Begriff „Flexibilitätspotenzial“ gibt es in der Literatur, ähnlich wie für den Begriff „Flexibilität“, keine eindeutigen Regeln. Die vorliegende Untersuchung zieht folgende Abgrenzungen für unterschiedliche generelle Potenzialbegriffe heran, die auch für Flexibilitätspotentiale gelten [11]: Das theoretische Potenzial ist eine rein rechnerische Größe und beschreibt z.B. die installierte Leistung einer Anlage oder die Ist-Last. Der Begriff wird durch das technische Potenzial eingegrenzt, das sicherheits- und anlagenrelevante Aspekte berücksichtigt. Dieses kann weiter in verschiedene Anteile, das wirtschaftliche Potenzial (wirtschaftlich nutzbarer Anteil des technischen Potenzials) und das praktische Potenzial (Anteil, der unternehmensinterne, regulatorische und administrative Hemmnisse beachtet), unterteilt werden. Die Schnittmenge von wirtschaftlichem und praktischem Potenzial ergibt schließlich das realisierbare Potenzial. Obwohl der Potenzialbegriff unterschiedlich verwendet und verstanden wird, weisen Studien oft die technische Potenziale aus. Für die vorliegende Untersuchung liegt der Fokus auf der Ausweisung von realisierbaren Potenzialen unter Beachtung von standortspezifischen Einschränkungen und Randbedingungen.

## 1.3 Use-Case Elektrostahlwerk

Die Stahlherstellung gilt als eine der kompliziertesten Industrien in Bezug auf die Prozessplanung, die sich durch eine groß angelegte, mehrstufige und produktübergreifende Prozesse und parallele Werkzeuge, komplexe Abhängigkeiten und Energiebeschränkungen auszeichnet. [12] Der betrachtete Standort ist in zwei Bereiche unterteilt: das Stahlwerk und das Walzwerk (Abbildung 1) und wird hauptsächlich mit zwei Energieträgern, Strom (zu zwei Drittel) und Erdgas (zu einem Drittel), versorgt. Der gesamte Produktionsprozess wird von einer Hauptprozesskette dominiert und beginnt mit der Aufschmelzung von Stahlschrott im Elektrolichtbogenofen, der aufgrund mehrerer Schmelzphasen entsprechende Leistungsspitzen im Verbrauch aufweist. Nach der Feinungsphase erfolgt der Abstich des flüssigen Rohstahls in eine feuerfest ausgemauerte Pfanne und der Transport zur sekundärmetallurgischen Behandlung im Pfannenofen. Der Pfannenofen dient auch als Puffer, um zeitliche Diskrepanzen zwischen Elektrolichtbogenofen und Strangguss auszugleichen. Im Strangguss erfolgt der Phasenübergang von flüssig zu fest und der erstarrte Stahl wird in Knüppel geschnitten. Die meisten Anlagen im Stahlwerk werden über eine Entstaubungsanlage abgesaugt, wobei vor allem die verschiedenen Betriebsphasen des

Elektrolichtbogenofens die Entstaubungsleistung beeinflussen. Mit dem Strangguss endet das Stahlwerk und der Bereich des Walzwerks beginnt. Im Walzwerk werden die Knüppel zunächst im Stoßofen wieder erwärmt und auf Walztemperatur gebracht und danach in der Walzstraße auf die gewünschte Dimension gewalzt. Die Produkte gelangen entweder als Stäbe aufs Kühlbett oder werden zu Coils aufgespult. Es besteht die Möglichkeit, die Coils auf der Umspulanlage zu größeren Coils (3 bis 5 t) umzuspulen.

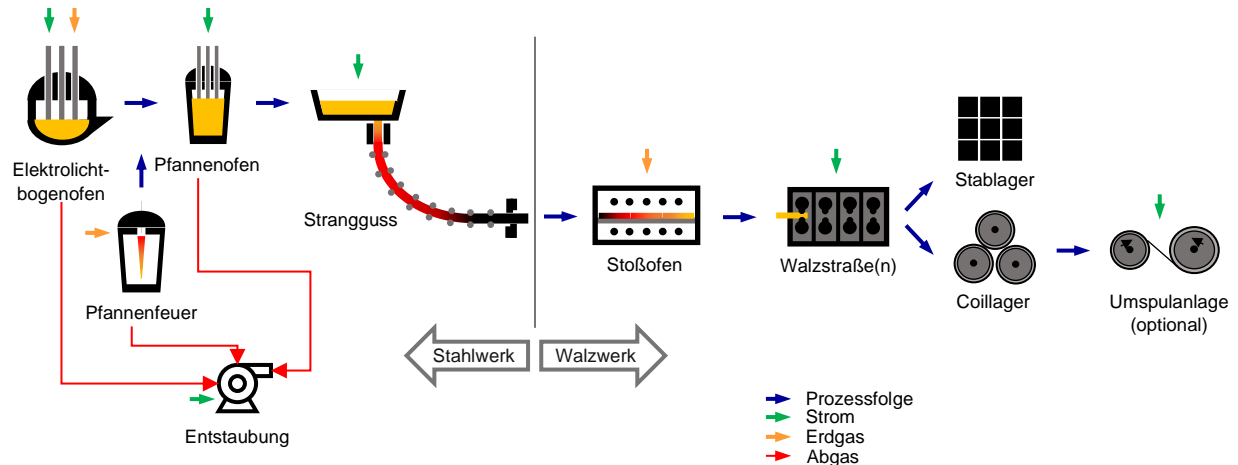


Abbildung 1: Prozesskette im Use-Case Elektrostahlwerk mit berücksichtigten Anlagen

Die genannten Anlagenteile sind insgesamt für ca. 85 % des Energiebedarfs des Standortes verantwortlich. Nebenanlagen, Sozialgebäude, usw. werden in der folgenden Flexibilitätsanalyse nicht berücksichtigt. Eine relative Aufteilung des Energiebedarfs für die Anlage ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Elektrolichtbogenofen ist mit 49 % relativem Energiebedarf das mit Abstand energieintensivste Anlage am Standort, gefolgt vom Stoßofen (19 %) und der Walzstraße (7 %).

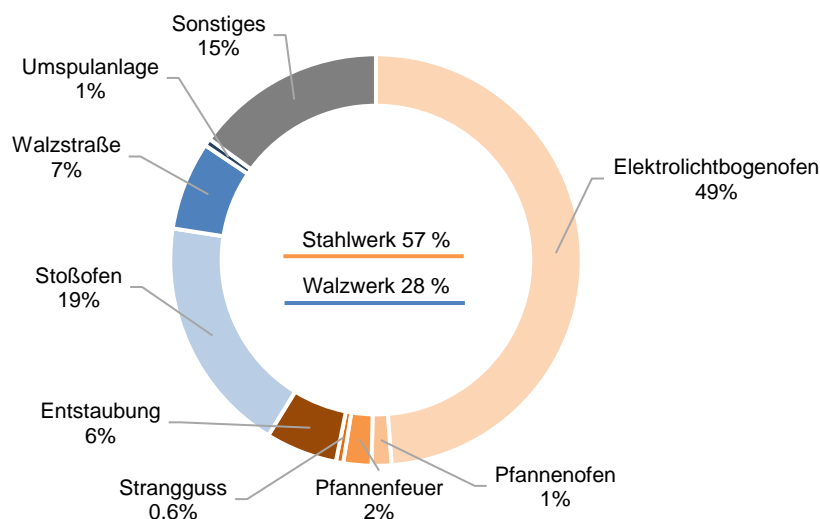


Abbildung 2: Relativer Energiebedarf der berücksichtigten Anlage für den Use-Case Elektrostahlwerk

#### 1.4 Use-Case Großbäckerei

In einer Bäckerei beeinflussen zahlreiche Faktoren den Produktionsprozess und die Produktionswege variieren, z.B. wird eine klassische Semmel nach der Teigzubereitung in

einem Gärschrank gelagert, bevor sie gebacken oder zum späteren Backen eingefroren wird. Andere Produkte wie Blechkuchen durchlaufen keinen Gärvorgang und werden direkt gebacken, während andere Produkte (z.B. Krapfen) frittiert werden. Zusätzlich müssen sowohl saisonale Effekte wie Umgebungstemperatur als auch kleinere zeitliche Schwankungen, wie Feiertage beachtet werden, da sie das Produktionsvolumen, die Produktpalette und den Energie- sowie Ressourcenverbrauch beeinflussen. Folglich gestaltet sich die Produktionsplanung komplex, weswegen hauptsächlich auf langjährige Erfahrungen der Bäcker:innen zurückgegriffen wird, statt Digitalisierung und Automatisierung zu nutzen. In der betrachteten Großbäckerei erfolgt die Produktion an zwei Standorten sowohl langfristig für Firmenkunden (Standort 1: große Volumina) als auch kurzfristig für Bäckereifilialen (Standort 2: kleinere Volumina). Standort 1 setzt auf automatisierte Prozesse und spezialisiert sich auf die Produktion großer Mengen weniger Produkte. Die Filialproduktion an Standort 2 basiert auf einer täglichen Backliste, die jeweils für die Produktion des Folgetages ausgegeben wird. Dadurch ergeben sich täglich wechselnde Betriebszeiten der Öfen und anderen für die Teigbereitung notwendigen Maschinen. Diese und der vorgegebene Zeitpunkt zur Auslieferung stellen die Randbedingungen dar, innerhalb derer eine gewisse Flexibilität bezüglich der Reihenfolge der Herstellung der unterschiedlichen Backwaren, sowie deren Verteilung auf die unterschiedlichen Öfen besteht. Die unterschiedlichen Prozessspezifikationen an den beiden Produktionsstandorten wirken sich wesentlich auf die vorhandenen Flexibilitäten aus. Für Standort 2 wird der relative Energieverbrauch der verschiedenen Aggregate in Abbildung 3 dargestellt: Der Hauptanteil entfällt auf die unterschiedlichen Öfen (Etagen-, Thermoöl-, Stikkenöfen) mit 82 %, während die Kühlung für etwa 11 % des Energiebedarfs verantwortlich ist. Die restlichen 7 % enthalten u.a. die zur Teigbereitung benötigten Maschinen.

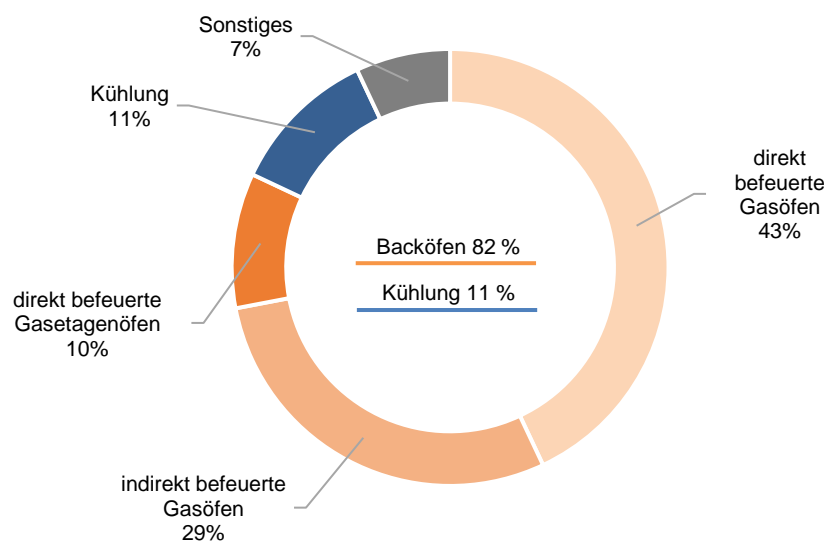


Abbildung 3: Relativer Energiebedarf der berücksichtigten Anlage für den Use-Case Großbäckerei (Standort 2)

## 1.5 Methodik

Für beide Use-Cases werden Flexibilitätpotenziale qualitativ nach der Kategorisierung von Sethi und Sethi (1990) [6] bewertet. Diese Bewertung erfolgt auf verschiedenen Maßstabsebenen (Komponenten-, System- und Gesamtsystemebene). Zusätzlich wird eine

dreistufige Skala eingeführt, um die Potenziale eindeutiger zu bewerten: vorhanden (+), vorhanden mit Einschränkung (~) und nicht vorhanden (-). Die Randbedingungen, Einschränkungen usw., die zu dieser Bewertung führen, werden ebenfalls diskutiert.

Im Elektrostahlwerk werden auf Komponentenebene die als relevant identifizierten Produktionsanlagen (Abbildung 1) bewertet. Für die Untersuchung auf Systemebene wurde das Elektrostahlwerk in die beiden Bereiche Stahlwerk und Walzwerk unterteilt. Für die Großbäckerei werden auf Komponentenebene ebenfalls die relevanten Produktionsanlagen auf ihre Flexibilität untersucht. Die System- und Gesamtsystemebene wird in die zwei verschiedenen Produktionsstandorte eingeteilt.

## 2 Ergebnisse

In Tabelle 1 zeigt sich, dass im Elektrostahlwerk auf Komponentenebene unter Berücksichtigung von Randbedingungen und Prozessvorgaben nur begrenzt Flexibilitäten vorhanden sind. Jede Anlage erfüllt spezifische Aufgaben, z.B. kann der Elektrolichtbogenofen nur Stahlschrott aufschmelzen, aber nicht sekundärmetallurgisch behandeln. Weitere Anlagen (Strangguss, Entstaubung, Stoßofen, Walzstraße und Umspulanlage) können keine zusätzlichen Aufgaben übernehmen oder Anlagen ersetzen. Daher wird die Maschinenflexibilität als nicht vorhanden eingestuft.

Auch bei der Bewertung der Materialflusssystemflexibilität gibt es deutliche Einschränkungen, hauptsächlich bedingt durch die lineare Struktur des Produktionsprozesses und zeitliche sowie räumliche Abhängigkeiten im Stahlwerk. Jede Änderung führt zu weitreichenden Folgen für den nachfolgenden Downstream-Prozess, die entweder mit erhöhten Kosten oder sinkender Produktionsleistung einhergehen. Insbesondere in Bezug auf den Elektrolichtbogenofen werden in der Literatur Flexibilitätspotenzialen erwähnt [3,13], basierend auf dem unkomplizierten Anfahr- und Abschaltverhalten. Das führt zu der Schlussfolgerung, dass sich der Elektrolichtbogen für die Realisierung von Lastabwürfen eignet, wobei der Einfluss auf die Materialflüsse vernachlässigt wird. [14] Ein flexibles Abschalten während einer Charge verlängert die Chargendauer und kann schon bei relativ kurzen Verzögerungen zu Versorgungsproblemen im nachgeschalteten Strangguss führen. [15] Auch Wärmeverluste durch Abkühlung der Rohstahlschmelze müssen berücksichtigt werden, was zu einem erhöhten spezifischen Energieeinsatz führen kann. [16] Neben Gründen der Energieeffizienz sind auch Qualitätseinbußen im Produkt bei verändertem Aufheiz- bzw. Abkühlverhalten zu berücksichtigen. [11] Der Materialfluss im Stahlwerk ist somit weder räumlich noch zeitlich flexibel. Die Bereiche Stahl- und Walzwerk sind durch ein Knüppellager entkoppelt, das theoretisch flexiblere Materialflüsse für Stoßofen und die Walzstraße ermöglicht. In Hinblick auf die Energieeffizienz ist es jedoch sinnvoller, die produzierten Knüppel aus dem Strangguss direkt weiter zu verarbeiten, wodurch sich wieder eine direkte zeitliche Abhängigkeit ergibt. Die Umspulanlage ist ebenfalls theoretisch entkoppelt, jedoch lässt die aktuelle Auslastung selten Verschiebungen des Materialflusses zu.

Hinsichtlich Operationsflexibilität sind keine Flexibilitäten vorhanden. Die Abfolge der Prozessschritte ist festgelegt, um die gewünschte Stahl- und Produktqualität zu produzieren. Zum Beispiel kann die Feinungsphase im Elektrolichtbogenofen erst gestartet werden, wenn der gesamte Stahlschrott aufgeschmolzen wurde.

Tabelle 1: Qualitative Bewertung der Flexibilitäten auf Komponenten-Ebene im Elektrostahlwerk

	Maschinen- flexibilität	Materialflusssystem -flexibilität	Operations- flexibilität
<b>Stahlwerk</b>			
Elektrolichtbogenofen	-	-	-
Pfannenofen	-	-	-
Strangguss	-	-	-
Pfannenfeuer	-	-	-
Entstaubung	-	-	-
<b>Walzwerk</b>			
Stoßofen	-	~	-
Walzstraße(n)	-	~	-
Umspulanlage	-	~	-

Auf der Systemebene des Stahlwerks wurden keine Flexibilitätspotenziale identifiziert. Die Prozessflexibilität tendiert gegen Null, da ausschließlich eine Stahlqualität (Betonstahl) produziert wird. Eine Änderung der Stahlqualität würde nicht nur eine Anpassung des Einsatzmaterials erfordern, sondern auch Auswirkungen auf die Prozessführung im Elektrolichtbogen- und Pfannenofen haben. Das hätte direkten Einfluss auf die Regelung der Entstaubungsanlage, die Pfannenfeuerlogistik und die Gießparameter im Strangguss. Ähnliche Umstände gelten für die Produktflexibilität bei der Einführung neuer Produktqualitäten oder Substitutionen. Auch Routenflexibilität ist nicht vorhanden, da es keine alternativen Herstellungsrouten oder redundante Anlagen am Standort gibt. Die Anlagen im Stahlwerk, insbesondere der Elektrolichtbogenofen, lassen sich auf unterschiedlichen Produktivitätsniveaus nicht wirtschaftlich betreiben. Obwohl theoretisch möglich, den Elektrolichtbogenofen nur teilweise zu befüllen, würde dies zu höheren spezifischen Kosten und verfehlten Produktionszielen führen.

Im Walzwerk ist Prozessflexibilität vorhanden, da unterschiedliche Produkte (Stäbe und Coils in verschiedenen Dimensionen) hergestellt werden können. Die dafür notwendigen Umrüstzeiten in der Walzstraße sind in der Preisbildung berücksichtigt. Theoretisch ist auch eine Änderung der Auftragsanordnung möglich, solange die Liefertreue eingehalten wird. Die Einführung neuer Produkte, hängt von der Umsetzbarkeit einer entsprechenden Umrüstung der Walzgestelle ab und muss für den Einzelfall geprüft werden. Routenflexibilität ist auch im Walzwerk nicht gegeben, da keine alternativen Herstellungsrouten vorhanden sind. Volumenflexibilität innerhalb gewisser Grenzen ist wahrscheinlich möglich, solange die Liefertreue eingehalten wird. Ein Betrieb auf sehr niedriger Auslastung ist wahrscheinlich nicht wirtschaftlich, da der Stoßofen die Knüppel trotzdem auf die gleiche Arbeitstemperatur für das Walzen bringen muss und der spezifische Energiebedarf für den Aufheizvorgang überdurchschnittlich hoch wird. Außerdem müsste eine niedrigere Auslastung im Walzwerk mit einer geringeren Auslastung im Stahlwerk einhergehen, was aus verschiedenen Gründen nicht wirtschaftlich ist (z.B. Personalkosten, diskontinuierlicher Betrieb des Stranggusses). Die Wirtschaftlichkeit der Walzstraße und der Umspulanlage ist von variierenden Auslastungen nicht betroffen.

Aufgrund des niedrigen Automatisierungsgrads und der Abhängigkeit von Expertenwissen im Betrieb [17], ist ein unbeaufsichtigter Betrieb nahezu unmöglich. Die Programmflexibilität ist daher sehr niedrig bis nicht vorhanden. In Bezug auf die Produktionsflexibilität kann der

Standort verschiedene Produkte (Stäbe und Coils in definierten Dimensionen) herstellen, die Produktion weiterer Produkte erfordert jedoch zusätzliche Maßnahmen.

An dieser Stelle ist festzuhalten, dass weitere Flexibilitätspotenziale identifiziert wurden, die sich jedoch nicht in die Systematik von Sethi und Sethi (1990) [6] einordnen lassen. Der hier betrachtete Elektrolichtbogenofen wird sowohl mit Strom als auch mit Gas betrieben und erlaubt, innerhalb gewisser Grenzen, eine Regelung dieser Anteile. Dieser Umstand eröffnet ein Flexibilitätspotenzial, das sich z.B. auf day-ahead-Märkten zur Kostensenkung oder zur generellen CO<sub>2</sub>-Senkung nutzen lässt. Des Weiteren eröffnet auch die Pfannenlogistik, der Transport und die Bereitstellung der mit flüssigem Stahl gefüllten Pfannen im Stahlwerk, Potenziale. Im Normalfall sind drei bis vier Pfannen im Umlauf, um den flüssigen Stahl vom Abstich des Elektrolichtbogenofens zum Pfannenofen und danach zum Strangguss zu transportieren. Dafür müssen die Pfannen zum richtigen Zeitpunkt eine bestimmte Temperatur aufweisen, um Temperaturschocks des flüssigen Stahls zu vermeiden. Die Temperaturregelung der Pfannen wird in den Pfannenfeuern realisiert. Nach einer gewissen Einsatzdauer sind Wartungsarbeiten an den Pfannen notwendig. Aktuell werden die Pfannenlogistik und Wartungsentscheidungen überwiegend manuell und durch das Personal gesteuert. In Hinblick auf eine digitalisierte Pfannenlogistik, identifizieren die Autoren hier ein Flexibilitätspotenzial zur Energie(-kosten)einsparung.

Tabelle 2: Qualitative Bewertung der Flexibilitäten auf System- und Gesamtsystemebene im Elektrostahlwerk

		Stahlwerk	Walzwerk	Elektrostahlwerk (Gesamtwerk)
System- ebene	Prozessflexibilität	-	+	
	Produktflexibilität	-	~	
	Routenflexibilität	-	-	
	Volumenflexibilität	-	~	
	Expansionsflexibilität	n.b.	n.b.	n.b.
Gesamtsystem- ebene	Programmflexibilität			-
	Produktionsflexibilität			~
	Marktflexibilität	n.b.	n.b.	n.b.

Bei der Maschinenflexibilität in der Großbäckerei zeigt sich ein gemischtes Bild: Bei einem Ausfall der Teigbereitungsmaschinen kann nur auf händische Verarbeitung ausgewichen werden, die nicht praktikabel ist. Bei den Öfen ist Maschinenflexibilität nur unter Einbußen der Produktqualität möglich, da die Art des Ofens, in dem ein Produkt gebacken wird, wesentlich dazu beiträgt. Im Gegensatz dazu kann in den vorhandenen Gärunterbrechern die Temperatur sehr einfach angepasst werden, sodass ein fließender Übergang zwischen der Nutzung als Gärunterbrecher oder Tiefkühler möglich ist.

In Hinblick auf die Materialfluss- und Operationsflexibilität muss beachtet werden, dass ein Produkt nur dann die gewünschten Eigenschaften aufweist, wenn die Rezepte eingehalten werden. Das beinhaltet sowohl die notwendigen Verarbeitungsschritte als auch festgelegte Teigparameter, wie Festigkeit und Temperatur. Um einen idealen Teig herzustellen, müssen die verwendete Wassermenge bzw. -temperatur manuell angepasst werden, da diese stark von der Beschaffenheit des Mehls und Außentemperatur abhängen. Hier fließen die Erfahrungen der Bäcker:innen wesentlich mit ein. Das führt zu einer deutlichen Einschränkung der Materialfluss- und Operationsflexibilität.



Tabelle 3: Qualitative Bewertung der Flexibilitäten auf Komponenten-Ebene in der Großbäckerei

	Maschinen- flexibilität	Materialfluss- flexibilität	Operations- flexibilität
Teigbereitungsmaschinen	-	-	-
Backöfen	~	-	-
Kühlung	+	-	-

Auf Systemebene konnten bei der Großbäckerei verschiedene Flexibilitätspotenziale identifiziert werden, wobei eine Unterscheidung zwischen den zwei Produktionsstandorten wichtig ist. Am Standort 1 werden wenige Produkte in großen Mengen hergestellt; hier dominieren Automatisierung und Spezialisierung. Die Umrüstung von Maschinen, um unterschiedliche Erzeugnisse zu produzieren, kann bis zu einer Stunde dauern, weswegen auf große (Tages-)Chargen gesetzt wird. Die Einführung eines neuen Produktes ist mit beträchtlichem Aufwand verbunden, da verschiedene Tests durchgeführt werden müssen, um die Maschineneinstellungen entsprechend zu regeln. Deswegen wird auf eine Standardpalette von Produkten gesetzt, die nur eingeschränkt verändert wird. Aufgrund dieser Umstände wird sowohl die Produkt- als auch Prozessflexibilität als nicht vorhanden eingestuft. Standort 2 zeigt ein gegensätzliches Bild: Das Produktportfolio ist groß und die Produktion von verschiedenen Backwaren ohne große Umrüstzeiten möglich, wobei sich die genauen Sortimente saisonal oder an Feiertagen orientieren. Verschiedene Produktionslinien sind speziell darauf ausgelegt, in wenigen Minuten flexibel zwischen Produkten zu wechseln, wobei die Produktreihenfolge auch von enthaltenen Allergenen und Bio-/Nicht-Bio-Artikeln abhängig ist. Auch die Einbindung neuer Produkte ist im Normalfall ohne signifikante Änderungen möglich. Produkt- und Prozessflexibilität sind somit an Standort 2 gegeben.

Bei den Öfen kann ein gewisses Maß an Routenflexibilität identifiziert werden, da jeweils mehrere Öfen der gleichen Bauart vorhanden und nicht die gesamte Zeit voll ausgelastet sind. Eine weitere Möglichkeit zur Routenflexibilität bei beiden Standorten besteht auch über die (Nicht-)Einbindung der Kühlung. Bei fast allen Artikeln (außer Brot) gibt es unterschiedliche mögliche Fertigungsstufen bei der Auslieferung: vorgebacken / tiefgekühlt, vorgegart, roh / tiefgekühlt, fertig gebacken. Hierbei bietet die Lagerung die Möglichkeit, die Produktionsschritte der Teigbereitung vom Backvorgang zu entkoppeln.

Volumenflexibilität ist notwendig und mit Einschränkungen möglich, da sich die Produktpalette saisonal ändert. Dabei geht es vor allem um besondere Backwaren zu bestimmten Feiertagen (z.B. Ostern, Allerheiligen). Am Standort 1 stellen die Maschinen das Bottleneck dar, da diese momentan bereits fünf Tage die Woche voll ausgelastet sind, weswegen bei Spitzenzeiten ein zusätzlicher Produktionstag pro Woche angehängt wird. Am Standort 2 stellt das Personal die Engstelle dar, weswegen einerseits Sonderschichten geplant werden und andererseits zusätzliches Personal bei Stoßzeiten eingestellt wird. Daher muss auch die Expansionsflexibilität an den Standorten als kaum vorhanden eingestuft werden.

Im Standort 1 der Großbäckerei ist ein Großteil der Prozesssysteme automatisiert und auf bestimmte Produkte spezialisiert. Da für alle Produkte genaue Parameter wie z.B. Ruhe- / Gärzeiten eingehalten werden müssen, um die Qualität der Backwaren zu garantieren, können kleine Abweichungen im Prozess negative Konsequenzen haben. Das führt zur Notwendigkeit der Beaufsichtigung jedes Produktionsschrittes und somit zu keiner Programmflexibilität. Bei der Produktionsflexibilität spielt wie bereits zuvor erwähnt, die Automatisierung ebenfalls eine

entscheidende Rolle und führt dazu, dass das Standardsortiment selten erweitert wird und hier kaum Flexibilität vorhanden ist. Am Standort 2 sind wesentlich weniger Prozesse automatisiert und werden stattdessen von Hand erledigt; damit ist auch keine Programmflexibilität gegeben. Im Hinblick auf die Produktionsflexibilität muss berücksichtigt werden, dass hier ein wesentlich breiteres Spektrum an Artikeln produziert und zu Spitzenzeiten (Allerheiligen, Fasching) Standardprodukte für einen bestimmten Zeitraum aus dem Sortiment genommen werden, um Kapazitäten für die Herstellung der seasonspezifischen Produkte zu schaffen. Dadurch kann die Produktionsflexibilität als gegeben angesehen werden.

Die Marktflexibilität ist an beiden Standorten in unterschiedlichem Maß vorhanden: Während Standort 1 quartalsweise auf Wünsche der Partner reagieren kann, da die Menge an benötigten Ressourcen eine kürzere Änderungsspanne unmöglich macht, kann Standort 2 theoretisch täglich auf die Verkaufszahlen der Filialen reagieren. Typischerweise werden diese wochenweise betrachtet, was vor allem bei Auslauf eines saisonalen Produktes für die Bewertung der Fortführung wichtig ist.

*Tabelle 4: Qualitative Bewertung der Flexibilitäten auf System- und Gesamtsystemebene in der Großbäckerei*

		Standort 1	Standort 2
System- ebene	Prozessflexibilität	-	+
	Produktflexibilität	-	+
	Routenflexibilität	+	+
	Volumenflexibilität	~	~
	Expansionsflexibilität	-	-
Gesamtsystem- ebene	Programmflexibilität	-	-
	Produktionsflexibilität	~	+
	Marktflexibilität	~	+

### 3 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Analyse fokussiert sich auf unterschiedliche Industriestandorte – ein Elektrostahlwerk und zwei Produktionsstätten einer Großbäckerei –, um deren Flexibilitätspotenziale zu untersuchen. Durch eine gründliche Analyse der Betriebscharakteristika und Prozesse wurden Flexibilitäten auf verschiedenen Ebenen betrachtet, von Komponenten- über System- bis hin zur Gesamtsystemebene [6]. Im Elektrostahlwerk ergeben sich begrenzte Flexibilitätspotenziale, insbesondere bedingt durch die Natur des Produktionsprozesses. Die zeitliche und räumliche Abhängigkeit der Materialflüsse im Stahlwerk limitiert die Flexibilität erheblich. Trotzdem konnten folgende Flexibilitätspotenziale identifiziert werden, die die Grundlage für eine nachfolgende Optimierung bilden, um die Flexibilitätspotenziale zu quantifizieren:

- Elektrolichtbogenofen: Regelung der Strom- und Gasversorgung unter Ausnutzung volatiler Energiepreise bzw. zur Senkung produktionsgebundener CO<sub>2</sub>-Emissionen
- Pfannenlogistik: Optimierte Bereitstellungs- und Wartungsentscheidungen zur Erhöhung der Energieeffizienz
- Walzstraßen: Optimale Auftragsplanung für einen zeitlichen Horizont von mehreren Tagen, unter Ausnutzung von schwankenden Strompreisen zur Kostensenkung

Es ist wichtig zu betonen, dass die hier identifizierten Flexibilitätspotenziale spezifisch für ein Betonstahlwerk und nicht auf jedes andere Elektrostahlwerk (z.B. Edelstahlwerk) übertragbar sind.

In der Großbäckerei eröffnen auf Komponentenebene die Gärunterbrecher Maschinenflexibilität, die auch schon im Produktionsalltag genutzt werden. Auf Systemebene zeigt speziell Standort 2 große Potenziale in der Produkt- als auch Prozessflexibilität sowie auf Gesamtsystemebene in der Produktions- und Marktflexibilität. Standort 1 hat auf System- und Gesamtsystemebene durch die automatisierte und spezialisierte Produktion nur eingeschränkte Potenziale, mit Ausnahme der Routenflexibilität. Die hier identifizierten Flexibilitätspotenziale zur weiteren Quantifizierung lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Backöfen (Standort 2): Optimierter Backplan (Anordnung der Produkte) zur Reduzierung der Lastspitzen für einen Tag
- ?

Der Ausblick dieser Analyse richtet sich auf die Notwendigkeit einer umfassenderen Betrachtung, die Aspekte wie das Anfahrverhalten der Anlage, die Flexibilität in Bezug auf Energieträgersubstituierung oder die Marktflexibilität auf Komponentenebene einschließt. Darüber hinaus wird darauf hingewiesen, dass neben der Identifizierung von Flexibilitätspotenzialen auch das Fehlen geeigneter Marktmechanismen eine Herausforderung für die erfolgreiche Implementierung von DSM darstellt. Aktuell ist die Teilnahme von Industriestandorten am Strommarkt begrenzt, was eine effektive Nachfragesteuerung erschwert.

## References

- [1] Finn P, Fitzpatrick C. Demand side management of industrial electricity consumption: Promoting the use of renewable energy through real-time pricing. *Applied Energy* 2014;113:11–21.
- [2] Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung. Prospektive Flexibilitätsoptionen in der produzierenden Industrie: Bericht zum Projekt "WindNODE - Das Schaufenster für intelligente Energie aus dem Nordosten Deutschlands" 2020:97.
- [3] Marchiori F, Belloni A, Benini M, Cateni S, Colla V, Ebel A et al. Integrated Dynamic Energy Management for Steel Production. *Energy Procedia* 2017;105:2772–7. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.597>.
- [4] Zhang Q, Grossmann IE. Enterprise-wide optimization for industrial demand side management: Fundamentals, advances, and perspectives. *Chemical Engineering Research and Design* 2016;116:114–31.
- [5] Rahnema Mobarakeh M, Kienberger T. Climate neutrality strategies for energy-intensive industries: An Austrian case study. *Cleaner Engineering and Technology* 2022;10:100545.
- [6] Sethi AK, Sethi SP. Flexibility in manufacturing: A survey. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 1990;1990(2):289–328.
- [7] Palensky P, Dietrich D. Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 2011;7(3):381–8.
- [8] Finn P, Fitzpatrick C, Connolly D, Leahy M, Relihan L. Facilitation of renewable electricity using price based appliance control in Ireland's electricity market. *Energy* 2011;36(5):2952–60. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.038>.
- [9] O'Connell N, Pinson P, Madsen H, O'Malley M. Benefits and challenges of electrical demand response: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014;39:686–99.
- [10] Ma O, Alkadi N, Cappers P, Denholm P, Dudley J, Goli S et al. Demand response for ancillary services. *IEEE Transactions on Smart Grid* 2013(4):1988–95.
- [11] Ausfelder F, Seitz A, Roon S von. Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie: Methodik, Potenziale, Hemmnisse. 1st ed. Frankfurt am Main; 2018.
- [12] Castro PM, Sun L, Harjunkoski I. Resource–Task Network Formulations for Industrial Demand Side Management of a Steel Plant. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2013;52(36):13046–58. <https://doi.org/10.1021/ie401044q>.

- [13] Gruber A. Zeitlich und regional aufgelöstes industrielles Lastflexibilisierungspotenzial als Beitrag zur Integration Erneuerbarer Energien. undefined 2017.
- [14] Paulus M, Borggreffe F. The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany. *Applied Energy* 2011;88(2):432–41. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.03.017>.
- [15] Langrock T, Achner S, Jungbluth C, Marambio C, Michels A, Weinhard P. Potentiale regelbarer Lasten in einem Energieversorgungssystem mit wachsendem Anteil erneuerbarer Energien; 2015.
- [16] Buber T, Gruber A, Klobasa M, Roon S von. Lastmanagement für Systemdienstleistungen und zur Reduktion der Spitzenlast. *Vierteljahrshfte zur Wirtschaftsforschung* 2013;82(3):89–106. <https://doi.org/10.3790/vjh.82.3.89>.
- [17] MacRosty RDM, Swartz CLE. Dynamic Modeling of an Industrial Electric Arc Furnace. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2005;44(21):8067–83. <https://doi.org/10.1021/ie050101b>.