
















### 3.4 Blaupause 6: Flexibilisierung kontinuierlicher Produktionsprozesse

<b>Blaupause</b>											
<b>Zielgruppen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Industrieunternehmen (insb. Metall)</li> <li>■ Netzbetreiber</li> <li>■ Aggregatoren / VK-Betreiber</li> </ul>										
<b>Ausgangslage und Problemstellung</b>	<p>Im verarbeitenden Gewerbe – insbesondere in der Metall- und NE-Metallindustrie – sind stromintensive, elektrochemische und elektrothermische Prozesse in der Regel kontinuierlich. Die Prozesse benötigen eine konstante Zufuhr elektrischer Energie beispielsweise für die Elektrolyse oder Schmelzvorgänge in Lichtbogenöfen. Diese konventionellen Prozesse bieten normalerweise kein Flexibilitätspotenzial. Eine Flexibilisierung der Produktionsprozesse bedingt kapitalintensive, technische Umrüstungen, um Effizienzverluste oder Prozessstörungen zu vermeiden, wenn die für die Prozesse optimalen Arbeitspunkte zu Gunsten einer Flexibilität bereitstellung verlassen werden. Elektrische Lasten werden zusammengefasst nicht markt- oder netzdienlich betrieben, sondern grundsätzlich mit dem Ziel der Minimierung der Stromkosten.</p>										
<b>Lösungsansatz</b>	<p>Die Blaupause beschreibt, wie technische Umrüstungen und angepasste Fahrweisen die Flexibilisierung kontinuierlicher Produktionsprozesse erlauben, ohne dabei die Effizienz oder Qualität der Produktion (übermäßig) negativ zu beeinflussen. Der marktorientierte oder netzdienliche Einsatz der Produktionsanlagen ermöglicht die Senkung der Energiekosten.</p> <p>Erfolgsfaktoren für den Lösungsansatz:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Kompensation von Nebeneffekten, die sich negativ auf den Produktionsprozess auswirken, und Prozessautomatisierung</li> <li>■ Preisfluktuationen am Strommarkt bzw. monetäre Anreize des Regelenergiemarktes müssen genügen, um die signifikanten Investitionen zu rechtfertigen</li> </ul>										
<b>Einordnung der Blaupause</b>	<table border="1"> <tr> <td>Haushalte</td> <td>GHD</td> <td><b>Industrie</b></td> <td>Energie</td> </tr> <tr> <td><b>Flexibilisierung</b></td> <td>Sektorkopplung</td> <td></td> <td>Erzeugung</td> </tr> </table>	Haushalte	GHD	<b>Industrie</b>	Energie	<b>Flexibilisierung</b>	Sektorkopplung		Erzeugung		
Haushalte	GHD	<b>Industrie</b>	Energie								
<b>Flexibilisierung</b>	Sektorkopplung		Erzeugung								
<b>Technologiereifegrad</b>	<p>1 2 3 4 5 6 <b>7</b> 8 9</p> <p>TRL: Prototypen (flexible Elektrolyse, flexibler Ofen) im Betriebsumfeld getestet</p>										
<b>Eingeflossene SINTEG-Aktivitäten</b>	<table border="0"> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>■ Flex-Aluminium</td> <td></td> <td>■ Power-to-Aluminium ■ Elektrolichtbogenofen</td> <td>■ Flex-Werkzeugkasten</td> </tr> </table>							■ Flex-Aluminium		■ Power-to-Aluminium ■ Elektrolichtbogenofen	■ Flex-Werkzeugkasten
											
	■ Flex-Aluminium		■ Power-to-Aluminium ■ Elektrolichtbogenofen	■ Flex-Werkzeugkasten							
<b>Innovationsgehalt</b>	<p>Forschung und Entwicklung zu kontinuierlichen Produktionsprozessen zielen primär auf Effizienz- und Qualitätssteigerungen ab, ihre Flexibilisierung stand bislang nicht im Fokus. Die der Blaupause zu Grunde liegenden Technologien wurden teilweise in SINTEG entwickelt bzw. neu in Steuerungssysteme eingebunden und ihr flexibler Betrieb erprobt. Aufgrund ihrer Komplexität und der Notwendigkeit der Anpassung an lokale Gegebenheiten sind die verwendeten technischen Lösungen teilweise einmalig. Ein in SINTEG entwickelter Flex-Werkzeugkasten befähigt Betriebe ihre Flexibilitätspotenziale zu identifizieren und Vermarktungsoptionen zu bewerten.</p>										
<b>Bedingungen für Übertragbarkeit und Skalierbarkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Elektrochemischer oder elektrothermischer Prozess, der beschleunigt und verlangsamt werden kann, wenn andere Parameter konstant gehalten werden</li> <li>■ Entsprechender Spielraum in der Auslastung von Betriebsmitteln (z. B. Transformator)</li> <li>■ Fallspezifische Prüfung der technischen Rahmenbedingungen in den jeweiligen Produktionsstätten</li> </ul>										

Die Grundstoffindustrie benötigt viel elektrische Energie für elektrochemische Prozesse (z. B. Aluminium-Elektrolyse) und elektrothermische Prozesse (z. B. Stahl-Lichtbogenöfen). Die konventionelle Elektrolyse ist ein kontinuierlicher Prozess. Elektrolyseöfen werden für eine

fixe Stromstärke und Energiezufuhr konstruiert, die den Wärmehaushalt und Magnetfelder stabil halten. Bei Änderung der Stromstärke und Energiezufuhr ändert sich die Energiebilanz des Ofens und führt zu Effizienzverlusten, Prozessstörungen oder Ausfällen. Die Steuerung von Elektrolysezellen war bisher nicht möglich. In Elektrolichtbogenöfen – beispielsweise in der Stahlherstellung – werden Eingangsstoffe eingeschmolzen. Das Einschmelzen ist ein komplexer Prozess, der von einer Vielzahl von Parametern abhängt. Die elektrische Leistung lässt sich durch Einstellung verschiedener Parameter, im Wesentlichen der Spannung und des Stromes des Lichtbogens, variieren.

Die kontinuierlichen Produktionsprozesse können durch Umrüstungen so flexibilisiert werden, dass Teile der signifikanten Last als Regelenergie genutzt werden können. Flexibilisierte Produktionsprozesse ermöglichen die Anpassung der elektrischen Leistungsaufnahme und damit die gezielte Erbringung von positiver und negativer Regelenergie bzw. erhebliche (virtuelle) Speicherkapazitäten. Ferner sind die Produktionsstätten als abschaltbare Lasten einsetzbar. Das Stromnetz wird so entlastet, da große Leistungsbilanzunterschiede ausgeglichen werden können. Auch schnelle Regelenergieprodukte wie Momentanreserve sind umsetzbar.

Die Leistungsaufnahme von Elektrolysezellen kann durch steuerbare Wärmetauscher, die die Energiebilanz bei unterschiedlichen Belastungssituationen aufrechterhalten, variiert werden. Durch die Integration von steuerbaren Wärmetauschern und einer angepassten Prozesssteuerung kann die Stromzufuhr nun für einen gewissen Zeitraum variiert werden, ohne dass sich die Temperatur im Ofeninneren ändert und der spezifische Energieverbrauch konstant gehalten werden. Die thermische Kompensation führt bei einer erhöhten Produktion die überschüssige Wärme ab und isoliert die Zellen während einer Drosselung der Produktion. Eine Flexibilisierung ohne steuerbare Wärmetauscher würde der Prozesseffizienz schaden und könnte zu irreparablen Schädigungen von Elektrolysezellen führen. Die Dynamik bewirkt je nach Anordnung der Elektrolysezellen magnetische Felder, die ebenfalls durch technische Vorrichtungen kompensiert werden können.

Im Rahmen von DESIGNETZ hat die TRIMET Aluminium am Standort Essen untersucht, wie die Produktion flexibilisiert und die große Last der Aluminiumhütte genutzt werden kann, um gezielt entweder überschüssigen Strom aus regenerativer Erzeugung aufzunehmen oder bei Erzeugungsmangel den knappen Strom durch Drosselung der Produktion anderen Verbrauchern zu überlassen. Dabei bleibt der primäre Nutzen der Anlage die Herstellung von Primäraluminium. Sekundär ergeben sich jedoch weitere Einsatzmöglichkeiten, sodass beispielsweise Märkte zur Momentanreserve, Primär-, Sekundär- und Minutenreserveleistung sowie für ab- und zuschaltbare Lasten bedient werden können. Darüber hinaus kann Flexibilität im Bilanzkreismanagement, für systemdienliche Residuallastanbieter am Energy-Only-Market, für innovative Strommarkt- und Ausgleichsenergiemarktprodukte und als steuerbare Last für den Versorgungswiederaufbau genutzt werden.

Die Aluminiumelektrolyse hat ein ursprüngliches Lastprofil von 90 MW über 8.500 Volllaststunden. Durch die Flexibilisierung entsteht ein Lastprofil von 90 MW  $\pm$  22,5 MW. Die Lastgrenzen können für bis zu 48 Stunden betrieben werden. Daraus ergibt sich eine symmetrische Lastverschiebekapazität von  $\pm$  1 GWh. Die Flexibilität kann dabei mit einer hohen Dynamik (22 MW/s) bereitgestellt werden. Damit kann die Aluminium-Flex-Elektrolyse für das oben genannte Spektrum von Systemdienstleistungen genutzt werden.

Für den Schaufensterbetrieb im System Cockpit von DESIGNETZ wurden 1 MW Leistung zur Verfügung gestellt. Die Anlagen wurden über eine Schnittstellenbox physisch an das Ge-

samtsystem angebunden. Die Steuerung erfolgte in der gemeinsamen Leitwarte der Elektrolyselinie. Dort wurden die Datenaufnahme, Datenverwaltung, grafische Auswertung, intelligente Steuerung, Anlagen und Prozessüberwachung, Fahrplanübersendung und -empfang sowie die automatisierte Fahrplanumsetzung durchgeführt. Für die Prognose wurden Anlagendaten zum Betriebszustand, Fahrplandaten und Anlagen-Istwerte benötigt. Zum Abrufzeitpunkt wurde eine Führungsgröße (Soll-Leistungswert) übermittelt, die direkt in der Anlage umgesetzt wird, sofern diese in den definierten Grenzwerten liegt.

Im Rahmen von NEW 4.0 hat die TRIMET Aluminium auch am Standort Hamburg den Elektrolyseprozess flexibilisiert und 4 Mio. Euro in die Nachrüstung von zehn Elektrolysezellen investiert. Durch die im Vergleich zu der Elektrolyse in Essen unterschiedlichen Technologien, konnten die Wärmetauscher aus Essen nicht analog übernommen werden. Wärmetauscher mussten speziell für die Ofentechnologie in Hamburg, entsprechend der Zellengeometrie, entwickelt werden. So wurde eine Flexibilisierung von +/- 1,25 MW erreicht. Im Rahmen eines gemeinsamen Feldtests der NEW 4.0 Projektpartner wurden zwei Testfahrten mittels Gebot auf der Flexibilitätsplattform des Schaufensters mit automatischer Fernsteuerung durch Fernwirktechnik erfolgreich durchgeführt. Bei einer vollständigen Implementierung im Werk Hamburg und einer entsprechenden Modulation der regulären Last von ca. 240 MW könnte ein Flexibilitätspotenzial von insgesamt +40 MW für bis zu 48 Stunden und -20 MW für bis zu 96 Stunden gehoben werden. Die maximale Kapazität zur Lastverschiebung der Elektrolyse läge somit bei 3.840 MWh.

Potenzial zur Lastverschiebung durch die Flexibilisierung von kontinuierlichen Produktionsprozessen konnte auch im Hamburger Stahlwerk der ArcelorMittal aufgezeigt werden, wo unter anderem Metallschrott recycelt, in einem elektrischen Lichtbogenofen geschmolzen und anschließend zu Stahl verarbeitet wird. Im Rahmen von NEW 4.0 ist es gelungen, den Strom Einsatz im Ofen zu flexibilisieren. In den Elektrolichtbogenöfen lässt sich eine Anpassung der Schmelzleistung in Abhängigkeit an Bedingungen auf dem Strommarkt implementieren. Die Ausgangsstoffe können schneller oder langsamer eingeschmolzen werden und entsprechend zeitweise beispielsweise mehr Stahl produziert werden. Dazu wurden Arbeitspunkte für den lastflexiblen Betrieb ermittelt und in der Prozessautomatisierung implementiert.

Die mittlere Schmelzleistung von 100 MW kann infolgedessen durch die Auswahl geeigneter Arbeitspunkte um +/- 10 MW variiert werden („slow melting“ mit ca. 90 MW und „fast melting“ mit ca. 110 MW). In Zeiten mit einem Überangebot erneuerbaren Stroms kann der Schmelzprozess mit einer erhöhten Leistung betrieben werden. Übersteigt die Stromnachfrage das Angebot erneuerbaren Stroms, kann der Standard-Arbeitspunkt dagegen um 10 MW abgesenkt werden.

Die Zeitverfügbarkeit der Flexibilitätsoption wird auf 75 % geschätzt und liegt damit unterhalb der für Systemdienstleistungen geforderten Verfügbarkeit von 98 %. Stattdessen wurden Analysen angestellt, um (Stromkosten-)Einsparpotenziale durch Kurzfrishandel am Spotmarkt als Geschäftsmodell für die Flexibilisierung abzuschätzen. Dazu wurden beispielhafte Produktionswochen anhand von Simulationsrechnungen analysiert. Über die Kenntnis des zeitlichen Verlaufs des Strompreises, den Umfang des Wochenstillstands sowie von der Anzahl der produzierten Chargen mit dem gewählten Arbeitspunkt bzw. dem jeweiligen Lastgang einer Charge konnte durch eine zeitliche Umverteilung der Chargen ein Kostenoptimum als theoretisches Potenzial gefunden werden. Das „Fast Melting“ würde entsprechend in Zeiten niedriger Strompreise verlagert, hingegen Chargen unter Verwendung des „Slow Melting“ in Zeiten hoher Strompreise. Der Wartungsstillstand würde in Zeiten maximaler Strompreise verlagert.

Die Analysen ergaben ein maximales Erlöspotenzial von 2,43 €/MWh bei einer Beschaffung am Intraday-Markt, was eine Einsparung von rund 10 % der Stromkosten bedeuten würde. Dieser Vorteil stellt dabei lediglich eine theoretische Betrachtung dar, da eine perfekte Prognose des Strompreises vorausgesetzt wird und es stets zu kleineren oder größeren, ungeplanten Störungen im Prozess kommen kann, die ein permanentes Überprüfen der Produktionsplanung erforderlich machen würden. Es wurde geschlussfolgert, dass eine strompreisgeführte Fahrweise des Elektrolichtbogenofens unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Wirkungsgrade je Arbeitspunkt ab einem Spread am Strommarkt in der Größenordnung von > 50 €/MWh sinnvoll erscheint.

Das Fraunhofer IFF hat im Rahmen von WindNODE einen Flex-Werkzeugkasten für industrielle Flexibilität entwickelt, der auch kontinuierliche Produktionsprozesse berücksichtigt. Die Software ermöglicht die Analyse und Bewertung des Flexibilitätpotenzials und übersetzt die technischen Eigenschaften in Geschäftsmodelle am Strommarkt.