

LEITFADEN

ZUR TECHNO-ÖKONOMISCHEN BEWERTUNG
VON FLEXIBILITÄTSPOTENTIALEN



Impressum

Leitfaden zur techno-ökonomischen Bewertung von Flexibilitätspotentialen

Herausgeber (in alphabetischer Reihenfolge):

BEST – Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH; Inffeldgasse 21b; A-8055 Graz
Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, Department Umwelt- und Energieverfahrenstechnik
der Montanuniversität Leoben; Franz-Josef Straße 18; A-8700 Leoben

Autoren:

Bernd Riederer
Markus Gölles
Thomas Kienberger
Kerstin Pfleger-Schopf

1. Auflage

Graz/Leoben, 30.09.2025

Kontakt:

BEST: office@best-research.eu

MUL-EVT: evt@unileoben.ac.at



Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

Das Projekt *FLEXcheck* sowie dieses Dokument *Leitfaden zur techno-ökonomischen Bewertung von Flexibilitätspotentialen* wurden gefördert durch das Land Steiermark im Rahmen der **15. Ausschreibung (2022): Green Tech X** des Zukunftsfonds unter der Projektnummer **PN1513**.

Das Titelbild wurde mit Hilfe einer KI-Bildgenerierungssoftware erstellt (OpenAI DALL-E).

Alle Rechte vorbehalten

VORWORT

Die Energiewende stellt Industrie und Energiewirtschaft gleichermaßen vor große Herausforderungen. Die zunehmende Einspeisung erneuerbarer Energien führt zu stärkeren Schwankungen auf den Strommärkten und erhöhten Anforderungen an die Flexibilität im Energieversorgungssystem.

Industrieunternehmen können durch die gezielte Nutzung betrieblicher Flexibilitätspotentiale einen wichtigen Beitrag zur Systemstabilität leisten – und gleichzeitig wirtschaftliche Vorteile realisieren. Durch die oft schwer erkennbaren Abhängigkeiten innerhalb des Betriebsprozesses ist aber eine effiziente Suche nach den vorhandenen Flexibilitäten oft sehr mühsam.

Ziel des Projekts **FLEXcheck** ist es deshalb, einen einheitlichen Zugang zu schaffen, der Unternehmen – unabhängig von Branche oder Betriebsgröße – einen schnellen, fundierten Einstieg in das Thema Flexibilisierung ermöglicht. Mit Hilfe des Leitfadens sollen Hemmschwellen abgebaut, systematische Analysen erleichtert und neue Handlungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Die Zielgruppe dieses Dokuments umfasst technische und betriebswirtschaftliche Entscheider:innen, Energie- und Produktionsverantwortliche sowie alle Akteure, die sich mit der Optimierung industrieller Energiesysteme im Kontext der Energiewende beschäftigen. Neben praxisorientierten Handlungsempfehlungen bietet der Leitfaden auch theoretische Grundlagen und verweist auf ein begleitendes Simulations-Framework zur detaillierten Bewertung von Flexibilitätsoptionen.

Weitere Informationen zum Projekt, zum **FLEXcheck**-Framework und zu den beteiligten Partnerinstitutionen finden Sie auf unserer Projektwebsite unter: <https://flexcheck.best-research.eu/>
Wir wünschen Ihnen eine erkenntnisreiche Lektüre und viel Erfolg bei der Erschließung Ihrer industriellen Flexibilitätspotentiale.



Autor*innen- und Projektteam
(v.l.n.r. Bernd Riederer, Martin Puster, Kerstin Pflieger-Schopf)

Graz und Leoben, im September 2025

Bernd Riederer & Kerstin Pflieger-Schopf

INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung	1
Ziel des Leitfadens	1
Zielgruppen und Anwendungsbereiche	1
Welche Bedeutung haben Energieflexibilitätpotentiale für die Industrie?	2
Wie soll dieser Leitfaden bei der Hebung von Flexibilitätpotentialen helfen?	3
Industrielle Flexibilitätpotentiale und Vermarktungsoptionen	4
Was sind industrielle Flexibilitätpotentiale und -maßnahmen im Detail?	4
Welche Beispiele gibt es für Flexibilitätsoptionen?	6
Wie können Flexibilitätpotentiale genutzt und vermarktet werden?	7
Identifikation und Bewertung von Flexibilitätpotentialen	9
Wie können Flexibilitätpotentiale im Unternehmen identifiziert werden?	9
Schritt I: Erste Orientierung und Schnellcheck	12
Schritt II: Datenerhebung und Ableitung der Flexibilitätsoptionen	16
Schritt III: Bewertung von Flexibilitätpotentialen	21
Schritt IV: Hebung der Potentiale durch gesamtheitliche Betriebsoptimierung	24
Kernaussagen und Handlungsempfehlungen	29
Zentrale Erkenntnisse	29
Handlungsempfehlungen für die Praxis	29
Literatur und Referenzen	31

EINLEITUNG

Ziel des Leitfadens

Energieflexibilität ist für viele Unternehmen ein neues Thema – gleichzeitig eröffnet sie spannende Chancen, den Energieverbrauch effizienter zu steuern, Kosten zu senken und einen Beitrag zur Energiewende zu leisten.

Dieser hier vorliegende Leitfaden zeigt auf, was sich hinter dem Begriff **Energieflexibilität** verbirgt, wo in Industrieunternehmen **Potentiale** liegen und wie **erste Schritte in Richtung flexibler Energieanwendung** aussehen können – und all das, ohne tiefgreifende technische Vorkenntnisse vorauszusetzen. Ziel ist es, praxisnah zu informieren, Orientierung zu bieten und dabei zu unterstützen, Unternehmen fit für die Energiezukunft zu machen.

Zielgruppen und Anwendungsbereiche

Dieser Leitfaden richtet sich vorwiegend an produzierende Unternehmen, die bisher wenig oder keine Berührungspunkte mit dem Thema Flexibilität hatten und nun einen Einstieg suchen. Allerdings können auch Unternehmen, die bereits erste Schritte in Richtung Flexibilitätsschaffung und -nutzung getätigt haben, diesen Leitfaden zur weiteren Orientierung nutzen

Angesprochen sind insbesondere:

- Mitarbeitende im Energiemanagement und Gebäudemanagement,
- Verantwortliche in der Produktionsleitung, Instandhaltung und im Prozessmanagement,
- sowie Personen aus dem Controlling und der Unternehmensleitung, die sich mit Energieeffizienz, Kostenoptimierung oder Nachhaltigkeit befassen.

Jedes Unternehmen, dass sich mit dem Thema Flexibilität beschäftigen möchte, ist dazu eingeladen diesen Leitfaden zu lesen, und eigene Anwendungsbereiche davon abzuleiten.

Welche Bedeutung haben Energieflexibilitätspotentiale für die Industrie?

Unter dem **Energieflexibilitätspotential** versteht man die Fähigkeit industrieller Systeme, ihren Energiebedarf an volatile Rahmenbedingungen, z.B. sich verändernde Verfügbarkeiten im Stromnetz oder schwankende Preissignale, anzupassen. Gezielte **Energieflexibilitätsmaßnahmen** erlauben es Unternehmen, Lasten zeitlich zu verschieben, kurzfristig zu reduzieren oder vorübergehend zu erhöhen [1].

Im Energiesystem der Zukunft, welches zunehmend von erneuerbaren Energien wie Wind und Sonne geprägt sein wird, gewinnt diese Fähigkeit entscheidend an Bedeutung und kann Chancen für das Unternehmen eröffnen:

Kostenvorteile realisieren

Durch das gezielte Steuern von Lasten kann eine Optimierung des Eigenverbrauches erreicht werden. Dadurch kann dieser beispielsweise an eigene Erzeugungsanlagen oder Preisschwankungen angepasst werden. Dies kann Energie- und Netzkosten senken, wie auch die Vermeidung von Lastspitzen ermöglichen. Weiters können durch die Teilnahme an Energie- und Flexibilitätsmärkten zusätzliche Erlöse erzielt werden.

Wettbewerbsfähigkeit steigern

Flexibilität kann Prozesse effizienter machen, etwa durch optimierte Betriebsweisen, geringere Auskühlzeiten oder eine bessere Auslastung von Anlagen und Speichern.

Zur Energiewende beitragen

Indem sich der Verbrauch stärker am Energieangebot orientiert, wird die Integration erneuerbarer Energien intern und extern unterstützt.

Systemstabilität sichern

Flexible Industrieprozesse können durch die Bereitstellung von Systemdienstleistungen aktiv zur Netzstabilität und damit zur Versorgungssicherheit beitragen.

Damit wird deutlich:

Energieflexibilität ist kein rein technisches Thema, sondern ein zentraler Baustein für eine nachhaltige, wettbewerbsfähige und zukunftssichere Industrie.

Unternehmen, die dieses Potential erschließen, stärken nicht nur ihre eigene Position, sondern leisten zugleich einen wichtigen Beitrag zur Stabilität und Nachhaltigkeit des Energiesystems.

Wie soll dieser Leitfaden bei der Hebung von Flexibilitätspotentialen helfen?

In den letzten Jahren sind bereits verschiedene Leitfäden erschienen, die sich mit der Nutzung industrieller Energieflexibilität beschäftigen [1–3]. Viele davon setzen jedoch den Schwerpunkt auf einzelne Technologien oder betrachten vor allem theoretische Potentiale. Dieser Leitfaden geht einen Schritt weiter: Er soll Unternehmen dabei unterstützen, Flexibilitätspotentiale zu identifizieren, deren Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit abzuschätzen und die Umsetzung zu forcieren. Vor allem unterscheidet sich dieser Leitfaden in folgenden Punkten von bisherigen:

Ganzheitliche Systembetrachtung

Statt einzelne Maschinen oder Prozesse isoliert zu betrachten, liegt hier der Fokus auf dem gesamten Produktionsablauf. So können auch Schnittstellen und Abhängigkeiten zwischen Prozessen berücksichtigt werden.

Alle Energieträger im Blick

Flexibilität beschränkt sich nicht nur auf den Stromverbrauch. Auch Wärme- und Gasströme bergen relevante Potentiale, die in den Analysen einbezogen werden sollen.

Fokus auf Österreich

Dieser Leitfaden ist speziell auf die österreichische Industrie zugeschnitten. Damit werden die Besonderheiten der nationalen Märkte, der regulatorischen Rahmenbedingungen und der verfügbaren Vermarktungsmöglichkeiten berücksichtigt.

Von der Theorie zur Praxis

Der vorliegende Ansatz zielt nicht allein auf die Darstellung von Optionen, sondern auf die Erhebung und Bewertung des tatsächlich realisierbaren Potentials in einem Betrieb. Dafür werden auch praxistaugliche Tools und Methoden vorgestellt, die Schritt für Schritt eingesetzt werden können.

Damit soll Unternehmen nicht nur Orientierung gegeben, sondern auch konkrete Werkzeuge an die Hand gelegt werden. Für eine erste Identifikation werden leicht zugängliche Tools bereitgestellt. Wer darüber hinaus tiefergehende Analysen, Optimierungen oder die Entwicklung maßgeschneiderter Projekte anstrebt, findet in unseren wissenschaftlichen Partnern kompetente Ansprechpartner. So entsteht ein direkter Weg von der ersten Potentialerhebung bis hin zur Umsetzung in der Praxis.

INDUSTRIELLE FLEXIBILITÄTSPOTENTIALE UND VERMARKTUNGSOPTIONEN

Was sind industrielle Flexibilitätspotentiale und -maßnahmen im Detail?

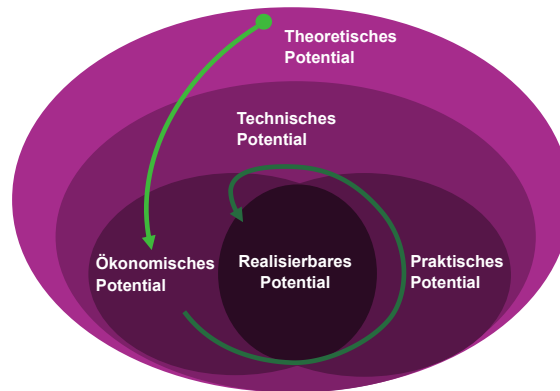


Abbildung 1 Schematische Darstellung von Flexibilitätspotentialen (basierend auf Illustration von [4])

Um die Möglichkeiten der industriellen Energieflexibilität zu verstehen, ist es hilfreich, zwischen verschiedenen Potentialarten zu unterscheiden. Diese sind in **ABBILDUNG 1** dargestellt und geben an, in welchem Umfang und unter welchen Bedingungen Flexibilität tatsächlich nutzbar ist:

Theoretisches Potential

Das theoretische Potential ist die maximale Flexibilität, die, unter der vollständigen Vernachlässigung aller umsetzungsrelevanten Bedingungen, in einem Betrieb vorhanden ist. Es ist somit eine rein rechnerische Größe, die sich aus dem Energiebedarf und der Energieaufbringung ergibt.

Technisches Potential

Umfasst die Flexibilität, die unter den tatsächlichen technischen und prozessspezifischen Rahmenbedingungen einer Anlage möglich ist. Hier spielen Prozess- oder Anlagenspezifikationen, wie Betriebszeiten, maximale Abrufdauern, Regenerationszeiten oder Sperrzeiten, sowie Kapazitäten von Material- und Energiespeichern eine Rolle.

Ökonomisches Potential

Der Anteil des technischen Potentials, der sich wirtschaftlich lohnt. Hier ist entscheidend, ob die durch Flexibilität erzielten Erlöse die zusätzlichen Kosten übersteigen.

Praktisches Potential

Der Teil des technischen Potentials, der sich auch unter realen Rahmenbedingungen – wie organisatorischen Abläufen, rechtlichen Vorgaben oder sozialen Faktoren – tatsächlich umsetzen lässt.

Realisierbares Potential

Die Schnittmenge aus wirtschaftlichem und praktischem Potential. Es zeigt auf, welcher Anteil der Flexibilität tatsächlich im Betrieb genutzt werden kann.

Die inhärenten Abhängigkeiten der einzelnen Potentiale untereinander verlangt für eine Bestimmung des tatsächlich realisierbaren Potentials eine gesamtheitliche Betrachtung. Ein möglicher Zugang dazu ist schematisch in **ABBILDUNG 1** dargestellt. Während die ersten Schritte (hellgrüner Pfeil) zur Bestimmung des ökonomischen Potentials direkt durch Rahmenbedingungen des Betriebs gegeben sind, stellt vor allem die finale Bestimmung der Schnittmenge zwischen dem praktischen und ökonomischen Potential eine Herausforderung dar. Zur Bestimmung empfiehlt es sich in einem iterativen Prozess die beiden Potentiale miteinander abzugleichen (dunkelgrüner Pfeil) und somit das tatsächlich realisierbare Potential zu bestimmen.

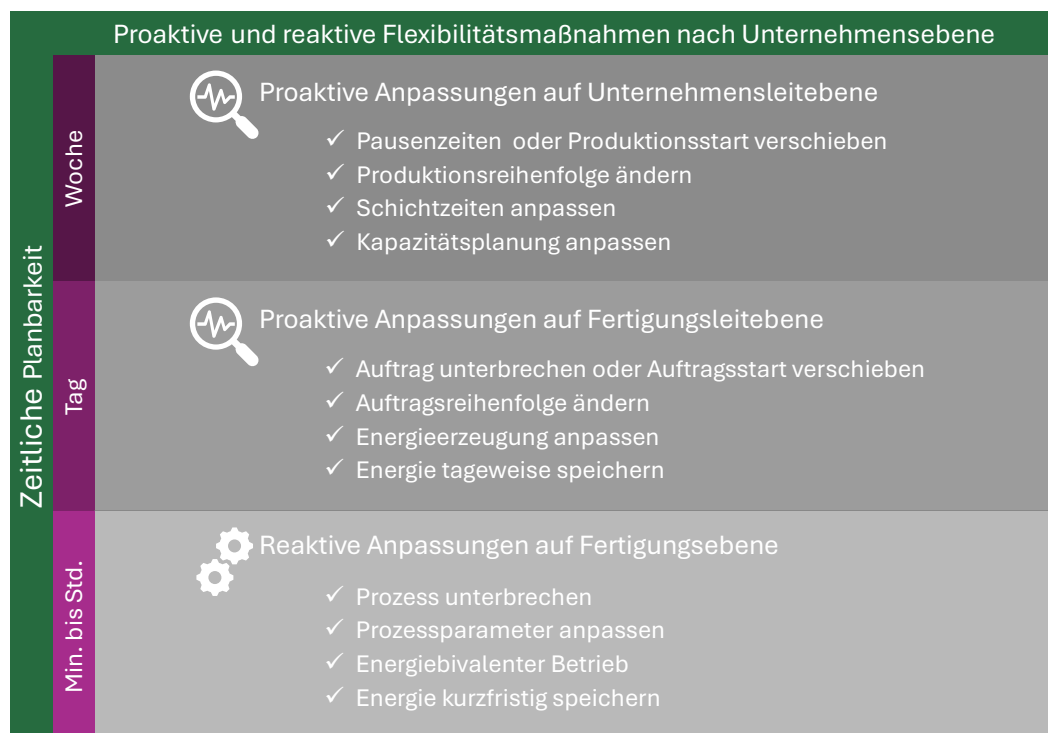


Abbildung 2 Überblick über mögliche proaktive und reaktive Flexibilitätsmaßnahmen in Industriebetrieben nach Unternehmensebene (Eigene Darstellung nach [1])

Um das Flexibilitätspotential in einem Unternehmen heben zu können müssen **Flexibilitätsmaßnahmen** gesetzt werden. Beispiele dafür werden in **ABBILDUNG 2** dargestellt. Dabei können zwei Strategien bei der Planung und Umsetzung der Maßnahmen verfolgt werden:

Proaktive Anpassung

Maßnahmen, die im Voraus geplant und vorbereitet werden, z.B. basierend auf Prognosen zu Strompreisen oder erwarteter Verfügbarkeit erneuerbarer Energien. Diese Strategie erfordert gute Vorhersagen (Forecasting) und ein hohes Maß an Planungssicherheit.

Reaktive Anpassung

Kurzfristige Maßnahmen als direkte Reaktion auf unerwartete Ereignisse, etwa plötzliche Netzschwankungen oder Marktpreise. Diese Strategie setzt schnelle Prognosewerkzeuge und Entscheidungswege, sowie flexible Betriebsführung voraus.

Welche Beispiele gibt es für Flexibilitätsoptionen?

Diese Flexibilitätsmaßnahmen können auf Anlagen mit Flexibilitätspotential angewandt werden, sogenannten Flexibilitätsoptionen. Grundsätzlich werden meist drei Kategorien von flexibel steuerbaren Anlagen und Prozessen gemäß Literatur unterschieden. Die Kategorien orientieren sich dabei nach der Systemtiefe. Je tiefer man in den Produktionsprozess eintaucht, desto relevanter werden technische Abhängigkeiten zwischen Prozessen, spezifische Prozessparameter und Risiken für die Produktion bei der Hebung industrieller Flexibilitätspotentiale [3].

Produktionsprozesse

Hier betreffen Maßnahmen unmittelbar die Hauptprozesskette und sind eng mit Produktqualität, Durchsatz und technologischen Rahmenbedingungen verbunden. Eine detaillierte Prozessanalyse kann hier erforderlich sein, um Flexibilitätsmaßnahmen und deren Auswirkungen untersuchen zu können.

Querschnittstechnologien

Maßnahmen adressieren hier unterstützende Prozesse, wie die Druckluftbereitstellung, Kühlung oder Belüftungsanlagen. Diese Prozesse weisen meistens nur mittlere Abhängigkeiten zur Produktion auf und können in der Regel mit überschaubarem Risiko flexibilisiert werden. Der Begriff Querschnittstechnologien bezieht sich dabei auf den breiten branchen- und sektorübergreifenden Einsatz.

Infrastrukturanlagen

Maßnahmen beziehen sich hier vor allem auf energietechnische Systeme wie KWK-Anlagen, Photovoltaik (PV)-Anlagen oder Speichertechnologien. Diese sind meist vom Produktionsprozess entkoppelt und bieten dadurch zusätzliche Flexibilitätspotentiale bei vergleichsweise geringen Risiken.

Eine Übersicht mit Beispielen je Kategorie ist in **ABBILDUNG 3** gegeben. Details zu den Prozessen und Anlagen, sowie weitere Flexibilitätsoptionen finden sich in Übersichtswerken [3, 5, 6].

Zunehmende Systemtiefe		
Infrastrukturanlagen	Querschnittstechnologien	Produktionsprozesse
✓ KWK-Anlagen ✓ Power-to-X-Anlagen ✓ PV-Anlagen ✓ Batteriespeicher ✓ Thermische Speicher ✓ ...	✓ Elektrische Verdichter ✓ Motoren von Ventilatoren ✓ Pumpenmotoren ✓ Heizstäbe ✓ ...	✓ Walzanlagen ✓ Elektrolichtbogenofen ✓ Elektrolysezellen ✓ Papiermaschinen ✓ Zementmühlen ✓ ...

Abbildung 3 Beispiele zu Flexibilitätsoptionen nach Kategorien mit zunehmender Systemtiefe (eigene Darstellung nach [3])

Wie können Flexibilitätspotentiale genutzt und vermarktet werden?

Für viele Unternehmen steht zunächst die interne Nutzung von Flexibilität im Vordergrund – z.B. zur Kostenoptimierung, Lastspitzenvermeidung oder besseren Eigenerzeugungsnutzung. Darüber hinaus bieten aber auch externe Vermarktungsmöglichkeiten attraktive Chancen: vom Spotmarkt bis hin zur Bereitstellung von Regelernergie. Welche Märkte für einen Betrieb in Frage kommen, hängt stark von den technischen Anforderungen der Märkte (Reaktionszeit, Mindestleistung, Abrufdauer) und der vorhandenen Vorhersagbarkeit und Steuerbarkeit der Prozesse ab. Eine grobe Zusammenfassung über mögliche Verwertungsoptionen inklusive einer Einschätzung des Erlöspotentiale liefert **TABELLE 1**.

Tabelle 1 Grobe Zusammenfassung netz-, system- und marktdienlicher Verwertungsoptionen von Flexibilitätspotentialen inklusive der Einschätzung von Erlöspotentialen und Entwicklungen (Adaptierte Kategorisierung nach [7])

	Verwertungsoptionen	Erlös- potential		Erwartete Entwicklung
Netzdienlich	Peak Shaving	Mittel	➔	Es wird erwartet, das Verteilnetzbe- grenzungen zunehmen.
	Engpassmanagement	Niedrig	➔	Entwickelt sich zukünftig ein Markt könnte das Erlöspotential steigen.
Systemdienlich	Primärregelreserve	Hoch	➔	Derzeit ist eine Marktsättigung zu beobachten.
	Sekundärregelreserve	Hoch	➔	Aktuell können hohe Erlöse erzielt werden die Entwicklung ist jedoch unsicher.
	Tertiärregelreserve	Niedrig	➔	Derzeit bereits ein großes Angebot vorhanden.
Marktdienlich	Preisausgleich: Day-Ahead	Mittel	➔	Eine steigende Preisvolatilität ist zu erwarten.
	Preisausgleich: Intraday	Hoch	➔	Eine steigende Preisvolatilität und Liquidität sind zu erwarten.

Netzdienlicher Einsatz bedeutet, dass Flexibilität genutzt wird, um das Stromnetz lokal zu entlasten. Besonders etabliert ist hier das Peak Shaving: Durch die Reduktion von Lastspitzen lassen sich Netzentgelte senken und Netzüberlastungen reduzieren. Darüber hinaus können Engpassmanagement- oder Redispatch-Maßnahmen dazu beitragen, Netzengpässe zu entschärfen. Eine netzdienliche Vermarktung könnte in Zukunft hohe Erlöse ermöglichen, allerdings fehlt hier noch eine marktbasierte Vergütung.

Systemdienliche Optionen dienen vor allem der Stabilisierung der Netzfrequenz im gesamten Stromsystem. Dafür schreibt der nationale Übertragungsnetzbetreiber, Austrian Power Grid AG, verschiedene Produkte aus, die unter dem Begriff „Regelreserve“ zusammengefasst sind. Man unterscheidet Primärregelung (FCR), Sekundärregelung (aFRR) und Minutenreserve (mFRR). Diese Produkte unterscheiden sich in Aktivierungszeit und Dauer und stellen teils hohe technische Anforderungen an flexible Anlagen. Während eine direkte Teilnahme über Prozessflexibilisierung oft schwierig ist, können Speichertechnologien wie z.B. Batterien hier Möglichkeiten eröffnen. Für industrielle Prozesse eignen sich eher Sekundär- oder Minutenreserveprodukte.

Details zu den Anforderungen sind auf der Homepage der APG zu finden unter: markt.apg.at/transparenz/netzregelung

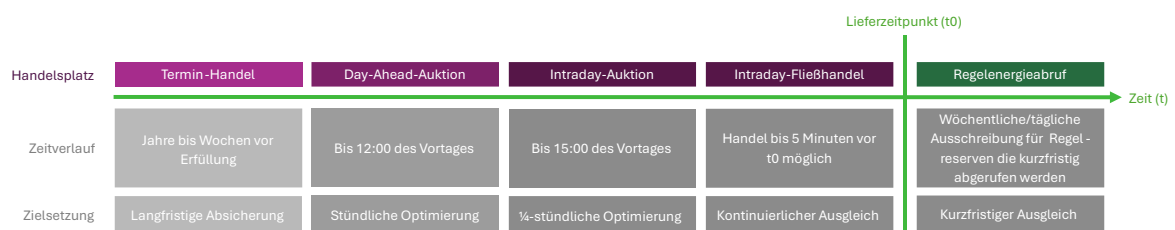


Abbildung 4 Übersicht über die unterschiedlichen Strommärkte in Österreich inklusive zugehörigem Zeitverlauf (Darstellung frei nach [8])

Marktdienliche Optionen schließlich beziehen sich auf den klassischen Stromhandel. Der Handel erfolgt vor der physikalischen Lieferung auf sequentiell aufeinander folgenden Märkten: dem Terminmarkt zur Absicherung Monate bis Jahre im Voraus und dem Spotmarkt, der sich in Day-Ahead- und Intraday-Märkte gliedert. Eine Übersicht über die Märkte liefert **ABBILDUNG 4**. Besonders der Intraday-Markt mit seinen Viertelstundenprodukten bietet attraktive Preisschwankungen, erfordert jedoch eine proaktive Strategie (Prognosetools, Prozessoptimierungsansätze etc.) zur Anpassung der flexiblen Anlagen. Zusätzlich kann Strom bilateral über den außerbörslichen OTC-Handel (Power Purchase Agreements) gehandelt werden.

IDENTIFIKATION UND BEWERTUNG VON FLEXIBILITÄTSPOTENTIALEN

Wie können Flexibilitätspotentiale im Unternehmen identifiziert werden?

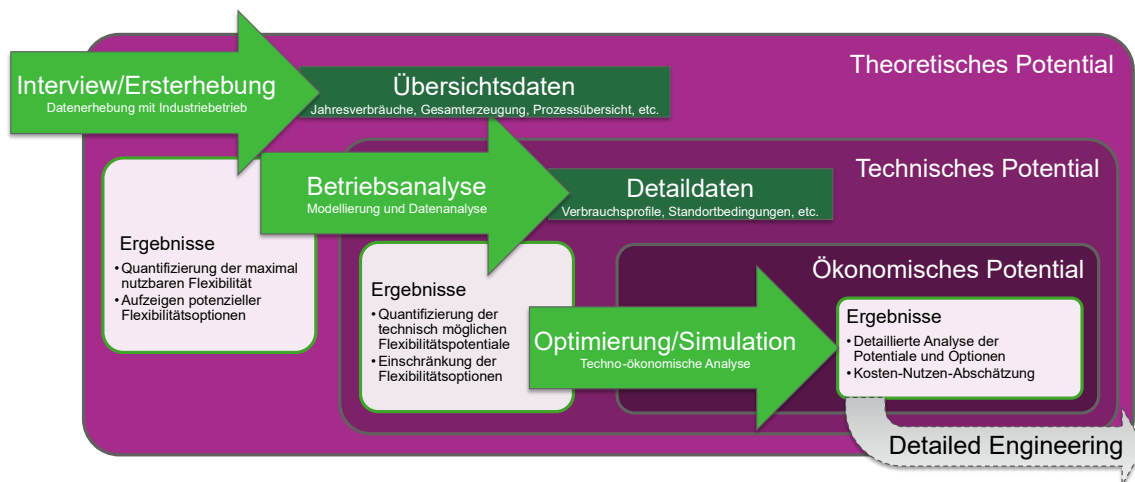


Abbildung 5 Übersicht der iterativen Methodik des Leitfadens inklusive erwarteter Zwischenergebnisse

Aufbauend auf der Klassifizierung der unterschiedlichen Potentialklassen wurde eine allgemeine Methodik entwickelt, mit der systematisch und schrittweise die Potentiale erhoben werden können, um die Flexibilität eines Unternehmens zu bestimmen und zu bewerten. Es handelt sich um einen iterativen Prozess gemäß **ABBILDUNG 5** der schrittweise immer tiefer in die Potentialklassen einsteigt. Diese Vorgehensweise erlaubt es relativ früh Hürden zu erkennen und ermöglicht gegebenenfalls einen frühen Abbruch, sowie die Definition notwendiger Schritte, bevor zum nächsten Schritt übergegangen werden kann. Um die Barriere hierfür niedrig zu halten, wird die Komplexität der Bestimmung schrittweise erhöht.

Interview/Ersterhebung

Als ersten Schritt in der Bestimmung von Flexibilitätspotentialen wurden Interviews mit Personen aus unterschiedlichen Verantwortungsbereichen im Unternehmen identifiziert. Diese sind unumgänglich, um den zu analysierenden Betrieb einmal grob kennenzulernen, und Einblicke in die Prozesse zu bekommen. Dadurch ist möglich herauszufinden, ob der Betrieb überhaupt Flexibilität in jeglicher Form aufweist. Diese Interviews sollen dabei die grundlegenden Fragen beantworten, die zur Bestimmung von Flexibilitätspotentialen erforderlich sind, ohne dabei tiefes Expertenwissen zu benötigen.

Betriebsanalyse

Im zweiten Schritt werden die erhobenen Daten schnell analysiert und eine erste Bewertung der Flexibilität abgegeben. Diese sollte möglichst leicht zu interpretieren sein, wie etwa mit einem Score zwischen 0 und 100. Weiters können aus den Interviewergebnissen auch bereits einfache Maßnahmen abgeleitet werden, um die Flexibilität zu erhöhen.

Für die weiteren Schritte ist es außerdem notwendig die Produktions- und Energiedaten des Unternehmens vor- bzw. aufzubereiten. Hierfür empfiehlt es sich einen Prozess aufzusetzen, der die Daten automatisiert speichert, aufbereitet und zugänglich macht.

Optimierung/Simulation

Für weitere Analysen empfiehlt es sich dann mit Hilfe einer einfachen Simulation zu beginnen, um das Verschiebepotentiale der einzelnen Prozesse zu bestimmen. Dies erlaubt einen Einblick in das ökonomische Potential zu erlangen. Die grundlegende Idee hierbei sollte es sein die Last- und Produktionsprofile des Unternehmens zu untersuchen und spezifische Blöcke zu identifizieren die ersetzt oder verschoben werden können. Mithilfe eines Optimierungstools kann dann das ökonomische Potential durch die Anpassung des tatsächlichen Produktionsplans an beispielsweise variable Stromtarife abgeschätzt werden.

Detailed Engineering und Umsetzung

Im letzten Schritt geht es dann um das realisierbare Potential. Aufbauend auf den Ergebnissen aus der Simulation muss nun evaluiert werden, wie dieses Potential tatsächlich gehoben werden kann. Hierfür empfiehlt sich eine detaillierte Simulation, welche das gesamte Energiesystem sowie den Produktionsplan berücksichtigt und daraus im Sinne einer übergeordneten Regelungsstrategie das tatsächlich umsetzbare Potential bestimmt. Diese Tools sind oftmals komplexer und sehr Unternehmensspezifisch, allerdings unumgänglich, wenn es um die tatsächliche Realisierung von Potentialen geht.

Zwischen jedem der Schritte sollte eine Evaluation der Ergebnisse stattfinden, um abschätzen zu können, ob weitere Schritte gesetzt werden. Für eine erstmalige Abschätzung von Potentialen im Betrieb sollte jedenfalls die Betriebsanalyse durchgeführt werden.

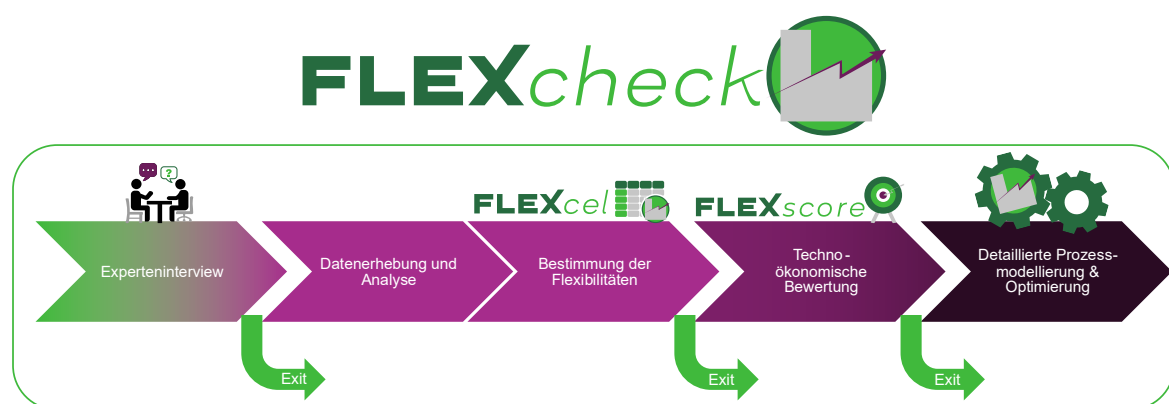


Abbildung 6 Iterative Vorgehensweise zur Bestimmung des Flexibilitätspotentials und begleitende Tools

Aus der allgemeinen Methodik gemäß **ABBILDUNG 5** wurden im Rahmen von **FLEXcheck** auch konkrete iterative Schritte zur Identifikation und Bewertung von Flexibilitätpotentialen in Industrieunternehmen abgeleitet. Zudem wurden Tools entwickelt, die bei der Umsetzung der jeweiligen Schritte Hilfestellung bieten. Wie in **ABBILDUNG 6** dargestellt unterstützt das Tool **FLEXcel** beim Schnellcheck zur ersten Bestimmung von Flexibilitäten und Ableitung von Handlungsempfehlungen, während das Tool **FLEXscore** zusammen mit den Ergebnissen der vorhergehenden Schritte eine erste techno-ökonomische Bewertung erlaubt, indem das ökonomische Potential der identifizierten Flexibilitäten abgeschätzt werden kann.

Diese Tools sollen als Hilfestellung zur eigenen Anwendung des Leitfadens oder als Vorbereitung für eine tiefergehende Simulationsstudie Anwendung finden. Die Ergebnisse sollten dennoch kritisch überprüft werden und nicht als detaillierte Analyse interpretiert werden.

Schritt I: Erste Orientierung und Schnellcheck

Der erste Schritt im Rahmen des Leitfadens besteht in der Bestimmung des theoretischen Potentials, sowie der Erhebung der Rahmenbedingungen für die weiteren untergeordneten Potentiale. Um diese Bestimmung möglichst niederschwellig zu halten, und um auf detailliertes Expertenwissen verzichten zu können ist es notwendig mithilfe einfacher Fragestellungen den aktuellen Stand des Betriebs erheben und abbilden zu können. Zur Erreichung dieser Ziele wurden zwei konkrete Schritte identifiziert:

1. Strukturiertes Interview mit Personen aus unterschiedlichen Verantwortungsbereichen des Betriebes
 - a. Führungsebene zur Bestimmung der strategischen Ausrichtung und übergeordneten Zielsetzung
 - b. Verantwortliche(n) für Energietechnik zur Identifikation energetischer Flexibilitätspotentiale
 - c. Verantwortliche(n) für Produktions- beziehungsweise Prozesstechnik zur Identifikation von Flexibilitäten in der Prozesskette sowie der Anlagen
 - d. IT- und Digitalisierungsverantwortlichen zur Bestimmung der Infrastruktur Rahmenbedingungen sowie der Datenerhebung
 - e. Falls vorhanden: Flexibilisierungsbeauftragten der die Thematik übergeordnet verantwortet und vorantreibt
2. Schnelle Erstbewertung der identifizierten Flexibilitäten sowie etwaiger simpler Maßnahmen auf Basis des Interviews

Um diese Schritte zu unterstützen, wurden im Rahmen des Projekts sowohl ein Fragebogen entwickelt, welcher als strukturelle Guideline für das Führen der Interviews verwendet werden kann, als auch ein Excel-basiertes Tool zur Auswertung des Fragebogens. Im Folgenden werden die Grundzüge des Fragebogens und des Tools sowie die entsprechenden Methoden genauer erklärt. Hierbei wird speziell ein Fokus auf die Methodiken gelegt, damit Unternehmen in der Lage sind selbstständig die für sie relevanten Punkte identifizieren zu können.

Interviews und Fragebogen

Zur Erhebung des aktuellen Standes des Unternehmens, sowie der strategischen Ausrichtung bezüglich Flexibilitätsschaffung und -nutzung ist es unumgänglich einen gesamtheitlichen Einblick in das Unternehmen zu erlangen. Hierzu empfiehlt es sich, wie bereits einführend erwähnt, Personen aus unterschiedlichen Verantwortungsbereichen des Betriebs miteinzubeziehen und mit diesen Interviews zu spezifischen Kategorien zu führen. Zur Vorbereitung für die Interviews

sind Fragestellungen zu den individuellen Bereichen zu definieren und sollen an die entsprechenden Personen übermittelt werden. Dabei sollten die folgenden Kategorien behandelt werden:

Unternehmung

Fokus auf Fragestellungen die das gesamte Unternehmen, sowie die strategische Ausrichtung der Flexibilitätsbewertung beinhalten. Mögliche Fragestellungen betreffen die „zukünftige Entwicklung von Produktionsmengen/Energieträgern/Produktarten“, „Bereitschaft zur Teilnahme an Flexibilitätsmärkten“ sowie „Priorisierung im energiepolitischen Zieldreieck (Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit, Versorgungssicherheit)“ (siehe **ABBILDUNG 7**).

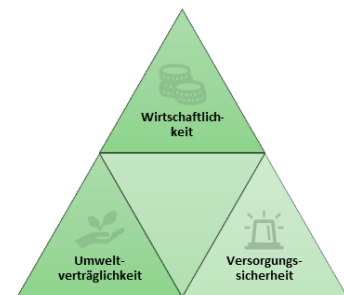


Abbildung 7 Energiepolitisches Zieldreieck

Energietechnik

Fokus auf Fragestellungen die die aktuelle Energiesituation des Unternehmens adressieren. Mögliche Fragestellungen betreffen die „Energieaufbringung“, den „Energiebedarf“, sowie „Energiespeichermöglichkeiten“.

Prozesstechnik

Fokus auf Fragestellungen die sich mit den Produktionsprozessen und der Produktionslinie beschäftigen. Mögliche Fragestellungen betreffen „Technische Aspekte wie Produktionsdauer/Materialbedarf/Lastgänge“, „Äußere Einflussfaktoren auf die Produktion“, sowie „Speichermöglichkeiten und geplante Stillstände“.

Digitalisierung

Fokus auf Fragestellungen rund um den derzeitigen Stand der industriellen Digitalisierung zur tieferen Analyse, sowie der Hebung von Flexibilitäten. Mögliche Fragestellungen betreffen „Digitalisierungsgrad der Daten-Aufzeichnungen“, sowie den „Automatisierungsgrad der Prozesse“.

Flexibilisierung

Fokus auf weitere Fragestellungen zum Thema Flexibilisierung und der dazugehörigen Bereitschaft für Anpassungen. Mögliche Fragestellungen betreffen „Anschaffung weiterer Speichertechnologien/volatile Energieaufbringung“, „Anpassungen in Schichtbetrieben“, sowie „Weitere Rahmenbedingungen zur Flexibilität“.

Im Rahmen des Projektes wurde bereits ein Fragebogen [9] entwickelt der als Basis hierfür angesehen werden und weiteren Input für spezifische Anwendungen liefern kann.

Auch wenn das Ziel des Fragebogens sein sollte die wichtigsten Aspekte bereits vorab schriftlich einzuholen und zu dokumentieren, sollte der ausgefüllte Fragebogen weiters als struktureller

Rahmen für die Interviews verwendet werden. In diesen sollten die einzelnen Antworten auf die Fragestellungen nochmals gemeinsam diskutiert, sowie zusätzliche Anregungen notiert werden. Dieser Schritt erschwert zwar eine systematische Herangehensweise in der späteren Bewertung der Flexibilität, ist allerdings essentiell wichtig, um eine realistische Einschätzung dieser zu bekommen. Im entwickelten Fragebogen [9] wird dies spezifisch durch Freitext-Felder am Ende einer jeden Kategorie adressiert. Hier besteht die Möglichkeit das Interview zu protokollieren und bereits in diesem Part der Analyse Flexibilitätsoptionen sowie -hemmnisse zu identifizieren.

Was bei diesen Interviews sowie der Erstellung des Fragebogens allerdings stets im Hinterkopf behalten werden sollte ist, dass man sich hierbei niemals auf Details stützen, sondern sich in einem allgemeineren Rahmen mit den Thematiken beschäftigen. Detailanalysen können in späteren Schritten der Leitfaden-Anwendung durchgeführt werden. In diesem ersten Schritt sollten die Geschwindigkeit der Ermittlung sowie ein guter Überblick im Vordergrund stehen.

Schnellanalyse und Erstbewertung

Auf Basis der durchgeführten Interviews, sowie des ausgefüllten Fragebogens, ist im nächsten Schritt eine Analyse und Erstbewertung des Unternehmens hinsichtlich Flexibilität durchzuführen. Um diese auch möglichst niederschwellig zu halten, empfiehlt sich folgende Vorgehensweise:

Definition eines Bewertungsschemas

Das Bewertungsschema sollte einfach zu interpretieren sein und die Flexibilität des Unternehmens mit einem Wert repräsentieren können. Hierzu eignet sich beispielweise eine Notenskala mit Werten von 1 (sehr hohe Flexibilität) bis 5 (keine Flexibilität) oder ein prozentueller Wert zwischen 0% (keine Flexibilität) 100% (sehr hohe Flexibilität). Um eine gewisse Feingranulierung zu erlauben ist es oftmals sinnvoll die prozentuelle Skala zu verwenden. Zur Interpretation wird für die Zahlenwerte auch jeweils eine zugehörige Einstufung in eine der folgenden Kategorien empfohlen: *Keine Flexibilität*, *Geringe Flexibilität*, *Mittlere Flexibilität*, *Hohe Flexibilität* oder *Sehr hohe Flexibilität*.

Bewertung des Fragebogens und der Interviews

Um nun tatsächlich zu einer Bewertung zu kommen ist für jede in den Interviews besprochenen Fragen ein maximaler und minimaler Wert (meist 0) zu definieren, und in Abhängigkeit der Antworten Punkte zu vergeben. Auch hier sollte die Einfachheit der Bewertung wieder im Vordergrund stehen. In manchen Fällen kann es durchaus auch sinnvoll sein die Bewertung direkt im Interview gemeinsam durchzuführen. Vor allem sollten hier auch die zusätzlichen Anmerkungen aus den Interviews miteinfließen. Dies ist am einfachsten möglich durch die Nutzung einer gesamtheitlichen Einstufung dieser in eine *positive*,

neutrale oder *negative* Auswirkung auf die Flexibilität, und dann entsprechend mit positivem, keinem oder negativem Beitrag in der Bewertung zu berücksichtigen.

Allgemein ist es empfehlenswert innerhalb einer Interviewkategorie jeweils die gleichen maximalen Werte den Fragen zuzuweisen, um die Balance in der Bewertung sicherzustellen.

Bewertung für die Einzelkategorien

Auf dieser Basis ist dann die Gesamtbewertung für jede Kategorie individuell zu bestimmen. Dies geschieht einfach mit der Berechnung des Verhältnisses „*Summe aller erhaltenen Scores*“ zu „*Summe der maximalen Scores*“. Im Falle einer Notenskala muss dieses prozentuelle Ergebnis noch direkt umgewandelt werden.

Identifikation von Schwachstellen und Ableitung simpler Maßnahmen

Durch die individuelle Bewertung ist leicht erkennbar welche Kategorien aktuell noch aufholbedarf haben bezüglich der Flexibilität. Hier sind spezifisch jene Punkte zu adressieren die innerhalb der Kategorien mit niedrigen Scores bereits niedrige Bewertungen erhalten haben. Abhängig von der Frage kann es sich hierbei entweder um Potentiale oder Hemmnisse handeln. Beispiele hierfür wären:

- **Potentiale** Fehlender Ausbau von erneuerbaren Energieträgern/Speichertechnologien; Keine Teilnahme an Flexibilitätsmärkten; Geringe Maschinenauslastung
- **Hemmnisse** Geringe Bereitschaft zur Umsetzung; Keine oder geringe Daten des Energiebedarfs/der Energieaufbringung; Starre Produktion (hohe Auslastung)

Bei den entsprechenden Kategorien sollten diese identifiziert werden, und spezifisch für die Hemmnisse Maßnahmen abgeleitet werden. Potentiale hingegen können direkt gehoben werden.

Gesamtbewertung und Entscheidung nächster Schritte

Zuletzt ist noch eine Gesamtbewertung der Flexibilität, sowie eine Übersicht der identifizierten Potentiale und Hemmnisse zu erstellen. Für die Gesamtbewertung eignet sich ein gewichteter Mittelwert der individuellen Scores. Zur Vermeidung eines Bias sollte die Gewichtung der Kategorien bereits unabhängig von der Bewertung durchgeführt werden. Als Daumenregel sollten Energie- und Produktionstechnische Aspekte höher gewichtet werden, da diese die größten Potentiale beherbergen.

Als Endergebnis dieser Bewertung sollte eine Entscheidung getroffen werden, ob die Evaluierung genug Potentiale aufgezeigt hat, um die Analyse weiterzuführen, oder ob aktuell die Hemmnisse noch im Vordergrund stehen und diese vorerst behandelt werden sollten.

Die wichtigsten Punkte dieses Vorgehens sind somit die Bewertung des Interviews, welches den Grundstein für die Bewertung legt, sowie die der finale Schritt, in dem das weitere Vorgehen bestimmt wird. Es ist speziell dieser letzte Schritt, der die Grundzüge dieses Leitfadens nochmals verdeutlichen soll:

Schnelle Bestimmung der Flexibilität und Ableitung von Maßnahmen.

Sollte keine Flexibilität im ersten Schritt erkennbar sein, ist zuerst ein Fokus auf simple Maßnahmen zu setzen, bevor Detailanalysen durchgeführt werden.

Begleitend zu diesem Leitfaden wurde ein automatisiertes Tool namens **FLEXcel** entwickelt, welches die hier empfohlene Vorgehensweise für den vorliegenden Fragebogen [9] implementiert. Bei **FLEXcel** handelt es sich um Microsoft Excel Dokument, welches in den einzelnen Tabellenblättern die Fragebogen Kategorien beinhaltet, und automatisiert die Angaben überprüft und daraus eine Flexibilitätswertung sowie empfohlene Maßnahmen ableitet. Die detaillierte Methodik hinter diesem Tool übersteigt den Rahmen dieses Leitfadens und wird daher unabhängig unter [10] gemeinsam mit dem Tool öffentlich zur Verfügung gestellt.



Schritt II: Datenerhebung und Ableitung der Flexibilitätsoptionen

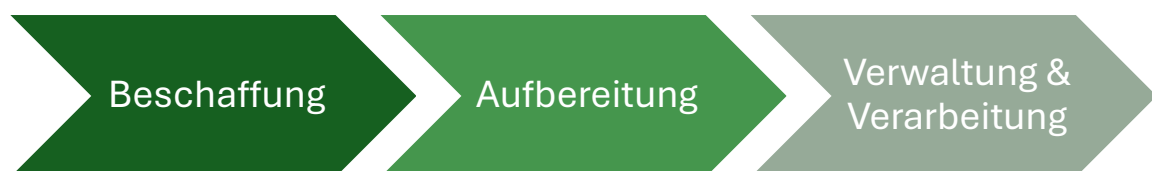


Abbildung 8 Schematischer Workflow der Messdaten Verarbeitung

Für die weitergehende Bestimmung von Flexibilität ist eine gewisse Grundvoraussetzung an die vorhandenen Daten zu stellen. Während die Tools im ersten Schritt sich bereits mit grundlegenden Fragestellungen und der Datenqualität beschäftigen und diese auch bereits als mögliches Hemmnis klassifiziert haben, geht es in diesem Schritt nun darum die notwendigen Daten bereitzustellen und für weitere Analysen vorzubereiten. Um den Umfang in diesem Bereich überschaubar zu halten, gehen wir hier nur kurz auf die wichtigsten Punkte und Begrifflichkeiten ein. Ein detaillierter Workflow ist im Anhang **A 1 WORKFLOW ZUR STRUKTURIERTEN AUFBEREITUNG UND VERWALTUNG HETEROGENER MESSDATEN** zu finden.

Allgemeine Datenerhebung

Grundsätzlich wird im Weiteren davon ausgegangen, dass Messdaten in irgendeiner Form und Qualität vorhanden sind. Sollte dies nicht der Fall sein, ist die Leitfaden-Anwendung an diesem Punkt vorzeitig zu beenden und stattdessen erstmal die Datenaufzeichnung im Unternehmen zu adressieren. Als Vorbereitung wird trotzdem empfohlen sich mit dem weiteren Leitfaden zu beschäftigen.

Der Workflow zur Datenerhebung unterteilt sich grundlegend in die drei Schritte die in **ABBILDUNG 8** schematisch dargestellt sind. Diese Schritte beinhalten die folgenden Aspekte:

Beschaffung der Daten

Dieser Schritt beinhaltet die Beschaffung der Daten und, falls notwendig, Überführung in ein digitales Format. Grundsätzlich unterscheidet man in drei Datenkategorien: visuell lesbar (z.B. handschriftliche Daten oder Abrechnungen), visuell-maschinell lesbar (z.B. .txt oder .csv Daten) und maschinell lesbar (z.B. Datenbanken oder binäre Formate). Ziel der Beschaffung ist es für alle Datenkategorien eine Digitalisierungsmethode in ein einheitliches Dateiformat zu definieren. Diese Daten werden als *digitale Rohdaten* bezeichnet.

Aufbereitung der Daten

Während der vorhergehende Schritt die unterschiedlichen Datenquellen in ein Format zusammenführt, handelt es sich zu diesem Zeitpunkt noch um unverarbeitete Daten. Für weitere Analysen kann es aber notwendig sein die Daten in eine gemeinsame Form, wie etwa Zeitreihen zu überführen, oder die Daten zu bereinigen [11, 12] und zu ergänzen. Am Ende dieses Schrittes stehen die sogenannten *digitalen Sekundärdaten* welche für weitere Schritte, in einem einheitlichen Datenformat, aufbereitet sind.

Verwaltung und Verarbeitung der Daten

Zu guter Letzt sind sowohl die digitalen Rohdaten als auch die Sekundärdaten an einem einheitlich definierten Ort zu speichern und mit deskriptiven Namen zu versehen. Besonders eignen sich für diese Aufgabe die Verwendung diverser Datenbanken, welche eine zentrale Schnittstelle darstellen können. Diese Daten sind nun bereit für weitere Verarbeitungen und Analysen im Rahmen des Leitfadens.

Ableitung von Flexibilitätsoptionen

Die Datenerhebung und -aufbereitung ist die Basis für die Ableitung von Flexibilitätsoptionen, also Anlagen mit Flexibilitätspotential. Dabei sollten vor allem Daten zum Energiebedarf der Anlagen, im Idealfall Leistungsverläufe (Lastprofile) für mindestens ein Jahr in einer Auflösung von

15 Minuten bis zu einer Stunde, zur Verfügung stehen. Liegen zudem zugehörige Produktionsdaten und Energiekosten vor, kann ein Verständnis für die Leistungsverläufe und Produktionszustände gewonnen werden. Beispielsweise sind nach Datenaufbereitung, stark ausgelastete Betriebszeiten, Kontinuität des Bedarfes oder Stillstandzeiten sichtbar. Dies ist essentiell, um Flexibilitätsoptionen identifizieren zu können und in weiterer Folge Flexibilitätsmaßnahmen zu entwickeln und deren Potentiale zu ermitteln. Einen Überblick über den empfohlenen Datenbedarf gibt hier auch bereits das **FLEXcel** Tool.

Eine kontinuierliche Erfassung von Energie- und Betriebsdaten ist essentiell um Flexibilitätsoptionen zu identifizieren und deren Potential hinsichtlich Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit zu bewerten.

Festlegung der Systemgrenzen

Zur Ableitung der Flexibilitätsoptionen auf Basis der verfügbaren Daten kann es hilfreich sein ein vereinfachtes Prozessschema bildlich dazustellen und somit die Systemgrenzen abzustecken und den Bilanzraum zu verdeutlichen. **ABBILDUNG 9** zeigt einen beispielhaften Prozessablauf, durch welchen alle für das System relevanten Material- und Energieflüsse, sowie deren Wechselwirkungen visualisiert werden. Zudem werden Abhängigkeiten zwischen Prozessen erkennbar, vorhandene Daten können eingeordnet werden und mögliche Messstellen bei zusätzlichem Datenbedarf identifiziert werden.

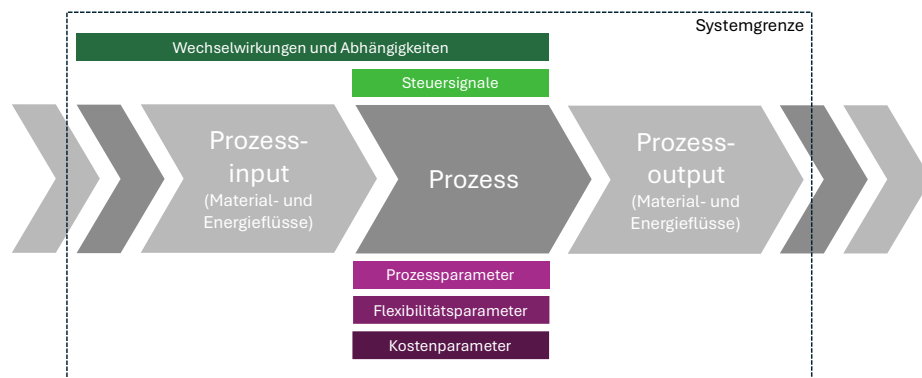


Abbildung 9 Beispielhafter Prozessablauf zur Illustration der Systemgrenzen

Detailanalyse zu den Flexibilitätsoptionen

Sind die Systemgrenzen bekannt beziehungsweise definiert und die Anlagen mit Flexibilitätspotential auf Basis der übergeordneten Daten und Interviews identifiziert, können diese im Detail betrachtet werden. Eine Charakterisierung der jeweiligen Flexibilitätsoption beinhaltet dabei eine Betrachtung verschiedener Prozess- und Flexibilitätsparameter, die vor allem für eine flexible Steuerung relevant sind. Zu den Prozessparametern zählen unter anderem die maximale Anschlussleitung, maximale Durchsatzkapazitäten oder Jahresbetriebsstunden. **TABELLE 2** zeigt Prozessparameter deren Identifikation eine

aussagekräftige Erhebung und Bewertung der Flexibilitätspotentiale unterstützt. Ziel dabei ist die Prozessparameter aus den Lastprofilen und Betriebsdaten in Kombination mit dem Vorwissen aus den Interviews ableiten zu können.

Tabelle 2 Prozessparameter zur Detailanalyse der Flexibilitätsoptionen

Prozessparameter	Erläuterung	Einheit
Maximale Anschlussleistung	Gibt an, wie viel Leistung das System maximal bezieht.	kW
Maximale Durchsatzkapazität	Die größtmögliche Menge an Material oder Produkten, die in einer Stunde verarbeitet oder hergestellt werden kann.	t, m ³ , oder pcs/h
Jahresdurchsatz	Die tatsächlich produzierte oder verarbeitete Menge pro Jahr.	t, m ³ , oder pcs/a
Jahresbetriebsstunden	Die Gesamtzahl der Stunden, in denen die Anlage pro Jahr läuft.	h
Durchschnittliche Betriebsstunden pro Tag	Gibt an, wie lange die Anlage an einem durchschnittlichen Arbeitstag in Betrieb ist.	h
Schichtdauer	Spiegelt die Länge einer Arbeitsschicht wider.	h
Schaltzyklen	Anzahl der Ein- und Ausschaltvorgänge einer Anlage pro Jahr.	-
Energiebedarf	Die gesamte Energiemenge, die die Anlage in einem Jahr benötigt.	kWh/a

Die Flexibilitätsparameter umfassen unter anderem Daten zur möglichen Abrufdauer oder erforderlichen Regenerationszeiten. Um die Begrifflichkeiten besser zuordnen zu können werden diese in **ABBILDUNG 10** dargestellt und in **TABELLE 3** näher erläutert. Aufgrund des normativen Charakters orientieren sich die Flexibilitätsparameter an den Begrifflichkeiten der VDI 5207 [1]. Zudem werden Parameter ergänzt, welche sich im Rahmen der Leitfadenentwicklung als essentiell herausstellten, um Flexibilitätspotentiale zu ermitteln und nachfolgend zu bewerten. Auch hier sollte möglichst das bereits generierte Wissen aus Interviews, Lastprofilen und Betriebsdaten genutzt werden, um die Parameter bestmöglich abzuleiten.

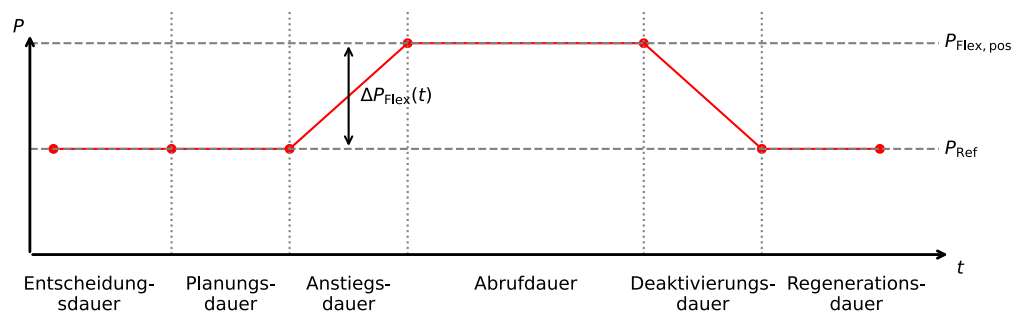


Abbildung 10 Flexibilitätsparameter zur Erläuterung der Zeitintervalle einer Flexibilitätsmaßnahme (in Anlehnung an VDI 5207 [1])

Tabelle 3 Flexibilitätsparameter zur Detailanalyse der Flexibilitätsoptionen (in Anlehnung an VDI 5207 [1])

Flexibilitätsparameter	Erläuterung	Einheit
Minimale Last	Die kleinste Leistung, mit der die Anlage betrieben wird.	kW
Maximale Last	Die höchste Leistung mit der die Anlage betrieben wird.	kW
Abrufdauer	Zeitintervall vom voll entwickelten Lastwechsel bis zum Beginn der Deaktivierung.	min
Auslösendes Ereignis	Ereignis, das erfordert, dass das System sein vorhergehendes Niveau des Strombedarfs ändert.	min
Anstiegs- bzw. Aktivierungsdauer	Zeitintervall vom Einleiten der Laständerung bis zum Erreichen des gewünschten Laständerungsniveaus.	min
Deaktivierungsdauer	Zeitintervall vom Beginn der Deaktivierung einer zuvor vollständig ausgebildeten Flexibilitätsmaßnahme bis zur Rückkehr zum Ausgangsniveau.	min
Entscheidungsdauer	Zeitintervall, das von der Wahrnehmung eines auslösenden Ereignisses bis zur Entscheidung für eine Flexibilitätsmaßnahme vergeht.	min
Planungsdauer	Zeitintervall von der Entscheidung zur Notwendigkeit einer Flexibilitätsmaßnahme bis zur Beendigung aller damit einhergehenden planerischen Tätigkeiten im Prozess- und Fertigungsablauf.	min
Regenerationsdauer	Zeitintervall, das vergehen muss, um nach der Deaktivierung einer Flexibilitätsmaßnahme diese wieder durchführen zu können.	min
Wahrnehmungsdauer	Zeitintervall, vom Auftreten eines auslösenden Ereignisses bis zu seiner Wahrnehmung.	min
Abrufhäufigkeit	Flexibilitätsabrufe pro Tag.	-
Pufferkapazitäten	Kapazitäten zur Pufferung von Materialien, Produkten oder Energiemengen.	t, m ³ , oder kWh

Mögliche Flexibilitätsmaßnahmen zuordnen und Flexibilitätspotential ermitteln

Nach der Detailanalyse der Flexibilitätsoptionen können in einem nächsten Schritt unter Berücksichtigung der Energie- und Betriebsdaten die Flexibilitätsmaßnahmen gemäß **ABBILDUNG 10** zugeordnet werden. Gibt es beispielsweise Produktionsvorgänge deren Start je nach Energiebereitstellung über die firmeneigenen PV-Anlagen flexible verschoben werden kann, stellt dies eine mögliche Flexibilitätsmaßnahme dar. Diese wäre mit einer Lastverschiebung verbunden und kann eine Kostenreduktion mit sich bringen, da die

Nutzung der firmenintern bereitgestellten Energie optimiert wird. Wird die Lastverschiebung anhand des zeitlich aufgelösten Lastprofils betrachtet, kann das Flexibilitätspotential dieser Maßnahme ermittelt werden. Dafür wird die Fläche unter der Kurve der jeweiligen Flexibilitätsmaßnahme berechnet. Dadurch ergibt sich jene Energiemenge, die entweder zusätzlich benötigt, nicht benötigt oder zeitlich verschoben werden kann. **ABBILDUNG 11** illustriert beispielhaft eine Lastverschiebung sowie eine Lastreduktion und -erhöhung:

- **Lastverzicht** bezeichnet eine Reduktion der Leistungsaufnahme im Vergleich zum Referenzbetrieb. Dies kann eine Verringerung der Leistungsaufnahme oder ein vollständiges Abschalten ohne Bedarf an nachträglichem Lastnachholen umfassen.
- **Lasterhöhung** bedeutet eine Erhöhung der Leistungsaufnahme im Vergleich zum Referenzbetrieb, ohne dass nachfolgend ein Bedarf an Lastreduktion besteht.
- **Lastverschiebung** beinhaltet eine temporäre Erhöhung oder Verringerung der Leistungsaufnahme im Vergleich zum Referenzbetrieb, verbunden mit einem entsprechenden Bedarf an Lastnachholung.

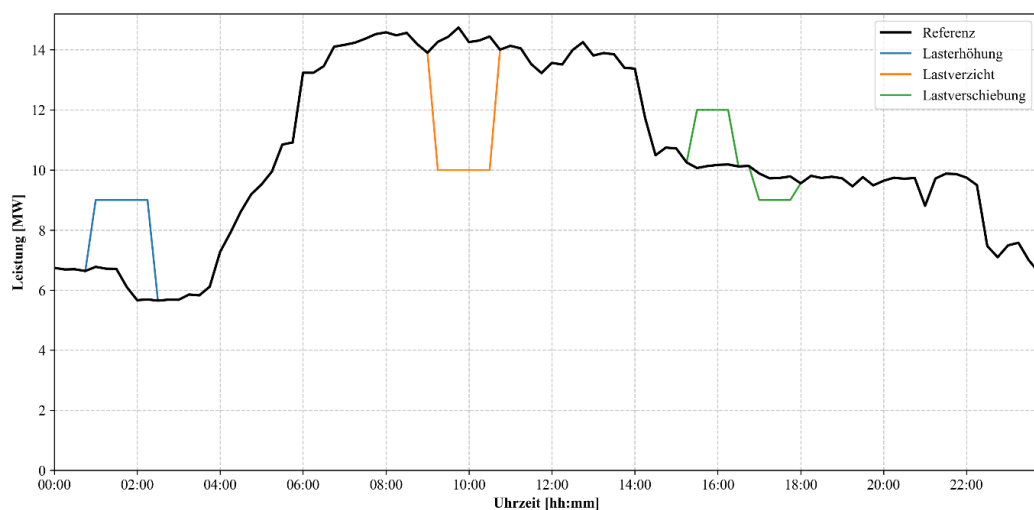


Abbildung 11 Beispielhafte Visualisierung für Lasterhöhung, Lastverzicht und Lastverschiebung

Sind die Flexibilitätspotentiale ermittelt gilt es festzustellen welche Handlungen erforderlich sind, um Flexibilitätsmaßnahmen im realen Betrieb umzusetzen. Das **FLEXcel** Tool bietet hier erste Anhaltspunkte für weitere Vorgehensweisen.

Schritt III: Bewertung von Flexibilitätspotentialen

Die Bewertung von Flexibilitätspotentialen ist ein wichtiger Schritt, um zu entscheiden welche Potentiale zukünftig durch die Implementierung von Flexibilitätsmaßnahmen gehoben werden

sollen. So kann eine ausreichende Basis für eine detaillierte Prozessmodellierung und -optimierung aufgebaut werden.

Überprüfung der Durchführbarkeit ausgewählter Flexibilitätsmaßnahmen

Auf Basis der Analysen gemäß Kapitel **SCHRITT II: DATENERHEBUNG UND ABLEITUNG DER FLEXIBILITÄTSOPTIONEN** gilt es die Flexibilitätsmaßnahmen bezüglich Durchführbarkeit zu bewerten. Dabei sollen Wechselwirkungen zwischen Flexibilitätsmaßnahmen näher beleuchtet werden. Die nachfolgenden Fragesellungen können dabei helfen:

- **Schließen sich gewisse Flexibilitätsmaßnahmen aus?**
So könnte beispielsweise eintreten, dass zwei Anlagen welche sequentiell aufeinander folgen nicht beide gleichzeitig flexibel gesteuert werden können.
- **Beeinflussen Parameteränderungen andere Prozesse?**
Zum Beispiel kann eine Lastreduktion die Prozessgeschwindigkeit beeinflussen, was eine Anpassung nachfolgender Prozesse erfordert.
- **Welche Puffer- bzw. Speicherkapazitäten stehen zur Verfügung?**
Um beim Beispiel der Lastreduktion und damit einhergehenden Beeinflussung der Prozessgeschwindigkeit zu bleiben, können Pufferkapazitäten zwischen den Prozessen die Prozesse entkoppeln. Zudem muss beachtet werden, wie die Pufferkapazitäten durch Flexibilitätsmaßnahmen ausgelastet werden.

Detailanalyse der Kostenparameter

Neben den Prozess- und Flexibilitätsparametern gilt es zur Vorbereitung einer ökonomischen Bewertung der Flexibilitätsmaßnahmen und der damit verbundenen Flexibilitätspotentiale Kostenparameter zu ermitteln. Die nachfolgende Tabelle 4 zeigt relevante Kostenparameter inklusive einer kurzen Erläuterung.

Tabelle 4 Kostenparameter zur Detailanalyse der Flexibilitätsoptionen

Flexibilitätsparameter	Erläuterung	Einheit
Investitionskosten	Kosten für Investitionen, die eine Flexibilitätsmaßnahme zu Befähigen.	€
Fixe Flexibilisierungskosten	Jährliche fixe Kosten die durch die Befähigung einer Flexibilitätsmaßnahme auftreten.	€/a
Variable Flexibilisierungskosten	Kosten die durch die tatsächliche Ausführung der Flexibilitätsmaßnahme entstehen.	€/MWh

Die Kostenparameter umfassen damit zusätzliche Aufwendungen, die durch die Bereitstellung oder Durchführung von Flexibilitätsmaßnahmen entstehen. Grundsätzlich lassen sich zwei Kostenkategorien unterscheiden: Einerseits die Investitionskosten, die das

Flexibilitätpotenzial des Produktionssystems erhöhen bzw. realisierbar machen, indem sie beispielsweise Umrüstungen oder Anlagenanpassungen ermöglichen. Hier können die Methoden der statischen oder dynamischen Investitionsrechnung zur Anwendung kommen.

Und andererseits entstehen bei der eigentlichen Durchführung einer Flexibilitätsmaßnahme weitere fixe und variable Kosten, die zeitlich und organisatorisch mit dem Eingriff verbunden sind. Fixkosten sind beispielsweise zusätzliche Instandhaltungskosten, während variable Kosten nur dann anfallen, wenn die Flexibilität tatsächlich abgerufen wird. Dazu zählen zum Beispiel zusätzliche Personal- oder Verschleißkosten. Regelbetriebskosten werden in dieser Detailanalyse nicht berücksichtigt.

Ökonomische Bewertung von Flexibilitätpotentialen

Im Rahmen der ökonomischen Bewertung erfolgt eine Gegenüberstellung der aufsummierten Kosten der Flexibilitätsmaßnahme mit den möglichen Energiekosteneinsparungen oder Erlösen durch eine Vermarktung z.B. am Day-Ahead- oder Intra-Day-Markt.

Um mögliche Energiekosteneinsparungen berechnen zu können müssen interne Preisinformationen über aktuelle Energiekosten zur Verfügung stehen. Diese können z.B. über das Bedarfsprofil auch für einzelne Stunden oder Tage genau analysiert werden. Wird eine bestimmte Energiemenge eingespart kann diese mit dem aktuellen Energiekosten multipliziert werden, um eine grobe Einschätzung des Einsparungspotential zu erhalten.

Zur Ermittlung der Erlöspotentiale müssen weitere Informationen zur Verfügung stehen:

- **Informationen zu Netzentgelten:** Führen die Flexibilitätsmaßnahmen zu einer Reduktion der Lastspitzen kann eine Reduktion der Netzentgelte erreicht werden.
- **Preisspreads an Day-Ahead- oder Intraday-Märkten:** Sollen Flexibilitätpotentiale auf Spot-Märkten vermarktet werden, kann anhand von Preisspreads ermittelt auf der Basis historischer oder prognostizierter Preiskurven eine Bewertung erfolgen. Historische Preisdaten können zugekauft werden (www.expexspot.at), während Preisprognosen von verschiedenen Anbietern erworben werden können.
- **Preise für Regelreserven:** Bei der Bereitstellung von Systemdienstleistungen können zur Ermittlung des Erlöspotentials historische Preise für Primär-, Sekundär oder Tertiärregelleistung herangezogen werden. Diese sind auf der Seite der APG zu finden. (markt.apg.at/netz/netzregelung/statistik)

Um die ökonomische Bewertung einer Lastverschiebung, -erhöhung oder -reduktion zu vereinfachen wurde begleitend zum Leitfaden ein Tool namens **FLEXscore**



entwickelt. Das Tool ermöglicht auf Basis weniger Daten eine grobe Abschätzung des ökonomischen Potentials bei Vermarktung der Flexibilitätspotentiale auf dem Day-Ahead- und dem Intraday-Markt. Dabei werden ausgewählte Prozess- (Betriebszeiten und Energiebedarfsprofile) und Flexibilitätsparameter (Regenerationszeiten), sowie ein kumulierter Kostenparameter berücksichtigt. Zudem werden Anlagenabhängigkeiten und historische Preisdaten in die Betrachtung miteinbezogen. Als Ergebnis erhält man pro Flexibilitätsoption einen erzielbaren Erlös, welcher mit maximalen Erlöspotentialen in Relation gesetzt wird.

Schritt IV: Hebung der Potentiale durch gesamtheitliche Betriebsoptimierung

Aufbauend auf den Ergebnissen aus der techno-ökonomischen Bewertung konnte nun das ökonomische Potential des Betriebs grundlegend abgeleitet werden. In der finalen Phase stellt sich nun die Frage der Realisierbarkeit und der Hebung dieser Potentiale. Dieser Aspekt teilt sich grundlegend in zwei Bereiche auf. Einerseits die tatsächliche Umsetz- und Verwertbarkeit der identifizierten Potentiale, sowie der technischen Realisierung.

Technische Realisierung und Umsetzung

Der Schritt der tatsächlichen Realisierung und vollständigen Umsetzung kann in diesem Leitfaden allerdings nicht systematisch behandelt werden. Aufgrund unterschiedlicher Unternehmens- und standortspezifischer Anforderungen, müssen hier für jeden Fall individuelle Maßnahmen getroffen werden. Diese können in Form eines *Detailed Engineering* auf Basis der bisherigen Ergebnisse erhoben und bestimmt werden. Dies ist vor allem oftmals mit der Bereitschaft zu einem Investment in entsprechende Projekte, Technologien und Umsetzungen verbunden. Wenn bis zu diesem Punkt in dem Leitfaden allerdings alles auf ein hohes Flexibilitätspotential hinweist, und die techno-ökonomische Bewertung auch positiv ausfällt, ist dies auf alle Fälle in Erwägung zu ziehen.

Hierzu empfiehlt sich die Konsolidierung von Experten in zielgerichteten Projekten.

Optimierte Betriebsführung

Ein weiterer wichtiger Schritt in der Umsetzung und technischen Realisierung ist allerdings auch die an die Anforderungen angepasste Regelung des Energiesystems, welche im Einklang mit der gesamten Produktionsstrategie geschehen muss. Vor allem die Integration von Flexibilitätsträgern, wie etwa volatile Energieträger, oder die Teilnahme an Flexibilitätsmärkten sind nur dann für das Unternehmen techno-ökonomisch sinnvoll, wenn diese synergetisch mit der Produktion abgestimmt werden.

Um dies gesamtheitlich berücksichtigen zu können empfiehlt es sich ein übergeordnetes Regelungskonzept einzuführen, welches sowohl Energiebedarf und -produktion vorhersagen und berücksichtigen kann als auch den gesamten Produktionsprozess miteinschließt und teilweise auch mit optimieren kann. Ein derartiges System sollte spezifisch die folgenden drei Punkte adressieren:

Volatilität

Die Nutzung von Flexibilität basiert grundlegend auf dem Ausgleich von volatiler Energieproduktion und -bereitstellung. Um bereits proaktiv vorab agieren zu können müssen Prognose- und Vorhersagemethoden verwendet werden.

Variationsbreite

Die aktuellen Energie- und Produktionssysteme werden immer umfangreicher in ständig erweitert. Um zukunftsfit zu sein, sollte ein Regelungskonzept in der Lage sein eine große Bandbreite an Erzeugern und Verbrauchern abzudecken und auch adaptiv angepasst werden zu können. Somit sollte ein Framework dafür auch eine möglichst hohe Modularität aufweisen.

Optimaler Betrieb

Zuletzt, aber vermutlich auch der wichtigste Punkt, sollte ein Regelungsframework in der Lage sein das gesamte Energie- und Produktionssystem optimal zu betreiben. Dies bedeutet hauptsächlich Flexibilitäten maximal auszunützen, um den idealen Betrieb sicherstellen zu können. Hierfür eignen sich besonders model- und optimierungsbasierte Zugänge.

Frameworks, die diese Punkte, zumindest auf den Energiesektor bezogen, weitestgehend erfüllen können auf Basis von modellprädiktiven Regelungen für jeden Betrieb entwickelt und implementiert werden. Die Basis für die notwendigen Modelle liefern eine Vielzahl an frei-zugänglichen Energiesystem Modellen, welche etwa systematisch in [13] verglichen werden.

Für eine sinnvolle Regelung der Energiezentrale auf Basis dieser Frameworks sind allerdings auch die Produktionsprozesse und spezifisch die Produktionsplanung zu berücksichtigen. Hierzu ist es notwendig die Produktionsprofile der relevanten Systeme, wie bereits im Kapitel **SCHRITT II: DATENERHEBUNG UND ABLEITUNG DER FLEXIBILITÄTSOPTIONEN** erläutert, in der Regelungsstrategie zu berücksichtigen. Dafür stehen grundsätzlich drei unterschiedliche Methoden zur Verfügung: direkte Berücksichtigung der (gemittelten) Profile aus historischen Messdaten, Prognose von Profilen aus historischen Messdaten [14–16] oder Generierung der Profile aus Modellen [17–21]. Die unterschiedlichen Methoden steigen jeweils in der Komplexität der Umsetzung, ermöglichen aber damit auch jeweils eine genauere Beschreibung der Prozesse, und somit einen optimaleren

Betrieb. Grundsätzlich gilt, dass jegliche Integration bereits eine Verbesserung des Betriebs, und damit einhergehend eine Reduktion der Kosten bringt, unter der Annahme, dass Flexibilitäten existieren und gehoben werden können.

Spezifisch wurde hierfür, im Rahmen des Projekts ein existierendes Framework zur übergeordneten Regelung von Multi-Energiesystemen [22, 23] um die Berücksichtigung von industriellen Produktionsprozessen basierend auf gemittelten Produktionsprofilen erweitert. Eine detaillierte Beschreibung der entwickelten Methodik¹ übersteigt zwar den Rahmen dieses Leitfadens, kann aber in [24, 25] nachgelesen werden.

Zur Verdeutlichung dessen, was es bedeutet, wenn Flexibilität optimal gehoben wird, folgen nun ein paar Beispiel-Anwendungen des zuvor skizzierten Frameworks. Hierbei handelt es sich um zwei unterschiedliche Möglichkeiten der Flexibilitätshebung, welche auf Basis realer Prozesse ausgewählt und simuliert wurden. Die Ergebnisse sollen dabei nicht als tatsächliche Umsetzungen interpretiert werden, aber stattdessen ein Gefühl dafür vermitteln, was mit Hilfe einer optimierungsbasierten Regelung aus einem Produktionsprozess herausgeholt werden kann. Details zu den Rahmenbedingungen der Beispiele sind in **A 2 DETAILS ZUR OPTIMIERUNGSBASIERTEN BETRIEBSPLANUNG** zu finden.

¹ Die Methodik basiert grundlegend auf einer mathematischen Faltung der Bedarfs- und Produktionsprofile des industriellen Prozesses mit einem Startsignal. Dieses kann im Optimierungsproblem als freie oder fixierte Variable gesetzt werden, und somit der Produktionsplan optimiert beziehungsweise berücksichtigt werden.

Anwendungsbeispiel: Speicherbewirtschaftung

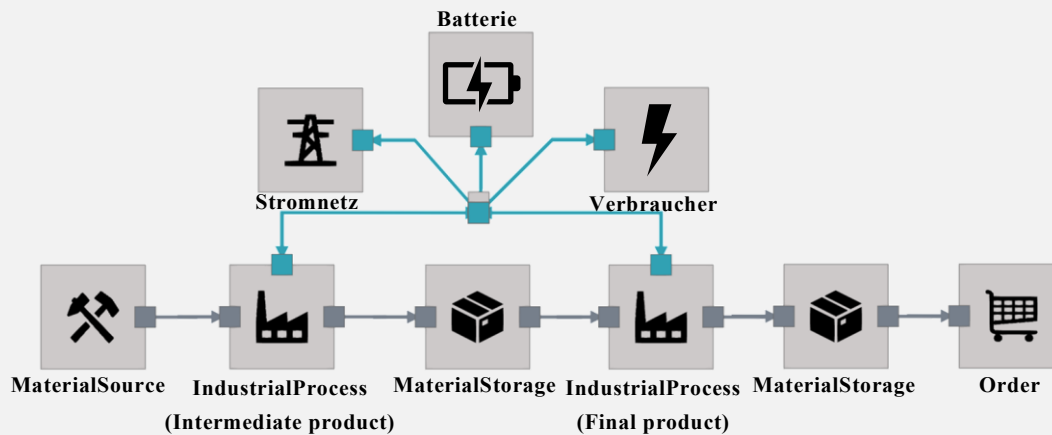


Abbildung 12 Prozessschema lineare Produktion mit Material- und Batteriespeicher, Materialflüssen (grau) und Stromflüssen (türkis)

Kurzbeschreibung

Für die Nutzung von Flexibilität sind Speichertechnologien jeglicher Art äußerst essenziell. In diesem Beispiel soll illustriert werden, wie sich sowohl Zwischenspeicher in der Produktionskette als auch energietechnische Speicher (konkret eine Batterie) zur Hebung der Flexibilität genutzt werden und welches Resultat dadurch erzielt werden kann.

ABBILDUNG 12 zeigt schematisch einen derartigen Produktionsablauf.

Flexibilisierungsmaßnahmen

- Teilnahme am Day-Ahead Markt
- Optimierte Bewirtschaftung des Stromspeichers und des Zwischenlagers
- Optimierter Produktionsplan

Ergebnisse

- Gleichbleibende Maschinenauslastung
- Kostengünstigere Produktion durch Verschiebung der Produktionszeiten
- Erhöhung des Energieautarkie Grades durch optimierte Speichernutzung

Hebung der Flexibilität durch (optimierte) Nutzung von energie- und produktionstechnischen Speichern führt zur Reduktion von Produktionskosten.

Anwendungsbeispiel: Sektorkopplung und Produktvielfalt

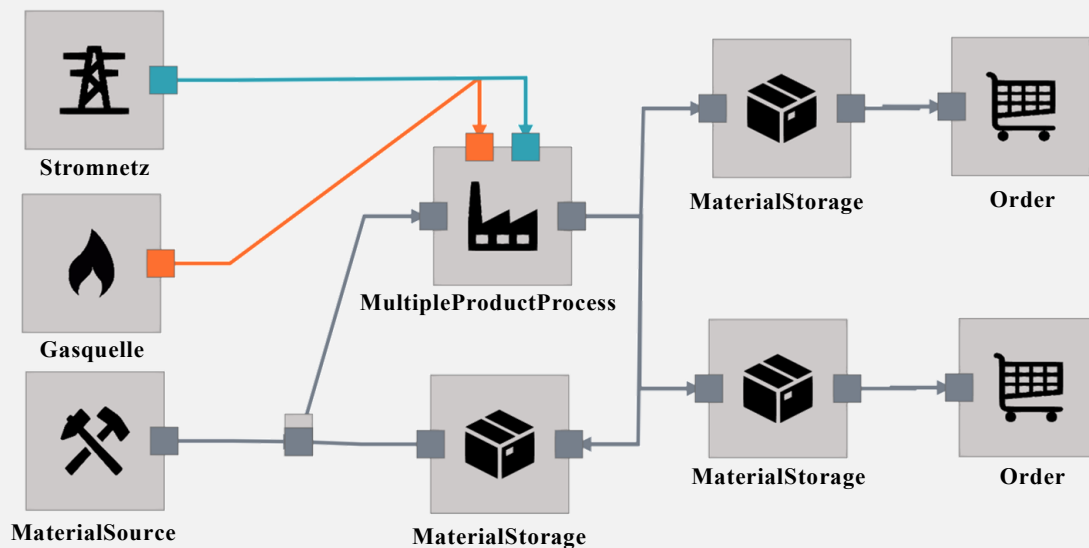


Abbildung 13 Prozessschema für sektorgekoppelte Produktion unterschiedlicher Produkte mit Material- und Produktspeicher, Materialflüssen (grau), Gasflüssen (orange) und Stromflüssen (türkis).

Kurzbeschreibung

Der Wechsel zwischen unterschiedlichen Produktkategorien, mit diversen Bedarfen an Primärenergie (Strom, Wärme/Gas, Material), erhöht die Flexibilität des Prozesses. In diesem Beispiel wird gezeigt wie diese Flexibilität durch optimierte Produktionsplanung genutzt werden und welches Resultat dadurch erzielt werden kann. **ABBILDUNG 13** zeigt schematisch einen derartigen Produktionsablauf, bei dem unterschiedliche Produkte in einer Anlage produziert werden können.

Flexibilisierungsmaßnahmen

- Teilnahme am Day-Ahead Markt
- Flexibler Wechsel zwischen produzierten Produkten (optimierungsbasiert)
- Produktabhängige Primärenergienutzung
- Optimierter Produktionsplan

Ergebnisse

- Gleichbleibende Maschinenauslastung bei wechselnder Produktkategorie
- Kostengünstigere Produktion durch Verschiebung der Produktionszeiten
- Erhöhung der Ressourceneffizienz

Flexibilität durch (optimierte) Planung von Produktionsprozessen in Koordination mit dem Energiesystem führt zur Reduktion von Produktionskosten.

KERNAUSSAGEN UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Energieflexibilität ist weit mehr als ein technisches Detail. Sie ist ein zentraler Baustein für eine nachhaltige, wettbewerbsfähige und zukunftssichere Industrie. Unternehmen, die sich frühzeitig mit dieser Thematik auseinandersetzen, verschaffen sich nicht nur Kostenvorteile, sondern sichern auch ihre langfristige Resilienz gegenüber volatilen Märkten und regulatorischen Anforderungen.

Zentrale Erkenntnisse

Ganzheitliche Bedeutung

Energieflexibilität ist kein rein technisches Thema, sondern umfasst strategische, wirtschaftliche und organisatorische Dimensionen. Der Leitfaden sowie die im Rahmen von **FLEXcheck** entwickelten Tools sollen dabei helfen einen Überblick zu erhalten und diesen kontinuierlich zu verbessern.

Strukturiertes Vorgehen

Eine schnelle Bestimmung von Flexibilitätspotentialen und die Ableitung erster Maßnahmen sind entscheidend. Wenn im ersten Schritt keine klaren Potentiale erkennbar sind, sollte der Fokus auf einfach greifbare und umsetzbare Maßnahmen gelegt werden, bevor komplexe Detailanalysen erfolgen. So kann ein tieferes Verständnis von Produktionsabläufen und Daten aufgebaut werden, bevor komplexere Flexibilitätsmaßnahmen angestrebt werden.

Daten als Grundlage

Die kontinuierliche Erfassung und Auswertung von Energie- und Betriebsdaten ist unverzichtbar, um Flexibilitätsoptionen zuverlässig zu identifizieren sowie deren technische Realisierbarkeit und wirtschaftliche Tragfähigkeit zu bewerten.

Handlungsempfehlungen für die Praxis

Frühzeitig beginnen

Eine zeitnahe Beschäftigung mit der Thematik Energieflexibilität wird empfohlen, auch wenn erste Potentiale klein erscheinen.

Schrittweise vorgehen

Start mit einfachen Flexibilitätsmaßnahmen (z. B. in Neben- oder Infrastrukturanlagen), bevor komplexe Prozesseingriffe oder -anpassungen geprüft werden.[8]

Datenmanagement etablieren

Aufbau eines durchgängigen Datenmanagementsystems zur Erfassung und Nutzung von Energie- und Betriebsdaten als strategische Grundlage zur Hebung von Flexibilitätspotentialen.

Strategische Verankerung

Energieflexibilität sollte nicht isoliert betrachtet, sondern in die Unternehmensstrategie und das Energiemanagement integriert werden.

So entsteht ein direkter Weg von der ersten Auseinandersetzung mit der Thematik, der ersten Datenaufnahme und -aufbereitung, über die Erhebung von Flexibilitätsmaßnahmen und deren Potential bis hin zur Umsetzung in der Praxis. Wer hierbei Unterstützung bei tiefergehenden Prozessanalysen, Optimierungen oder der Entwicklung maßgeschneiderter Projekte benötigt, findet in unseren wissenschaftlichen Partnern kompetente Ansprechpartner.

LITERATUR UND REFERENZEN

- [1] VDI 5207 Blatt 1 - Energieflexible Fabrik - Grundlagen. 2020. [Online]. Available: <https://www.vdi.de/mitgliedschaft/vdi-richtlinien/details/vdi-5207-blatt-1-energieflexible-fabrik-grundlagen>
- [2] Leitfaden Energieflexibilitätsoptionen in der Industrie. vbw - Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V., 2024. [Online]. Available: https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2024/Downloads/2024-10-08-Leitfaden-Energieflexibilit%C3%A4tsoptionen-in-der-Industrie_FINAL-3.pdf
- [3] J. C. Arlinghaus, P. Komarnicki, and M. Richter, 'Prospektive Flexibilitätsoptionen in der produzierenden Industrie', 2020, doi: [10.24406/iff-n-599494](https://doi.org/10.24406/iff-n-599494).
- [4] S. Estelmann, R.-U. Dietrich, and A. Seitz, Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie Methodik | Potenziale | Hemmnisse. 2018. [Online]. Available: http://www.dlr.de/dlr/PortalData/1/Resources/documents/2018/05032018_Studie_Flexibilitaetsoptionen_in_der_Grundstoffindustrie.pdf
- [5] Energieflexibilitätsoptionen in der Industrie - Fokus Bayern. vbw - Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V., 2024. [Online]. Available: https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2024/Downloads/Studie-Energieflexibilit%C3%A4tsoptionen-in-der-Industrie_FINAL.pdf
- [6] A. Sauer, E. Abele, H. U. Buhl, and Fraunhofer IPA, Stuttgart, Eds, Energieflexibilität in der deutschen Industrie: Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt - Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie). Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2019.
- [7] 'Rückblick: NEFI Technology Talk „Wirtschaftlich nutzbare Flexibilitäten in der Industrie – Low Hanging Fruits?“ - NEFI'. [Online]. Available: <https://www.nefi.at/de/news-2024-detail/rueckblick-nefi-technology-talk-wirtschaftlich-nutzbare-flexibilitaeten-in-der-industrie-low-hanging-fruits>
- [8] C. Zöphel and T. Müller, 'FLEXIBILITÄTSOPTIONEN AM STROMMARKT- EINE ANALYSE ZU HEMMNISSEN UND ERLÖSMÖGLICHKEITEN', presented at the 14. Symposium Energieinnovation, Graz/Austria, Feb. 2016.

- [9] B. Riederer, M. Puster, K. Pfleger-Schopf, and M. Göller, ‘FLEXcheck - Fragebogen “Identifikation industrieller Flexibilitätspotentiale”’, Aug. 2025, doi: [10.5281/zenodo.17185135](https://doi.org/10.5281/zenodo.17185135).
- [10] B. Riederer et al., ‘FLEXcel’. Zenodo, Sept. 19, 2025. doi: [10.5281/zenodo.16759276](https://doi.org/10.5281/zenodo.16759276).
- [11] S. Narasimhan and C. Jordache, Data reconciliation & gross error detection: an intelligent use of process data. Houston: Gulf Pub. Co, 2000.
- [12] Y. Miao, H. Su, R. Gang, and J. Chu, ‘Industrial Processes: Data Reconciliation and Gross Error Detection’, Meas. Control, vol. 42, no. 7, pp. 209–215, Sept. 2009, doi: [10.1177/002029400904200704](https://doi.org/10.1177/002029400904200704).
- [13] M. Hoffmann et al., ‘A review of mixed-integer linear formulations for framework-based energy system models’, Adv. Appl. Energy, vol. 16, p. 100190, Dec. 2024, doi: [10.1016/j.adapen.2024.100190](https://doi.org/10.1016/j.adapen.2024.100190).
- [14] V. Zawodnik, F. Schwaiger, C. Sorger, and T. Kienberger, ‘Tackling Uncertainty: Forecasting the Energy Consumption and Demand of an Electric Arc Furnace with Limited Knowledge on Process Parameters’, Energ. Open-Access J. Relat. Sci. Res. Technol. Dev. Stud. Policy Manag., vol. 2024, no. 6, Mar. 2024, doi: [10.3390/en17061326](https://doi.org/10.3390/en17061326).
- [15] V. Zawodnik, ‘Optimized Production Scheduling: A Case Study on Food and Steel Industry’, Conf. Proc. NEFI NEW ENERGY Ind. 2024, pp. 39–41, 2024.
- [16] V. Zawodnik, A. Gruber, and T. Kienberger, ‘Fueling Industrial Flexibility: Discrete-Time Dispatch Optimization of Electric Arc Furnaces’, Energ. Open-Access J. Relat. Sci. Res. Technol. Dev. Stud. Policy Manag., vol. 2025, no. 18, Sept. 2025, doi: [10.3390/en18184838](https://doi.org/10.3390/en18184838).
- [17] P. J. Binderbauer and T. Kienberger, ‘Ganymed’, Ganymed - Application for Industrial Load Profile Simulation. [Online]. Available: <http://ganymed.ga/index.html>
- [18] T. Staubmann, ‘Erstellung eines Lastprofilgenerators für die Eisen- und Stahlbranche mittels ereignisorientierter Simulation’, Masterarbeit, 2021.
- [19] P. J. Binderbauer, T. Kienberger, and T. Staubmann, ‘Synthetic load profile generation for production chains in energy intensive industrial subsectors via a bottom-up approach’, J. Clean. Prod., vol. 331, p. 130024, Jan. 2022, doi: [10.1016/j.jclepro.2021.130024](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130024).
- [20] P. Binderbauer, ‘Synthetic Load and Generation Profiles in Industry’, University of Leoben, 2024. doi: [10.34901/mul.pub.2024.049](https://doi.org/10.34901/mul.pub.2024.049).
- [21] ‘Modeling of hybrid systems’. [Online]. Available: <https://control.ee.ethz.ch/research/theory/control-of-constrained-hybrid-systems/modeling.html>

- [22] A. Moser et al., 'A MILP-based modular energy management system for urban multi-energy systems: Performance and sensitivity analysis', *Appl. Energy*, vol. 261, p. 114342, Mar. 2020, doi: [10.1016/j.apenergy.2019.114342](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114342).
- [23] D. Muschick, S. Zlabinger, A. Moser, K. Lichtenegger, and M. Göllles, 'A multi-layer model of stratified thermal storage for MILP-based energy management systems', *Appl. Energy*, vol. 314, p. 118890, May 2022, doi: [10.1016/j.apenergy.2022.118890](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118890).
- [24] B. Riederer et al., 'Flexibilization of industrial energy systems by optimization-based demand response', presented at the NEFI NEW ENERGY FOR INDUSTRY 2024, Oct. 2024, pp. 36–38. doi: [10.5281/zenodo.13985899](https://doi.org/10.5281/zenodo.13985899).
- [25] K. Pflieger-Schopf et al., 'Enabling a new balance - efficient identification and utilization of techno-economic flexibilities in industry', *Energy Sustain. Soc.*, no. 3rd CONFERENCE OF THE INNOVATION NETWORK: New Energy for Industry 2024, 2025, in preparation.
- [26] J. Forrest et al., 'coin-or/Cbc: Release releases/2.10.12'. Zenodo, Aug. 20, 2024. doi: [10.5281/zenodo.13347261](https://doi.org/10.5281/zenodo.13347261).
- [27] 'Austrian Power Grid AG - DayAhead', EXAAD1P_2024-05-22T22_00_00Z_2024-05-23T22_00_00Z_15M_de_2024-05-22T12_50_54Z.csv. [Online]. Available: <https://markttransparenz.apg.at/de/markt/Markttransparenz/Uebertragung/EXAA-Spotmarkt>
- [28] 'Preise, Nutzen, Handel: Das müssen Sie über Schrott wissen', *Produktion Online*. [Online]. Available: <https://www.produktion.de/rohstoffe/schrott/schrottpreis-im-fokus-wie-sich-der-wert-von-altmetall-veraendert-311595-433.html>
- [29] 'Gaspreisindizes: AEA - Österreichische Energieagentur'. [Online]. Available: <https://www.energyagency.at/fakten/gaspreisindizes>

DANKSAGUNG

Unser besonderer Dank gilt dem Land Steiermark, das im Rahmen der 15. Ausschreibung des Zukunftsfonds die Entwicklung dieses Leitfadens, der Methoden, sowie der zugehörigen Tools unterstützt hat. Ohne diese Förderung wäre das Projekt in dieser Form nicht möglich gewesen.

Weiters bedanken wir uns bei allen weiteren Beteiligten am Projekt in den beiden wissenschaftlichen Einrichtungen. Diese sind, in alphabetischer Reihenfolge: Carina Deutsch, Sebastian Dietze, Cyrus Alexander Emami, Markus Göllles, Andreas Hammer, Walter Haslinger, Valentin Kaisermayer, Thomas Kienberger, Jonathan Krobatschek, Klaus Lichtenegger, Carl Majneri, Jürgen Mitterlehner, Daniel Muschick, Helmut Niederweiser, Martin Puster, Julia Schönfelder, Sandra Staudt, Julia Vopava-Wrienz.

Zusätzlich zu den Mitarbeiter:innen in den wissenschaftlichen Einrichtungen gilt unser Dank auch jenen Firmen die dieses Projekt bereits vorab mit einem Letter-of-Intent unterstützt haben: Agrana Zucker GmbH (www.agrana.com), Ceram Austria GmbH (www.ceram-austria.com), Stahl- und Walzwerk Marienhütte GmbH (www.marienhuetten.at), World-Direct eBusiness solutions GmbH (www.world-direct.at) und Zellstoff Pöls AG (www.heinzelpoels.com). Spezieller Dank gilt außerdem Markus Deutsch und Hannes Knoll von Ceram Austria GmbH, Christoph Sorger von Stahl- und Walzwerk Marienhütte GmbH und Bernhard Schmid von Zellstoff Pöls AG, für die tiefen Einblicke in die jeweiligen Produktionsbetriebe, und die tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung des Projekts.

Zu guter Letzt gilt unser Dank jeder Person, die diesen Leitfaden liest, und somit ein Engagement für eine flexiblere und erneuerbare Zukunft zeigt. Ohne Euch die diese Methoden in ihren Betrieben anwenden und auch Maßnahmen umsetzen, werden wir die Energietransition nicht schaffen. Daher ein herzliches Dankeschön an Euch.

Gemeinsam in eine flexible, erneuerbare und aussichtsreiche Zukunft!

APPENDIX

A 1. Workflow zur strukturierten Aufbereitung und Verwaltung heterogener Messdaten

Wie bereits in Kapitel **SCHRITT II: DATENERHEBUNG UND ABLEITUNG DER FLEXIBILITÄTSOPTIONEN** grundlegend beschrieben unterteilt sich ein Workflow zur Vorbereitung von Messdaten für weiterführende Analysen in drei Schritte: **Beschaffung der Daten, Aufbereitung**, sowie **Verwaltung & Verarbeitung**. Innerhalb dieser Schritte gibt es noch zugehörige Teilschritte, welche in **ABBILDUNG 14** dargestellt sind. Im Folgenden werden diese genauer beschrieben.

Die Beschaffung der Messdaten wird hierfür unterteilt in einen allgemeinen Schritt der *Beschaffung*, sowie der *Digitalisierung* der vorhandenen Daten. Abhängig vom ursprünglichen Format der Primärdaten müssen im Schritt der Digitalisierung unterschiedliche Methoden zur Digitalisierung angewendet werden.

Bei den Datenformaten unterscheidet man in **visuell lesbar**, **visuell-maschinell lesbar** und **maschinell lesbar** Datenformate. Während maschinell und visuell-maschinell lesbare Daten mithilfe von Computerprogrammen direkt weiterverarbeitet werden können, ist dies für Datenformate, die rein visuell lesbar sind, nicht der Fall.

Visuell lesbare Daten umfassen hierbei sowohl handschriftliche Aufzeichnungen (z.B. Anlagenprotokolle, Fahrtenbücher, ...) als auch jene Dokumente welche weitere relevante Messgrößen beinhalten können (z.B. Strom- und Gasabrechnungen, Berichte, ...). Letztere können durchaus bereits in „digitaler“ und somit maschinell-lesbarer Form, wie zum Beispiel als .pdf, vorliegen, sind aber nicht direkt verwertbar, da zusätzliche Informationen enthalten sein können.

Visuell-maschinell und rein maschinell lesbare Daten hingegen können direkt zur weiteren Verarbeitung verwendet werden ohne einen Schritt der Vorverarbeitung. Die Unterscheidung in visuell-maschinell und maschinell ist rein vom Aspekt der weiteren Datenverarbeitung irrelevant. Allerdings können visuell-maschinell lesbare Daten schneller auf offensichtliche Probleme untersucht werden, da zur visuellen Durchsicht keine Vorverarbeitung notwendig ist. Rein maschinell lesbare Daten hingegen sind dafür meist in Form von komprimierten Speicherformaten vorhanden und erlauben somit einen einfacheren Datentransfer großer Datenmengen.

Ziel der Digitalisierung der Primärdaten ist es auf jeden Fall alle Daten in einem, idealerweise, einheitlichen Dateiformat digital zur Verfügung zu haben. Dieser Schritt ist sehr spezifisch und muss daher individuell getätigt werden.

Am Abschluss der Datenbeschaffung, und somit am Beginn der Aufbereitung stehen nun die sogenannten *digitalen Rohdaten*. Diese sind in einem weiteren Schritt aufzubereiten beziehungsweise fehlende Daten zu ergänzen. Das Ziel hierbei ist es einerseits ein einheitliches Datenformat zu verwenden, als auch eine einheitliche Form der Daten, wie etwa Zeitreihen, zu erhalten. Hierbei unterscheidet man erneut in drei Kategorien: **Datenanalyse und -bereinigung**, **Datentransformation** und **Synthetisieren von Daten**. Oftmals müssen mehrere dieser Schritte durchgeführt werden, um einheitliche Daten zu erhalten.

Bei der Datenanalyse handelt es sich um den Schritt der Rohdatenverarbeitung welcher mithilfe statistischer Methoden nach Lücken in den Daten, redundanten Informationen, sowie Ausreißern sucht und diese identifiziert. Diese Daten sollten dann entfernt werden, bevor die Lücken in einem nächsten Schritt wieder gefüllt werden.

In der Datentransformation sollten die bereinigten Daten in ein einheitliches Format überführt werden. Hierzu sollten Daten stets in SI-Basiseinheiten überführt werden, um weitere Fehler zu vermeiden. Die entstanden Lücken aus der Datenbereinigung werden in diesem Schritt gefüllt in Abhängigkeit von den entsprechenden Datentypen. Methoden hierfür sind: Ableitung/Schätzung aus anderen Messdaten (z.B. für Summen oder dergleichen), Ergänzung durch vergleichbare Daten (z.B. historische Daten, oder vergleichbare Maschinen), Verwendung von Default Werten, oder mittels Inter- und Extrapolationsmethoden. Spezifisch Interpolations- und Extrapolationsmethoden eignen sich oftmals, da meist Zeitreihen ein sinnvolles finales Format für die Daten darstellen.

In der Synthese von Messdaten geht es noch darum Daten für nicht gemessene Systeme zu generieren. Dies kann mittels daten- oder modellgetriebener Ansätze geschehen. Die Notwendigkeit dieses Schrittes ist nur gegeben, wenn für eine für weitere Analysen relevante Anlage keine Messung vorhanden ist. Hier wird generell auch empfohlen Messgeräte und Sensorik nachzurüsten für zukünftige Analysen. In einem ersten Schritt ist eine Synthese aber durchaus sinnvoll. Ein Beispiel hierfür findet sich in [\[17\]](#).

Am Ende der Aufbereitung liegen nun alle Daten in einem einheitlichen Dateiformat und Datenformat vor. Diese Daten werden als *digitale Sekundärdaten* bezeichnet. Diese sollten nun für weitere Verarbeitung bereit sein, und daher in dieser Form auch zentralisiert abgespeichert werden. Hierfür eignen sich spezifisch Datenbanken, um eine zukünftige und kontinuierliche Erweiterung einfach handhabbar zu machen. Die weitere Verarbeitung ist dann spezifisch für die entsprechende Anwendung zu definieren und durchzuführen.

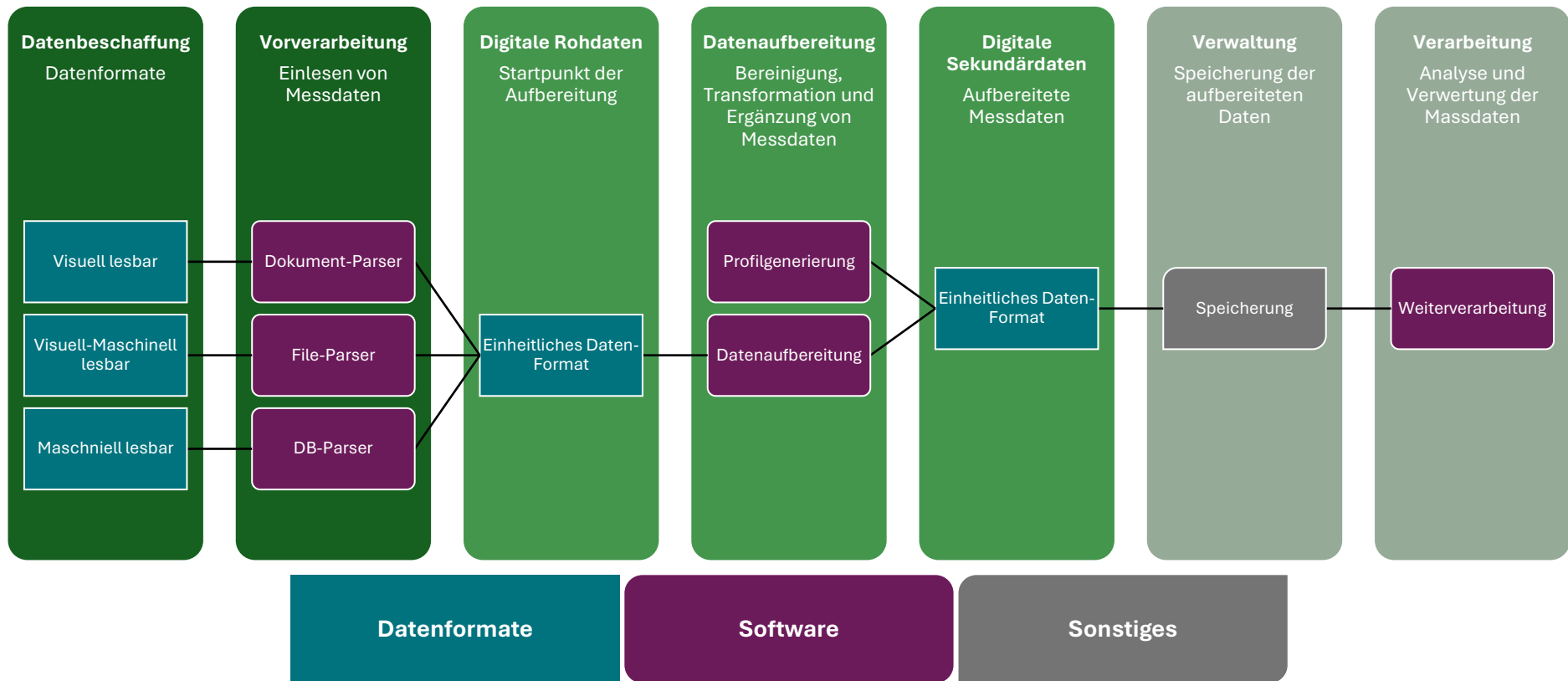


Abbildung 14 Detaillierter schematischer Workflow der Messdaten Verarbeitung
Schritte des Workflows sind den Workflow Kategorien aus **ABBILDUNG 8** farblich zugeordnet

A 2. Details zur optimierungsbasierten Betriebsplanung

Zur Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse werden hier nochmals die Prozess- und Energietechnischen Rahmenbedingungen, sowie die Optimierungsrahmenbedingungen für die Anwendungsbeispiele aus Kapitel **SCHRITT IV: HEBUNG DER POTENTIALE DURCH GESAMTHEITLICHE BETRIEBSOPTIMIERUNG** angegeben. Die Optimierungen wurden mit dem im Kapitel **OPTIMIERTE BETRIEBSFÜHRUNG** und [22–25] beschriebenen Framework durchgeführt. Für die Lösung der resultierenden Optimierungsprobleme zum Betrieb der Anlagen wurden in beiden Fällen der open-source Solver Cbc [26] verwendet. Die Verwendung eines open-source Solver erlaubt vor allem die einfachere Handhabung bei einer Umsetzung in einem Industriebetrieb als Decision-Support Software.

Anwendungsbeispiel: Batteriebewirtschaftung

Ziel dieses Beispiels ist die Untersuchung der optimierungsbasierten übergeordneten Regelung der Prozesskette und des Energiesystems, welches in **ABBILDUNG 12** dargestellt ist. Als Rahmenbedingung für die standardmäßige Produktion und die Erstellung des Optimierungsproblem wurden folgende Parameter verwendet:

Zeitdiskretisierung

15 Minuten Intervalle mit einem Vorhersagehorizont von 24 Stunden

Maximale Spitzenlast

2.5 MW in einem 15 Minuten Intervall

Produktionsziel

600 Stück des finalen Produkts bis zum nächsten Morgen um 05:00

Planmäßige Prozessstarts

Zwischenprodukt: 07:30

Finales Produkt: 05:30 und 16:30

Strompreis

aktuelle Daten des Day-Ahead Markts [27]

Materialpreis

0.23 €/kg Stahlschrott Sorte 1 [28]

Zwischenlager

Zu Beginn befinden sich 850 Stück des Zwischenprodukts im Zwischenlager

Verbraucher

Zufälliger gleichverteilter Bedarf zwischen 0 und 100 kW

Batterie

Kapazität: 500 kWh

Ladegrenzen: idealerweise zwischen 20% und 90% der maximalen Kapazität

Bewirtschaftung: gleichmäßiger Einkauf aus dem Netz zwischen 10:00 und 16:00 sowie Füllstand am Anfang und am Ende des Tages muss gleich sein

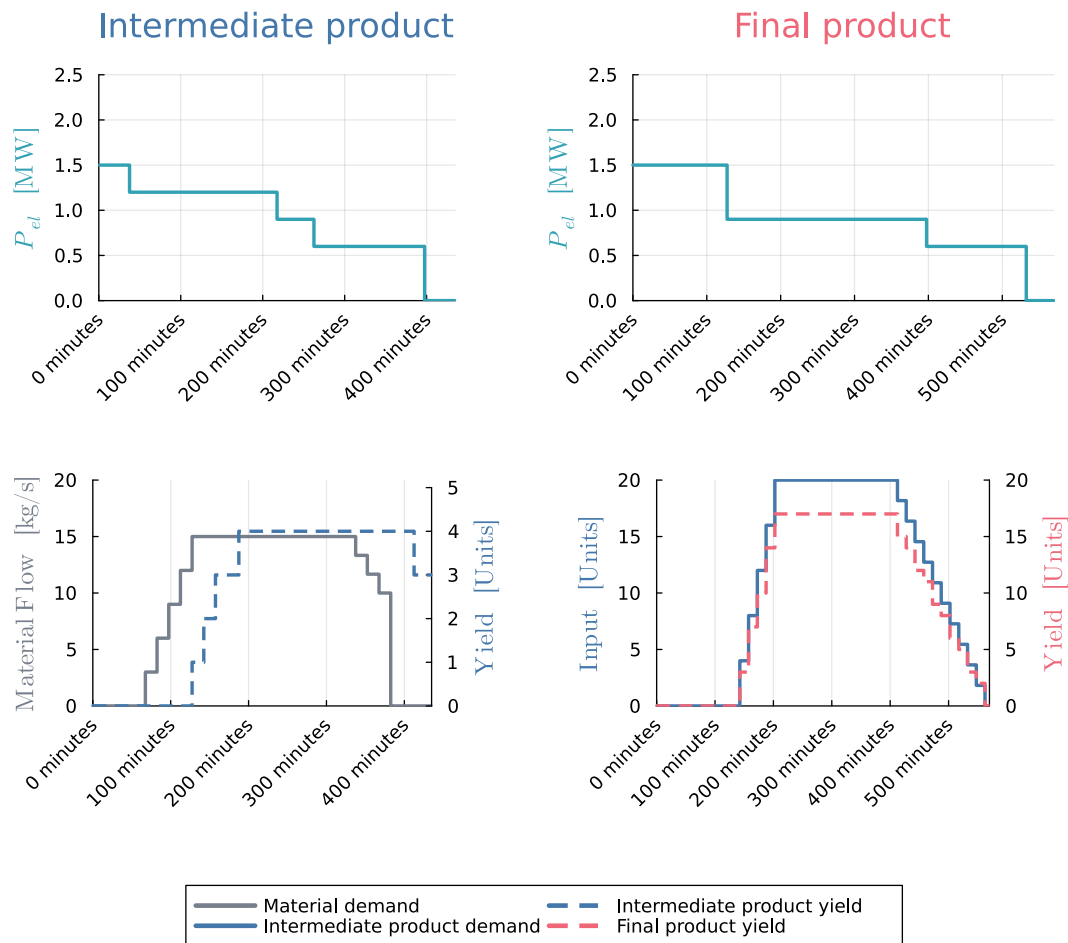


Abbildung 15 Last- und Erzeugungsprofile der Prozesse
(Anwendungsbeispiel: Batteriebewirtschaftung)

Für die Produktionsprofile wurden gemittelt Profile für Batchprozesse verwendet, welche in **ABBILDUNG 15** dargestellt sind. Beide Produktionsprozesse besitzen anfangs einen erhöhten Strombedarf zum Hochfahren des Prozesses, und einen kontinuierlichen Anstieg an Materialbedarf und Output bis zum maximalen Durchsatz.

In einem ersten Schritt wurde ein Durchlauf mit dem fixierten Produktionsstarts durchgeführt um den Strom- und Materialbedarf, die Speicherfüllstände, sowie die resultierenden Kosten zu ermitteln. In **ABBILDUNG 16** werden die Produktionsstarts, die kumulierten produzierten Einheiten, der gesamte Strombedarf, der Materialspeicherstand, die Batteriebe- und -entladung, die Materialspeicherstände, der variable Strompreis, sowie die kumulierten Gesamtkosten, von links oben nach rechts unten dargestellt. Dieser Produktionsplan respektiert die maximale Spitzenlast und erreichte die gewünschten Produktionseinheiten. Ziel der originalen Planung war es die Produktion verstärkt zu Schichtwechselzeiten zu starten, sowie die Batteriebewirtschaftung mit minimalem Aufwand sinnvoll durchführen zu können.

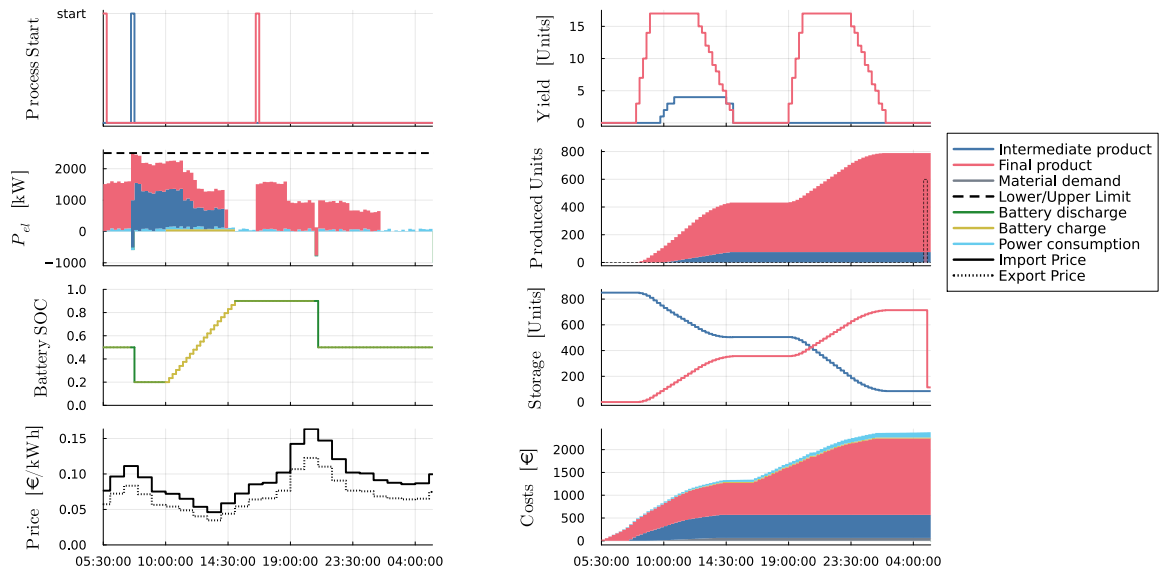


Abbildung 16 Standard-Produktionsplan und resultierender Strombedarf
(Anwendungsbeispiel: Batteriebewirtschaftung)

Im zweiten Schritt wurde die Wahl des Produktionsplans sowie die Batteriebewirtschaftung der Optimierung überlassen. Die angegebenen Ladegrenzen der Batterie durften hierbei auch für einen kurzen Zeitraum unter- oder überschritten werden, wenn es die Ergebnisse signifikant verbesserte. Die Ergebnisse sind analog zum ersten Durchlauf in **ABBILDUNG 17** dargestellt. Auch in diesem Durchlauf konnten alle Bedingungen erfüllt werden.

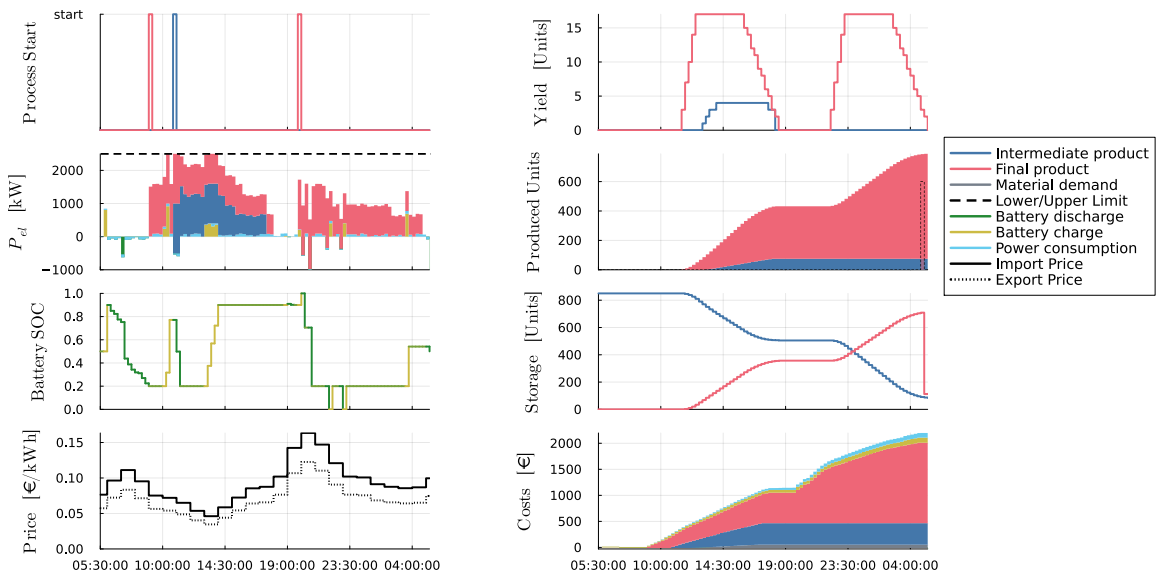


Abbildung 17 Optimierter Produktionsplan und resultierender Strombedarf
(Anwendungsbeispiel: Batteriebewirtschaftung)

Tabelle 5 Vergleich der Betriebsstrategien und resultierenden Kosten
(Anwendungsbeispiel: Batteriebewirtschaftung)

Kategorie	Standard	Optimiert
Zwischenprodukt		
<i>Produzierte Einheiten</i>	75	75
<i>Durchschnittliche Kosten pro Stück</i>	6,74€	5,51€
Endprodukt		
<i>Produzierte Einheiten</i>	714	714
<i>Durchschnittliche Kosten pro Stück</i>	2,43€	2,25€
<i>Kosten Batteriebeladung</i>	20,90€	97,52€
<i>Gewinn Batterieexport</i>	-18,29€	-29,39€
<i>Kosten Strombedarf Verbraucher</i>	115,12€	89,75€
Gesamte Produktion		
<i>Durchschnittliche Kosten pro Endprodukt</i>	3,22€	2,96€
<i>Kosten</i>	2.300,29€	2.116,06€

Der direkte Vergleich der resultierenden Kosten aus den beiden Betriebsstrategien ist in **TABELLE 5** dargestellt.

Der optimierte Produktionsplan konnte somit in diesem Beispiel eine Reduktion der Produktionskosten von 184,22€ beziehungsweise rund 8,1% erreichen. Der Grund hierfür liegt hauptsächlich in der Ausnutzung der Flexibilität durch die Speicher. Mithilfe des Batteriespeichers kann gezielt zu günstigen Zeitpunkten Strom bereits vorausschauend importiert werden und Überschüsse zu einem späteren Zeitpunkt wieder verkauft werden. Dies ist vor allem sinnvoll aufgrund der variablen Strompreise des Day-Ahead Markets. Weiters ist es dadurch auch möglich die Produktionsstarts derart anzupassen, ohne die Spitzenlast zu überschreiten. Die Flexibilität, welche durch den Zwischenspeicher gewonnen wird, ist in beiden Fällen bereits sinnvoll genutzt, da hier die Produktion und die Laufzeit der beiden Prozesse entkoppelt werden können. Mit dieser Demonstration konnte gezeigt werden, dass vor allem bei Prozessen mit Batteriespeichern, ein optimierter Betrieb noch weitere Gewinne erzielen kann, verglichen zu herkömmlichen Standardregelungen.

Anwendungsbeispiel: Sektorkopplung und Produktvielfalt

Ziel dieses Beispiels ist die Untersuchung der optimierungsbasierten übergeordneten Regelung der Prozesskette und des Energiesystems, welches in **ABBILDUNG 13** dargestellt ist. Als Rahmenbedingung für die standardmäßige Produktion und die Erstellung des Optimierungsproblem wurden folgende Parameter verwendet:

Zeitdiskretisierung

15 Minuten Intervalle mit einem Vorhersagehorizont von 24 Stunden

Maximale Spitzenlast

3 MW in einem 15 Minuten Intervall

Produktionsziel

Produkt A: 300 Stück

Produkt B: 600 Stück

Planmäßige Prozessstarts

Produkt A: 05:30, 06:00, 13:00 und 13:30

Produkt B: 20:00 und 20:30

Strompreis

aktuelle Daten des Day-Ahead Markts **[27]**

Gaspreis

42€/MWh basierend auf ÖGPI Jahresindex Juli 2025 **[29]**

Materialpreis

0.23 €/kg Stahlschrott Sorte 1 **[28]**

Materiallager

Zu Beginn befinden sich 500 kg Stahlschrott im Materiallager

Produktionsprozess

Zwei Produkte können parallel produziert, aber nicht zeitgleich gestartet werden

Für die Produktionsprofile wurden gemittelt Profile für Batchprozesses verwendet, welche in **ABBILDUNG 18** dargestellt sind. Beide Produktionsprozesse besitzen anfangs einen erhöhten Strombedarf zum Hochfahren des Prozesses, und einen kontinuierlichen Anstieg an Materialbedarf und Output bis zum maximalen Durchsatz. Produkt B benötigt zusätzlich Gas, welcher gegen Ende der Laufzeit erhöht wird.

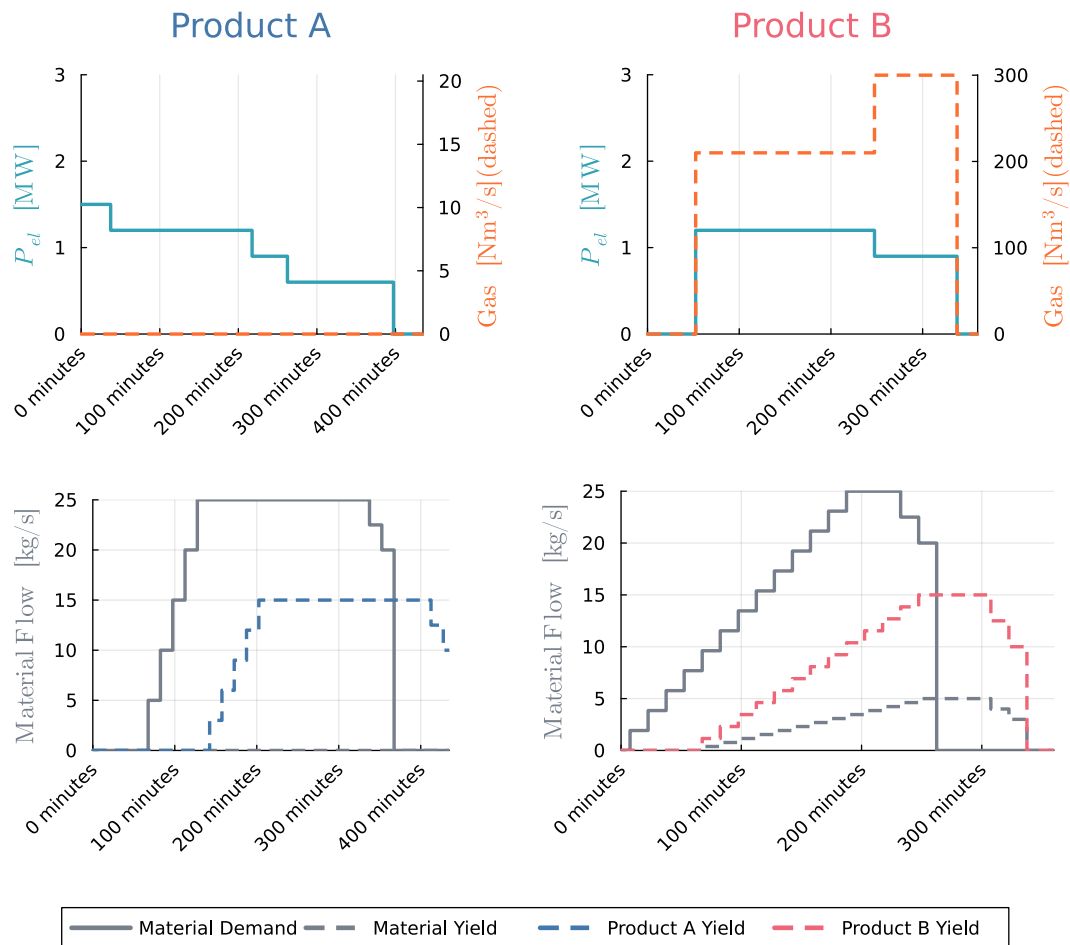


Abbildung 18 Last- und Erzeugungsprofile von zwei Produkten
(Anwendungsbeispiel: Sektorkopplung und Produktvielfalt)

In einem ersten Schritt wurde ein Durchlauf mit dem fixierten Produktionsstarts durchgeführt um den Strom-, Material- und Gasbedarf, sowie die resultierenden Kosten zu ermitteln. In **ABBILDUNG 19** werden die Produktionsstarts, die produzierten Einheiten, der resultierende Materialbedarf sowie der Materialspeicherstand, der gesamte Strombedarf, die kumulierten produzierten Einheiten, der variable Strompreis, sowie die kumulierten Gesamtkosten, von links oben nach rechts unten dargestellt. Dieser Produktionsplan respektiert die maximale Spitzenlast und erreichte die gewünschten Produktionseinheiten. Ziel der originalen Planung war es hierbei die Maschinen möglichst auszulasten und die Wechsel zwischen Produkttypen möglichst gering zu halten.

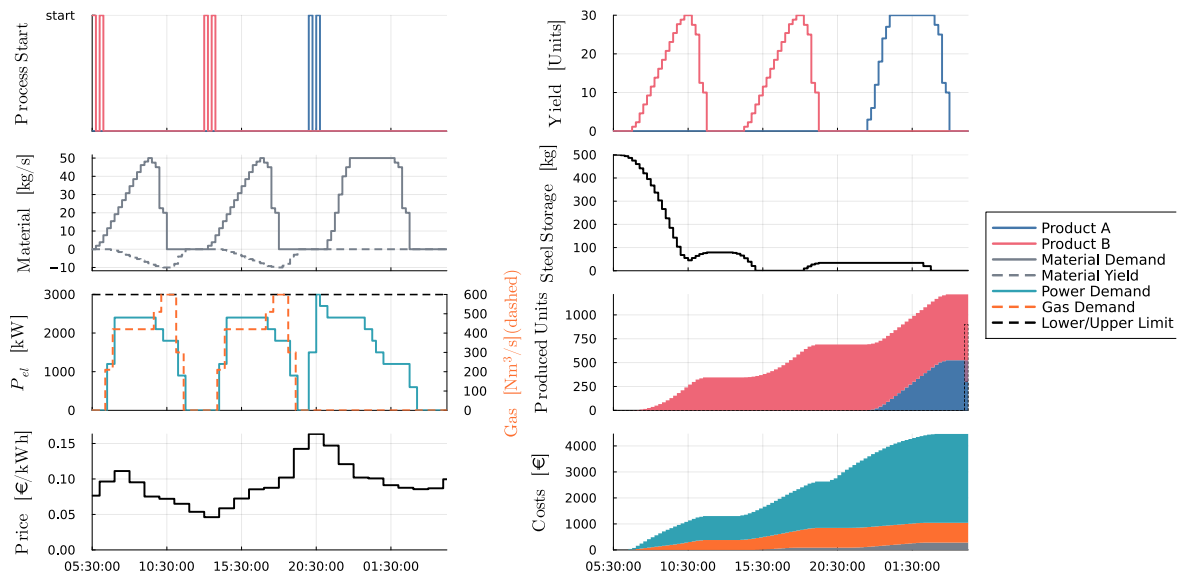


Abbildung 19 Standard-Produktionsplan und resultierender Strombedarf
(Anwendungsbeispiel: Sektorkopplung und Produktvielfalt)

Im zweiten Schritt wurde die Wahl des Produktionsplans der Optimierung überlassen. Die Ergebnisse sind analog zum ersten Durchlauf in **ABBILDUNG 20** dargestellt. Auch in diesem Durchlauf konnten alle Bedingungen erfüllt werden. Mit dem optimierten Produktionsplan ergeben sich folgende Produktionszahlen und Stückkosten aus den beiden Prozessrouten:

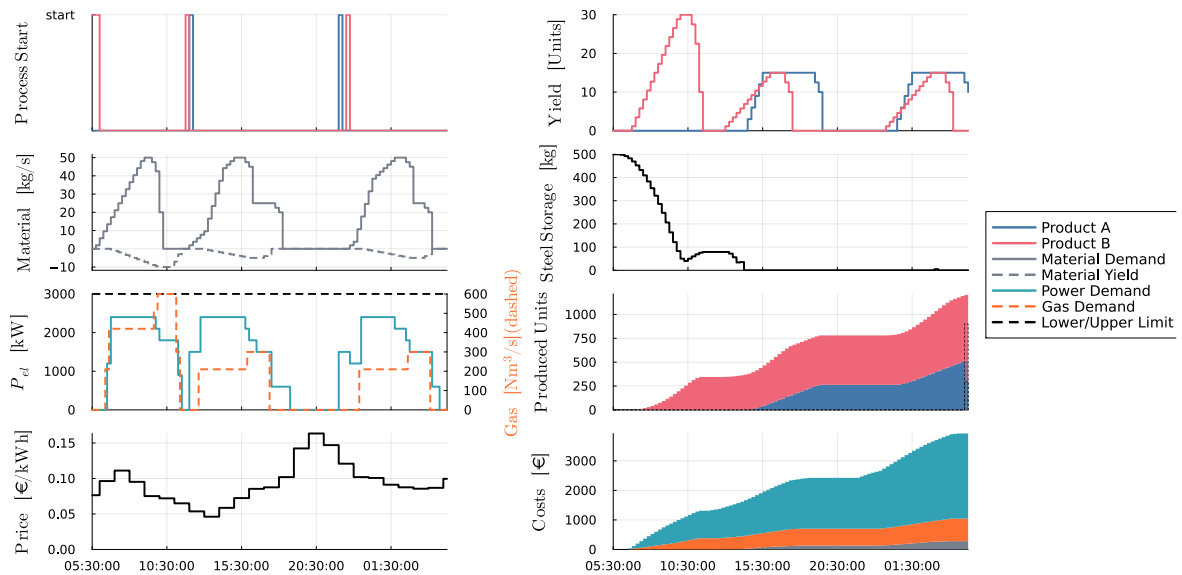


Abbildung 20 Optimierter Produktionsplan und resultierender Strombedarf
(Anwendungsbeispiel: Sektorkopplung und Produktvielfalt)

Tabelle 6 Vergleich der Betriebsstrategien und resultierenden Kosten
(Anwendungsbeispiel: Sektorkopplung und Produktvielfalt)

Kategorie	Standard	Optimiert
<i>Produzierte Einheiten: Produkt A</i>	525	525
<i>Produzierte Einheiten: Produkt B</i>	690	690
Gesamte Produktion		
<i>Durchschnittliche Produktionskosten pro Stück</i>	3,67€	3,23€
<i>Kosten</i>	4.460,63€	3.926,24€

Der direkte Vergleich der resultierenden Kosten aus den beiden Betriebsstrategien ist in **TABELLE 6** dargestellt.

Der optimierte Produktionsplan konnte somit in diesem Beispiel eine Reduktion der Produktionskosten von 534,39€ beziehungsweise rund 12,0% erreichen. Der Grund hierfür liegt erneut in der optimierten Wahl der Prozessstarts auf Basis der dynamischen Strompreise des Day-Ahead Markets, welche aufgrund der Speicherkapazitäten und Produktwechsel möglich ist. Der Strombedarf ist somit gleichmäßiger verteilt und sorgt dafür, dass zu Spitzenpreisenzeiten der Bedarf möglichst gering ist. Mit dieser Demonstration konnte gezeigt werden, dass vor allem bei Prozessen mit komplexer Sektor Kopplung, dennoch alle Abhängigkeiten einfach aufgrund der Modularität des Frameworks abgebildet und berücksichtigt werden können, und dadurch eine Kostenreduktion entstehen kann.