



Kompendium Energieeffizienz in Unternehmen



Vorwort

Familienunternehmen sind so erfolgreich, weil sie seit jeher nachhaltig wirtschaften. Sie denken nicht in Quartalen, sondern handeln langfristig orientiert und achten auf die Enkelfähigkeit des Unternehmens. Deshalb ist es nicht verwunderlich, dass gerade Familienunternehmen Umwelt- und Klimaschutzmaßnahmen forcieren und ressourcenschonend wirtschaften. Energieeffizienz liegt jedoch auch im wirtschaftlichen Eigeninteresse unserer Familienunternehmen: Geopolitische Spannungen, Energiepreisschocks, Rohstoffknappheit sowie angespannte Lieferketten machen energieeffizientes Handeln unabdingbar.

Die Stiftung Familienunternehmen hat sich mit den wichtigen Themen Energieknappheit und -effizienz bereits intensiv in Studien, Veranstaltungen und Austauschrunden auseinandergesetzt. Nun haben wir das Kompendium Energieeffizienz durch das renommierte Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF erstellen lassen. Die kompakte, gleichermaßen wissenschaftlich fundierte und praxisnahe Handreichung liefert Ihnen einen branchenübergreifenden, verständlichen Zugang zu einer Thematik von hoher unternehmerischer und gesellschaftlicher Relevanz.

Das Kompendium zeigt anschaulich, wo maßgebliche Einsparpotenziale, aber auch physikalische Grenzen liegen und welche Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz bestehen. Weiterhin werden konkrete Handlungsspielräume für die unternehmerische Praxis benannt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Lösungen, die über alle Branchen hinweg anwendbar sind.

Wir wünschen Ihnen eine erkenntnisreiche Lektüre!

Ihre Stiftung Familienunternehmen

München, 2023

Inhalt

Einleitung	4
I. Energie – Herausforderungen und Chancen	5
1. Effizienz aus verschiedenen Perspektiven	6
2. Energiepreise	8
a) Energiebedarfsentwicklung	8
b) Strompreiszusammensetzung und -prognose	8
c) Energieeffizienzmetriken.....	10
3. Versorgungssicherheit	11
4. Unternehmen als Prosumer.....	13
II. Handlungsspielräume	19
1. Grenzen der Energieeffizienz	20
a) Der erste und zweite Hauptsatz der Thermodynamik.....	20
b) Das Physikalische Optimum	23
c) Das Physikalische Optimum komplexer Prozesse	24
d) Effizienzbewertung mit Hilfe des PhO-Faktors	25
2. Technische Potenziale regenerativer Energien	27
a) Photovoltaik	27
b) Windenergieanlagen.....	28
3. Sektorenkopplung und Synergiebildung	29
a) Sektorenkopplung: Synergien auf der obersten Ebene	29
b) Technologien zur Sektorenkopplung.....	30
c) Synergie durch Power-to-X.....	33
4. Kennwerte	36
III. Maßnahmen umsetzen	39
1. Ein Leitfaden	40
2. Effizienzverbesserung durch Querschnittsanwendungen.....	46

3. Effizienzverbesserung durch Energierückgewinnung.....	51
a) Wärmerückgewinnung	51
b) Elektrische Energierückgewinnung	52
4. Effizienzverbesserung durch Integrationsmaßnahmen	53
a) Batteriespeicher	53
b) Umweltdatenmanagementsystem.....	56
IV. Energieeffizienz vs. Flexibilität	59
1. Energetische Flexibilität	60
a) Definition	60
b) Dilemma zwischen Flexibilität und Energieeffizienz.....	60
c) Netzdienlichkeit als Chance.....	60
2. Flexibilitätsoptionen.....	61
a) Nur keine Eingriffe in das Kerngeschäft!	61
b) Eigene Erzeugungs- und Speichereinheiten mobilisieren	63
c) Toleranzbereiche als Puffer nutzen	63
d) Energiebedarf nach Angebot ausrichten – eine Ultima Ratio?.....	64
3. Chancen & Risiken.....	65
a) Flexibilität mobilisieren und in die Wertschöpfung integrieren	65
b) Nachhaltigkeit im Dreiklang.....	66
V. Ausblick.....	69
Literatur	71
Impressum.....	74

Einleitung

Ziel dieses Kompendiums ist es, Familienunternehmen eine praxisorientierte Hilfestellung auf ihrem Weg zu einer nachhaltigen, sicheren und (teil-)unabhängigen Energieversorgung zu geben. Es wurde auf Basis aktueller wirtschaftlicher, energetischer und gesellschaftspolitischer Gegebenheiten erarbeitet.

Einführend beschreiben wir das Spannungsfeld, in dem Familienunternehmen hinsichtlich der Energieversorgung agieren müssen. Dabei beleuchten wir unterschiedliche Triebfedern zur Effizienzsteigerung, beschreiben die zukünftige Rolle (Prosumer) von Unternehmen im Energiesektor sowie die sich daraus ergebenden Chancen.

Nach einem Exkurs zu den physikalischen Grenzen der Effizienz und den relevanten Bewertungsgrößen stellen wir einen Leitfaden vor, mit dessen Hilfe Sie das Thema Energieeffizienz strukturiert angehen können. Der Leitfaden liefert konkrete Maßnahmen zur Effizienzsteigerung in Unternehmen. Gleichwohl können aufgrund des sehr umfassenden Themas lediglich ausgewählte Aspekte betrachtet werden. Abschließend zeigen wir Ihnen Zukunftsmärkte auf, die sich durch die Umsetzung der technologischen Innovationen für Sie ergeben können.

Sofern Zahlen und Aussagen nicht durch explizite Quellen belegt sind, sind diese auf die wissenschaftliche Arbeit und langjährige Erfahrung der Autoren in unterschiedlichen Forschungs- und Entwicklungsprojekten zurückzuführen. Die verwendeten Einheiten und Abkürzungen entsprechend der wissenschaftlichen Praxis.



I. Energie – Herausforderungen und Chancen



Energieeffizienz
vs. Flexibilität



Maßnahmen
umsetzen



Handlungs-
spielräume



Energie –
Herausforderungen
und Chancen

1. Effizienz aus verschiedenen Perspektiven

Prozesse möglichst effizient zu gestalten, ist aus vielerlei Gründen das Ziel eines jeden Entwicklers, Ingenieurs aber auch eines jeden Unternehmers. Die Effizienz bezeichnet das Verhältnis zwischen einem betriebenen Aufwand und dem daraus gezogenen Nutzen. Im Fall der Energieeffizienz wird der verbrauchte Strom, das verbrauchte Gas oder die umgesetzte Wärmeenergie als Aufwand betrachtet. Der jeweilige Nutzen kann stark variieren und sich von der Anzahl der versorgten Maschinen über Produktionsstrecken bis hin zum Umfang der gefertigten Endprodukte erstrecken. Es lassen sich daher verschiedene Beweggründe identifizieren, die eine Optimierung des Nutzens – und damit eine Steigerung der Effizienz – lohnenswert machen:

Leistung steigern

Unsere Wirtschaft ist geprägt vom Streben nach kontinuierlichem Wachstum. Wirtschaftliches Wachstum führt zu gesellschaftlichem Wohlstand und zu einer Verbesserung der allgemeinen unternehmerischen Situation. Wachstum wird überdies oftmals als Synonym für unternehmerischen Erfolg verstanden. Bei gleichbleibendem Einsatz von Ressourcen und Energie lässt sich eine Steigerung des Produktionsertrags nur durch eine Steigerung der Leistung beziehungsweise der Leistungsfähigkeit erzielen. Aus technischer Sicht geht dies zumeist mit einer Verbesserung des Wirkungsgrades durch Austausch von ineffizienten Anlagen beziehungsweise Maschinen einher.

Kosten senken

Eine Steigerung der Produktionszahlen ist jedoch nicht für jedes Unternehmen zu jeder Zeit erstrebenswert. Sofern der jeweilige Absatzmarkt bereits ausreichend gesättigt ist oder andere Faktoren, wie beispielsweise Lager- oder Lieferkapazitäten, die Produktionsmenge begrenzen, ergibt eine Produktionssteigerung aus ökonomischer Perspektive keinen Sinn. Dennoch wirkt sich die Effizienzsteigerung positiv auf die Geschäftsentwicklung aus. Ein konstantes Ergebnis bei besserer Verwertung des



Einsatzes bedeutet letztlich eine Verringerung der eingesetzten Mittel, wie beispielsweise elektrischer oder thermischer Energie. Dies wirkt sich wiederum positiv auf die Produktionskosten aus, die dadurch sinken und dem Unternehmen somit einen höheren Profit ermöglichen.

Ressourcen schonen

Abseits der wirtschaftlichen Aspekte ist der Nachhaltigkeitsgedanke eine immer stärkere Triebfeder für Innovationen in den Unternehmen. Eine Steigerung der Energieeffizienz führt nicht nur zu wirtschaftlichen Vorteilen, sondern wirkt sich insbesondere positiv hinsichtlich des geringeren Abbaus natürlicher Ressourcen zur Energiegewinnung aus. Dies kann nur dann erfolgen, wenn die Effizienzsteigerung nicht vollumfänglich in eine Leistungssteigerung überführt wird. Insbesondere für Familienunternehmen, denen in der breiten gesellschaftlichen Wahrnehmung oftmals eine deutlich wertorientiertere Geschäftsausrichtung attestiert wird, ist dies ein großes Plus im Hinblick auf Ansehen und Image.

Ganzheitlich denken – mehr als die Summe der Einzelteile

Einzelne Maßnahmen lassen sich zum Teil einfach und mitunter kurzfristig umsetzen, sodass jedes Unternehmen auch schnelle Erfolge erzielen kann. Insbesondere an größeren Standorten oder bei einem höheren Energiebezug aus unterschiedlichen Medien (z. B. Strom, Wärme, Gas, etc.) ist es ratsam, zunächst ein ganzheitliches Konzept zu entwickeln, um konkurrierende Maßnahmen (z. B. Photovoltaik vs. Solarthermie als Dachinstallation) gegeneinander abzuwägen oder zusätzliche Synergien zu schaffen. In Summe können dadurch größere Effizienzverbesserungen erzielt werden, auch wenn dabei bewusste Abstriche in einer Einzelmaßnahme in Kauf genommen werden.

2. Energiepreise

a) Energiebedarfsentwicklung

Im deutschen Industriesektor ist seit 2003 eine Gesamtenergieverbrauchssteigerung um 15 Prozent zu verzeichnen. Der Großteil (88 %) wurde dabei zur Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geht davon aus, dass der Endenergieverbrauch im Industrie- sowie Gewerbe-, Haushalts- und Dienstleistungssektor bis 2030 um knapp 8 Prozent zurückgehen wird, bis 2050 sogar um bis zu 17 Prozent im Vergleich zum Jahr 2020 [1]. Grund für die Annahme sind bereits jetzt regulatorisch vorgegebene Energieeffizienzmaßnahmen und Zertifizierungen wie die ISO 50001. Die wichtigsten Energieträger bleiben Erdgas, Strom, Kohle und Öl. Zukünftig ist jedoch insbesondere dem Stromsektor eine stärkere Bedeutung zuzuschreiben. Ursachen hierfür sind hauptsächlich die Abkehr von fossilen Energieträgern, der Ausbau erneuerbarer Energien (EE) und die Wertigkeit hinsichtlich Wandlung in die Nutzenergie, Speicherbarkeit, effiziente Transportfähigkeit sowie gute Mess- und Steuerbarkeit des Mediums Strom.

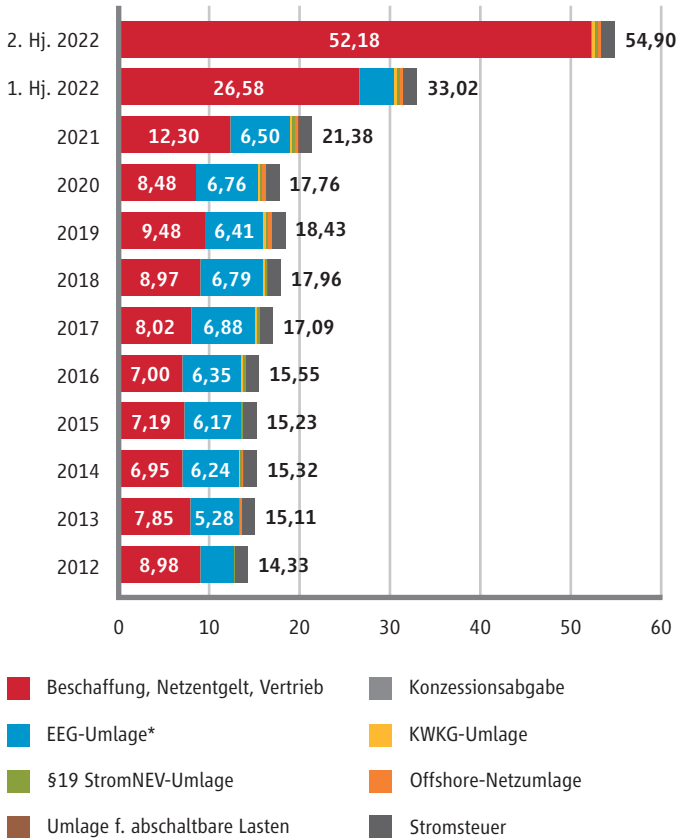
b) Strompreiszusammensetzung und -prognose

Der Preis für Strom setzt sich für gewerbliche und industrielle Abnehmer aus folgenden Komponenten zusammen:

1. Stromgestehungskosten für die Energieerzeugung
2. Netzentgelte für den Energietransport
3. Steuern, Umlagen und Abgaben

Strompreisentwicklung im Industriesektor [4]

Durchschnittlicher Strompreis für Neuabschlüsse in der Industrie in ct/kWh (inkl. Stromsteuer), Jahresverbrauch 160.000 bis 20 Mio. kWh, mittelspannungsseitige Versorgung



*EEG-Umlage entfällt ab 01.07.2022

Stand: 12/2022

Quelle: VEA, BDEW.

Im Jahr 2016 betrug der Kostenanteil für die reine Erzeugung nur knapp ein Viertel des Gesamtpreises [2]. Doch schon vor Beginn des Ukraine-Konflikts entwickelte sich der Strompreis an der Strombörse (Spotmarkt) drastisch nach oben. Im Oktober 2021



verneunfachte sich der Preis für eine Megawattstunde gegenüber dem gleichen Tag im Vorjahr [3]. Den Börsenstrompreis zahlen Stromanbieter bei kurzfristigen Nachkäufen, was sich unmittelbar auf die Preisbildung für die Verbraucher auswirkt. Haupttreiber sind der Atom- und Kohleausstieg sowie das Fortschreiten der Energiewende. Erzeugern von Ökostrom wird eine Einspeisevergütung garantiert, welche im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) geregelt ist. Seit dem zweiten Halbjahr 2022 entfällt diese EEG-Umlage, nachdem der Druck auf die Bundesregierung angesichts der steigenden Strompreise zu hoch wurde. Der durchschnittliche Strompreis für kleine und mittlere Industrieunternehmen (ohne Stromsteuer) stieg verglichen mit dem ersten Halbjahr 2022 dennoch um 70 Prozent im zweiten Halbjahr [4].

Kostengünstige Energie ist für Familienunternehmen von immenser Bedeutung [5]. Im internationalen Vergleich gehört Deutschland zu den hochpreisigen Ländern – unabhängig von der bezogenen Energiemenge des Abnehmers im Gas- beziehungsweise Stromsektor. Als kritisch lässt sich zudem die Risikobewertung in Folge der Lieferabhängigkeiten aus Drittländern bewerten. Dies unterstreicht den Bedarf nach Energieeffizienzmaßnahmen und lokaler Erzeugung regenerativer Energien vor Ort.

c) Energieeffizienzmetriken

Als Indikator für die Energieeffizienz kann der Energieverbrauch im Verhältnis zum Produktionswert herangezogen werden. 2021 betrug dieser Wert in der deutschen Industrie etwa 2,5 Gigajoule (GJ) Energie pro 1.000 Euro Bruttoproduktionswert (BPW). Gegenüber den Vorjahren ist diesbezüglich nur eine leicht positive Entwicklung zu beobachten (2,6 GJ pro 1.000 € BPW in 2001) [6].

In der Praxis werden Energiewerte zur Kennzahlenbildung häufig auf folgende Größen bezogen (vgl. ISO 50006):

- Produzierte Menge, d. h. je Stückzahl, Volumen oder Gewicht (in kWh/Stk., kWh/t, kWh/m³)
- Umsatz oder Wertschöpfung (in kWh/€)
- Anzahl der Mitarbeitenden (in kWh/Kopf)
- Gebäude- beziehungsweise Nutzfläche (in kWh/m²)



Zweckmäßig ist dabei die Aufschlüsselung nach Unternehmensbereichen (z. B. Produktion, Büroflächen), da es eine bessere Vergleichbarkeit – auch branchenübergreifend – erlaubt.

Als wesentliche Herausforderung gilt die Gewährleistung der Grundvoraussetzung: Messbarkeit muss sichergestellt werden. Auch die Normierung bei Erweiterungen, Veränderung oder der Abbau von Fertigungslinien gestaltet einen Vergleich zu Vorjahreswerten schwierig. In der Praxis wird dieser Problematik in der Regel durch bestmögliche Schätzungsansätze begegnet. Verbleibende Defizite können durch erweiterte Methoden der Ersatzwertbildung und rückwirkende Bereinigungen gemildert werden. Dabei werden Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) und des maschinellen Lernens trainiert, um auf Basis der vorhandenen Daten die Fehlstellen zu interpolieren. Im Ergebnis steht ein vollständiger Datensatz zur Auswertung zur Verfügung.

3. Versorgungssicherheit

Eine effiziente Nutzung elektrischer Energie setzt ein hohes Maß an Verfügbarkeit sowie eine sichere Versorgung aller Teilnehmer voraus. Die gesicherte Versorgung der (Letzt-)Verbraucher stellt, neben der Wirtschaftlichkeit und Ökologie, einen Eckpunkt im energiepolitischen Zieldreieck dar. Sie bildet die Basis für eine effiziente Nutzung der produzierten Energie. In Deutschland haben die Versorger einen sehr hohen Standard etabliert, der sich in entsprechenden Kennzahlen widerspiegelt. So wird der System Average Interruption Duration Index (SAIDI) gern als Maß für die mittlere Zeitdauer einer Versorgungsunterbrechung beim Endkunden innerhalb eines Kalenderjahres herangezogen. In den vergangenen 15 Jahren lag dieser Wert im Mittel knapp unterhalb von 15 Minuten. Das bedeutet, im Schnitt war jeder Verbraucher weniger als 15 Minuten pro Jahr ohne Versorgung, was einer Versorgung von 99,997 Prozent entspricht. Im Jahr 2020 wurde sogar ein historischer Tiefstwert von knapp über 10 Minuten erreicht. Europaweit kann nur Luxemburg (Spitzenwert seit 2013: 10 min) ein ähnlich hohes Maß an Versorgungssicherheit aufweisen [7]. Im Vergleich der sieben größten Industrienationen wird der Unterschied noch deutlicher: Hier folgen Italien (42 min) und Großbritannien (55 min) auf den Plätzen zwei

und drei während in den USA jeder Verbraucher im Schnitt 4 Stunden 40 Minuten ohne Versorgung war.



Die hohe Versorgungssicherheit im Bereich elektrischer Energie geht mit großen Aufwendungen der Energieversorger einher. In Zeiten zunehmend volatiler Einspeiser sowie einer stärkeren Verteilung der Energieerzeuger über alle Netzebenen, nehmen diese Aufwendungen sukzessive zu. Hier können beispielhaft die Abregelungen erneuerbarer Energien nach dem Einspeisemanagement genannt werden. Zwischen 2013 (0,39 TWh) und 2018 (5,4 TWh) hat sich das Gesamtvolumen mehr als verzehnfacht. Es muss damit ein erheblicher Teil an Energie, die potenziell aus erneuerbaren Energien bereitgestellt werden könnte, verworfen werden, um die technische Stabilität des Versorgungsnetzes nicht zu gefährden. Diese Energiemengen müssen den Anlagenbetreibern dennoch vergütet – also finanziell ersetzt – werden, wenngleich sie nicht an der Strombörse gehandelt werden können. Die Ausgleichskosten

werden in Form von Umlagen auf die Verbraucher umgeschlagen, was wiederum zu höheren Stromkosten und damit zu höheren Betriebskosten der Unternehmen führt.

Es zeigt sich deutlich, dass die Kosten für Maßnahmen der Netzbetreiber zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit zunehmen. Neben Redispatch (Eingriffe in die Erzeugungsleistung von Kraftwerken) und Einspeisemanagement (Abregelung erneuerbarer Energien) müssen mehr Kosten für die Vorhaltung von Reserven eingeplant werden, um im Fall von sogenannten Dunkelflauten (keine Einspeisung aus Wind- und Sonnenenergie) die Energieversorgung zu gewährleisten.

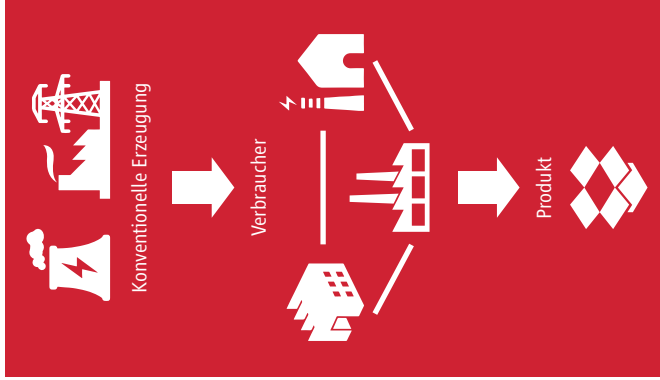
4. Unternehmen als Prosumer

Vor allem produzierende Unternehmen sehen sich in den letzten Jahren einem starken Wandel ihrer Rolle im Energiesystem ausgesetzt. Die vormals klare Trennung der Akteure Energieproduzent und Energiekonsument verschwimmt zusehends, sodass durch die Energiewende eine gänzliche neue Rolle, insbesondere für Unternehmen, im Energiesystem definiert wird.

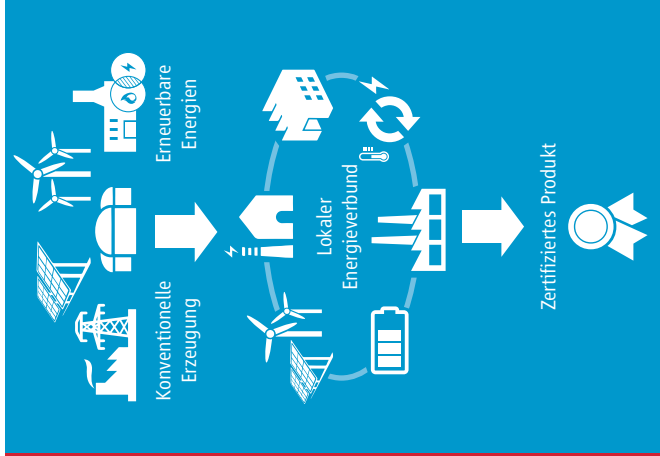


Zielbild eines Transformationsprozesses: Vom Verbraucher zum Prosumer

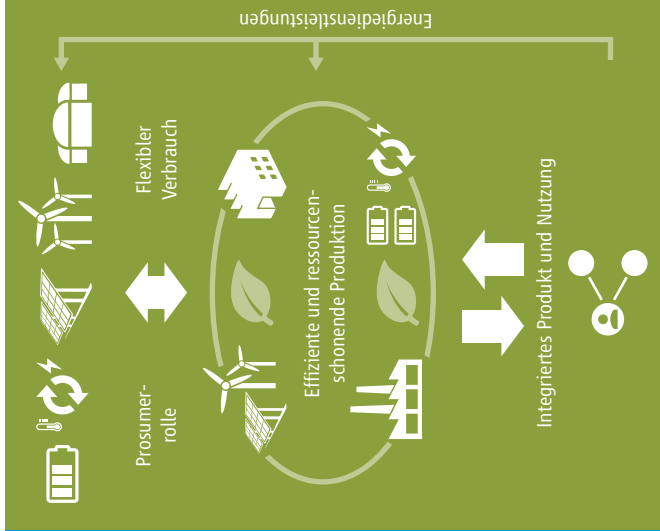
Phase 1



Phase 2



Phase 3





Phase 1: Energie überall und zu jeder Zeit

Das konventionelle Energiesystem basiert auf der Prämisse, dass sich die Erzeugung jederzeit nach dem geforderten Verbrauch zu richten hat. Das zentralistische Design eines unidirektionalen Energieflusses von konventionellen Großkraftwerken hin zu den Abnehmern spiegelt sich dabei auch in der Struktur des elektrischen Versorgungsnetzes wider. Es hat dabei aber auch wesentlich dazu beigetragen, dass sich Deutschland im internationalen Vergleich industriell profiliert hat. Effizienzthemen rückten vor dem Hintergrund kostengünstiger und zuverlässiger Versorgung in den Hintergrund.

Neben den kontinuierlich steigenden Kosten gewinnt jedoch die eigene ökologische Ausrichtung immer stärker an Bedeutung für den Kunden und damit auch für das Unternehmen. Tendenzen, wie sie im Lebensmittelbereich mit der enormen Zunahme an Bioprodukten bereits seit längerem zu beobachten sind, lassen sich zunehmend auch in anderen Branchen erkennen. Insbesondere innerhalb des mittleren und oberen Kundensegments wird Wert auf eine ökologische Produktion gelegt, welche stark auf dem Nachhaltigkeitsgedanken basiert. Dies beinhaltet nicht nur die Auswahl ökologisch verträglicher Basiskomponenten für die Produktion, sondern auch die stärkere Einbindung von regenerativ erzeugter Energie in den Produktionsprozess.

Phase 1:

Konventionelles Verbrauchsmodell → Bedarfsabhängiger Energiebezug, geringe Effizienzbestrebungen, Energiebereitstellung richtet sich nach der Produktion.

Phase 2: Das Unternehmen als Prosumer

Sowohl der starken Abhängigkeit vom Strompreis als auch dem immer wichtigeren Nachhaltigkeitsgedanken kann durch den Aufbau eigener Erzeugungsanlagen (z. B. Photovoltaik auf Hallendächern) begegnet werden. Das Unternehmen wird damit vom reinen Verbraucher zum sogenannten Prosumer (PROducer and conSUMER) und entnimmt je nach Anlagengröße nicht nur Energie aus dem Stromnetz, sondern speist seinen Überschuss auch in das Netz zurück. Diese Doppelrolle ermöglicht es

den Unternehmen sowohl selbst für die Deckung ihres Energiebedarfs zu sorgen als auch weiterhin von der Sicherheit, die das elektrische Versorgungsnetz bietet, zu profitieren und gleichzeitig dazu beizutragen. Eine ähnliche Entwicklung wird im Wärmesektor aufgrund der zunehmenden Nutzung von Wärmepumpen oder solarthermischer Anlagen erwartet.

Als Prosumer wird den Unternehmen eine aktive Teilnahme am Energiemarkt ermöglicht, indem sie ihren produzierten Strom und/oder ihre produzierte Wärme selbst anbieten und vermarkten. Daraus ergibt sich auch die Möglichkeit einer zusätzlichen Einnahmequelle durch den energetischen Überschuss, der nicht selbst verbraucht wird. Hierdurch können bestehende Geschäftsfelder ergänzt und transformiert sowie zusätzliche Felder erschlossen werden.

Phase 2:

Unternehmen als Prosumer → Einführung (auch lokaler) regenerativer Erzeugung, Schaffung eines lokalen Energieverbundsystems, höhere Energieeffizienz der Prozesse, bleibende Netz- und Marktabhängigkeit, Nutzung des Zertifikatehandels und von Kompensationsmechanismen.

Phase 3: Systemische Integration von Prozess und Produkt

Das ideale Zielbild in Phase 3 umfasst ein vollständiges regeneratives Energiemanagement unter Nutzung interner sowie externer Erzeugung. Die Endlichkeit der Effizienzsteigerung (siehe Kapitel II.1) unter Beibehaltung von Qualitäts- und Durchsatzstandards erfordert dabei eine Transformation des unternehmerischen Gesamtprozesses. Beispielhaft ist hier der Wandel von Automobilherstellern hin zu Mobilitätsdienstleistern zu nennen. Elektrofahrzeuge werden zukünftig nicht nur als Lasten in das elektrische Netz integriert, sondern können ihre Fahrzeugbatterie auch als mobile Energiespeicher bereitstellen, sodass damit netzstützende Dienste [9] bereitgestellt werden können. In Verbindung mit den Fahrzeugherstellern können dadurch zusätzliche Geschäftsmodelle erschlossen werden. Auch der Umstieg vieler Wertangebote auf Kaufbasis hin zu Mietmodellen zahlt auf eine gesamtheitliche Effizienzsteigerung ein. Die damit verbundene Möglichkeit der Wiederverwertung

von Altmaterialien durch Remanufacturing schont Ressourcen, gleichzeitig verringern sich Abhängigkeiten von Zulieferern.

Im energetischen Gesamtkontext führt die Erweiterung des Betrachtungsrahmens eines Unternehmens im systemischen Kontext (fast) immer zu einer Verbesserung der Energieeffizienz.

Phase 3:

Integrierte Produktion → Ausschließlich regenerative Energiebereitstellung (extern und intern), Produktion abhängig vom Energieangebot aus erneuerbaren Quellen, aktives Lastmanagement mittels Einsatzes von Speichern und Wandlern, Anpassung des Produktportfolios und Integration in die Wertschöpfung.



Energie –
Herausforderungen
und Chancen



Handlungs-
spielräume



Maßnahmen
umsetzen



Energieeffizienz
vs. Flexibilität



II. Handlungsspielräume



Energieeffizienz
vs. Flexibilität



Maßnahmen
umsetzen



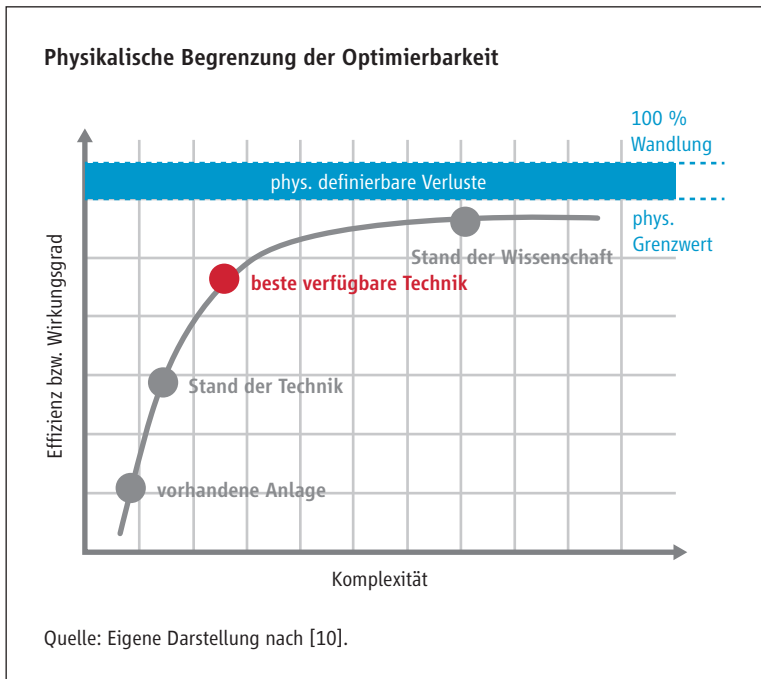
Handlungs-
spielräume



Energie –
Herausforderungen
und Chancen

1. Grenzen der Energieeffizienz

Die Verbesserung der Energieeffizienz ist ein wesentliches Ziel, um nachhaltige Prozesse und Verfahren zu optimieren. Eine Steigerung der Energieeffizienz führt entweder zu einem geringeren Ressourcen- und Energieverbrauch oder zu einer erhöhten Produktausbeute. Daraus resultieren geringere Betriebskosten und in der Regel auch eine bessere Ökobilanz. Trotz aller Bestrebungen zur Steigerung der Energieeffizienz können Prozesse jedoch nicht unendlich verbessert werden. Physikalische Gesetzmäßigkeiten geben letztlich die Grenze der Optimierbarkeit vor.



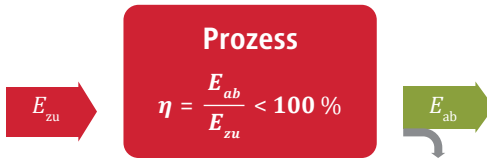
a) Der erste und zweite Hauptsatz der Thermodynamik

Die erste physikalische Grenze der Optimierbarkeit von Prozessen ergibt sich aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik. Vereinfacht dargestellt besagt dieser,



dass Energie weder gebildet, noch vernichtet werden kann. Sie wird lediglich umgewandelt. Bei der Effizienzbewertung anhand des Wirkungsgrades wird diese Tatsache aufgegriffen. Der Wirkungsgrad ist definiert durch das Verhältnis der Nutzenergie E_{ab} und der zugeführten Energie E_{zu} .

Wirkungsgrad eines realen Prozesses



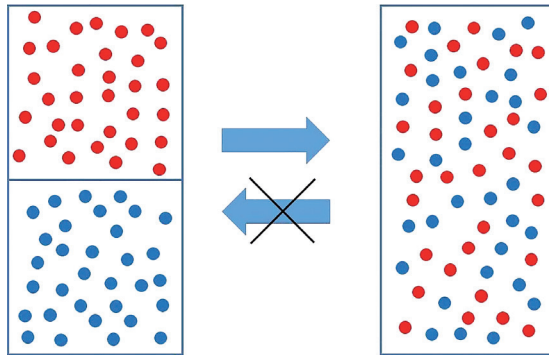
Quelle: Eigene Darstellung.

Da Energie nicht gebildet werden kann, liegt die Grenze des Wirkungsgrades bei 100 Prozent, wenn $E_{ab} = E_{zu}$. Dieser Zustand entspricht jedoch einem Perpetuum mobile zweiter Art und kann in der Realität nicht erreicht werden. Die Differenz eines realen Wirkungsgrades zu 100 Prozent ermöglicht daher keine Aussage über das tatsächlich erreichbare Optimierungspotenzial eines Prozesses. Weist ein technischer Prozess beispielsweise einen Wirkungsgrad von 35 Prozent auf und hat einen Energiebedarf von 100 kWh, bedeutet dies nicht, dass davon 75 kWh eingespart werden können.

Beispielhaft lässt sich diese Tatsache durch eine Teigkugel illustrieren, die auf ein Brett fällt. Durch den Aufprall verformt und erwärmt sich die Kugel. Andersherum ist es jedoch noch nie vorgekommen, dass eine Teigkugel bei Abkühlung plötzlich nach oben springt. Ein solcher Vorgang widerspricht zwar nicht dem ersten, aber dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, weshalb ein solcher Vorgang als Perpetuum mobile zweiter Art bezeichnet wird.

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik bestimmt, in welche Richtung ein Prozess abläuft. Definiert ist der zweite Hauptsatz, der auch als Entropiesatz bezeichnet wird, durch das Entropiegleichgewicht eines geschlossenen Systems. Er besagt, dass die Gesamtentropie eines geschlossenen Systems nur zunehmen oder gleichbleiben kann. Sie nimmt nie ab.

Irreversibilität realer Prozesse [11]



In einem im Gleichgewicht befindlichen geschlossenen System gilt also:

$$\Delta S_{\text{System}} + \Delta S_{\text{Umgebung}} = 0$$

Dieser Zustand kann jedoch nur unter totaler Reversibilität erreicht werden. Das bedeutet, dass der Vorgang unendlich langsam ablaufen müsste. Ein reversibler Prozess stellt daher einen idealisierten Grenzfall dar, der zwar manchmal fast, aber in der Realität nie ganz erreicht wird. Die vollständige Umwandlung von Arbeit in Wärme ist beispielsweise irreversibel, wodurch eine abkühlende Teigkugel nicht vom Brett nach oben springen würde. In der Realität ist daher in Folge der Irreversibilität realer Prozesse niemals die gesamte zugeführte Energie nutzbar. Umgangssprachlich wird dieser Anteil nicht nutzbarer Energie als Verlust bezeichnet.

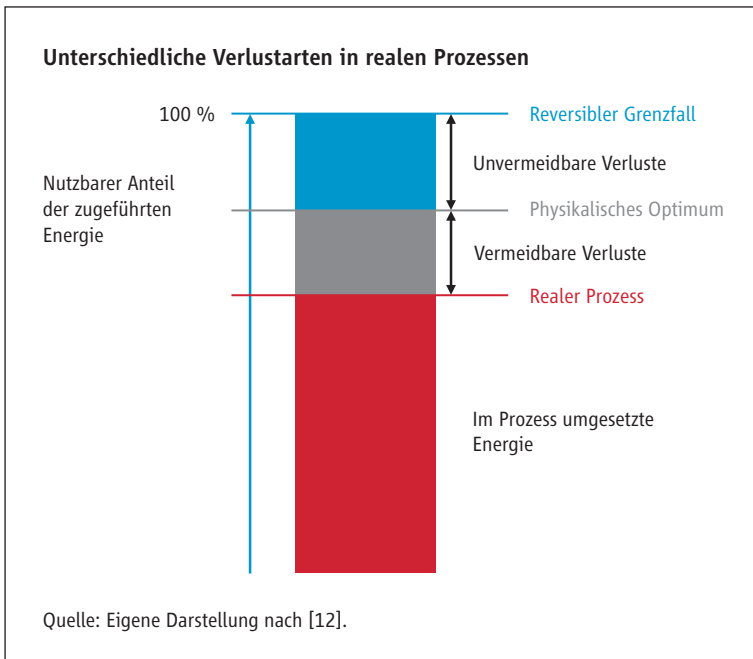
Die Natur setzt uns Grenzen, die wir auch bei größtmöglichem Aufwand nicht überwinden werden. Leider versuchen einige unseriöse Anbieter immer wieder, ihren Kunden etwas anderes zu versprechen. Nehmen Sie sich daher hin und wieder die Zeit und fragen Sie sich, ob eine angebotene Maßnahme nicht wirklich „zu gut ist, um wahr zu sein“.



b) Das Physikalische Optimum

Die einem realen Prozess zugeführte Energiemenge ist in Folge des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik nicht vollständig nutzbar. Energieverluste entstehen beispielsweise in Form von Abwärme oder Reibung, bei der wiederum Wärme freigesetzt wird. Auch wenn diese Verluste nicht vollständig vermeidbar sind, können sie zum Beispiel durch Abwärmenutzung oder Verringerung der Rohrreibung durch glattere Oberflächen minimiert werden.

Das Physikalische Optimum (PhO) beschreibt einen idealisierten Referenzprozess, bei dem auftretende Verluste so gering wie physikalisch möglich definiert sind. Damit ist das PhO ein Maß für die tatsächlich erreichbare Grenze der Optimierbarkeit eines technischen Prozesses. Es basiert auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten und berücksichtigt somit die durch die Irreversibilität des Prozesses auftretenden unvermeidbaren Verluste (sofern diese bestimmbar sind). Anders als bei der Wirkungsgrad-Betrachtung wird also in vermeidbare und unvermeidbare, durch Irreversibilität des Prozesses auftretende, Verluste unterschieden.



Verdeutlichen lässt sich das Prinzip des PhOs am Prozess der Wassererwärmung. Technisch ist die Umsetzung dieses Prozesses beispielsweise mit Hilfe einer Heizplatte und eines Wasserkessels oder mit einem Wasserkocher möglich. Obwohl die technische Durchführung eine andere ist, bleibt der Prozess derselbe.

Die physikalische Grenze dieses Prozesses lässt sich anhand der spezifischen Wärmekapazität des Wassers bestimmen. Um ein Kilogramm Wasser um ein Grad zu erwärmen, sind demzufolge mindestens 1,16 Wh erforderlich. Je nach gewählter technischer Durchführung entstehen bei diesem Vorgang Verluste, die beispielsweise auf die Fläche der Wärmeübertragung, auf die Durchmischung des Wassers während des Aufheizprozesses oder auf die Wärmeverluste an die Umgebung durch die Behälterwand zurückzuführen sind. Technisch sind diese Verluste durch eine Isolierung des Gefäßes, eine Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche und ein Durchmischen des Reaktors – unter Abwägung des wirtschaftlichen Nutzens – minimierbar.

Seien Sie sich bei der Bewertung von Maßnahmen bewusst, dass jeder technische Prozess eine natürliche Effizienzgrenze besitzt. Die physikalischen Grenzen machen bestimmte Verluste unvermeidlich.

c) Das Physikalische Optimum komplexer Prozesse

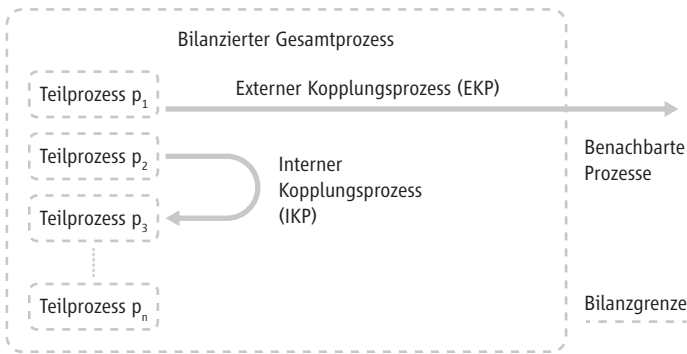
Für die Berechnung des PhOs muss der Gesamtprozess inklusive aller Teilprozesse bekannt sein. Für die Definition einer Bilanzgrenze ist daher eine Unterscheidung zwischen internen Kopplungsprozessen, also Teilprozessen des bilanzierten Gesamtprozesses, und externen Kopplungsprozessen erforderlich.

Das PhO des Gesamtprozesses ist abhängig von den jeweils zu betrachtenden Teilprozessen. Es lässt sich durch die nachfolgende Gleichung aus der Summe der Physikalischen Optima aller Teilprozesse unter Abzug der durch die Prozesskopplung entstehenden Effizienzsteigerung berechnen.

Der bilanzierte Gesamtprozess ist dabei so weit in Teil- und Subprozesse zu zerlegen, dass eine Darstellung durch adäquate optimale Vergleichsprozesse möglich ist.



PhO-Bilanzierung im Gesamtprozess [13]



Bei der Bilanzierung eines komplexen Prozesses kommt es nicht nur auf die Teilprozesse an. Bedenken Sie, dass auch notwendige Kopplungsmechanismen die Gesamteffizienz beeinflussen.

d) Effizienzbewertung mit Hilfe des PhO-Faktors

Wie weit die Betriebsweise des realen Prozesses von dem physikalischen Optimum entfernt ist, lässt sich durch den PhO-Faktor darstellen. Nach Volta bildet sich der PhO-Faktor aus dem Quotienten der realen (V_{real}) und der physikalisch optimalen (V_{PhO}) zu verrichtenden Arbeit und ist damit ein Maß für die Effizienz des Verfahrens. Je näher der PhO-Faktor an dem Grenzwert liegt, desto effizienter verläuft der Betrieb des Prozesses.

$$F_{PhO} = \frac{V_{real}}{V_{PhO}} \geq 1$$

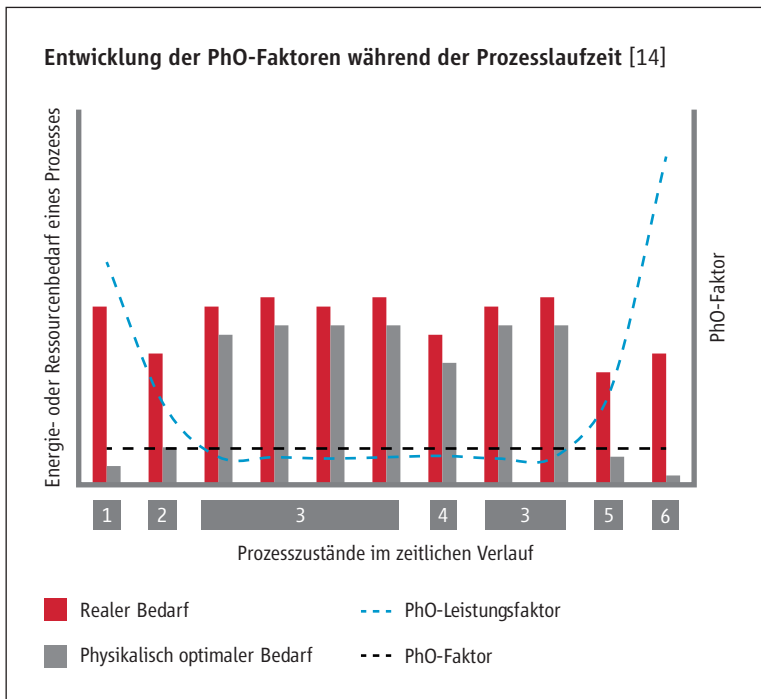
Bei dieser Definition ist jedoch zu beachten, dass bei Prozessen, bei denen unter physikalisch optimalen Bedingungen kein Aufwand zu verrichten ist (wie beispielsweise bei Lagerungsprozessen), der PhO-Faktor gegen unendlich strebt. Nach Volta ist dieser Faktor in einem solchen Spezialfall nicht anwendbar.

Für eine detailliertere Betrachtung der Effizienz eines Prozesses hat Keichel den leistungsbezogenen PhO-Faktor eingeführt. Dieser berücksichtigt zusätzlich die zeitliche Veränderung des realen und des physikalisch optimalen Bedarfes.

$$f_{\text{PhO}} = \frac{V_{\text{real}}}{V_{\text{PhO}}} \geq 1$$

Während mit Hilfe des bisher vorgestellten PhO-Faktors die Bewertung eines Prozesses innerhalb eines Zeitintervalls erfolgt, wird bei dem PhO-Leistungsfaktor ein konkreter Zeitpunkt der Prozessführung betrachtet. So ist es möglich, auch das Teillastverhalten eines technischen Prozesses dynamisch zu bewerten.

Nachfolgend ist exemplarisch der reale sowie der physikalisch optimale energetische Bedarf eines fiktiven Prozesses im Verlauf der jeweiligen Prozesszustände dargestellt. Während der PhO-Faktor den Gesamtprozess abbildet und somit während des Prozessverlaufes konstant bleibt, beschreibt der leistungsbezogene PhO-Faktor die Effizienz jedes einzelnen Prozesszustandes.



Anhand dieser Abbildung wird deutlich, dass, neben einer Gesamtbewertung des Prozesses, die Bewertung von bestimmten Betriebspunkten für die Ermittlung des Optimierungspotenzials relevant ist. Anhand des PhO-Leistungsfaktors ist es möglich, Zeitpunkte zu ermitteln, in denen die Betriebsweise besonders ineffizient verläuft. Diese Berechnungen können als Grundlage für Analysen und Bewertungen von Prozessen dienen.

Bevor Sie mit dem großräumigen Austausch von Anlagen beginnen, sollten Sie zunächst die Betriebsweise Ihrer Prozesse betrachten. Oft lässt sich schon durch einen angepassten Arbeitspunkt ein Effizienzgewinn erreichen.

2. Technische Potenziale regenerativer Energien

a) Photovoltaik

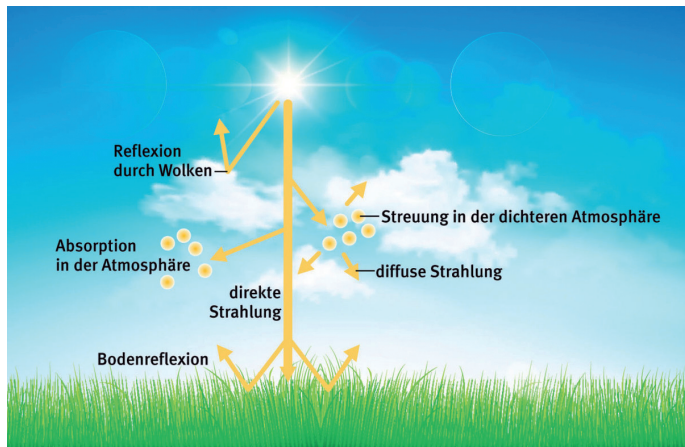
Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) nutzen die von der Sonne abgegebene Strahlungsenergie und wandeln diese in elektrische Energie. Das maximale Erzeugungspotenzial ist damit direkt abhängig von der Leistung der Sonne und in der sogenannten Solarkonstante auf circa 1.367 W/m^2 beschränkt. Ein Teil dieser Leistung wird jedoch schon durch die Erdatmosphäre gemindert.

Die an einem wolkenlosen Sommertag verbleibenden circa 1.000 W/m^2 treffen nun auf die Solarzellen am Boden und regen die darin befindlichen Halbleiter an, sodass diese einen Stromfluss ermöglichen. Im Gegensatz zu Metallen, die zu jeder Zeit Strom leiten können, und Isolatoren, die generell keinen Strom führen, können die Halbleiter in einer PV-Zelle Energie aus der Sonnenstrahlung aufnehmen und ihre Elektronen auf ein höheres Energieniveau heben – das Material beginnt Strom zu leiten. Bedauerlicherweise liegt hier auch die als Shockley-Queisser-Grenze bezeichnete natürliche Begrenzung, denn hat ein Elektron einmal die Lücke zwischen den beiden Energieniveaus übersprungen, nimmt es keine weitere Leistung aus der



Sonnenstrahlung auf. Technisch nutzbar wird die Energie erst dann, wenn das Elektron in seinen ursprünglichen Zustand zurückfällt und dabei genau die Energie abgibt, die es zur Überwindung der Lücke aufnehmen musste. Für ein einzelnes Elektron ergibt sich hier ein Maximum zwischen 30 und 40 Prozent. Da es in einer PV-Zelle zu einer Vielzahl solcher Elektronenübergänge kommt, ist für die Zelle auch ein etwas höherer Wirkungsgrad möglich. Die effizienteste Solarzelle der Welt erreicht unter Laborbedingungen mit konzentriertem Licht einen Wirkungsgrad von 47,6 Prozent [16], industriell verfügbare Modelle liegen bei natürlichen Bedingungen jedoch eher im Bereich von 15 bis 25 Prozent.

Minderung der Sonnenenergie beim Eintritt in die Erdatmosphäre [15]



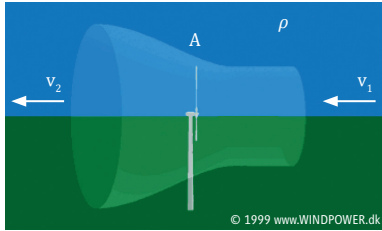
b) Windenergieanlagen

Bei einer Windkraftanlage wird mit Hilfe der Bewegungsenergie des Windes elektrische Energie bereitgestellt. Die physikalische Grenze der Optimierbarkeit dieses Prozesses ergibt sich durch die Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit der Luft hinter der Windkraftanlage. Eine vollständige Entnahme der mechanischen Energie der Luft wäre damit verbunden, dass die Luft stehen bliebe. Es entstünde ein vollständiger Luftstau.



Die ankommende Windleistung einer Windenergieanlage wird durch die Rotorfläche A , den Luftdruck ρ und die Strömungsgeschwindigkeit v_1 des Windes definiert.

Idealisierte Luftströmung und daraus resultierenden Windleistung



$$P_0 = A \frac{\rho}{2} v_1^3$$

Quelle: Eigene Darstellung nach [17].

Wird die zugeführte und entnommene Leistung des Windes ins Verhältnis gesetzt, ergibt sich die Funktion des Leistungsbeiwertes $c_p(x)$, die ihr Maximum bei $x = 1/3$ aufweist. Maximal können daher 16/27 der zugeführten Windenergie in einer Windkraftanlage genutzt werden, was einem maximalen Wirkungsgrad von 59 Prozent entspricht.

3. Sektorenkopplung und Synergiebildung

a) Sektorenkopplung: Synergien auf der obersten Ebene

Eine Schlüsseltechnologie zur Erreichung einer breiten Versorgung mit erneuerbaren Energien und der damit einhergehenden erfolgreichen Umsetzung der Energiewende stellen die technologischen Verfahren der Sektorenkopplung dar. Dabei ist es wichtig, die kumulierten CO₂-Emissionen der infrastrukturellen Sektorenkopplung zu betrachten. Dies ermöglicht einen möglichst frühen Wechsel von fossilen Energien zu erneuerbaren Energien (Fuel-Switch) in allen Sektoren. Damit wird das zulässige CO₂-Budget geschont. Mittelfristig gelingt dies durch die Erdgasnutzung, die

langfristig zunehmend durch grüne Gase (d. h. mit erneuerbarem Strom synthetisch erzeugtem Wasserstoff oder Methan bzw. Biogas) ersetzt werden soll.

Die Nutzung von erneuerbarem Strom zur Dekarbonisierung aller Sektoren und Emissionsbereiche erfordert eine umfassende Kopplung mehrerer Infrastrukturen. Dies kann durch den Einsatz sogenannter Power-to-X-Verfahren (P2X) erreicht werden. Power-to-X steht für die Gesamtheit der Möglichkeiten, (erneuerbaren) Strom außerhalb des Stromsektors zu nutzen. Relevante Verfahren sind:

- Power-to-Heat (Einsatz von EE bei der Wärmeerzeugung, kurzfristig)
- Power-to-Gas (grüne Gase, mittel- /langfristig)
- Power-to-Liquid (synthetische Kraftstoffe, mittel- /langfristig)
- Power-to-Chemicals (Grundchemikalien)
- Power-to-Mobility (Elektro- und Wasserstoffmobilität, mittelfristig)
- Power-to-Battery (Rückspeisung aus Elektromobilität)
- Power-to-Power (Pufferspeicher, Lastverschiebung)

Hierdurch wird es möglich, erneuerbaren Strom im Wärmesektor und (über die Elektro- und Wasserstoffmobilität) im Verkehrssektor zu nutzen.

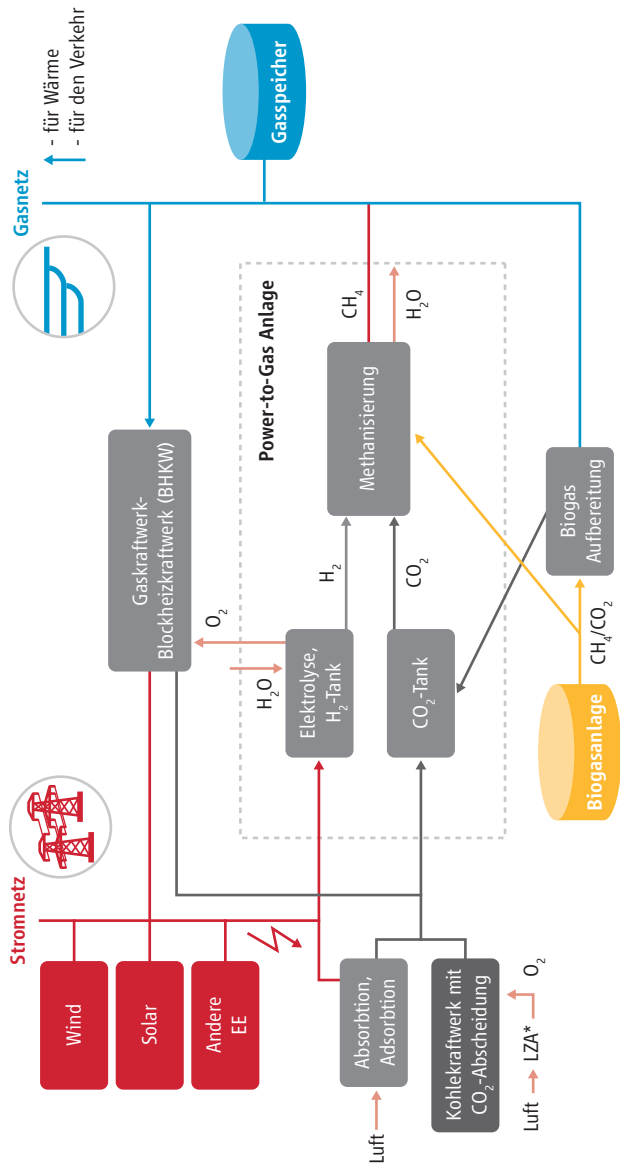
b) Technologien zur Sektorenkopplung

Die folgende Kurzbeschreibung der Technologien, die im Rahmen der Sektorenkopplung relevant sind, basiert auf den Definitionen des Vereins des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) und des Verbands der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE) [18]. In allen Fällen kann ein Beitrag zur umfassenden Dekarbonisierung nur dann geleistet werden, wenn der Strom, der eingesetzt wird, zunehmend aus erneuerbaren Quellen bereitgestellt wird. Hierbei kann es sich um erneuerbaren Überschussstrom handeln, der ansonsten aberegelt werden würde. Perspektivisch muss es sich jedoch nicht mehr nur um Überschussstrom handeln. Zu den Technologien der Sektorenkopplung zählen folgende Verfahren:

- Power-to-Heat (PtH, P2H) bezeichnet den Einsatz von Strom im Wärmemarkt, beispielsweise durch den Einsatz von Heizelementen (Elektrokessel) in Fernwärmesystemen oder elektrisch betriebener Wärmepumpen.
- Power-to-Gas (PtG, P2G) bezeichnet die Bereitstellung von brennwertreichen Gasen (z. B. Wasserstoff oder Methan) durch die strombetriebene Elektrolyse von Wasser, das heißt, die Aufspaltung von Wasser in Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2). In einem weiteren optionalen Schritt (sogenannte Methanisierung) kann der Wasserstoff durch die Einbindung von Kohlenstoffquellen in synthetisches Methan (CH_4) umgewandelt werden. Als Kohlenstoffquelle dient in der Regel Kohlenstoffdioxid (CO_2), das zum Beispiel bei der Biogasaufbereitung anfällt, aus den Abgasen fossil befeuerter Kraftwerke abgetrennt wird (analog zum Carbon Capture and Storage) oder direkt aus der Luft gewonnen werden kann (Direct Air Capture). Bei der Nutzung von erneuerbarem Strom wird dann von erneuerbarem Erdgas gesprochen, da Erdgas überwiegend CH_4 enthält. Der Begriff „grüne Gase“ umfasst erneuerbares Erdgas und Biogas. Das Verfahrensbeispiel ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.



Power-to-Gas (Power-to-Methan) [19]



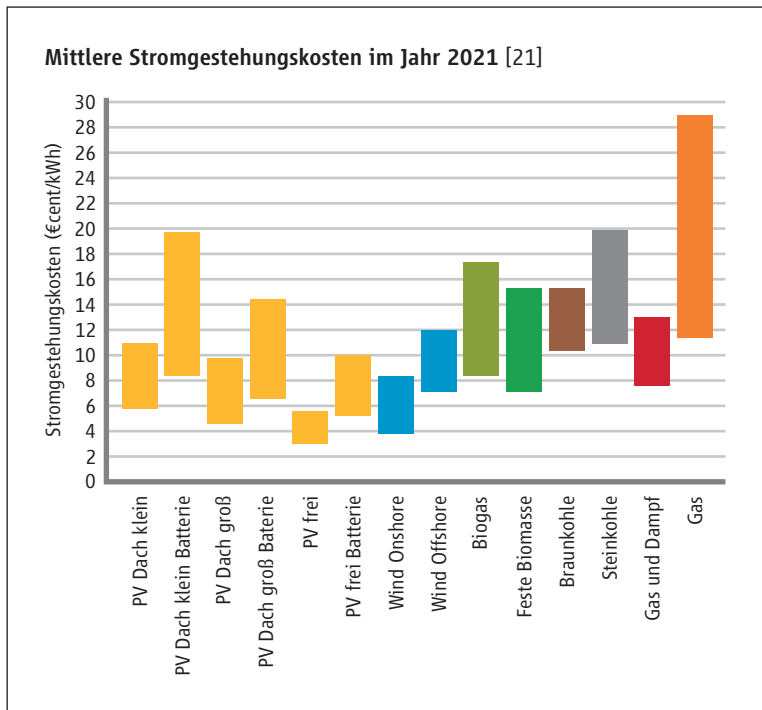
*LZA: Luftzerlegungsanlage



- Power-to-Liquid (PtL, P2L) bezeichnet ein Verfahren zur Herstellung von synthetischen flüssigen Treibstoffen aus Strom, bei dem zunächst Wasserstoff mittels Elektrolyse hergestellt wird. In sich anschließenden chemischen Prozessschritten lassen sich daraus unter Einbindung von Kohlenstoff synthetische Kohlenwasserstoffe generieren (Methanol, Dimethylester, Kerosin etc.). Der Begriff Power-to-Fuel umfasst sowohl Power-to-Liquid als auch Power-to-Gas, sofern die hierbei erzeugten Gase (H_2 bzw. CH_4) im Verkehrsbereich genutzt werden sollen.
- Power-to-Chemicals beschreibt die Nutzung von Strom zur Herstellung von Chemikalien. Im weiteren Sinne fallen hierunter auch die Produkte, die mit Power-to-Gas und Power-to-Liquid hergestellt werden. Im engeren Sinne wird darunter die Nutzung von Strom zur Herstellung von Grundchemikalien in der chemischen Industrie (z. B. im Rahmen der grünen Grundstoffchemie) verstanden.
- Power-to-Mobility umfasst alle Arten der (direkten oder indirekten) Nutzung von Strom im Verkehrsbereich. Dies inkludiert neben batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen auch elektrisch betriebene Züge, Oberleitungsbusse beziehungsweise Oberleitungs-Lkw. Alternativ kann der aus Power-to-Gas-Prozessen erzeugte Wasserstoff oder das Methan in Brennstoffzellen- oder gasbetriebenen Fahrzeugen (LNG – Liquefied Natural Gas, CNG – Compressed Natural Gas) genutzt werden. Auch hierdurch würde ein Beitrag zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors geleistet werden.
- Power-to-Battery bezeichnet die Nutzung von Strom zum Laden von Elektrofahrzeugen. Prinzipiell kann die mobile Batterie im Auto als Stromspeicher genutzt werden und elektrische Energie zurück ins Stromnetz speisen (sogenannter Vehicle-to-Grid-Ansatz).
- Power-to-Power bezeichnet die (Zwischen-)Speicherung von Strom in Batterien oder anderen Speichern für elektrische Energie (z. B. Pumpspeicher oder Druckluftspeicher).

c) Synergie durch Power-to-X

Die Preise für Wind- und Solarstrom sind in den letzten Jahren stark gesunken. In Deutschland liegen die Preise mittlerweile bei unter sechs ct/kWh, weltweit bei circa drei ct/kWh [20]. Damit ist erneuerbarer Strom unter günstigen Bedingungen schon heute wettbewerbsfähig gegenüber konventionell erzeugtem Strom aus fossilen und nuklearen Quellen.

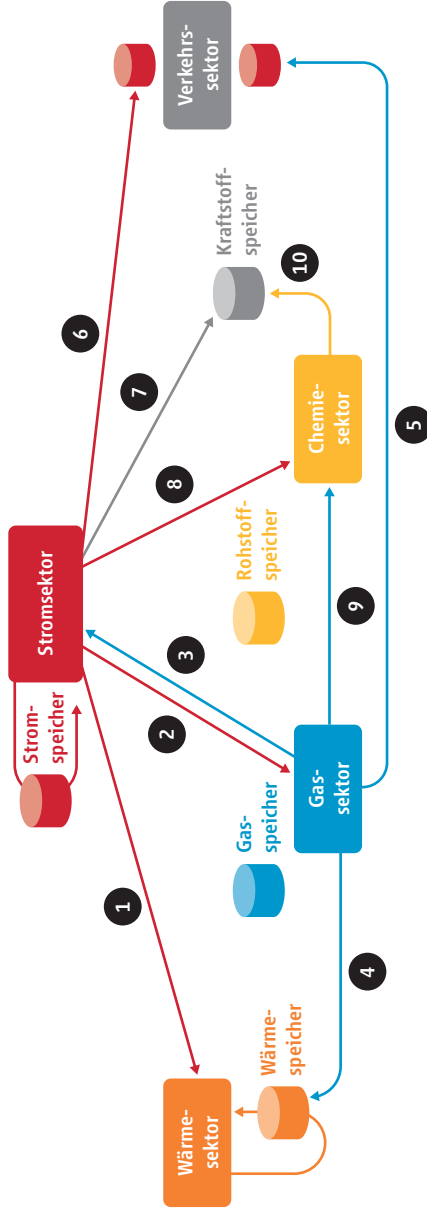


Um den zunehmend günstiger zur Verfügung stehenden Wind- beziehungsweise Solarstrom zukünftig auch in anderen Sektoren nutzen zu können, wird allerdings dessen Wandlung und Speicherung in andere Energieformen notwendig.

Mittels der Technologien Power-to-Heat, Power-to-Gas, Power-to-Liquid, Power-to-Chemicals und Power-to-Mobility wird es durch die Kopplung der Stromnetze mit der Wärme-, Gas- und Verkehrsinfrastruktur möglich, dass die erneuerbaren Strommengen einen Beitrag zur Dekarbonisierung der anderen Sektoren leisten und sich weitere Synergieeffekte zwischen den Sektoren nutzen lassen [18].

Unter energetischer Sektorkopplung wird darüber hinaus die Verbindung der Strom-, Wärme- und Gasnetze sowie des Mobilitätssektors verstanden. Hierdurch erhöht sich der Umfang der Optionen, die für eine kosteneffiziente Umsetzung der Energiewende zur Verfügung stehen. Somit können die verschiedenen Energiequellen besser genutzt werden, was zu Kosteneinsparungen führen kann.

Sektorenkopplung durch Power-to-X-Technologien und Energiespeicher [19]



1 Power-to-Heat Wärmepumpe Flexible Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

3 Power-to-Gas als Stromspeicher

5 Power-to-Gas als Stromkraftstoff

7 Power-to-Liquid als Stromkraftstoff

9 Power-to-Gas als Rohstoffspeicher

2 Einspeichertechnologie Power-to-Gas

4 Power-to-Gas als Wärmespeicher

6 Elektromobilität

8 Einspeichertechnologie Power-to-Chemicals

10 Power-to-Chemicals als Kraftstoffspeicher



Energieeffizienz vs. Flexibilität



Maßnahmen umsetzen



Handlungsspielräume



Energie – Herausforderungen und Chancen

4. Kennwerte

Das Richtige zur rechten Zeit bewerten!

Zur Identifikation möglicher Klimaneutralitäts- und Effizienzmaßnahmen im Unternehmen muss die Eignung beziehungsweise Nicht-Eignung mit Hilfe ökologischer, technischer und wirtschaftlicher Parameter bewertet werden. Je nach Zielstellung des Unternehmens (z. B. Minimierung von Bezugskosten oder Maximierung des Autarkiegrads) kann unter Ausweisung aussagekräftiger Indikatoren der Entscheidungsprozess transparent gestaltet werden. Somit lassen sich unterschiedliche Maßnahmen hinsichtlich des Gesamtnutzens durch geschickte Kombination vergleichen.

Von besonderer Bedeutung hinsichtlich der späteren Umsetzbarkeit einer Maßnahme beziehungsweise eines Maßnahmenpaketes sind die technischen und wirtschaftlichen Anforderungen. Zunächst sollten daher die zu untersuchenden Energiemedien festgelegt werden. Der Fokus sollte dabei auf Elektrizität sowie Wärme- und Kälteversorgung liegen. Zusätzliche Medien können integriert werden, sofern durch die Wandlung und Nachnutzung Potenzialverbesserungen hinsichtlich energetischer Effizienz, Kosten und ökologischer Nachhaltigkeit während des Betriebs zu erwarten sind.

Auf dem Laufenden bleiben!

Das Portfolio an möglichen Technologien und Maßnahmen unterliegt entwicklungs-technisch einem permanenten Wandel. Insbesondere die preislichen und parametrischen Größen besitzen nur eine kurze Halbwertszeit, sodass ein konkreter Anwendungsfall für die Bewertung notwendig ist. Darüber hinaus sollten relevante Maßnahmen regelmäßig neu bewertet und ergänzt werden. Auf diese Weise sind die für die Auswahl entscheidenden Faktoren ebenso wie die Maßnahmen selbst stets am Puls der Zeit.

Welcher Kennwert passt zu meinem Ziel?

Mit Hilfe der entsprechenden technischen (z. B. Anlagenleistung, Verbrauch) und wirtschaftlichen (z. B. Anschaffungs- und Betriebskosten) Basisparameter werden die Kennwerte ermittelt, die das vorab definierte Ziel (z. B. Leistungssteigerung, Kostensenkung und Image) bewertbar machen. Diese Kennwerte beschreiben die finale Auswahl der gelisteten Maßnahmen und Technologien in dimensioniertem Zustand. Dabei ist es immer das Ziel, den Bewertungskennwert durch geschickte Kombination der Maßnahmen zu maximieren. Die weiteren Kennwerte, die sich auch aus den individuellen Anforderungen des Standorts ergeben, können darüber hinaus eine entsprechende Rangfolge abbilden und die Umsetzungsreihenfolge entscheidend beeinflussen. So kann es beispielsweise sinnvoll sein, kleinere Maßnahmen sofort umzusetzen, auch wenn diese nicht den höchsten Effizienzgewinn innerhalb des Gesamtkonzeptes aufweisen aber dafür sofort umsetzbar sind. Da größere Maßnahmen in der Regel auch mit größerem Aufwand und Umbaumaßnahmen verbunden sind und mitunter erst Genehmigungen eingeholt werden müssen, können kleine Maßnahmen mit kurzer Umsetzungszeit, sogenannte „Low Hanging Fruits“, den oft gewünschten Sofort-Effekt mit sich bringen.

Potenziell wichtige Zielstellungen sind unter anderem:

- Wirtschaftlich-energetisch: Minimale Kosten je erzeugter beziehungsweise eingesparter Energie in €/kWh
- Wirtschaftlich-ökologisch: Minimale Kosten je eingespartem CO₂-Äquivalent in €/tCO₂
- Autarkiegraderhöhung: Maximale Eigendeckung / Eigenversorgung in Prozent
- Zeitliche Realisierung (Auswahl schnell umzusetzende Maßnahmen)



III. Maßnahmen umsetzen



Energieeffizienz
vs. Flexibilität



Maßnahmen
umsetzen



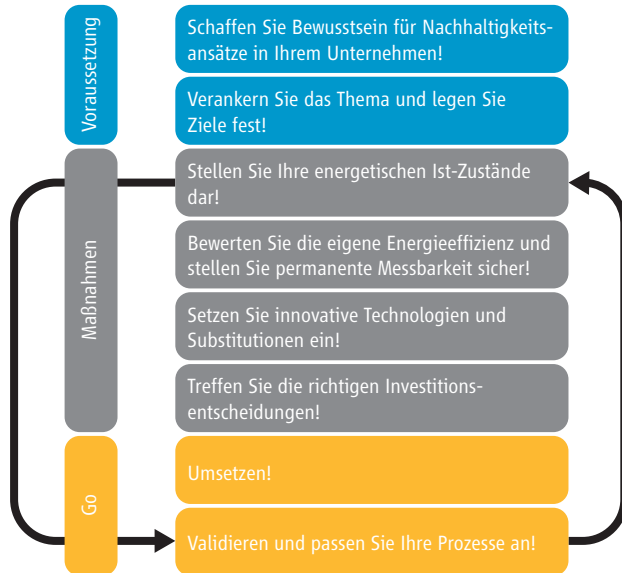
Handlungs-
spielräume



Energie –
Herausforderungen
und Chancen

1. Ein Leitfaden

Umsetzungsleitfaden zur Steigerung der unternehmens-internen Energieeffizienz



Quelle: Eigene Darstellung.

Purer Aktionismus ist bei der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen wenig ratsam. Vielmehr sollten die richtigen Maßnahmen unternehmensindividuell ausgewählt und auf geeignete Weise umgesetzt werden, denn nicht jede Maßnahme ist für jedes Unternehmen geeignet. Zudem können negative Wechselwirkungen zwischen einzelnen Maßnahmen bestehen, die in Kombination weder zielführend sind noch zum gewünschten Ergebnis führen. Wer den ganzheitlichen Blick verliert, spürt die finanziellen Auswirkungen früher oder später sehr deutlich. Im folgenden Abschnitt wird ein möglicher strategischer Ablauf präsentiert, der Unternehmen zur Umsetzung von effizienzsteigernden Maßnahmen befähigen kann. Voraussetzung für die Umsetzung ist, ein unternehmensinternes Bewusstsein für Nachhaltigkeit,



die organisationale Verankerung konkreter Themen und die Festlegung von Zielen.

Im Folgenden wird genauer auf die jeweiligen Maßnahmen eingegangen und die einzelnen Punkte beschrieben.

Stellen Sie Ihre energetischen Ist-Zustände dar!

Zunächst wird der Status quo mit Hilfe einer Ist-Analyse festgehalten und bestehende Stärken und Schwächen ermittelt. Darauf basierend gilt es, Potenziale zu ermitteln, entsprechende Maßnahmen abzuleiten sowie technisch und ökonomisch zu bewerten und zu priorisieren. Diese Maßnahmen sollten in einem Konzept zusammengefasst werden, das als Richtschnur für das weitere Vorgehen dient.

Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen scheuen häufig die notwendigen Investitionen, obwohl sich diese in der Regel bereits innerhalb weniger Jahre amortisieren. Zudem ist das eigene Hintergrundwissen über die Einsparpotenziale und deren Erschließung oftmals nicht ausreichend.

„Machen Sie Ihr Unternehmen doch einfach effizienter!“ – Die Überforderung durch willkürliche Effizienzmaßnahmen



Quelle: Eigene Darstellung.

Die möglichst verursachungsgerechte Erfassung der Energieverbräuche und -kosten schafft die Voraussetzung dafür, die Verschwendung von Energie im Unternehmen gezielt zu verringern und unnötige Verbräuche zu vermeiden. Beispiele hierfür sind der unnötige Leerlauf von Maschinen sowie häufiges oder zu langes Öffnen von Außentoren. Mit motivierten Beschäftigten lassen sich oft hohe Effizienzverbesserungen erreichen. Deshalb sollten die Mitarbeiter für entsprechende Maßnahmen sensibilisiert werden. Die meisten Anwender haben ihren monatlichen Energieverbrauch bisher noch nicht analysiert, die Ergebnisse auf Betriebsmittel bezogen oder gar Maßnahmen getroffen. Das Verständnis über den elektrischen Verbrauch in der eigenen Organisation ist eine maßgebliche Voraussetzung, um überlegte Entscheidungen zur Reduktion des Energieverbrauchs zu treffen.

Bewerten Sie die eigene Energieeffizienz und stellen Sie permanente Messbarkeit sicher!

Um der Überforderung durch willkürliche Maßnahmen entgegen zu können, ist es von großer Bedeutung, die eigene Energieeffizienz bewerten und deren Messbarkeit sicherstellen zu können.

Das generelle Ziel der energetischen Bewertung ist es, jene Bereiche des Unternehmens zu identifizieren, die den wesentlichen Energieverbrauch verursachen. Für das energetische Verständnis ist es entscheidend zu wissen, wo innerhalb des Unternehmens die Energie verbraucht wird. Nur so kann ein aussagekräftiges Energiemanagementsystem aufgebaut und die Energieeffizienz gesteigert werden. Sobald die wesentlichen Energieaspekte identifiziert sind, lassen sich zielgerichtet Maßnahmen zur Optimierung ableiten.

Jede energetische Bewertung sollte zum Beispiel folgende Prüfpunkte beinhalten:

- Vergleich des aktuellen mit dem früheren Energieverbrauch und der Energiefaktoren auf der Basis von Mess- und weiteren Daten
- Ermittlung der Bereiche mit dem wesentlichen Energieverbrauch, vor allem unter Berücksichtigung jener Bereiche, in denen sich in der letzten Periode bedeutende Veränderungen ergeben haben

- Für jeden Bereich mit wesentlichem Energieverbrauch: Identifikation der Energieinflussfaktoren, der aktuellen energiebezogenen Leistung, der Personen mit möglicher Einflussnahme
- Prognose des zu erwartenden Energieverbrauchs für die nächste Periode
- Maßnahmenermittlung und Umsetzung zur Steigerung der Energieeffizienz – „Low Hanging Fruits“ können unmittelbar mit geringem Aufwand und geringen Kosten erreicht werden.

Setzen Sie innovative Technologien und Substitutionen ein!

Wo stehen die Unternehmen in puncto Energieeffizienz? Zunächst sollte ein Technologie- und Maßnahmenscreening erfolgen, um herauszufinden, welche Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz es an dem jeweiligen Standort gibt. Hilfreich dazu sind Kataloge mit verschiedenen Technologien und hinterlegte Kriterien.

Anschließend erfolgt die Priorisierung. Im dritten Schritt muss die Dimensionierung geprüft werden. Hier sollte der Blick auch über die lokalen Möglichkeiten hinaus gehen. So zeigen sich auch die Chancen auf, die alternative Energieträger bieten können – etwa der Zukauf grünen Wasserstoffs oder die Anbindung an einen lokalen Windpark.

Wichtige Werkzeuge hierfür können effizienzsteigernde und ressourcenschonende, sogenannte Net-Zero-Technologien sein. Sie unterstützen dabei, ein bilanzielles Gleichgewicht aus Energieerzeugung und -verbrauch herzustellen. Das heißt, nicht nur Strom einzusparen, sondern Energie, die man benötigt, gegebenenfalls auch selbst zu erzeugen. Dies kann auch für nicht produzierende Unternehmen interessant sein. Hilfreich ist es für Betriebe zudem, wenn sie sich durch größere Autarkie ein Stück weit von den Bedingungen des Strommarkts lösen können. Und nicht zuletzt kommen Unternehmen mit Net-Zero-Technologien ihrem Ziel und dem Anspruch, nachhaltiger zu produzieren, näher. Die Integration von Net-Zero-Technologien wird künftig für Unternehmen weiter an Bedeutung gewinnen.



Net-Zero-Technologie-Blumenstrauß



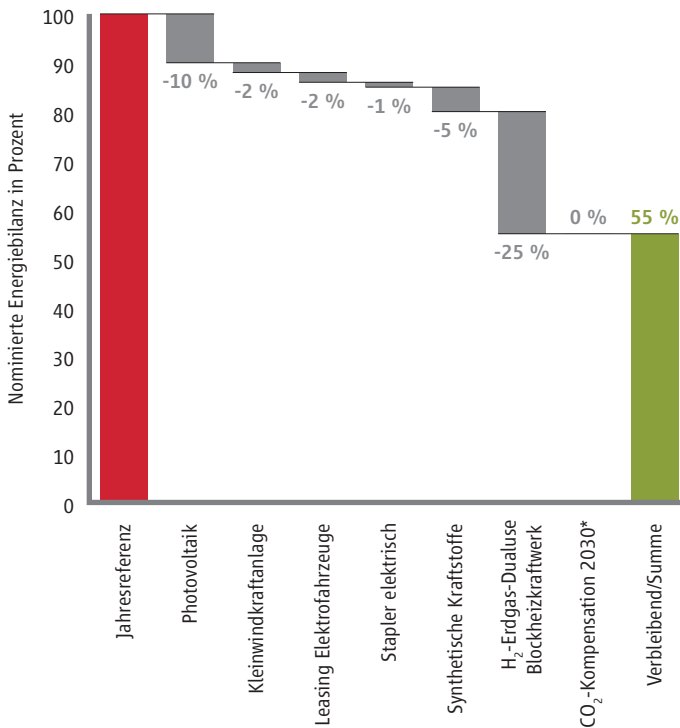
Quelle: Eigene Darstellung.

Gegenwärtig können mit diesen Technologien schon Verbesserungen der Energieeffizienz von über zehn Prozent erreicht werden. Neben der Energiebilanz der Unternehmen müssen jedoch viele Faktoren begutachtet werden; beispielsweise inwieweit Strom aus erneuerbaren Quellen gewonnen werden kann oder ob sich der Einsatz von Energiespeichern lohnt. Auch die energetische Flexibilität muss untersucht werden. So stellt sich die Frage, ob ein Unternehmen möglicherweise sogar einen Überschuss an Energie produzieren kann. In positiv bewerteten Fällen ließen sich interessante neue Geschäftsmodelle, wie der Verkauf von Strom und Abwärme, entwickeln. Unternehmen, die bereits sehr energieeffizient sind, können dennoch ihre Nachhaltigkeitsstrategien überprüfen lassen, um weitere Einsparpotenziale zu identifizieren. Dafür muss eine Vielzahl an Technologien und Einzelmaßnahmen analysiert werden, mit denen sich der CO_2 -Abdruck weiter senken lässt. Dazu gehören Photovoltaik und Windkraft, aber auch bessere Kühltechnik, Wärmenachnutzung oder effizientere Rechner. So kann zum Beispiel bezüglich des Autarkiegrads bei

der Energieversorgung ein Steigerungspotenzial von bis zu 50 Prozent identifiziert werden. Das heißt, wenn alle vorgeschlagenen Möglichkeiten klug kombiniert genutzt werden, kann im Idealfall ein Großteil der benötigten Energie selbst erzeugt und eine enorme Menge CO₂ pro Jahr eingespart werden.

Treffen Sie die richtigen Investitionsentscheidungen!

Beispiel eines Effizienz-Ausbaupfades: Strom, Verkehr und Wärme mit umzusetzenden Maßnahmen und Technologien und Energiebilanz



* keine Effizienzmaßnahme, Verbesserung der CO₂-Bilanz

Quelle: Eigene Darstellung.



Abschließend müssen konkrete Ausbaupfade definiert werden. So kann aufgezeigt werden, welche Technologien und Maßnahmen gegebenenfalls benötigt werden, um bestimmte Ziele zu erreichen – samt zugehöriger Kosten, Energie-Output, CO₂-Ersparnis und prozentualem Autarkiegrad. Je nach Umfang können drei, fünf, teilweise sogar bis zu zehn Ausbaupfade entwickelt werden.

In den nachfolgenden Abschnitten werden drei exemplarische Maßnahmen erläutert, die mit Hilfe einer umfangreichen Datenerhebung eine ganzheitliche Konzeptionierung ermöglichen, was wiederum zu einer Steigerung und Verbesserung der Energieeffizienz in Familienunternehmen führen kann.

2. Effizienzverbesserung durch Querschnittsanwendungen

Viele produzierende Unternehmen betreiben sehr individuell aufgebaute Produktionsprozesse. Deutschland ist ein Hochlohnland, in dem sich insbesondere diejenigen Familienunternehmen durchsetzen können, die spezifische Marktnischen mit hochwertschöpfenden Produkten erreichen. Dadurch besteht in diesen Unternehmen ein spezialisiertes Know-how für die Herstellung dieser Produkte sowie eine tieferegreifende Prozesskenntnis. Die Kernprozesse der Unternehmen sind daher häufig schon optimiert. Für die angrenzenden Ver- und Entsorgungsprozesse gilt dies jedoch nicht immer. Ein Grund hierfür ist, dass der Fokus weniger auf produktionstechnischen Kennzahlen liegt, die zur Kernkompetenz des Unternehmens gehören, sondern eher auf energietechnischen Kennzahlen. Dieses Feld der energie- und versorgungstechnischen Anlagen (Utilities) liegt zumeist nicht mehr im Kernkompetenzbereich des Unternehmens. Das führt dazu, dass die Utilities oft nicht optimal betrieben werden. Deren Auswirkung auf die Effizienz und damit die Wirkung auf die Produktionskosten durch Energiepreise wird nicht ausreichend erkannt. Weiterhin besteht oftmals Unkenntnis darüber, wie diese Prozesse optimiert werden können. Auch werden Effizienzverluste in Kauf genommen, solange die Produktion nicht gefährdet ist. Daher kann das Einschalten externer Experten für energie- und versorgungstechnische Anlagen zweckmäßig sein. Durch ein sehr tiefes Verständnis für die angrenzenden

Prozesse können diese Experten daher Vorschläge für Effizienzverbesserungen an den Utilities erarbeiten. Zu den Utilities können folgende Anlagen gezählt werden:

Energieerzeugung

- Eigenstromerzeugungsanlagen
- Energiespeicheranlagen (elektrisch und thermisch)

Prozesstechnik

- Dampf- und Heizkesselanlagen
- Druckluftanlagen
- Hydraulische Netze zur Verteilung von Wärme und Kälte
- Kälteanlagen
- Kühlanlagen
- Lüftungsanlagen
- Wärmeübertrager

Gebäude/Mobilität

- Beleuchtungsanlagen
- Fahrzeuge, Flurförderzeuge, Krananlagen

Soll festgestellt werden, ob diese Anlagen ein Effizienzsteigerungspotenzial aufweisen, ist zunächst eine Auseinandersetzung mit den von den Herstellern angegebenen Leistungsdaten erforderlich. Verfügt die Anlage über Messsensoren – beispielsweise für elektrische Leistungsaufnahme, Vor- und Rücklauftemperaturen an Heizkesseln, Rückkühlwerken oder Kältemaschinen, Volumenströme und Ventilstellungen – stehen die Chancen gut, potenzielle „Energiefresser“ zu entdecken.



Effizienzeinbußen am Beispiel einer Kälteanlage:

Doch wie kommt es zu Effizienzeinbußen? Nehmen wir als Beispiel eine Kälteanlage, die den Produktionsprozess zur Kühlzwecken mit einem Kaltwasser von 6 °C versorgen soll. Jede Kältemaschine ist auf eine bestimmte Vorlauf- und eine bestimmte Rücklauf Temperatur ausgelegt. Diese Angaben werden, genau wie die gewünschte Kälteleistung, dem Hersteller bei der Bestellung übermittelt. In unserem Beispiel soll die Kältemaschine über eine Kälteleistung von 500 kW verfügen. Die Rücklauf Temperatur gemäß Auslegung beträgt 12 °C. Die Differenz zwischen Vor- und Rücklauf Temperatur wird als Spreizung bezeichnet. Sie beträgt hier 6 K. Mit diesen Parametern ist ein Kaltwasservolumenstrom von 71,6 m³/h erforderlich. Im Laufe der Jahre wird seitens der Produktion immer wieder eine unzureichende Kühlung an bestimmten Apparaten beklagt. Der Betreiber der Kältetechnik reagiert daraufhin mit der Einstellung eines geringeren Sollwerts der Vorlauf Temperatur von 4 °C und die Netzumwälzpumpen werden mit höheren Drehzahlen betrieben, um einen höheren Volumenstrom im Kältenetz zu erzielen. Nun werden vielleicht die zuvor kritischen Apparate besser mit Kälte versorgt, doch läuft die Kältetechnik noch effizient? Der Blick auf die Messwerte zeigt folgendes Bild:

- Vorlauf Temperatur 4 °C anstatt 6 °C
- Rücklauf Temperatur 7 °C
- Volumenstrom 93,2 m³/h

Diese Messwerte lassen eine Kälteleistung von 325 kW errechnen. Daraus wird ersichtlich, dass die Kälteleistung der Maschine nicht voll ausgenutzt wird, der IST-Volumenstrom aber oberhalb des Volumenstromes von 71,6 m³/h liegt, den die Kältemaschine bei 100 Prozent ihrer Leistung (500 kW) benötigen würde. Ein Blick auf die Temperaturspreizung von nur 3 K anstatt der projektierten 6 K macht das sofort deutlich. Durch die geringere Vorlauf Temperatur arbeitet die Kältemaschine auf einem energieintensiveren Arbeitspunkt. So wird pro kWh Kälte mehr Strom verbraucht, als tatsächlich

nötig. Durch den zu hohen Volumenstrom verbrauchen die Netzumwälzpumpen in unserem Beispiel in etwa die dreifache Strommenge.

Doch warum wird ein solcher Betriebspunkt überhaupt gefahren? Oft sind die hydraulischen Netze älter als die Erzeugungsanlagen oder die Produktionsanlagen. Dadurch sind Verbraucher oft nicht regelbar und es liegen keine Regelkriterien für die Netzumwälzpumpen vor. Durch fehlende Sensorik ist keine Transparenz möglich. So können auch moderne Kälteanlagen und Umwälzpumpen ihr Einsparpotenzial nicht ausnutzen.

In unserem Beispiel könnte eine sogenannte Schlechtpunktregelung eingeführt werden. Dazu müssen Differenzdrucksensoren und geregelte Verbraucher eingeführt werden. Die Schlechtpunktregelung ist eine vorteilhafte Form der Differenzdruckregelung in einem hydraulischen Netz, die es ermöglicht, dass das Netz mit dem Volumenstrom, der aktuell geforderten Leistung entspricht. Die Kältemaschine kann nun wieder mit ihren Nennparametern betrieben werden. Das hat folgende Vorteile:

- Senkung des Pumpenstrombedarfes auf das technisch minimale Maß
- Längere Lebensdauer der Pumpen aufgrund niedrigerer Drehzahlen
- Effizienter Einsatz der Erzeugungsanlage (hier: Kälteanlage)
- Geringere Störanfälligkeit der Utilities
- Energiekostensenkung
- Produktivität des Unternehmens wird nicht durch Mängel in den Utilities gehemmt

Dieses Beispiel kann analog auf alle Versorgungssysteme angewendet werden, bei denen hydraulische Netze eine Rolle spielen.

Hinsichtlich eines energieeffizienten Agierens ist weiterhin der Betrieb von Druckluftnetzen relevant: Druckluft ist eine der teuersten Energieformen. Weniger als 10 Prozent des Strombedarfes des Kompressors werden in der Druckluft mechanisch



gespeichert. Die restlichen mehr als 90 Prozent des Strombedarfes werden über das Motorenöl des Kompressors als Abwärme abgeführt. Deshalb kommt es besonders darauf an, die Ein- und Ausschaltdrücke der Kompressorenanlage günstig zu wählen und sich mit den Betriebsmodi der Maschinen zu befassen. Viele Anlagen laufen oft im Standbybetrieb und verbrauchen Strom, obwohl keine Druckluftabnahme besteht. In anderen Betrieben wiederum wird verschwenderisch mit Druckluft umgegangen, da nicht immer der hohe Strombedarf zur Bereitstellung dieses Mediums verstanden wird. Hinzu kommen Leckagen bei schlecht gewarteten Netzen. Bei gleichzeitigem Wärmebedarf im Betrieb lohnt es sich, über Abwärmenutzung aus dem Kompressor nachzudenken. Die Abwärme steht bei mehr als 60 bis 90 °C zur Verfügung, so dass diese in ein Wärmenetz eingekoppelt werden kann. Viele Hersteller bieten inzwischen fertige Abwärmenutzungsmodule für Druckluftkompressoren an.



Fazit:

Die Beispiele lassen sich auf eine Vielzahl von energie- und versorgungstechnischen Prozessen übertragen. Sie sollen zeigen, dass es sich lohnt, auch bei den nicht direkt produktionsbetroffenen Anlagen mögliche Verbesserungen zu identifizieren. Das Hinzuziehen von externen Experten kann diesbezüglich sehr hilfreich sein.



Einsparpotenzial:

Bis zu 30 Prozent der jeweiligen Energieform



Adressaten dieser Maßnahmen:

Alle Unternehmen, die Utilities betreiben (siehe Auflistung zu Beginn des Abschnitts)

3.

Effizienzverbesserung durch Energierückgewinnung

Die Energierückgewinnung im technischen Sinne wird als Rekuperation bezeichnet. Im Folgenden werden die Wärmerückgewinnung sowie die elektrische Energierückgewinnung als relevante Methoden der industriellen Praxis genauer beleuchtet.

a) Wärmerückgewinnung

In der Prozessindustrie bedeutet Energierückgewinnung zumeist Wärmerückgewinnung. Unter Prozessindustrie werden insbesondere Unternehmen der Branchen Chemie, Pharmazie, Energiewirtschaft, die Grundstoffindustrie und die Lebensmittelindustrie verstanden.

Steht Abwärme bei moderaten Temperaturen unterhalb von 40 °C zur Verfügung, ist eine direkte Nutzung für andere Prozesse in der Regel nicht möglich. Hier könnte die Nutzung von Wärmepumpen eine interessante Lösung sein, um das vorhandene Temperaturniveau der Abwärme auf ein nutzbares Temperaturniveau anzuheben.

Elektrisch betriebene Wärmepumpen sind für Neubauten im Wohnbereich seit vielen Jahren etabliert. Sie liefern eine Vorlauftemperatur von maximal 50 °C, was für industrielle Anwendungen häufig zu gering ist. Um auch Altbauten und Gewerbeobjekte bedienen zu können, sind in den letzten Jahren Maschinen mit Vorlauftemperaturen bis 80 °C, fallweise bis 100 °C, hergestellt worden. Mit solchen Vorlauftemperaturen kann in vielen Industriebetrieben gearbeitet werden.

Sollte Abwärme im Temperaturbereich oberhalb von 300 °C zu Verfügung stehen (z. B. Stahlwerke, Glaswerke, Verbrennungsanlagen), kann mittels sogenannter Organic Rankine Cycle-Turbinen (ORC) Strom aus Abwärme erzeugt werden. Bei ORC-Turbinen handelt sich um Turbinen in einem thermodynamischen Kreisprozess, ähnlich dem Kreisprozess eines herkömmlichen fossilen Kraftwerkes. Im Unterschied dazu wird als Arbeitsmittel anstatt Wasser ein synthetisches organisches Arbeitsmittel eingesetzt, welches bei den Prozesstemperaturen einen günstigeren Wirkungsgrad aufweist.



Aus 1.000 kWh Abwärme lassen sich mit ORC-Technologie – je nach tatsächlicher Abwärmetemperatur – etwa 100 bis 200 kWh Strom erzeugen.

In Lüftungs- und Klimaanlageanlagen sind Rekuperatoren besonders bei hohen Luftwechselzahlen sehr verbreitet. Wenn eine Bestandsanlage noch nicht über einen Rekuperator verfügt, ist es ratsam, die aktuellen Betriebswerte der Lüftungs- und Klimaanlageanlagen auszuwerten, um festzustellen, ob sich die Nachrüstung eines Rekuperators lohnen würde.

b) Elektrische Energierückgewinnung

In der Fertigungsindustrie ist auch die elektrische Energierückgewinnung denkbar. Unter Fertigungsindustrie werden beispielsweise Unternehmen der Automobilbranche oder Maschinen- beziehungsweise Gerätebauunternehmen verstanden.

Durch die Ausnutzung einer mechanischen Energiequelle kann der Elektromotor als Generator genutzt werden und eine Stromrückspeisung in das Werksnetz oder in Akkumulatoren realisiert werden. In Elektrofahrzeugen ist die elektrische Rekuperation Stand der Technik. Bei Arbeitsmaschinen im industriellen Umfeld ist diese Technologie jedoch noch nicht sehr verbreitet. Für folgende Anwendungen ist elektrische Rekuperation denkbar:

- Aufzüge im Abwärtsbetrieb
- Krane im Absenkbetrieb
- Flurförderzeuge und Transportsysteme im Bremsbetrieb
- Computerized Numerical Control-Maschinen (CNC) im Bremsbetrieb

Speziell für CNC-Maschinen ist seit wenigen Jahren ein Schwungradsystem am Markt verfügbar, welches Bremsenergie von Dreh- oder Fräsköpfen in einem Schwungradmodul speichert und die gespeicherte Energie direkt beim wiederhochlaufen der Dreh- beziehungsweise Fräsköpfe zur Verfügung stellt. Dadurch wird der Stromverbrauch von CNC-Fertigungsmaschinen reduziert.



Fazit:

Die Wärmerückgewinnung ist besonders für die Prozessindustrie und für Unternehmen mit wärme-, kälte- und klimatechnischen Anlagen ein vielversprechender Ansatz. Elektrische Rekuperation kann vor allem für Unternehmen der Fertigungsindustrie interessant sein, wo Produktionsmaschinen wie Roboter, CNC-Maschinen, Fördertechnik und dergleichen wesentliche Teile der Produktion ausmachen.



Einsparpotenzial:

Bis zu 30 Prozent der jeweiligen Energieform



Adressaten dieser Maßnahmen:

- Unternehmen der Prozessindustrie
- Unternehmen der Fertigungsindustrie

4.

Effizienzverbesserung durch Integrationsmaßnahmen

Neben den Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauchs und des CO₂-Fußabdrucks können weitere Bausteine den Gesamtprozess auf dem Weg zur Net-Zero-Factory zusätzlich unterstützen. Ziel dieser Bausteine ist es einerseits, das volle Potenzial der jeweiligen Einzelmaßnahme auszuschöpfen und andererseits, den Energiemanager im Unternehmen zu unterstützen und zeitraubende bürokratische Arbeiten zu reduzieren.

a) Batteriespeicher

Batteriespeicher gehören zu den elektrischen (genauer gesagt zu den elektrochemischen) Energiespeichern und sind in der Lage, Strom im Überschussfall aufzunehmen und bei Bedarf zu einem späteren Zeitpunkt wieder abzugeben. Dadurch sind sie in der Lage, einen der größten Nachteile bei der Integration von erneuerbaren Energien – dem volatilen und nicht kontrollierbaren, witterungsabhängigen Ein-

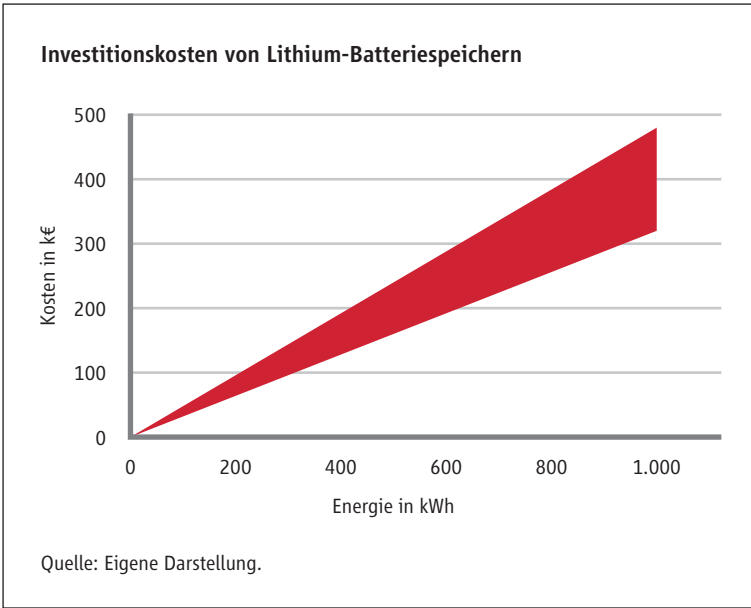


speiseverhalten – entgegenzuwirken und die Nutzung regenerativer Elektroenergie zu verbessern. Batteriespeicher auf Lithiumbasis zeichnen sich grundsätzlich durch eine hohe Energiedichte (120-200 kWh/kg) und örtliche Unabhängigkeit aus. Die Kombinationen des Elektrodenmaterials (zusammen mit Lithium) sind jedoch vielfältig.

In den letzten Jahren konnten sowohl einige Innovationen bei Batteriezellen und Batteriespeichersystemen bezüglich Effizienz und Zuverlässigkeit bei gleichzeitiger Kostenreduktion verzeichnet werden. Derzeit verfügbare Systeme erreichen einen Gesamtwirkungsgrad von 80 bis 85 Prozent, wobei hier ein vollständiger Zyklus aus Ein- und Ausspeichervorgang (Round Trip Efficiency) enthalten ist. Die benötigten circa zwei Prozent der Nennleistung als Eigenbedarf für Steuerungs- und Sicherheitseinrichtungen liegen zudem unterhalb des Eigenbedarfs konventioneller Kraftwerke. So erfüllen Lithiumbatterien sowohl Anforderungen an mobile als auch stationäre Speicher. Das typische Einsatzfeld erstreckt sich von mobilen Kleingeräten (z. B. Laptops, Mobiltelefone) über elektrische Fortbewegungsmittel, wie E-Autos oder Pedelecs, bis hin zu Großanlagen für das Energiemanagement, die zur Netzstabilisierung (Regelleistung) oder der Netzsicherung (unterbrechungsfreie Stromversorgung, Netzersatzanlage) notwendig sind.

Als Hemmschuh werden vor allem die Systemkosten sowie die Lebensdauer der Speicher gesehen. Je nach Hersteller und Systemkonfiguration müssen zwischen 400 bis 600 €/kWh Speicherkapazität eingeplant werden. Hinzu kommen etwa 80 bis 160 €/kW für die benötigten Wechselrichter, um den Anschluss der Batterien an das Wechselstromnetz realisieren zu können. Für Speicher mit einem Auslegungsverhältnis (Verhältnis von Speicherkapazität zu Speicherleistung) von 1 ergibt sich damit ein kapazitätsabhängiger Kostenkorridor, entsprechend der nachfolgenden Abbildung.

Dieses Auslegungsverhältnis von 1 gilt als üblich, da höhere Leistungen die Batteriezellen schneller altern lassen, sodass die garantierten Zyklen abnehmen. Bei entsprechender Auslegung kann von einer Lebensdauer von etwa 7.000 Vollzyklen (vollständige Einspeicherung und Ausspeicherung) ausgegangen werden. Während der angegebenen Lebensdauer verliert der Speicher an nutzbarer Kapazität, weshalb die Systeme oftmals leicht überdimensioniert sind. Als Grenzwert, auf den sich auch die angegebenen Zyklen beziehen, gilt ein Wert von 80 Prozent der Ursprungskapazität. Selbstverständlich kann das Speichersystem auch nach den 7.000 Zyklen, die auch als garantierte Mindestanzahl betrachtet werden können, weiter genutzt werden.



Die größten Lithiumressourcen existieren in Südamerika, China, den USA und im Kongo. Bei der Gewinnung werden große Mengen Salzlake aus der Erde gepumpt und verdunstet. Der hohe Wasserverbrauch sowie die zurückbleibenden Salzlückstände wirken sich ökologisch negativ aus. Verglichen mit dem Abbau von Platin oder weiteren seltenen Erden fällt die Umweltbelastung jedoch insgesamt gesehen gering aus.



**Fazit:**

Energiespeicher helfen bei der Integration von Eigenerzeugung in den Lastgang des Unternehmens und dienen damit als Booster für andere Maßnahmen. Zusätzlich können die Systeme zur Anpassung der Lastgänge (Lastverschiebung, Spitzenlastkappung) genutzt werden, was weitere Kosten einspart.

**Einsparpotenzial:**

Steigerung der Eigenverbrauchsquote von circa 25 Prozent auf teilweise bis zu 60 Prozent möglich

**Adressaten dieser Maßnahmen:**

Unternehmen mit bestehenden Erzeugungsanlagen und/oder Potenzial der Lastanpassung

b) Umweltdatenmanagementsystem

Für Unternehmen ist der Nachweis des Energieverbrauchs sowie der Bemühungen um eine effiziente Energienutzung ebenso bedeutsam, wie die dafür notwendigen Maßnahmen an sich. Als Orientierung und Leitfaden zum Entwurf eines koordinierten Energiemanagements (EMS) wurde 2011 die weltweit gültige Norm ISO 50001 eingeführt und 2018 zuletzt erneuert. Diese gilt weiterhin als Grundlage für eine Zertifizierung, wenn das eingesetzte EMS den Anforderungen der Norm entspricht.

Das Energiemanagement bildet im ersten Schritt die Grundlage zur Planung der bestmöglichen Maßnahmen, indem der Ist-Zustand erfasst wird. Dies kann bereits durch den Export und die Analyse von jährlichen beziehungsweise monatlichen Energieverbräuchen erfolgen. Für die wiederkehrende Überprüfung der Wirksamkeit und den Ausbau weiterer Maßnahmen ist es jedoch früher oder später ratsam, sich ein genaueres Bild in Form eines permanenten Monitorings zu verschaffen. Mit Hilfe dieser Daten können zum einen weiterführende Maßnahmen und insbesondere Synergiepotenziale identifiziert werden. Zum anderen können die Daten für ein (teil)automatisiertes Berichtswesen herangezogen werden. Dies entlastet einerseits den Energiemanager, da die Zusammenstellung der notwendigen Kennzahlen oft sehr zeitaufwendig ist, und ermöglicht zudem eine direkte Nutzung für eine öffentlichkeitswirksame Darstellung

auf Webseiten oder Bereichen mit Kundenverkehr – getreu dem Motto: Tue Gutes und rede darüber!



Fazit:

Das Energie- und Umweltdatenmanagement liefert sowohl in manueller als auch in automatisierter Form die notwendigen Daten zur Ermittlung und Bewertung der infrage kommenden Maßnahmen.



Einsparpotenzial:

Kein unmittelbares Einsparpotenzial, aber Grundlage jeder Maßnahme



Adressaten dieser Maßnahmen:

Alle Unternehmen, die ihren Energieverbrauch optimieren und ihre Effizienz steigern wollen



Energie – Herausforderungen und Chancen



Handlungsspielräume



Maßnahmen umsetzen



Energieeffizienz vs. Flexibilität



IV. Energieeffizienz vs. Flexibilität



Energieeffizienz
vs. Flexibilität



Maßnahmen
umsetzen



Handlungs-
spielräume



Energie –
Herausforderungen
und Chancen

1. Energetische Flexibilität

a) Definition

Energetische Flexibilität ist grundsätzlich die „Fähigkeit einer energie- bzw. leistungsrelevanten Erzeuger-, Verbraucher- oder Speicheranlage, sich schnell und mit geringem Aufwand an Markt- oder Systemsignale des Energiesektors anzupassen“ [22]. Positive Flexibilität beschreibt dabei die Reduzierung der entnommenen Anschlussleistung, das heißt entweder durch Verringerung des Verbrauchs oder durch Erhöhung der Eigenerzeugung. Negative Flexibilität ist entsprechend mit einer Erhöhung der Anschlussleistung durch Zuschalten von Last oder einer Reduzierung von Eigenerzeugung verbunden.

b) Dilemma zwischen Flexibilität und Energieeffizienz

Grundsätzlich lassen hocheffiziente Prozesse und Verfahren wenig Spielraum, um sich flexibel an veränderte Umgebungsbedingungen wie Energieverfügbarkeit, Preissignale oder personelle Umstellungen anzupassen. Jede Veränderung, beispielsweise hinsichtlich zeitlicher Planung von Prozessschritten, Variabilität von Temperaturbereichen oder Produktdurchsätzen, würde eine Abkehr vom optimalen Betriebspunkt bedeuten und damit die Gesamteffizienz verschlechtern. Bezogen auf Flexibilität in Haushalten ist auch oftmals die Rede davon, dass Flexibilitätserbringung keine Komforteinbußen nach sich ziehen darf. Das bedeutet, dass anwenderseitig keine Einschränkungen spürbar sind. In Relation zu industrieller Flexibilitätserbringung müssen folglich Maschinensollwerte der Produktion und gewünschte Durchsatzgrößen aufgrund von einzuhaltenden Lieferverpflichtungen unberührt bleiben.

c) Netzdienlichkeit als Chance

Die Flexibilisierung von Anschlussleistung muss folglich durch energiewirtschaftliche Erstattungen und Vergünstigungen kompensiert werden. Hierzu wird aktuell die Frage des Wertes von Flexibilität diskutiert. Es wird entscheidend sein, wie die Netzbetreiber neue Flexibilitätsoptionen als Alternativen zu bestehenden Methoden



der Netzengpassbewirtschaftung (Abregelung von EE, Redispatch) in ihre Prozesse einordnen können. Der starke Anstieg der Gesamtkosten für Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen von 1,4 Milliarden Euro im Jahr 2020 zu 2,3 Milliarden Euro im Jahr 2021 [24] steigert die Attraktivität für Flexibilität aus Sicht der Netzbetreiber enorm. Bereits heute kann die flexible Gestaltung von Energiebedarfen (z. B. Glättung der Lastkurve oder atypischer Bezug) zu monetären Vergünstigungen durch verbesserte Netznutzung führen.

2. Flexibilitätsoptionen

a) Nur keine Eingriffe in das Kerngeschäft!

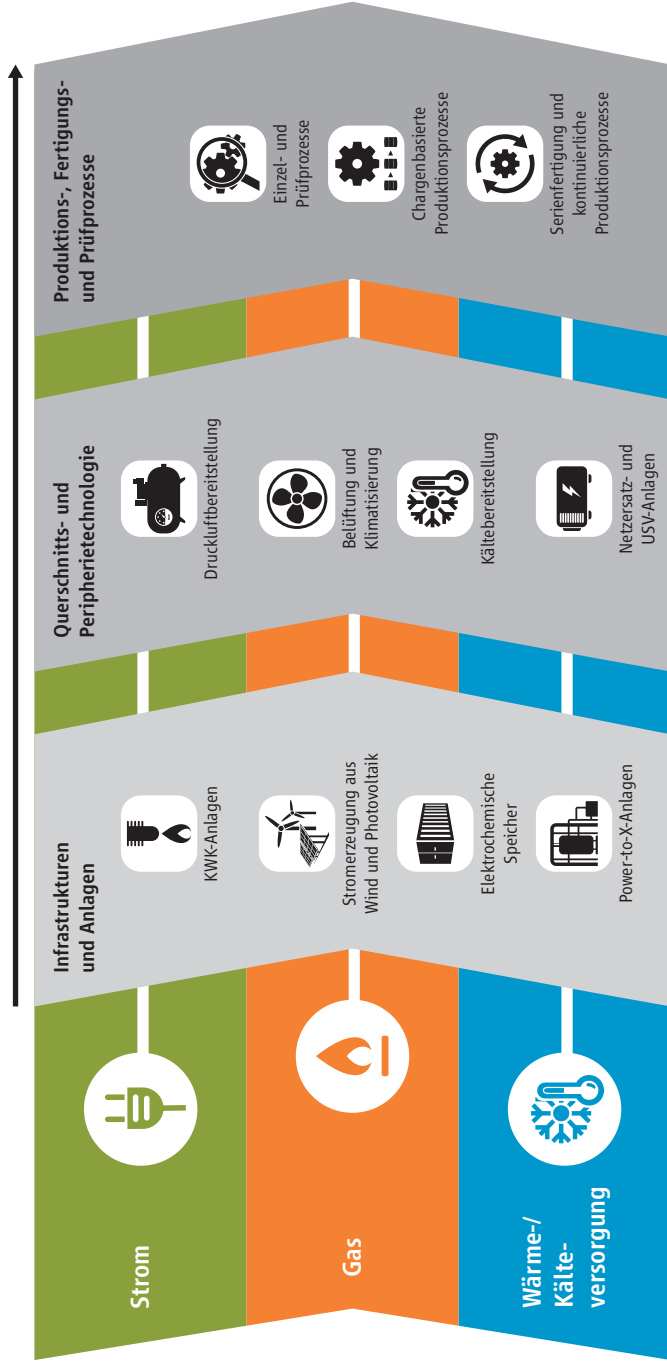
Da Flexibilität aggregiert an einem messtechnisch ausgestatteten Anschlusspunkt übergeben wird, erfolgt eine Aggregation der internen Anlagen, Technologien und Prozesse. Das erlaubt die Betrachtung von Optionen, um den energetischen Bezug abhängig von Integrationsgraden zu verändern. Mit zunehmendem Grad steigen die Wechselwirkungen der Komponenten untereinander sowie die Einflüsse auf die Produktions- und Fertigungsebene. Es kann wie folgt unterteilt werden [23]:

1. Infrastrukturen und Anlagen
2. Querschnitts- und Peripherietechnologien
3. Produktions-, Fertigungs- und Prüfprozesse

Der technische und wirtschaftliche Aufwand zur Erschließung von Flexibilität steigt umso mehr, je tiefer in die bestehenden Strukturen der Integrationsebenen eingegriffen wird. Je tiefer die Integrationsebene, desto stärker wächst der Einfluss auf die Kerngeschäftsebene des Unternehmens und die Wechselwirkungen nehmen zu. Dementsprechend ergeben sich andere Eigenschaften hinsichtlich Komplexität sowie personeller und organisatorischer Abhängigkeiten.

Integrations Ebenen für Flexibilitätsoptionen [23]

Steigender Integrationsgrad





b) Eigene Erzeugungs- und Speichereinheiten mobilisieren

Die Zielstellung sollte zunächst eine strikte Trennung zwischen Energieversorgungssystem und Nutzung sein. Realisieren lässt sich das am besten, wenn neben dem externen Bezug eigene und steuerbare Systemkomponenten zur Verfügung stehen, die Erzeugung und Speicherung von (elektrischer) Energie vor Ort erlauben.

Vorteile:

- Lokale Energie lokal nutzen
- Kein Eingriff in die Produktion
- Unabhängigkeit vom Energiemarktpreis
- Resilienz durch redundante Energiequellen

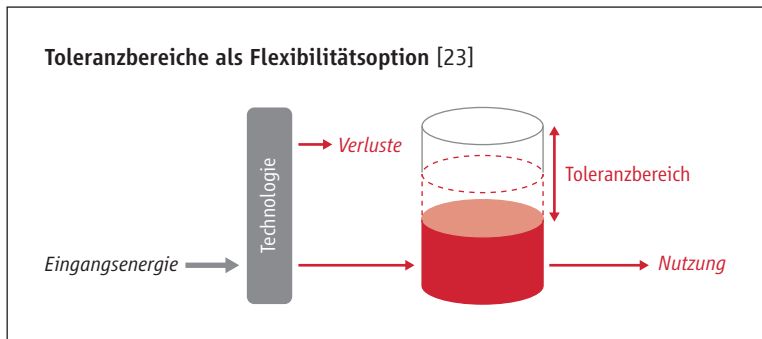
Voraussetzungen:

- Flächenbereitstellung
- Infrastrukturanbindung
- Logistik zur Energieträgerbereitstellung
- Energiemanagement

c) Toleranzbereiche als Puffer nutzen

Das Ausreizen von Toleranzbereichen in der Nutzenergieform wird oftmals verwendet, um anschlussseitig eine energetische Variabilität zu generieren. Das Prinzip zeigt die nachfolgende Abbildung.

Exemplarisch für diesen Ablauf können Kühlhäuser genannt werden, bei denen das zulässige Temperaturband (unter Beibehaltung von Qualitätsmerkmalen der gekühlten Ware) genutzt wird, um den energetischen Bezug zum Betrieb der Kühlaggregate im Minutenbereich zu verschieben [25]. Der Toleranzbereich kann neben thermischen Größen auch Durchsätze bei Lüftungsanlagen oder Druckbänder bei Kompressoren adressieren.



Vorteile:

- Nutzung bestehender (Querschnitts-)Systeme
- Kein unmittelbarer Eingriff in die Produktion

Voraussetzungen:

- Umfangreiche Mess- und Steuerungssysteme
- Hohe Automatisierung
- Intelligente Managementsysteme

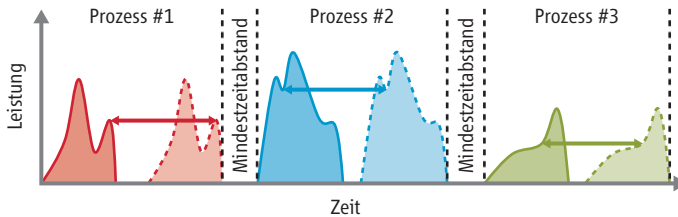
d) Energiebedarf nach Angebot ausrichten – eine Ultima Ratio?

Es müsste idealerweise – soweit möglich – stets dann produziert werden, wenn die Sonne scheint oder der Wind weht. Der Effekt einer flexiblen Produktion ist umso stärker, je energieintensiver einzelne Prozessschritte sind. Serienfertigung und kontinuierliche Produktionsprozesse erlauben in der Regel allerdings nur wenig Spielraum. Durch Verschiebung von Prozessschritten innerhalb produktspezifischer Grenzen, lassen sich Niedriglastzeitfenster besser ausnutzen und so wirtschaftliche Vorteile generieren.

Auch die optimale Integration erneuerbarer Energiequellen und die Kombination mit Speichertechnologien sind attraktive Anwendungsfälle.



Lastprofile einzelner Prozessschritte mit zeitlich flexiblen Startzeiten [23]



Vorteile:

- Hohe energetische Verschiebepotenziale
- Nachhaltigkeit bei Nutzung regenerativer Energien

Voraussetzungen:

- Umfangreiche Mess- und Steuerungssysteme
- Flexible Produktionstechniken und -anlagen
- Robuste Produktionsgüter mit geringem Qualitätsverlust
- Tolerante Lieferverpflichtungen

3. Chancen & Risiken

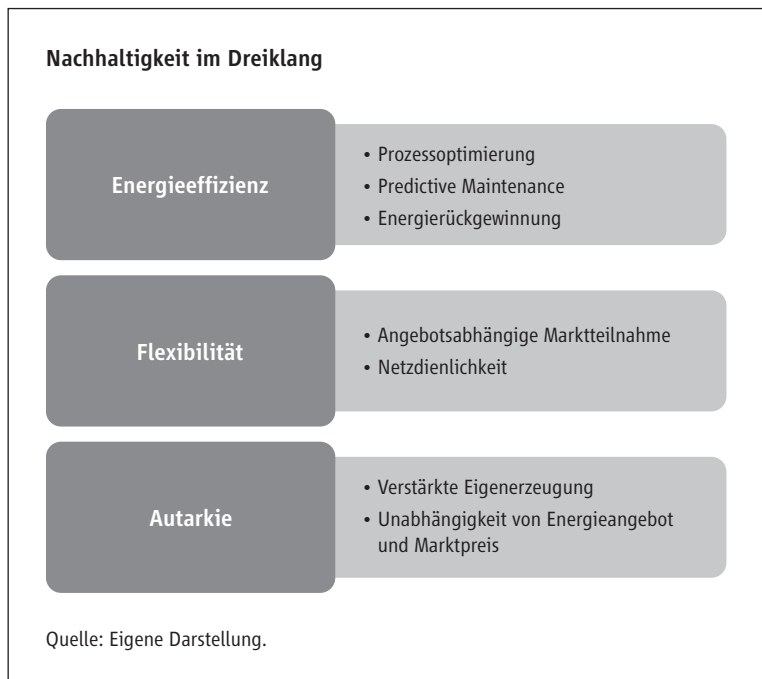
a) Flexibilität mobilisieren und in die Wertschöpfung integrieren

Die Mobilisierung von Flexibilität eröffnet Unternehmen zusätzliche Möglichkeiten, den Energieverbrauch angebotsabhängig zu nutzen und den CO₂-Ausstoß gesamtgesellschaftlich zu minimieren. In Verbindung mit den angestrebten Effizienzzielen können sich daraus neue Geschäftsmodelle ergeben, beispielsweise als Energiedienstleister für Dritte oder durch nachweislich grüne Produkte. Überdies wird durch die erhöhte

Flexibilität der energetischen Versorgung die Unabhängigkeit und Resilienz des Unternehmens gegenüber externen Einflüssen (z. B. Markt und Energieverfügbarkeit) gestärkt. Auch Unternehmen mit geringeren Energieabnahmemengen profitieren mittels Flexibilitätserbringung vor allem durch synergetische Effekte, indem beispielsweise zeitliche Ungleichgewichte des Verbrauchs kompensiert werden.

b) Nachhaltigkeit im Dreiklang

Vor dem Hintergrund unsicherer politischer, wirtschaftlicher und auch regulatorischer Entwicklungen sollte das Ziel für Unternehmen stets ein Gleichgewicht zwischen Energieeffizienz und Flexibilität sein. Ergänzt um den Aspekt der Autarkie, also der eigenständigen Versorgung durch lokale (regenerative) Energiesysteme, wird ein breiter Handlungsspielraum unter gleichzeitig wirtschaftlicher und sicherer Versorgung geschaffen.



Individuelle Herausforderungen ergeben sich in der Frage eines adäquaten Poolings, also einem Verfahren, das Verbraucher, Erzeuger und Speicher intelligent koordiniert.

Dies erfordert einen hohen Automatisierungsgrad unter Verwendung umfangreicher Mess- und Steuerungstechnik sowie eines intelligenten Energiemanagements. Komplex erweist sich in der Regel auch die Erschließung und Modellierung von Flexibilitätspotenzialen in hochspezialisierten Produktions- und Fertigungsbereichen. Letztlich entscheidet der finanzielle Vorteil darüber, ob ein solcher Mechanismus wirtschaftlich tragfähig ist.



Energieeffizienz
vs. Flexibilität



Maßnahmen
umsetzen



Handlungs-
spielräume



Energie –
Herausforderungen
und Chancen

V. Ausblick

Um nationale und internationale Klima- und Energieziele erreichen zu können, ist eine permanente gesellschaftliche Auseinandersetzung sowohl mit der Gewinnung von Nutzenergie (regenerative Erzeugung und deren Verteilung) als auch mit der Art und dem Umfang, wie diese Energie eingesetzt wird, notwendig. Aus unternehmerischer Sicht wird dieses Thema weiterhin ein fester Bestandteil der Überlegungen sein müssen, da die Energiepreise perspektivisch eine signifikante ökonomische Größe darstellen werden.

Die energetischen und prozesstechnischen Optimierungspotenziale sind damit auch mittel- bis langfristig von erheblichem Interesse für die Unternehmen, die marktfähige Leistungen zu konkurrenzfähigen Preisen anbieten und als Wirtschaftsunternehmen nicht nur Renditeerwartungen, sondern auch die Ansprüche ihrer Stakeholder erfüllen müssen. Sind diese Potenziale ausgeschöpft, stehen Unternehmen oft vor der Entscheidung, im Steady-State zu verweilen oder sich flexibel und beherzt mit Innovationen neuen Technologien und Trends auseinanderzusetzen. Trends sind keine starren Zustände, sondern weisen einen dynamischen Charakter auf. Es ist daher ratsam, sich regelmäßig mit Trends zu befassen. Dies funktioniert am besten durch:

- Integrieren von Trend- und Innovationsfiltern
 - Entwickelte Idee sollten an Entscheidungspunkten, hinsichtlich technischer Machbarkeit, des finanziellen Erfolgs oder der unternehmerischen Passung und darüber hinaus mit Blick auf die Trendpassung geprüft werden
- Einsetzen einer Person für Trendforschung
 - Dauerhafte Beobachtung gesellschaftlicher Strömungen als Basis für Innovationsentwicklungen nutzen; Vorteil: unternehmensrelevante Trends werden frühzeitig erkannt
- Implementieren einer Innovationskultur
 - Die Sensibilisierung aller Mitarbeiter eines Unternehmens für Trends und die damit einhergehende Prognose unternehmensrelevanter Trends schafft eine Innovationskultur

- Diese unterstützt das Unternehmen dabei, kunden- und gesellschaftszentriert zu agieren und sich darüber hinaus als Trendsetter gegen Wettbewerber durchzusetzen

In der Praxis kann es dennoch vorkommen, dass trotz der Durchführung von Effizienzsteigerungsmaßnahmen die erwarteten Einsparziele nicht vollumfänglich erreicht werden. Ein Grund dafür kann der sogenannte Rebound-Effekt sein: Die Nutzung innovativer und effizienter Produkte führt mitunter zu einer Desensibilisierung für energieeffizientes Handeln, sodass die vermeintlich eingesparten Ressourcen durch intensivere Nutzung an anderer Stelle verbraucht werden. Beispielsweise sollte der Einsatz von LED-Beleuchtung in Ihrem Unternehmen nicht dazu verleiten, die Beleuchtung dauerhaft eingeschaltet zu lassen. Aber auch auf technischer Ebene kann die Integration neuer Anlagen zu Effizienzverlusten im vorgelagerten Bereich führen, weil beispielsweise eine andere Maschine nun überdimensioniert ist und nur noch im (ineffizienten) Teillastbereich läuft.

Es ist daher unumgänglich die Bestrebungen soweit wie möglich zu koordinieren und mit einem gut strukturierten und strategischen ausgerichteten Gesamtkonzept zu arbeiten. Auch sollten alle Mitarbeiter regelmäßig mit eingebunden und fortlaufend auf das Thema aufmerksam gemacht werden.

Literatur

- [1] Kemmler (Prognos) et al.: „Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050“, 2021
- [2] Bundesnetzagentur, Bundeskartellamt: Monitoringbericht 2017, 13.12.2017
- [3] Magazin WirtschaftsWoche, Ausgabe 41/2022, Ersterscheinung 08.10.2021
- [4] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) e.V.: Strompreisanalyse Dezember 2022, 07.12.2022, online: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>, Zugriff: 14.12.2022
- [5] Stiftung Familienunternehmen: Die Energiekrise im Standortvergleich: Preiseffekte und Importrisiken – Sonderstudie zum Länderindex Familienunternehmen, 2022
- [6] AGEB: Energieverbrauch der Industrie in Deutschland im Verhältnis zum Produktionswert in den Jahren 2001 bis 2021, 16. September, 2022. online: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/240703/umfrage/energieeffizienz-der-industrie-in-deutschland/>, Zugriff: 14.12.2022
- [7] Bundesnetzagentur: Länge der Versorgungsunterbrechung je Stromverbraucher in Deutschland in den Jahren 2006 bis 2021, 23.10.2022. online: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/241414/umfrage/stromversorgungsunterbrechungen-in-deutschland/>, Zugriff: 09.12.2022
- [8] Bundesnetzagentur: Kosten für die Sicherstellung der Versorgungssicherheit im deutschen Stromnetz nach Art in den Jahren 2011 bis 2021, 27.04.2022. online: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/618806/umfrage/kosten-fuer-die-sicherstellung-der-versorgungssicherheit-des-deutschen-stromnetzes/>, Zugriff: 16.01.2023

- [9] Projekt E-Mobility4GridService: Entwicklung und Erprobung von heutigen und zukünftigen Vehicle-for-Grid-Konzepten und Dienstleistungen in ländlichen Energieversorgungsstrukturen, Laufzeit: 01.06.2018 bis 31.05.2021, online: <https://www.iff.fraunhofer.de/de/geschaeftsbereiche/energiesysteme-infrastrukturen/e-mobility4gridservice.html>
- [10] VDI 4663 Blatt 1: Bewertung von Energie- und Stoffeffizienz – Methodische Anwendung des physikalischen Optimums, Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 12/2021
- [11] G. Czycholl: Entropie und Grundlagen Statistischer Physik, Universität Bremen, 2019, online: <https://www.uni-bremen.de/kooperationen/uni-schule/lehrkraefte/fundamentale-fragen-der-physik/entropie-und-grundlagen-statistischer-physik>, Zugriff: 05.02.2023
- [12] L. Kerpen: Ansätze für eine Methodik zur Bewertung komplexer industrieller Prozesse vor dem Hintergrund gezielter energetischer Effizienzsteigerungen, Dissertation, TU Clausthal, 17.02.2022
- [13] D. Volta: Das Physikalische Optimum als Basis von Systematiken zur Steigerung der Energie- und Stoffeffizienz von Produktionsprozessen, Dissertation, TU Clausthal, 05.12.2014
- [14] C. Keichel: Methode der grenzwertorientierten Bewertung, Dissertation, TU Clausthal, 24.04.2017
- [15] Online: <http://www.energy-mag.com/wp-content/uploads/2015/04/Globalstrahlung-Sonne-Energy-Mag.jpg>
- [16] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE: Fraunhofer ISE entwickelt effizienteste Solarzelle der Welt mit 47,6 Prozent Wirkungsgrad, Presseinformation 30.05.2022, online: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2022/fraunhofer-ise-entwickelt-effizienteste-solarzelle-der-welt-mit-47-komma-6-prozent-wirkungsgrad.html>, Zugriff: 17.01.2023
- [17] Danish Wind Industry Assoziation: Das Betz'sche Gesetz, 12.05.2003, online: <http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/de/tour/wres/betz.htm>, Zugriff: 01.02.2023

- [18] DVGW/VDE: Eckpunkte zur Begriffsdefinition Sektorenkopplung, Hrsg.: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. – Technisch wissenschaftlicher Verein und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., 2016
- [19] M. Sterner und I. Stadler, Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration, Heidelberg: Springer Vieweg, 2. Auflage, 2017
- [20] G. Thomaßen, M. Deutsch: Future Cost of Onshore Wind: Recent Auction Results, Long-Term Outlook and Implications for Upcoming German Auctions, Agora Energiewende, 2017, Berlin, online: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/Future_Cost_of_Wind/Agora_Future-Cost-of-Wind_WEB.pdf, Zugriff: 10.12.2022
- [21] Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE: Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien, Studie, 2021
- [22] DIN SPEC 91410-1, „Energieflexibilität – Flexibilitätsbereitstellung für die Engpassbewirtschaftung von Stromnetzen – Anforderungen an die Teilnahme von Anbietern an einer Flexibilitätsplattform“, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Juni 2020
- [23] Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF: PROSPEKTIVE FLEXIBILITÄTSOPTIONEN IN DER PRODUZIERENDEN INDUSTRIE – Lastverschiebepotenziale erkennen, modellieren und vermarkten, Studie, Magdeburg, 2021
- [24] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) e.V.: Redispatch in Deutschland – Auswertung der Transparenzdaten, Berlin, 28.07.2022
- [25] Verbundprojekt WindNODE AP4: Vernetzter Endkunde – steuerbare Lasten und Dienstleistungen, Förderprogramm SINTEG des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2020

Impressum

Dieses Kompendium wurde im Auftrag der Stiftung Familienunternehmen von den Experten für Energiesysteme und Infrastrukturen des Fraunhofer IFF verfasst.



Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb
und -automatisierung IFF

Abteilung Energiesysteme und
Infrastrukturen

Sandtorstraße 22
39106 Magdeburg

Prof. Dr. Julia Arlinghaus
Dr.-Ing. Stephan Balischewski
(verantwortlich)
Dr.-Ing. Franziska Sondej
Dr.-Ing. Marc Richter
Natascha Eggers
Sebastian Jentsch
Marcus Kögler

Stiftung Familienunternehmen

Prinzregentenstraße 50

D-80538 München

Tel.: +49 89 12 76 400 02

Fax: +49 89 12 76 400 09

info@familienunternehmen.de

Mehr als 90 Prozent aller Unternehmen in Deutschland sind Familienunternehmen. Die gemeinnützige STIFTUNG FAMILIENUNTERNEHMEN setzt sich für den Erhalt dieser Familienunternehmenslandschaft ein. Sie ist der bedeutendste Förderer wissenschaftlicher Forschung auf diesem Feld und Ansprechpartner für Politik und Medien in wirtschaftspolitischen, rechtlichen und steuerlichen Fragestellungen. Zweck der Stiftung ist die Förderung, Information, Bildung und Erziehung sowie der wissenschaftliche Erfahrungsaustausch auf dem Gebiet des Familienunternehmertums in Europa.



Stiftung Familienunternehmen

Prinzregentenstraße 50

D-80538 München

Telefon + 49 (0) 89 / 12 76 400 02

Telefax + 49 (0) 89 / 12 76 400 09

E-Mail info@familienunternehmen.de

www.familienunternehmen.de

Preis: 9,90 €

ISBN: 978-3-948850-31-9