

**LEITFADEN**

# **Systematisch Energieeffizienz steigern und CO<sub>2</sub>-Emissionen senken in der Kunststoffindustrie**

Branchenspezifische Lösungen

# Inhalt

**Vorwort** Seite 3

## 01 Grundlagen und branchenspezifische Herausforderungen Seite 4

- 1.1 Verbrauchsstruktur in der kunststoffverarbeitenden Industrie
- 1.2 Vielfalt und Heterogenität der Branche
- 1.3 Typische Energieeffizienzpotenziale und Ansätze in den Prozessen

## 02 Systematische Ansätze Seite 8

- 2.1 Energie- und Umweltmanagement
- 2.2 Organisatorische Maßnahmen
- 2.3 Umweltgerechte Produktgestaltung

## 03 Prozesstechnologien in der Produktion Seite 18

- 3.1 Innovative und energieeffiziente Granulattrocknung
- 3.2 Effiziente Nutzung von Hydraulikölen
- 3.3 Einsatz elektromechanisch angetriebener Spritzgießmaschinen

- 3.4 Energieeffizienter Formschäumungsprozess durch innovative Werkzeugtechnik
- 3.5 Energieeffizientes Kühlsystem
- 3.6 Einsatz von Kunststoffzyklen zur Steigerung der Ressourceneffizienz
- 3.7 Lastmanagement

## 04 Abwärme Seite 30

- 4.1 Vermeidung und Nutzung von Abwärme – die Abwärmekaskade
- 4.2 Wärmedämmung
- 4.3 Warmwasser- und Dampfsysteme
- 4.4 Betriebsinterne Abwärmenutzung durch Abwärme-Upcycling
- 4.5 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

## 05 Querschnittstechnologien Seite 38

- 5.1 Antriebssysteme
- 5.2 Pumpensysteme
- 5.3 Druckluftsysteme
- 5.4 Beleuchtungssysteme

## 06 Finanzielle Förderung Seite 44

- Literaturverzeichnis
- Checkliste
- Impressum

# „KLIMASCHUTZ IMMER MEHR IM FOKUS DER KUNSTSTOFF- VERARBEITENDEN INDUSTRIE“



Der Aufbruch zur Klimaneutralität in Deutschland und Europa hat begonnen. Zahlreiche Unternehmen und Branchen zeigen heute schon, wie sie mit technischen Innovationen CO<sub>2</sub> einsparen und damit gleichzeitig ihre wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit steigern. Damit sind sie Vorbild und ein wichtiger Impulsgeber für den eigenen Wirtschaftsbereich.

Im Projekt „Leuchttürme CO<sub>2</sub>-Einsparung in der Industrie“ zeigt die dena realisierbare Wege zur Energie- und CO<sub>2</sub>-Reduktion in vier Schwerpunktbereichen auf. Sie folgen dem Grundsatz „Efficiency First“ und fokussieren auf Maßnahmen zur Energie- und Ressourceneinsparung, die auch die Wettbewerbsfähigkeit steigern. Besondere Beachtung finden dabei die Förderprogramme des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz Energie (BMWK), die den Unternehmen finanzielle Unterstützung bieten. Der vorliegende Leitfaden gibt Orientierung, Beispiele und Tipps für lohnende Maßnahmen in der Kunststoffbranche.

Andreas Kuhlmann

Vorsitzender der Geschäftsführung,  
Deutsche Energie-Agentur



Die deutsche kunststoffverarbeitende Industrie bekennt sich zum Klimaschutz und zur Kreislaufwirtschaft. Diese Fokussierung beinhaltet viele Herausforderungen für unsere Branche. Es beginnt mit dem richtigen Design der Kunststoffprodukte und danach folgt – ganz wichtig – der Herstellungsprozess. Auch die Nutzung und Verwertung werden sich ändern. Zugleich eröffnen sich hier große Chancen für ein nachhaltiges Wachstum unserer Branche. Kunststoffprodukte bieten uns exzellente und wirtschaftliche Lösungen in vielen Bereichen und leisten gleichzeitig schon heute einen wertvollen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduktion. Dies geschieht durch Gewichtsreduktion in der Mobilität und Isolierung von Gebäuden, beim Erhalt von frischen Lebensmitteln mit geeigneten Verpackungen sowie durch den Einsatz von Rezyklaten. Nun gilt es insbesondere die Herstellungsprozesse möglichst energieeffizient und klimaschonend zu gestalten. Wo und wie dabei Einsparpotenziale realisiert werden können, demonstriert der gemeinsame Leitfaden sehr pragmatisch und praxisorientiert. Lassen Sie uns diese Chance ergreifen!

Roland Roth

Präsident des GKV, Gesamtverbandes der  
Kunststoffverarbeitenden Industrie e. V.

# 01

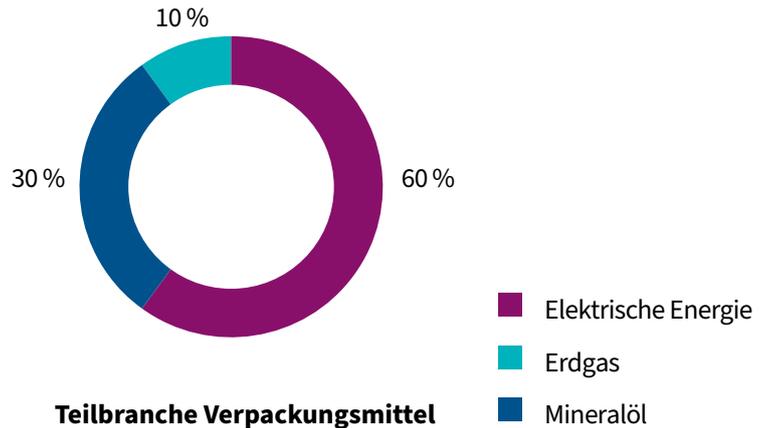
## **GRUNDLAGEN UND BRANCHEN- SPEZIFISCHE HERAUSFORDER- RUNGEN**

Die kunststoffverarbeitende Industrie ist mit einem Jahresumsatz von etwa 61,5 Mrd. Euro ein bedeutender Wirtschaftszweig in Deutschland.<sup>1</sup> Die Branche ist mittelständisch geprägt und zeichnet sich durch eine große Branchen- und Produktvielfalt aus – von Verpackungen, Baubedarfsartikeln bis hin zu medizinischen Produkten.

Die Themen Energieeffizienz und CO<sub>2</sub>-Einsparung sind gerade für eine energieintensive Branche wie die kunststoffverarbeitende Industrie von hoher Aktualität. Die Potenziale für Energieeinsparungen sind in vielen Bereichen vorhanden und können genutzt werden. Dies betrifft den Einsatz effizienter Prozesstechnologien, die Abwärmenutzung, aber auch Antriebs- und Pumpensysteme bis hin zur Druckluft oder Beleuchtung.

Energieeffiziente Spritzgussmaschinen und Kühlsysteme oder eine innovative Granulattrocknung verbessern dabei nicht nur die CO<sub>2</sub>-Bilanz von Unternehmen. Die in diesem Leitfaden vorgestellten Maßnahmen sind auch wirtschaftlich sinnvoll und erhöhen deren Wettbewerbsfähigkeit.

**Gesamte Kunststoffverarbeitung**



**Teilbranche Verpackungsmittel**

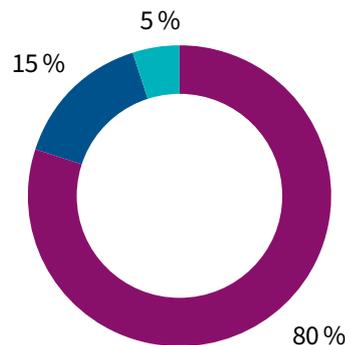


Abbildung 1: Energieeinsatz in der Kunststoffverarbeitung. Quelle: eigene Darstellung nach Universität Kassel (2011), S. 75

## 1.1 Verbrauchsstruktur in der kunststoffverarbeitenden Industrie

Der Endenergieverbrauch der kunststoffverarbeitenden Branche in Deutschland stieg vom Jahr 2000 bis zum Jahr 2011 um 14,8 Prozent und hat sich seit 2011 auf einem stabilen Niveau eingependelt. Der absolute Wert betrug 2018 ca. 22 TWh<sup>2</sup>.

In energieintensiven Branchen wie der Kunststoffverarbeitung ist der Energieverbrauch ein beträchtlicher Kostenfaktor. Aufgrund der hohen Energieintensität und der vergleichsweise hohen Preise für elektrische Energie ermöglichen Energieeffizienzmaßnahmen erhebliche Kosteneinsparungen und sind damit ein wichtiger Wettbewerbsvorteil.

Abbildung 1 verdeutlicht die Bedeutung der elektrischen Energie für kunststoffverarbeitende Betriebe. Das gilt insbesondere für die Herstellung

von Kunststoffverpackungen, bei der elektrische Energie 80 Prozent des gesamten Energiebedarfs ausmacht.<sup>3</sup> Die elektrische Energie wird dabei in mechanischen und thermischen Produktionsprozessen eingesetzt. In einem typischen Spritzgießbetrieb wird der Großteil der eingebrachten elektrischen Energie (über 60 Prozent) den Produktionsanlagen selbst zugeführt. Wärme wird in vielen Prozessen der Kunststoffverarbeitung benötigt, dazu gehören Trocknungsprozesse zur Aufbereitung von Granulaten, Prozessdampf für das Aufschäumen von z. B. Polystyrol und die vielfältigen formgebenden Verfahren. Kälte hingegen wird für die Werkzeug- und Maschinenkühlung gebraucht. Die Kälte- und Druckluftversorgung haben jeweils einen Anteil am Stromverbrauch von ca. 10 Prozent (siehe Abbildung 2).<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Destatis (2021)

<sup>2</sup> AGEB (2020), eigene Berechnung

<sup>3</sup> Universität Kassel (2011), S. 75

<sup>4</sup> ExxonMobil (2018), S. 3

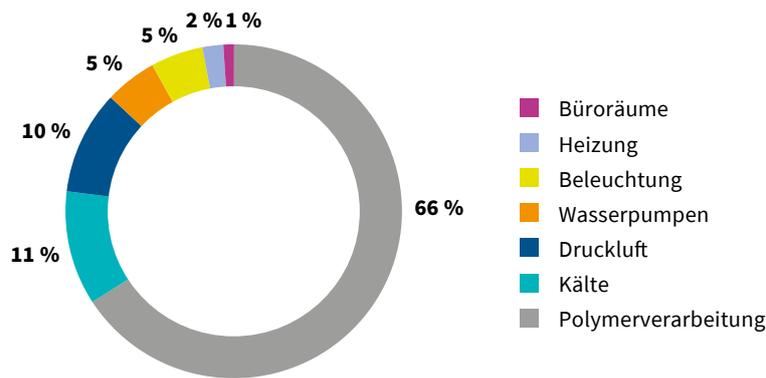


Abbildung 2: Energieverbrauch nach Anwendung in einem typischen Spritzgießbetrieb. Quelle: ExxonMobil (2018), S. 3

## 1.2 Vielfalt und Heterogenität der Branche

Mit rund 336.000 Beschäftigten ist die vergleichsweise noch junge und weiterhin wachsende kunststoffverarbeitende Industrie eine bedeutende Branche innerhalb des verarbeitenden Gewerbes in Deutschland. Sie zeichnet sich durch viele kleine und mittlere Unternehmen (KMU) aus. 2018 zählte die Branche gut 3.000 Betriebe, davon haben 91 Prozent weniger als 250 Beschäftigte.<sup>5</sup> Besonders in KMU stehen Energieverantwortliche häufig vor der Herausforderung, neben parallel bestehenden Aufgaben Maßnahmen zur energetischen Optimierung der Produktion umzusetzen. Hinzu kommen Zeitknappheit und der Einarbeitungsaufwand für die Klärung konkreter Fälle als typische Hemmnisse zur nachhaltigen Erschließung von Energieeffizienzpotenzialen.

Die Vielfalt der kunststoffverarbeitenden Industrie zeigt sich anhand von vier Sparten, in welche sich die Branche aufteilt:

- Herstellung von Platten, Folien, Schläuchen und Profilen,
- Herstellung von Verpackungsmitteln,
- Herstellung von Baubedarfsartikeln sowie
- Herstellung von sonstigen Kunststoffwaren.

Wichtige Abnehmer der Kunststoffwaren sind die Bau-, Lebensmittel-, Automobil- sowie Medizinindustrie. In den Unternehmen kommen unterschiedliche Fertigungsverfahren zum Einsatz, wie nebenstehende Übersicht zeigt.

Sowohl bei den kontinuierlichen wie bei den diskontinuierlichen Verfahren sind die Extrusion und das Spritzgießen die am stärksten verbreiteten Fertigungsverfahren. Der höchste Energiebedarf entfällt auf die Herstellung von Platten, Folien, Schläuchen und Profilen. Große Unterschiede beim Energieverbrauch in der Verarbeitung entstehen abhängig von der Art des verwendeten Kunststoffs. So ist die Verarbeitung von teilkristallinen Thermoplasten wie Polyamid (PA), Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) dreimal so energieintensiv wie die Verarbeitung von amorphen Kunststoffen wie Polystyrol (PS) Polyvinylchlorid (PVC) und Polycarbonat (PC).



Abbildung 3: Fertigungsverfahren der Kunststoffverarbeitung. Quelle: ÖKOTEC Energiemanagement GmbH

<sup>5</sup> Destatis (2020)

# 1.3 Typische Energieeffizienzpotenziale und Ansätze in den Prozessen

Betrachtet man die einzelnen Prozessschritte in der Kunststoffverarbeitung, zeigt sich, dass sowohl in der Vor- und Nachbehandlung als auch in den Hauptproduktionsschritten der Plastifizierung und Formgebung unterschiedliche mechanische und thermische Energieanwendungen bestehen (Abbildung 4). Diese weisen nicht selten wirtschaftliche Energieeffizienzpotenziale auf.

Die Einsparpotenziale innerhalb der Prozessschritte werden in der Regel erst durch eine umfassendere Analyse der Systeme oder im direkten Vergleich mit energieeffizienten Innovationen erkennbar. Hier zeigt sich: Die Einsparpotenziale bestehen nicht allein im Produktionsprozess selbst, sondern auch in der nachhaltigen Produktentwicklung und -nutzung und somit in der umfassenden Bilanz von Kunststoffwaren.

Ziel dieses Leitfadens ist es, der kunststoffverarbeitenden Industrie konkrete Maßnahmen und Lösungen zur ganzheitlichen Erschließung von Energieeffizienz- und CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzialen aufzuzeigen. In [Kapitel 2](#) werden organisatorische und strategische Maßnahmen vorgestellt. In [Kapitel 3](#) werden prozessspezifische Ansätze näher erläutert, während [Kapitel 5](#) einen Schwerpunkt auf Querschnittstechnologien legt. Neben der Vorstellung konkreter Maßnahmen und Fördermöglichkeiten werden im Leitfaden auch Tipps gegeben und Best-Practice-Beispiele vorgestellt. Am Ende des Leitfadens findet sich eine umfangreiche Checkliste, anhand derer geprüft werden kann, welche Maßnahmen im eigenen Betrieb sich noch umsetzen lassen.



Abbildung 4: Herstellungsschritte von Kunststoffprodukten. Quelle: dena

# 02

## SYSTEMATISCHE ANSÄTZE

## 2.1 Energie- und Umweltmanagement

Eine wichtige Grundlage für die Erschließung von Energieeffizienzpotenzialen ist die Einführung eines betrieblichen Energiemanagements (EnM). Dessen Ziel ist es, Energieverbräuche und -kosten in einem Betrieb systematisch zu erfassen, die energiebezogene Leistung (Energieeffizienz, -einsatz und -verbrauch) kontinuierlich zu verbessern und damit die Energiekosten sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen nachhaltig zu senken.

Die Einführung eines Managementsystems lohnt sich nicht nur in Großbetrieben, sondern auch in kleinen und mittelständischen Unternehmen der Kunststoffindustrie. Durch die transparente Erfassung des Energiebedarfs, Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz und organisatorische Maßnahmen sowie Schulungen des Personals lassen sich erfahrungsgemäß Einsparungen in Höhe von rund 5 bis 10 Prozent erzielen. Investive Maßnahmen, die auf Basis eines Energiemanagements umgesetzt werden, können zusätzlich bis zu 25 Prozent des Energieverbrauchs einsparen.<sup>6</sup> Das konkrete Einsparpotenzial ist dabei von der jeweiligen Ausgangssituation abhängig.

Neben der Energieeinsparung ergeben sich weitere positive Effekte, beispielsweise für das Marketing und die Gewinnung von mehr Rechtssicherheit, die Erfüllung von Kundenanforderungen und eine steigende Motivation der Mitarbeitenden. Im Zusammenspiel führen all diese Effekte zu einer allgemeinen Steigerung des Unternehmenswerts. Energiemanagementsysteme dienen der systematischen Planung, Umsetzung, Überprüfung und Optimierung eines Energiemanagements. Worauf es dabei ankommt, zeigen die sechs Grundregeln des Energiemanagements in Abbildung 5. Sie stellen zugleich auch wesentliche Erfolgsfaktoren für Einführung und Betrieb eines EnMS dar.

Wie bei der Einführung eines EnMS vorgegangen werden kann und wie Energieleistungskennzahlen, sogenannte Energy Performance Indicators (EnPI), entwickelt werden können, beschreiben die nachfolgenden Abschnitte.

**Tipp:** Die wichtigsten Normen auf einen Blick

- DIN EN ISO 50001:2018: Die Revision 2018 ermöglicht die Integration des Energiemanagements in die bestehende Struktur anderer Managementsysteme.
- DIN ISO 50003: Diese Norm stellt Anforderungen an die auditierenden und zertifizierenden Stellen des EnMS; die Verbesserung der Energieeffizienz muss nachgewiesen werden können.
- DIN ISO 50006:2017: Diese Anleitung bietet die Grundlage zur Bildung, Nutzung und Anpassung von Energieleistungskennzahlen (EnPI) und energetischen Ausgangsbasen (EnBs).
- DIN EN ISO 14001:2015: Norm für ein Umweltmanagementsystem mit dem Ziel, die Umweltleistung eines Unternehmens zu verbessern und mittels Umweltkennzahlen zu messen.
- Eco-Management and Audit Scheme (EMAS): Das EMAS beinhaltet die Anforderungen der ISO 14001 und zeigt weitere Ansätze für eine Erhöhung der Energie- und Materialeffizienz auf, z. B. über eine Umweltberichtspflicht. Umweltmanagementsysteme bieten eine gute Grundlage, um das Thema Ökodesign voranzutreiben (vgl. Abschnitt 2.3).

**5 – 10%**

lassen sich allein durch die Einführung eines Energiemanagements und die daraus abgeleiteten organisatorischen Maßnahmen einsparen.

**Bis zu  
25%**

des Energieverbrauchs können zusätzlich durch investive Maßnahmen auf Basis eines Energiemanagements eingespart werden.

<sup>6</sup> dena (2013b), S. 4



### 1. Orientierung auf das Wesentliche

Konzentrieren Sie sich auf die Schwerpunktverbraucher. In ISO 50001 werden diese Verbraucher significant energy use (SEU) genannt. Formulieren Sie Etappenziele, um schnell Erfolg zu haben. Das motiviert weiter voran zu gehen.



### 2. Kontinuierliche Verbesserung durch Regelkreise

Sind die SEUs identifiziert, können für diese Energieleistungskennzahlen – Energy Performance Indicators (EnPI) genannt – bestimmt werden. Formulieren Sie nun anspruchsvolle, aber erreichbare Ziele (siehe Tabelle 1). Daraufhin können Sie Maßnahmen erarbeiten, umzusetzen und regelmäßig prüfen. Bei Abweichungen erarbeiten Sie neue Maßnahmen und der Regelkreis beginnt von vorn.



### 3. Bottom-up-Festlegung von Energiesparzielen

Die Geschäftsleitung kann die strategischen Ziele vorgeben, doch die operativen Ziele sollten eng nach dem Bottom-up-Prinzip mit den prozessverantwortlichen Mitarbeitenden erarbeitet werden (siehe Tabelle 1). So können Sie Energiesparziele sinnvoll formulieren und Motivationsanreize setzen.



### 4. Integration in vorhandene Steuerungsstrukturen

Sollten bereits andere Managementsysteme bestehen, integrieren Sie das EnMS in die vorhandene Steuerungsstruktur. Das erleichtert die Implementierung und der Aufwand wird gering gehalten. Ein EnMS kann beispielsweise in vorhandene Managementsysteme und das Controlling integriert werden.



### 5. Energieeffizienzmaßnahmen mit Fokus auf betriebswirtschaftlichen Erfolg

Energieeffizienzmaßnahmen lohnen sich, wenn der Return größer ist als das Investment. Nutzen Sie dafür die Kapitalwertmethode für die Lebenszykluskosten anstelle der Amortisationsrechnung.



### 6. Rahmenbedingungen und entschiedenes Handeln

Schaffen Sie die für Ihren Betrieb richtigen Rahmenbedingungen. Dabei kann eine selbst erstellte Richtlinie hilfreich sein. In dieser sollte der Weg vom Ideenvorschlag bis zur Umsetzung und der Kontrolle mit allen verantwortlichen Personen aufgezeigt werden. So verhindern Sie Frustration und Aufwand durch spät abgelehnte Vorschläge.

Abbildung 5: Grundregeln des Energiemanagements und Erfolgsfaktoren für die Einführung und den Betrieb eines EnMS. Quelle: dena

## Voraussetzungen für die Einführung eines betrieblichen Energiemanagements und Vorgehen

### 1. Einführung:

Wenn die Einführung eines betrieblichen EnMS geplant ist, müssen die Verantwortlichkeiten bei der Aufgabenverteilung eindeutig geklärt sein. Die Entscheidung zur Implementierung eines EnMS wird zunächst von der Geschäftsführung an die Mitarbeitenden kommuniziert. Dann müssen die benötigten Ressourcen bereitgestellt und die anstehenden Aufgaben ebenso wie der zeitliche Rahmen festgelegt werden.

Das einzuberufende Energieteam sollte Mitarbeitende aus möglichst vielen Bereichen umfassen (Controlling, Abteilungsleitung der Produktion, Einkauf, Gebäude- und Energietechnik), da sich auf diese Weise am zuverlässigsten das gesamte Unternehmen erreichen lässt. Bei der Einführung eines EnMS ist es sinnvoll, sämtliche relevanten internen und externen Einflüsse zu analysieren. Ein externer Einfluss wäre beispielsweise, dass der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Kunststoffprodukten für Kunden immer mehr an Bedeutung gewinnt. Für die Festlegung der Grenzen des EnMS ist es wichtig, alle wesentlichen Prozesse mit einzubeziehen, von der Vorbehandlung über die Plastifizierung und Formgebung bis hin zur Nachbehandlung.

### 2. Erstellung einer Energiedatensammlung

Um Energieleistungskennzahlen zu entwickeln, müssen zunächst Energiedaten erfasst werden. Dabei sollte zu Beginn der Gesamtblick auf die Energieströme des Betriebs erfolgen (Grobanalyse) und anschließend weiter ins Detail gegangen werden (Feinanalyse). Oftmals müssen hierfür neue Energiezähler installiert werden. Damit die Daten des Energieverbrauchs in Echtzeit aufbereitet, ausgewertet und visualisiert werden können, benötigen Unternehmen in jedem Fall ein softwaregestütztes Energiemonitoring.

Die entsprechende Software sollte EnPI und Verhältniszahlen zur Korrelationsanalyse nutzen können und die Festlegung von Maximal- bzw. Minimalwerten enthalten, damit Störungen schnell erkannt werden können. Eine Anzeige des aktuellen Ist- und Sollstands der Anlagen, die Ermittlung des spezifischen Energiebedarfs und der spezifischen Kosten sowie eine zeitbezogene Anzeige des Energiebedarfs zur Lastganganalyse sind weitere Funktionen, über die eine EnM-Software verfügen sollte. Hierzu müssen neben den Energiedaten auch die relevanten Einflussgrößen gemessen werden, die auf das betrachtete System wirken. Neben den Energiedaten selbst müssen auch die relevanten Einflussgrößen gemessen werden, die auf das betrachtete System wirken. Darüber hinaus sollte die Software Energieverbrauchsreports generieren können und über Benchmark- und Filterfunktionen, z. B. nach Produkt, verfügen.

### 3. Energiepolitik, Ziele und Programme

Die Energiepolitik des Unternehmens (Strukturen, Prozesse und Inhalte) sollte die Verpflichtung zur fortlaufenden Verbesserung der energiebezogenen Leistung sowie der Bereitstellung der Ressourcen und Kriterien zum Erwerb energieeffizienter Produkte beinhalten. Besondere Bedeutung kommt der Zielformulierung zu. Es ist darauf zu achten, dass diese „smart“ (spezifisch, messbar, angemessen, realistisch und terminiert) formuliert wird (siehe Tabelle 1). Zusätzlich zu den Energiezielen sollten in diesem Schritt auch Ziele für die Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen festgelegt werden. Aus diesen werden anschließend Aktionspläne entwickelt, die auch eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung beinhalten.

Strategisches Ziel	Operatives Ziel	SMART?	Aktionsplan	Verantwortlich	Termin	
Kontinuierliche Verbesserung der Energieeffizienz um jährlich 3 %.	Senkung des Druckluftverbrauchs im Vergleich zum Vorjahr um 10 %.	Spezifisch	<input checked="" type="checkbox"/>	Einbau einer übergeordneten Steuerung für mehrere Kompressoren	Leitung Technik	29.11.2022
		Messbar	<input checked="" type="checkbox"/>			
		Angemessen	<input checked="" type="checkbox"/>			
		Realistisch	<input checked="" type="checkbox"/>			
		Terminiert	<input checked="" type="checkbox"/>	...	...	...

Tabelle 1: Beispiel für ein smartes Ziel. Quelle: dena

#### 4. Integration in Unternehmensprozesse

Energiemanagement und -effizienz ganzheitlich im Unternehmen zu integrieren, bedeutet, die Energiepolitik auch in die Prozesse Wartung und Instandhaltung, Einrichtung von Gebäuden sowie Einkauf und Beschaffung einzubeziehen. Alle Prozesse sollten unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz betrachtet und realisiert werden. Wird das Erreichen von Zielen oder der aktuelle Stand auf dem Weg zu einem Ziel intern kommuniziert, steigert dies die Motivation, auch neue Maßnahmen zu entwickeln. Gleichzeitig bietet die externe Kommunikation eine Chance, das Unternehmensimage glaubhaft zu verbessern.

#### 5. Kontrolle, Reflexion, interne Audits

Das EnMS sollte mithilfe regelmäßiger Audits überprüft werden. Dabei kann nach der Norm DIN EN ISO 19011:2018 vorgegangen werden. Das Ergebnis der internen Audits sollte in regelmäßigen Abständen (z. B. jährlich) der Geschäftsführung vorgelegt werden. Daraus entwickelt diese ein Management-Review, welches notwendige Änderungen des EnMS verbindlich zusammenfasst. Dazu zählen etwa Anpassungen der Energiepolitik, die Festlegung neuer Ziele oder Änderungen bei Ressourcen oder Kennzahlen.



**Tip:** Für die Zertifizierung des EnMS nach DIN EN ISO 50001:2018 ist eine geeignete Dokumentation notwendig. Eine Liste der verpflichtenden Informationen ist im [Leitfaden des Umweltbundesamts „Energiemanagementsysteme in der Praxis“](#), Seite 82, zu finden. Der Leitfaden enthält Tipps zu Software für das Dokumentenmanagement auf Seite 84.

#### Entwicklung von Energiekennzahlen und relevanten Variablen

Schwankungen in der Produktion, bei der Auslastung und beim Energieverbrauch prägen die betriebliche Praxis. Wie gelingt es, die Energieziele sicher zu bewerten und dabei nicht „Äpfel mit Birnen“ zu vergleichen? Die Entwicklung von Energieleistungskennzahlen dient genau diesem Zweck. Die EnPI leiten sich aus den Zielen der Energiepolitik des Unternehmens ab und dienen der Bewertung von Energieperformance und Optimierungsmaßnahmen. Die folgende Tabelle enthält Beispiele für Energiekennzahlen für die Kunststoffbranche mit dazugehörigen strategischen Zielen.

Während die EnPI zur Monitoringabdeckung (siehe Tabelle 2) unabhängig vom Produktionsbetrieb sind, können sich bestimmte in der Tabelle aufgeführte EnPI in Abhängigkeit äußerer Einflüsse und Randbedingungen ändern. Abhängig von der Außentemperatur kann sich beispielsweise der spezifische Heizenergieverbrauch in einem Kalendermonat vom Vorjahreswert unterscheiden.

Bei der Entwicklung von EnPI müssen daher zunächst alle Prozesse, in denen Energie eingesetzt wird, erfasst werden. Anschließend können die Großverbraucher (SEU) definiert und einer verantwortlichen Person zugeordnet werden. Nun werden die EnPI für die jeweiligen SEU auf variable und statische Einflussfaktoren untersucht.

Variablen mit Energierelevanz können beispielsweise die produzierte Menge oder die Außentemperatur sein. Sind die Variablen bestimmt, ist als nächster Schritt der Zusammenhang zwischen dem Energieverbrauch und den jeweiligen Variablen herzustellen. Hierfür kann die Regressionsanalyse angewandt werden. Erst die Berücksichtigung der relevanten Variablen ermöglicht einen Vergleich und damit die Bewertbarkeit der EnPI für unterschiedliche Betrachtungszeiträume.



Ein geeignetes statistisches Modell kann dann auch für ein Benchmarking genutzt werden, wenn

- die Eigenschaften des Produkts der Systeme, die miteinander verglichen werden sollen, gleich oder sehr ähnlich sind (z. B. ähnliche Foliendicken bei den Extrudern) und
- die Einflussgrößen, die den Aufwand bestimmen, in ähnlicher Größenordnung vorkommen.

**Tipp:** Die Norm DIN ISO 50006:2017-04 hilft bei der Erstellung, Nutzung und Anpassung von EnPI. Weitere Hilfestellungen enthalten auch die Leitfäden zu EnMS-Kennzahlen des EnPI-Connect-Projekts.

Kennzahl	Berechnung
Ziel: Ausbau Energiemonitoring	
Monitoringabdeckung in %	Monitoringabdeckung [kWh] / Gesamtenergieverbrauch [kWh] x 100
Ziel: Reduzierung der CO <sub>2</sub> -Emissionen, verbesserte CO <sub>2</sub> -Bilanz	
CO <sub>2</sub> -Emissionen	CO <sub>2</sub> -Äquivalente [kWh] / Produktionsmenge [kg]
Ziel: Kontinuierliche Verbesserung der Energieeffizienz	
Energieintensität Spritzgießmaschine in	Granulatmenge [kg] / Energieverbrauch [kWh]
Produktionsspezifische Kälteeffizienz	Granulatmenge [kg] / Stromverbrauch Kälte [kWh]
Förderspezifische Energieeffizienz	Granulatmenge [kg] / Stromverbrauch Granulatförderung (Vakuum) [kWh]

Tabelle 2: Beispiele für Energiekennzahlen zum Unternehmenscontrolling. Quelle: dena

## 2.2 Organisatorische Maßnahmen

Der Umgang der Mitarbeitenden mit Energie hat einen spürbaren Einfluss auf den Erfolg eines Energiemanagementsystems. Durch Informationsveranstaltungen und Schulungen kann die Bedeutung von Energieeffizienz vermittelt werden. Ideen für Maßnahmen zur Einbindung der Mitarbeitenden in das EnM können der folgenden Grafik entnommen werden:

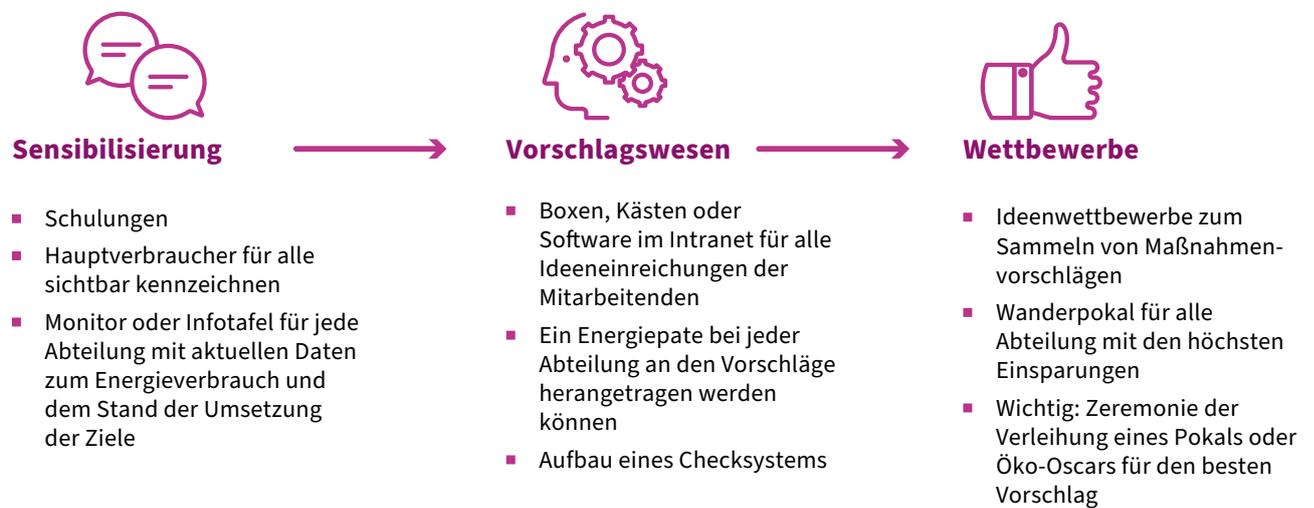


Abbildung 6: Beispielhafte Ideen für Maßnahmen zur Einbindung von Mitarbeitenden. Quelle: dena



**Tipp:** Vorschläge für das Sammeln und Bewerten von Ideen bis hin zur Ideenumsetzung finden sich im [Praxisleitfaden der Mittelstandsinitiative Energiewende und Klimaschutz: Ideen für \(noch\) mehr Energieeffizienz und Klimaschutz, Mitarbeitende einbinden und motivieren.](#)

## 2.3 Umweltgerechte Produktgestaltung

Nicht nur das Management energetischer und ökologischer Aspekte lässt sich im Unternehmen strategisch betreiben, auch in das Produktdesign können diese Faktoren integriert werden.

Umweltgerechte Produktgestaltung – auch Öko-design genannt – befasst sich mit der Verringerung der Umweltauswirkungen eines Produkts über dessen gesamten Lebensweg. Dies bedeutet zunächst, dass bei der Gestaltung die Erfüllung der bestehenden Anforderungen, wie beispielsweise Funktionalität und Sicherheit, unter dem Aspekt der Umweltrelevanz optimiert wird.

Zu einer umweltgerechten Produktgestaltung gehören etwa die Minimierung der nicht nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen, der Schutz der marinen Umwelt, die Verminderung von Lebensmittelabfällen in Bezug auf die Verpackungsindustrie und somit folglich auch der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Außerdem kann zukunftsorientiertes Eco-Design die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens erhöhen.

Neben der Produktgestaltung sollte der sogenannte Corporate Carbon Footprint (CCF) betrachtet werden, der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck eines Unternehmens. Der CCF umfasst sämtliche CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch die Geschäftsaktivitäten einer Organisation inklusive der Herstellung und Nutzung ihrer Produkte anfallen. Der Product Carbon Footprint (PCF) beschreibt die CO<sub>2</sub>-Bilanz eines einzelnen Produkts. Es kann somit unterschieden werden zwischen der CO<sub>2</sub>-Bilanz des Unternehmens („organisatorische Systemgrenze“) und der des Produkts selbst. Dabei wird der gesamte Lebensweg betrachtet, je nachdem, welche Systemgrenze (Scope) berücksichtigt wird:

- Scope 1: alle direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Unternehmen, die durch die Produktion entstehen
- Scope 2: alle indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Energiedienstleistungen (elektrische Energie, Dampf, Wärme, Kälte)
- Scope 3: sonstige indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen einschließlich vorgelagerter Produktionsketten (Cradle-to-Gate) bzw. einschließlich der Nutzungsphase (Cradle-to-Grave)

**Tipp:** Die Angabe des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks wird im Automobilbau von immer mehr Kunden gefordert und nimmt dabei auch die Kunststoffindustrie in die Pflicht. Ein kostenloses Tool für die CCF-Bilanzierung mit der Systemgrenze Cradle-to-Gate ist z. B. [ecocockpit.de](http://ecocockpit.de).



### Eco-Design für Kunststoffprodukte

Die Relevanz eines Eco-Designs nimmt aufgrund der Herausforderung der Kreislaufwirtschaft in der kunststoffverarbeitenden Industrie stark zu. Daher hat der Branchenverband IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen im Rahmen der Runden Tische initiativ einen Management-Leitfaden entwickelt. Dieser zeigt den Herstellern, wie ressourcenschonende Verpackungslösungen entwickelt und implementiert werden können. Der Leitfaden empfiehlt die Entwicklung einer Eco-Design-Strategie anhand vier grundlegender Strategieelemente (siehe Abbildung 7). Beispielsweise wird mit „Design für Recycling“ im Vorfeld geprüft, ob Materialien, die das spätere Recycling der Kunststoffverpackungen erschweren, vorbeugend durch andere passende Materialien ersetzt werden können, um ein effektives Recycling zu ermöglichen. Mit „Design für eine nachhaltige Materialbeschaffung“ wird ebenfalls im Vorfeld geprüft, ob die gleichen technischen Anforderungen der Verpackungen mit biobasierten bzw. recycelten Kunststoffen und so mit geringerem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck zu erfüllen sind.



Abbildung 7: Strategieelemente Eco-Design. Quelle: eigene Darstellung nach IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen (2019), S. 22

Ein **Praxisbeispiel** aus der Lebensmittelindustrie zeigt, wie mit den Strategieelementen von Eco-Design optimierte Ressourcennutzung und Design für Recycling umgesetzt, THG-Emissionen eingespart und die Recyclingfähigkeit des Produkts erhöht werden können. So werden bei einem K3-Joghurtbecher<sup>7</sup> mit einem Innenbecher aus PP (K3-PP in der Abbildung 8) zunächst Umweltziele (THG-Reduzierung, Steigerung der Recyclingfähigkeit) definiert. Anschließend werden die zwei neuen Designvarianten auf Zulässigkeit, Zielerreichung und mögliche Zielkonflikte hin geprüft. Die Abbildung zeigt: Je weiter innen im Diagramm die Linie liegt, desto „besser“ ist das Abschneiden in der Zielkategorie.

Aus dem Vergleich geht hervor, dass die Variante PP in allen betrachteten Aspekten besser abschneidet als die Variante K3-PP. Somit können mit dem Vollkunststoffbecher PP – verglichen mit dem Ausgangsdesign K3-PS – 32 Prozent des Gewichts und knapp 40 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden. Die Recyclingfähigkeit von Klasse F (nicht recycelbar) kann auf Klasse C (einige Recyclingprobleme) angehoben werden.<sup>8</sup>

**Tipp:** Mit Eco-Design wird geprüft, ob ein Material unter Erfüllung der Qualitätsanforderungen durch ein alternatives Material mit weniger Umwelteinfluss ersetzt werden kann. Oftmals wird bei der Herstellung von Saugrohren in der Automobilindustrie Polyamid (PA) verwendet. Dabei muss das PA getrocknet werden, was Energiekosten mit sich bringt. Die Herstellung von Polypropylen (PP) ist weniger energieintensiv als von Polyamid (PA), da für PP die Trocknung entfällt und die Werkzeug- und Schmelztemperaturen geringer sind. Wird als Rohstoff PP verwendet, können folglich Energie, Kosten und CO<sub>2</sub> eingespart werden.<sup>9</sup>

<sup>7</sup> K3 steht für Karton-Kunststoff-Kombinationen. Ein K3-Becher besteht aus drei Komponenten: einem unbedruckten Kunststoffbecher, einer Pappbanderole und einer Aluminiumfolie.

<sup>8</sup> IK (2019), S. 13

<sup>9</sup> KM Kunststoffmagazin (2021)

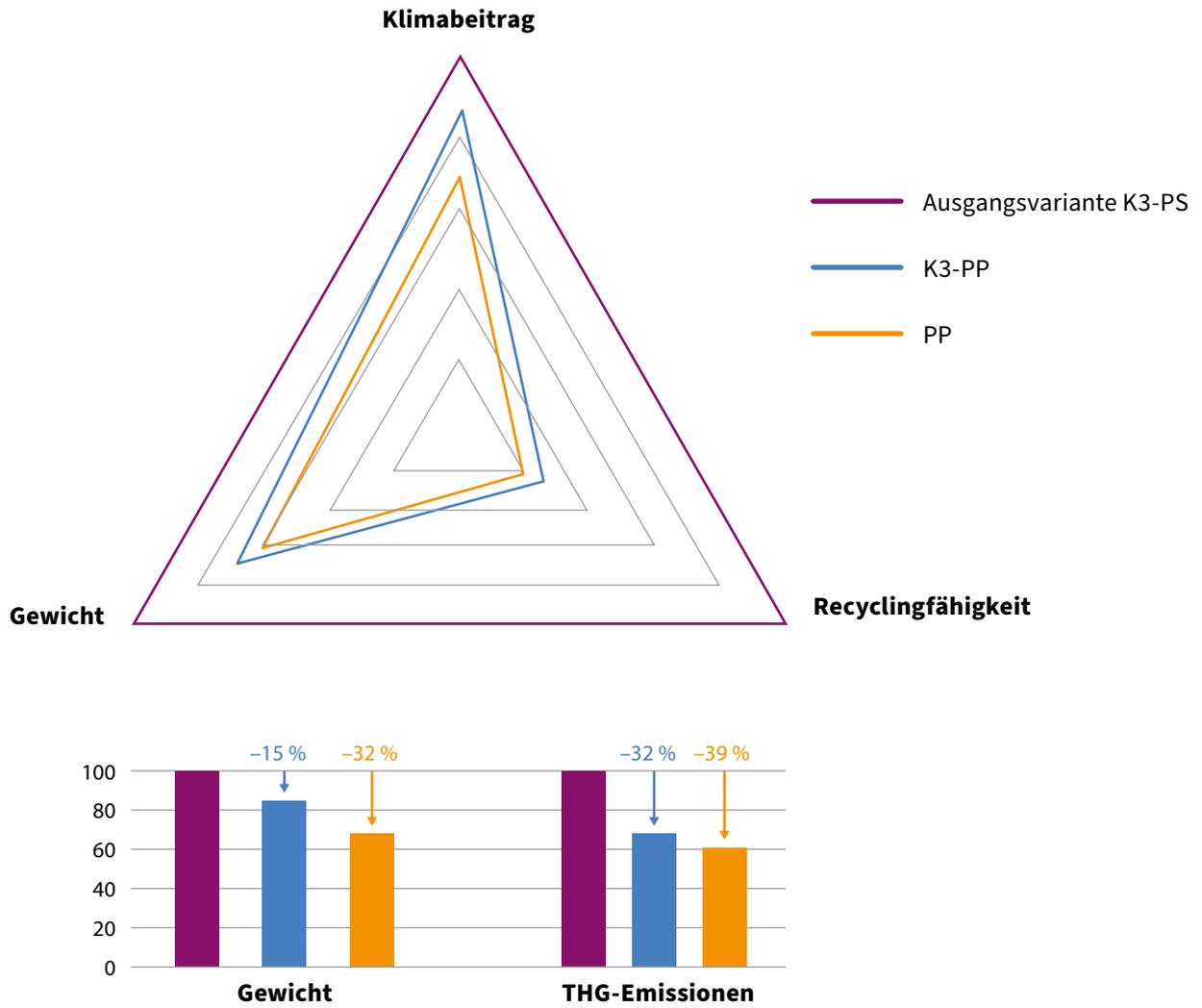


Abbildung 8: Umgang mit Zielkonflikten am Beispiel eines K3-Joghurtbechers. Quelle: IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen (2019), S. 12

# 03

## **PROZESS- TECHNOLOGIEN IN DER PRODUKTION**

## 3.1 Innovative und energieeffiziente Granulattrocknung

Granulate dienen als Ausgangsstoff in der nachfolgenden Kunststoffverarbeitung. Je nach verwendetem Kunststoff ist Granulattrocknung notwendig, um die eingelagerte Feuchtigkeit zu entziehen und um einen stabilen Fertigungsprozess und die Produktqualität zu gewährleisten. Zu diesem Zweck werden häufig sowohl Drucklufttrockner als auch herkömmliche Trockenlufttrockner (auch Adsorptionstrockner oder Trockner mit Molekularsieb genannt) eingesetzt. Das Granulat wird dabei durch die Zufuhr heißer trockener Luft getrocknet. Nach der Trocknung wird die mit Feuchtigkeit beladene Luft in einem Molekularsieb wiederum entfeuchtet und kann so erneut als Trockenluft eingesetzt werden. Die Molekularsiebe zu regenerieren ist energie- und zeitaufwendig. Der Vorgang erfolgt durch Erhitzen auf über 300 °C, dabei sollte der Erwärmungsvorgang langsam ausgeführt werden, damit das Molekularsieb nicht zerstört wird. Anschließend wird das Molekularsieb wieder abgekühlt, um die volle Adsorptionsfähigkeit wiederherzustellen.

Eine energieeffizientere Lösung für Granulattrocknung bietet die Vakuumtrocknung. Ein Vakuumtrockner funktioniert ohne Molekularsieb. Dabei wird ein 90-Prozent-Vakuum geschaffen, wodurch der Siedepunkt des Wassers von 100 °C auf 56 °C reduziert wird. Der Trocknungsprozess besteht aus drei Stufen. Zuerst wird das Granulat in einem Heiztrichter auf eine Solltemperatur aufgeheizt, indem es mit erwärmter Luft durchströmt wird. Danach wird es in einen Vakuumbehälter überführt, in dem ein Vakuum mit einem Druck von ca. 0,1 bar angelegt wird. Dort tritt die Feuchtigkeit ohne Einsatz von Trockenluft aus dem Material aus. Das vakuumgetrocknete Material wird dann in den Absaugtrichter abgelassen und für die Förderung zur Verarbeitungsmaschine bereitgestellt.

Im Vergleich zu konventionellen Trockenlufttrocknern bietet der Einsatz von Vakuumtrocknern Vorteile hinsichtlich Geschwindigkeit, Energieeinsparung und Wartungsaufwand. Das Vakuum sorgt dafür, dass das Wasser bei einer sehr hohen Prozessgeschwindigkeit ohne nennenswerte Wärmezufuhr verdampft. So wird im Vergleich zu Molekularsieben eine Abwärmevermeidung ermöglicht. Ein hocheffizienter Vakuumtrockner trocknet das Granulat im Schnitt sechsmal schneller als ein Trockenlufttrockner. Durch den Einsatz von Vakuumtrocknern entfällt die Energie für die Regeneration von Molekularsieben bei konventionellen Trockenlufttrocknern, dadurch kann eine 50-prozentige Energieeinsparung erzielt werden.<sup>10</sup> Es ist zu beachten, dass die tatsächliche Energieeinsparung von vielen Faktoren abhängig ist, u. a. von dem zu trocknenden Material.



### Best Practice

Ein Kunststoffverpackungshersteller (großes Unternehmen) hat in der Produktion Molekularsiebtrockner gegen Vakuumtrockner ausgetauscht. Das Werk produziert Flaschen und Behälter mit dem Spritz-Streck-Blasverfahren im 24/7-Betrieb. Ein wichtiger Schritt beim Spritz-Streck-Blasverfahren ist die Materialtrocknung. Dafür hat das Werk früher konventionelle Adsorptionstrockner eingesetzt. Die damit verbundene lange Trocknungszeit sowie der Energieaufwand für die Regeneration der Molekularsiebe erschweren eine energieeffiziente Produktion. Durch den Vakuumprozess dauert ein Materialwechsel nun 40 Minuten anstatt drei Stunden mit Molekularsieben. Der Energieverbrauch bei der Granulattrocknung konnte um ca. 50 Prozent reduziert werden.

<sup>10</sup> Mayer (2019)

## 3.2 Effiziente Nutzung von Hydraulikölen

Hydraulische Antriebe sind eine bewährte und häufig eingesetzte Antriebstechnik bei Spritzgießmaschinen. So werden die Schließ- und die Plastifiziereinheit der Spritzgießmaschinen in der Regel hydraulisch angetrieben. Das dabei zum Einsatz kommende Hydrauliköl wird über ein System aus Rohren und Schläuchen zu den sogenannten Aktuatoren (Hydrozylinder und -motoren) gepumpt. Dort wird die Druckenergie in mechanische Energie umgewandelt. Die Energieeffizienz eines hydraulischen Antriebssystems wird dabei von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst:

- Maschinen mit einer geregelten Hydraulik passen die Leistung der Pumpe über eine intelligente Steuerung an den tatsächlichen Bedarf an. Sie erzeugen nur dann Druck, wenn dieser benötigt, und nicht, wenn z. B. das Werkstück gekühlt wird.
- Arbeiten die Maschinen hingegen mit konstant betriebenen Pumpen, steigt der Druck in Leerlaufphasen, und das Druckbegrenzungsventil spricht an, um den Druck zu regulieren. Derartige Systeme weisen eine geringere Energieeffizienz auf. Auch Antriebskonzepte mit Speicher weisen diesbezüglich Nachteile auf, da der Speicherdruck konstant aufrecht erhalten werden muss.
- Ein zusätzlicher Faktor ist der Druckverlust des Hydrauliksystems, der über die Länge, den Durchmesser, die Strömungsgeschwindigkeit sowie die Anzahl und Art der Drosselstellen des Systems bestimmt wird.

Unabhängig von der Energieeffizienz des Hydrauliksystems spielt das Hydrauliköl eine wichtige Rolle. So darf die Viskosität nicht zu hoch sein (z. B. dickflüssig wie Sirup), weil dadurch der Pumpenenergieverbrauch stark steigt. Nach unten ist die Viskosität ebenfalls begrenzt, um Pumpenschleiß zu vermeiden.

Pumpenhersteller empfehlen eine Mindestviskosität von  $10 \text{ mm}^2/\text{s}$ , um die Lebensdauer der Pumpe und Ventile sicherstellen zu können. Angegeben wird die Viskosität von Hydrauliköl in ISO-VG-Klassen (Viscosity Grade), wobei als Bezugsgröße stets eine Temperatur von  $40 \text{ °C}$  gilt, denn die Viskosität ändert sich stark in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur des Öls. Sinkt die Temperatur, so steigt die Viskosität und damit der Energiebedarf. Bei

den standardmäßig verwendeten hochviskosen (dickflüssigen) Hydraulikölen ISO VG 46 oder ISO VG 68 wird das Öl daher vor Maschinenstart zunächst mittels elektrischer Heizung auf eine Mindesttemperatur erwärmt, bevor die Produktion starten kann.

Neben einer Zeitverzögerung bewirkt dieser Umstand einen höheren Verbrauch an elektrischer Energie und Lastspitzen beim Strombezug in der Startphase. Ist das Öl aufgeheizt, sorgt dessen Viskosität dafür, dass durch die unvermeidbaren Strömungsenergieverluste (Reibung, Drosselung) eine weitere Erwärmung erfolgt. Dieser Effekt ist ebenfalls abhängig von der Viskosität und führt zur Entstehung von Abwärme, die über die Maschinen und das Hydrauliksystem unkontrolliert an die Umgebung abgegeben wird. Übersteigt die Betriebstemperatur den tolerierten Temperaturbereich von  $35$  bis  $45 \text{ °C}$ , muss zum Schutz der Komponenten und zur Wahrung geeigneter Arbeitsbedingungen sogar eine Ölkühlung aktiviert werden. Sinkt die Betriebstemperatur hingegen (z. B. unter  $30 \text{ °C}$ ), ist wieder der Einsatz elektrischer Heizenergie erforderlich.

Eine einfache Möglichkeit, Energie einzusparen, kann durch den Einsatz eines Hydrauliköls mit geeigneter Viskosität realisiert werden. Darunter ist ein Hydrauliköl zu verstehen, welches aufgrund seiner ISO-VG-Klasse auch bei niedrigeren Betriebstemperaturen (z. B.  $35 \text{ °C}$ ) bereits die gewünschte Viskosität (z. B.  $25 \text{ mm}^2/\text{s}$ ) besitzt und zugleich die geforderte Mindestviskosität der Einzelkomponenten einhält. Anstelle der standardmäßig verwendeten hochviskosen Hydrauliköle kann daher Hydrauliköl einer Viskositätsklasse mit niedrigerer Stufe gewählt werden. Die Umstellung auf sogenannte niedrigviskose Öle kann die Pumpenantriebsenergie um bis zu 10 Prozent<sup>11</sup> reduzieren, den Heizvorgang zur Ölvorwärmung ersparen und den Kühlleistungsbedarf verringern (siehe Abbildung 9). Diese Maßnahme kann sogar ganz ohne Investitionskosten durchgeführt werden, wenn das Hydrauliköl im Zuge eines Ölwechsels umgestellt wird. Zu beachten ist, dass der Effekt der Energieeffizienzsteigerung auch von der oben beschriebenen Energieeffizienz des hydraulischen Antriebssystems und den eingestellten Temperaturfenstern bzw. Parametern für die Heizung und Kühlung des Hydrauliköls abhängt.

<sup>11</sup> Gerstel (2015)

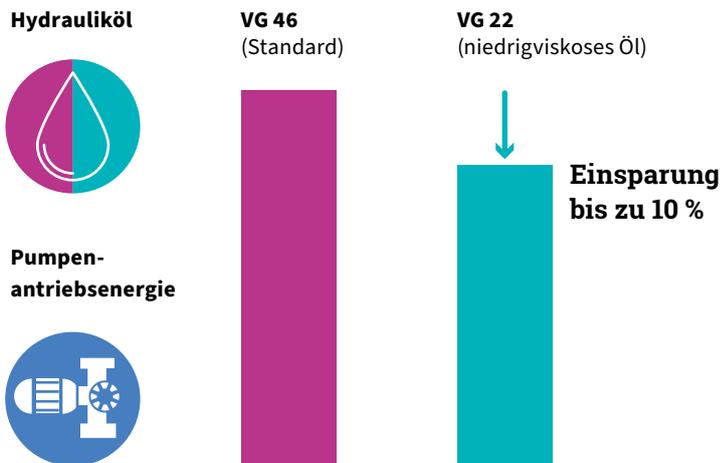


Abbildung 9: Energetischer Vorteil niedrigviskoser Öle. Quelle: dena



### Best Practice

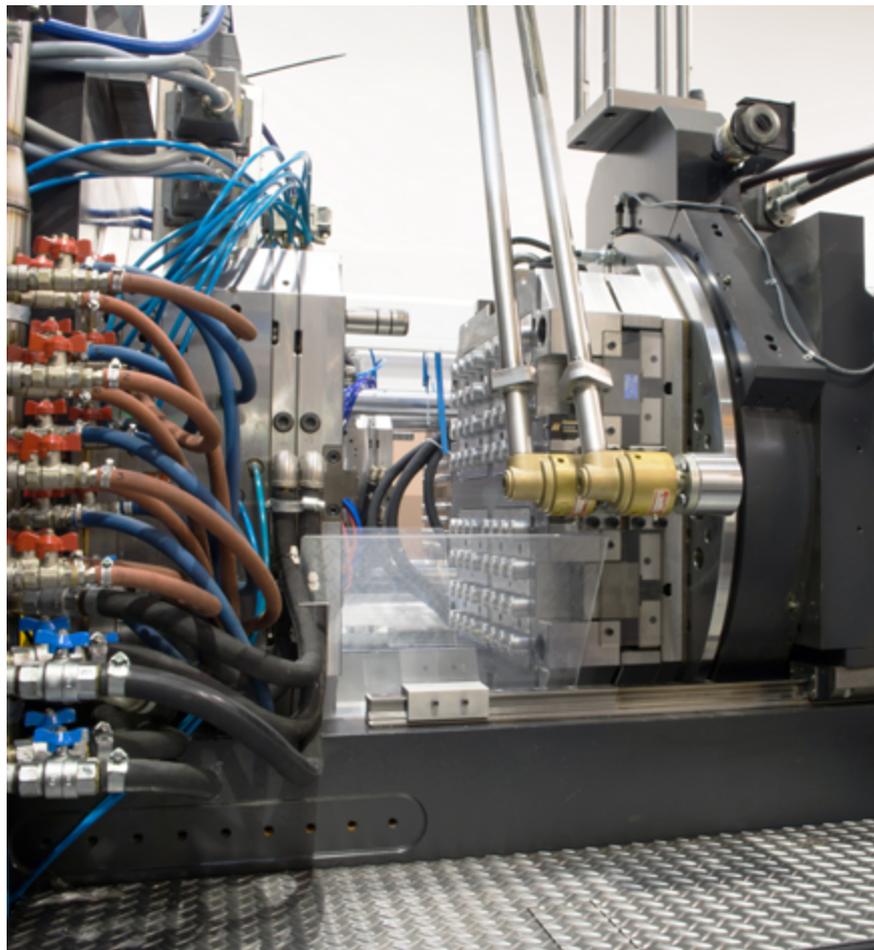
Bei einem Hersteller von Kunststoffprodukten (Großunternehmen) ist Strom mit einem Anteil von über 90 Prozent des Gesamtenergieverbrauchs der Hauptenergieträger. 70 Prozent des Gesamtstromverbrauchs wiederum sind auf die Spritzgießmaschinen (24/7-Betrieb) zurückzuführen. Im Rahmen der wirtschaftlichen Energieeinsparmaßnahmen hat das Unternehmen seit 2018 den Betrieb der Spritzgießmaschinen mit alternativen Hydraulikölen entwickelt und dabei über zehn ihrer Bestands-spritzgießmaschinen von Hydrauliköl VG 46 auf ein Öl nach ISO VG 22 mit niedriger Viskosität umgestellt. Das VG 46 hat bei einer Öltemperatur von 40 °C eine kinematische Viskosität von 46 mm<sup>2</sup>/s, das VG 22 hingegen von 22 mm<sup>2</sup>/s. Somit lässt sich das Hydrauliköl VG 22 im Hydraulikkreis leichter, mit geringerem Druckverlust des Leitungssystems zwischen der Pumpe und Zylinder sowie damit bei geringerer Stromaufnahme fördern.

Durch die Umstellung konnte eine Stromeinsparung von 3 Prozent bei den elektrisch dosierenden und 5 Prozent bei den hydraulisch dosierenden Spritzgießmaschinen bestätigt werden. Für das Unternehmen mit 20 hydraulischen Spritzgießmaschinen konnte eine Stromeinsparung von 550 MWh/a erzielt werden. Die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme entsteht dadurch, dass bei der Umstellung keine Mehrkosten angefallen sind, da die Kosten für das niedrigviskose Öl fast identisch mit denen des Standardöls VG 46 sind.<sup>12</sup>



### Innovatives Verfahren

In der Produktion muss das Hydrauliköl der Maschinen regelmäßig gewechselt werden. Der Ölwechsel bringt Energie- und Umweltkosten mit sich, sowohl für die Produktion des neuen als auch für die Entsorgung des alten Öls. Eine innovative Lösung bietet eine Technologie, die das verbrauchte Öl durch einen Rekonditionierungsprozess auf seine ursprüngliche Qualität zurückführt und dasselbe Öl wieder in der identischen Anwendung verwendbar macht. Auf diese Weise können nicht nur Ölwechsel eingespart werden, sondern es kommen weitere Vorteile hinzu: Reduktion des Ölverbrauchs um bis zu 90 Prozent, Einsparung von bis zu 3 Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro eingesparter Tonne Öl, Vermeidung von Produktionsstillständen und Reduzierung von Verschleiß durch erhöhte Reinheitsgrade im Hydrauliköl.



<sup>12</sup> König (2020), S. 52 ff.

### 3.3 Einsatz elektromechanisch angetriebener Spritzgießmaschinen

Hydraulisch angetriebene Spritzgießmaschinen liefern zuverlässig den Druck in der Menge, die jeweils benötigt wird. Darüber hinaus verfügt das hydraulische System über Kostenvorteile bei der Anschaffung. Bei einer hydraulischen Spritzgießmaschine muss jedoch das Hydrauliköl stets mit hohem Druck beaufschlagt werden. Dies führt dazu, dass der Motor des Hydrauliksystems zumeist mit hohem Stromverbrauch arbeitet.

Ein großes Energieeinsparpotenzial bei Spritzgießmaschinen bietet demgegenüber der Einsatz sogenannter vollelektrischer bzw. elektromechanischer Antriebe. Dabei ersetzen Servomotoren (strom-, drehzahl- und/oder positionsgeregelte Elektromotoren) den hydraulischen Antrieb der Schließeinheit. Die Plastifiziereinheit einer Spritzgießmaschine kann ebenfalls elektromechanisch angetrieben werden – mit messbarem Effekt: Eine vollelektrische Spritzgießmaschine, bei der alle wesentlichen Anlagenbewegungen von Elektromotoren angetrieben werden, spart bis zu 41 Prozent Energie gegenüber gebräuchlichen hydraulischen Antrieben ohne geregelte Hydraulik.<sup>13</sup> Dabei werden einzelne Anlagenbewegungen über Servomotoren direkt bedarfsgerecht angetrieben. Die Antriebe nehmen nur beim Öffnen und Schließen des Formwerkzeugs und beim Einspritzen Leistung auf. Gerade beim energieintensiven Dosiervorgang zeigen sich deutliche Vorteile gegenüber hydraulisch angetriebenen Spritzgießmaschinen.

In der Summe liegt der Energiebedarf einer elektromechanischen Spritzgießmaschine bei 0,3 kWh/kg (siehe Tabelle 3)<sup>14</sup> – das ist ein deutlicher Unterschied zum Energiebedarf einer unregelmäßig betriebenen hydraulischen Maschine von ca. 2,5 kWh/kg.

Neben energetischen Vorteilen bietet eine elektromechanisch angetriebene Spritzgießmaschine zudem eine kurze Zykluszeit, eine höhere Präzision und einen geringeren Wartungsaufwand beim Spritzgießen.



#### Best Practice

Ein Kunststoffverarbeiter (KMU) produziert Bauteile aus thermoplastischen Kunststoffen für die Automobilindustrie. Die Verarbeitung wird im Spritzgießverfahren auf Spritzgießmaschinen mit einer Schließkraft von 33 bis 1.750 Kilonewton (kN) durchgeführt. Ursprünglich wurden fünf hydraulische Spritzgießmaschinen mit einer Schließkraft von ca. 640 bis 880 kN eingesetzt. Die zentrale Hydraulikpumpe nahm während der Produktionszeit ständig Leistung auf, um den erforderlichen Systemdruck aufrechtzuerhalten. Die durchschnittliche Leistungsaufnahme lag zwischen 8,1 und 15,6 kWh. Im Zuge einer Prozessoptimierung wurden die fünf hydraulischen Spritzgießmaschinen durch drei vollelektrische Maschinen ersetzt. Dadurch konnte eine Energieeinsparung von rund 68 Prozent erzielt werden.<sup>15</sup>

	Hydraulischer Antrieb	Elektrischer Antrieb (Servomotor)
<b>Vorgelagerte und nachgelagerte Schritte</b>	Hochfahren, Vorerhitzen & Abkühlen	Entfällt
<b>Leistungsaufnahme</b>	Trotz Drehzahlregelung kontinuierlich hoher Energiebedarf, aufgrund von hohem Druck	Energiebedarf nur für das Öffnen und Schließen der Formumsetzung und für das Einspritzen
<b>Energiebedarf einer Spritzgießmaschine</b>	2,5 kWh/kg	0,3 kWh/kg

Tabelle 3: Vergleich hydraulischer und elektrischer Antriebe beim Kunststoffspritzgießen. Quelle: dena

**Tipp:** Neben Antriebstechnik spielt auch die Werkstoffauswahl eine Rolle, insbesondere beim CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial. So hat beispielsweise die Verwendung von Polyamid (PA) einen höheren CO<sub>2</sub>-Ausstoß als die Verwendung derselben Menge Polyolefine (z. B. PP). Unter Einhaltung der technischen Anforderungen kann eine Substitution des PA durch PP im Sinne des Eco-Designs zu einer besseren CO<sub>2</sub>-Bilanz beitragen. Siehe auch [Abschnitt 2.3](#).

<sup>13</sup> Blesl (2017), S. 424

<sup>14</sup> KM (2017)

<sup>15</sup> DKM (2019), S. 2

## 3.4 Energieeffizienter Formschäumungsprozess durch innovative Werkzeugtechnik

Schaumkunststoffe, wie z. B. expandiertes Polystyrol (EPS), expandiertes Polypropylen (EPP) und Polyurethan-Hartschaum (PUR), werden aufgrund der leichten Verarbeitbarkeit, der thermischen Eigenschaften und der geringen Dichte zu Formteilen in verschiedenen Anwendungsbereichen verarbeitet. Beispielsweise werden die Stoßfängersysteme der Automobilindustrie und die Wärmedämmung des Bausektors aus Schaumkunststoffen hergestellt.

Bei der Verarbeitung werden Formteile mittels Formschäumen am Formschäumautomaten im Werkzeug erzeugt. In konventionellen Verfahren handelt es sich beim Werkzeug in der Regel um eine zweiteilige Aluminiumform. Es besteht aus den Kavitäten, einer Dampfkammer und einem Rahmen, der als Verbindung zum eigentlichen Formschäumautomaten dient. Die Partikel (EPP, EPS) werden mittels Druckluft und Vakuum in die Kavitäten gepresst. Dann wird unter Druck Heißdampf in eine der Kavitäten vorgesezte Dampfkammer geleitet. Der Heißdampf kondensiert teilweise auf der Kavität und erhitzt diese und die Partikel so lange, bis der Verschweißprozess einsetzt. Durch den aufgebauten Expansionsdruck werden die Partikel vollständig zu einem dreidimensionalen Formteil verbunden.

Der Formschäumungsprozess ist durch das Verfahren mit bisher üblichen Werkzeugkavitäten energie- und kostenintensiv. Bei jedem Produktionsvorgang muss die gesamte Metallform, die zur Fertigung der Formteile notwendig ist, auf ca. 140 °C erhitzt und wieder gekühlt werden. Die dabei anfallende Abwärme wird über Kühltürme abgeführt. Der Prozess des Erhitzens und Abkühlens verlängert die Zykluszeit. Zusätzlich heizen sich die Werkshallen durch die Produktion auf und müssen aufwendig klimatisiert werden.

Als innovative energieeffiziente Werkzeugtechnik wird mittels 3D-Druck Edelstahl anstatt Aluminium für die Werkzeugkavitäten eingesetzt. Durch die höhere Festigkeit von Edelstahl im Vergleich zu Aluminium können geringere Wandstärken in den Kavitäten realisiert werden. Auf diese Weise kann Material eingespart werden, und der Energieeinsatz zum Erhitzen bzw. Kühlen der Metallform verringert sich. Außerdem können durch die höhere Festigkeit von Edelstahl im Vergleich zu Aluminium die Instandhaltungskosten der Werkzeuge reduziert werden. Die 3D-gefertigten Kavitäten verfügen über eine offene Dampfkammer mit kleinem Kammervolumen. Die Verkleinerung des Dampfkammervolumens führt zur Reduktion des Dampf- und Druckluftverbrauchs. So kann der Formschäumungsprozess energetisch optimiert und CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden.



Abbildung 10: SLM-Werkzeugkavität Lunchbox. Quelle: Overath



### Best Practice

Ein Hersteller (KMU) von Einbauteilen aus EPP für die Automobilindustrie setzt bei der Produktion innovative Werkzeuge aus Edelstahl mittels 3D-Drucktechnik auf Basis des selektiven Laserschmelzens (Selective Laser Melting, SLM) ein. Die 3D-Drucktechnik ermöglicht es, die Formgestaltung der Werkzeuge zu optimieren und konturnah zu kühlen. Dies führt zu einer Energieeinsparung von bis zu 80 Prozent sowie zur Senkung des Kuhlwasserverbrauchs. Mit den neuen Werkzeugen wird die beheizte Menge an Stahl und das Dampfkammer-volumen jeweils um 95 Prozent verringert. Dadurch kann der Dampfverbrauch um bis zu 75 Prozent reduziert werden. Zusätzlicher Vorteil: Der gesamte Formschäumungsprozess beschleunigt sich, und die Werkzeuge sind länger haltbar. Durch das Verfahren können jährlich ca. 19 GWh bzw. 3.780 Tonnen CO<sub>2</sub>-äquivalente eingespart werden.<sup>16</sup>



### Innovatives Verfahren

Der Schäumungsprozess mit bisher üblichen Werkzeugkavitäten ist energieintensiv, da bei jedem Zyklus die Werkzeugmasse aufgeheizt und wieder abgekühlt werden muss. Durch den Einsatz innovativer Werkzeugtechnik mittels 3D-Laserdrucktechnik (SLM) kann der Produktionsprozess energetisch optimiert und dadurch CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden. Dabei werden die konventionell gefrasteten Kavitäten durch mit dem SLM-Verfahren hergestellte Kavitäten ersetzt und die Dampfkammer in die Kavität integriert (siehe Abbildung 10).

<sup>16</sup> dena (2020), S. 5

## 3.5 Energieeffizientes Kühlsystem

Der Energiebedarf für die Kälteversorgung beträgt in der kunststoffverarbeitenden Industrie anteilig am gesamten Energiebedarf im Unternehmen schätzungsweise zwischen 5 und 20 Prozent. Aus Sicht eines Energiemanagementsystems gemäß DIN EN ISO 50001 ist die Kälteversorgung häufig eine wesentliche Verbrauchergruppe (SEU, [siehe auch Abschnitt 2.1](#)) und somit auch ein wesentlicher Kostenfaktor. Direkte und indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen sind mit dem Stromverbrauch und mit Kältemittelleckagen verbunden.

Kältebedarf (Kühlwasser, Kaltwasser) in der kunststoffverarbeitenden Industrie besteht sowohl in den Kernprozessen (Werkzeug-, Maschinen- und Produktkühlung) als auch in Nebenanlagen (beispielsweise Ölhydraulik) und Versorgungsanlagen (beispielsweise RLT-Anlagen und Klimatisierung). Die Versorgung mit Kälte und Kühlwasser erfolgt über zentrale und/oder dezentrale Anlagen, die entweder wasser- oder luftgekühlt sind. Für die Energieeffizienzsteigerung und CO<sub>2</sub>-Einsparung des Kühlsystems muss das ganze System betrachtet werden, wobei der Kältebedarf als Ausgangspunkt der Optimierung dient. Die nachfolgende Abbildung stellt die vier Systemkomponenten mit möglichen Optimierungsmaßnahmen dar.

Bei konsequenter Berücksichtigung aller Vermeidungs- und Energieeffizienzmaßnahmen in den genannten Bereichen besteht ein Energieeinsparpotenzial je nach Ausgangssituation im Betrieb zwischen 10 und 50 Prozent. Wenn neben der erfolgreichen Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen zusätzlich eine Umstellung auf klimaneutrale Kältemittel und erneuerbare Kälteerzeugung erfolgt, ergibt sich ein CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial klimarelevanter Emissionen von 100 Prozent.

**Tipp:** Um die Emissionen von fluorierten Treibhausgasen (F-Gasen) zu mindern, ist zum 1. Januar 2020 eine neue Etappe der F-Gase-Verordnung – VO(EG) 517/2014 – in Kraft getreten. Die Umstellung eines Kälteversorgungssystems auf ein anderes Kältemittel ist eine wesentliche Änderung, bei der es sich lohnt, bestehende Konzepte zu hinterfragen, Bedarfsanpassungen vorzunehmen und Effizienzpotenziale zu heben. So kann die Umstellung auf weniger klimaschädliche Kältemittel in Kombination mit einer Optimierung des Kälteversorgungssystems erfolgen.



Abbildung 11: Energieeffizienz durch systemische Optimierung der Kälteversorgung. Quelle: ÖKOTEC Energiemanagement GmbH



### Best Practice

In einem Betrieb erfolgen sowohl die Kalt- und Kühlwassererzeugung als auch die Verteilung für Werkzeug- und Hydraulikprozesse bereits getrennt und versorgen die Verbraucher auf unterschiedlichen Temperaturniveaus. Im Einsatz befinden sich effiziente Kompressoren für Kältemaschinen und Freikühler. Jedoch entsteht bei der Kälteerzeugung nach wie vor Abwärme, die bislang nicht genutzt wird. Die energetische Analyse des Standortes deckte eine geeignete Wärmesenke bei der Lufterwärmung in den Zuluftanlagen des Betriebs auf, die bislang über Gasbrenner versorgt wurde. Als Energieeffizienzmaßnahme wurden Niedertemperaturheizregister in den Zuluftanlagen eingebaut. Diese wurden an die Abwärme des Kühlkreises, die zuvor vollständig über Kühltürme an die Umgebung abgeführt wurde, angeschlossen. Durch die Maßnahme wird die Abwärme aus der Kälteerzeugung zukünftig für die Zulufterwärmung verwendet. Der folgenden Tabelle können die damit verbundenen Maßnahmen, deren Wirtschaftlichkeit und weitere Effekte entnommen werden.

## Innovationen: selbstlernende Anlagensteuerung für energieeffiziente Kühlung

Neben der Investition in neue Technologien gilt es auch für bereits vorhandene Anlagen, einen möglichst energiesparenden Betrieb zu gewährleisten. Bisher konnten Betreiber die Parameter für die Steuerung der Anlagen oft nur auf Basis ihrer Erfahrungswerte einstellen. Durch eine digitale Anlagensteuerung in Verbindung mit einer energieeffizienzbasierten Energiemanagementsoftware kann heute von vornherein das Optimum eingestellt bzw. über maschinelles Lernen „erlernt“ werden. Derartige intelligente Steuerungssysteme können den Anlagenbetrieb ganzer Systeme automatisiert nach Energieeffizienzkriterien regeln. Die Basis sind Kältesysteme mit Verbrauchskosten von über 200.000 Euro/Jahr. Das zu erwartende Energieeinsparpotenzial liegt hier zwischen 10 und 30 Prozent.

Wie funktioniert das? Nach Einführung des Softwaresystems (siehe beispielhafter Projektablauf in Abbildung 12) liest das innovative Steuerungssystem umfangreiche Messdaten eines Systems im Betrieb aus, wertet die zuvor definierten Energiekennzahlen aus und erlernt so die Betriebszustände der Anlagen hinsichtlich ihrer Energieeffizienz. Darauf aufbauend können vernetzte Teilsysteme neu eingestellt und Veränderungen selbstlernend berücksichtigt werden. Die Energieeffizienz des Unternehmens wird gesteigert, und komplexe Systeme werden in Bezug auf die Energieeffizienz leichter bewertbar.

Maßnahme	Wirtschaftlichkeit	Effekte
Kopplung von Abwärmequelle (Rückkühlung Kühlwasser) und Wärmesenke (Zuluftanlagen bzw. Niedertemperaturheizregister) als betriebsinterne Abwärmenutzung	Kosteneinsparung: 530 T€/a Investitionen: 1.200 T€ Statische Amortisationszeit: 2,3 a Interne Verzinsung: 44 Prozent	Effiziente Erzeugung von Kühlwasser, Entlastung der Kühltürme und Einsparung Ventilatorstrom. Im Notfall stehen die Kühltürme als Backup weiter zur Verfügung.

Tabelle 4: Entlastung Kühltürme durch betriebsinterne Abwärmenutzung. Quelle: ÖKOTEC Energiemanagement GmbH

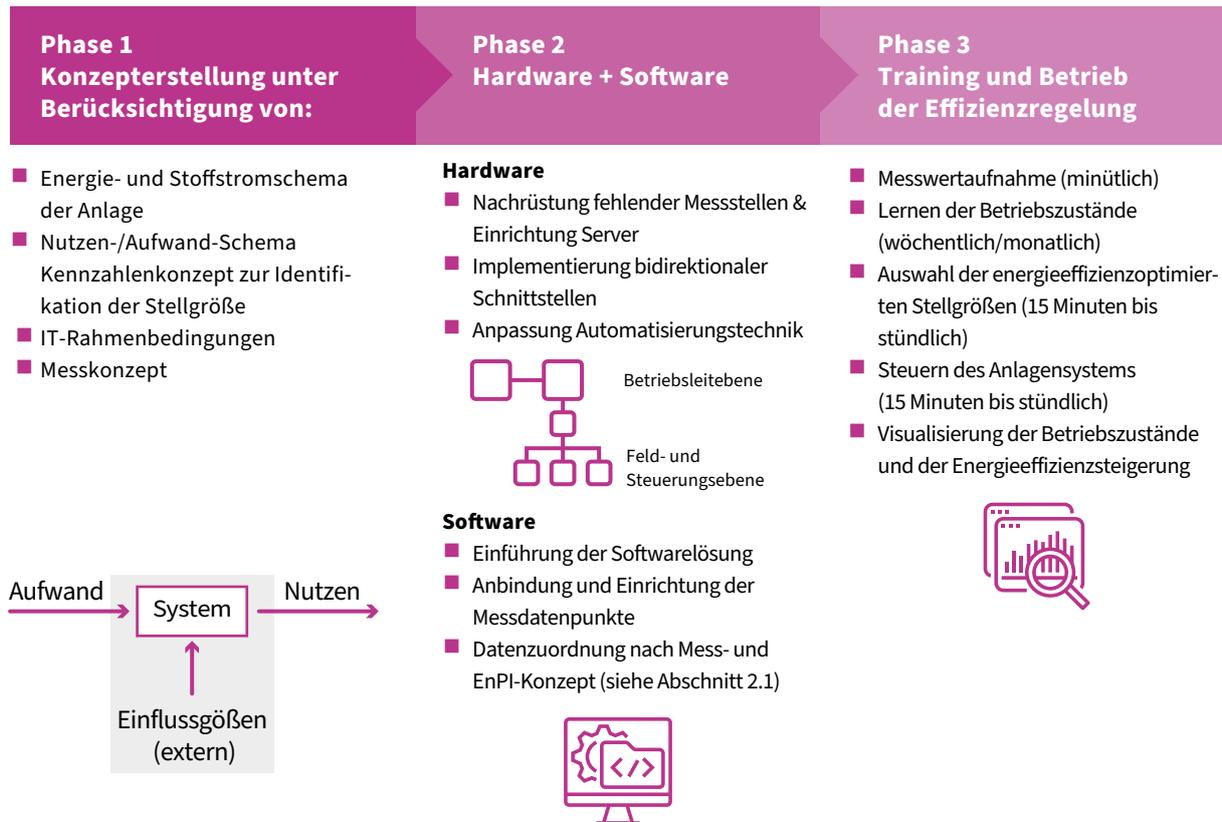


Abbildung 12: Beispielhafter Projektablauf zur Realisierung einer selbstlernenden Anlagensteuerung für ein energieeffizientes Kühlsystem.  
Quelle: ÖKOTEC Energiemanagement GmbH

## 3.6 Einsatz von Kunststoffrecyklaten zur Steigerung der Ressourceneffizienz

Gerade für die kunststoffverarbeitende Branche rücken Themen wie Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz immer stärker in den Fokus. Ein geschlossener Wertstoffkreislauf mit Recycling von Kunststoffabfällen (anstelle der Linear- bzw. Wegwerfwirtschaft) und der Einsatz von Kunststoffrecyklaten in Neuprodukten schonen Primärrohstoffe und sparen CO<sub>2</sub>-Emissionen ein (siehe Abbildung 13). Zudem können durch den Einsatz von Kunststoffrecyklaten über 50 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zum Einsatz von Neugranulaten auf Rohölbasis eingespart werden.<sup>17</sup>

Darüber hinaus kann der Einsatz von recycelten Kunststoffen die Wettbewerbsfähigkeit eines Betriebs im Zuge der Kreislaufwirtschaft erhöhen. 2019 wurden 14,2 Mio. Tonnen Kunststoffgranulate in Deutschland verarbeitet, davon nur 13,7 Prozent Kunststoffrecyklat.<sup>18</sup> Die Steigerung des Rezyklateinsatzes wird durch die stofflichen Eigenschaften des Rezyklates (Sortenreinheit) eingeschränkt, z. B. aufgrund mangelhafter Trennung der Abfälle, der Konkurrenz gegenüber kostengünstigen Neuwaren sowie fehlender Qualitätsstandards für Kunststoffrecyklat. Der Anteil des Kunststoffrecyklateinsatzes lässt sich jedoch auch durch Prozessoptimierung steigern und dadurch CO<sub>2</sub> einsparen.

<sup>17</sup> ALBA (2020), S. 4

<sup>18</sup> Conversio Market & Strategy (2020), S. 7

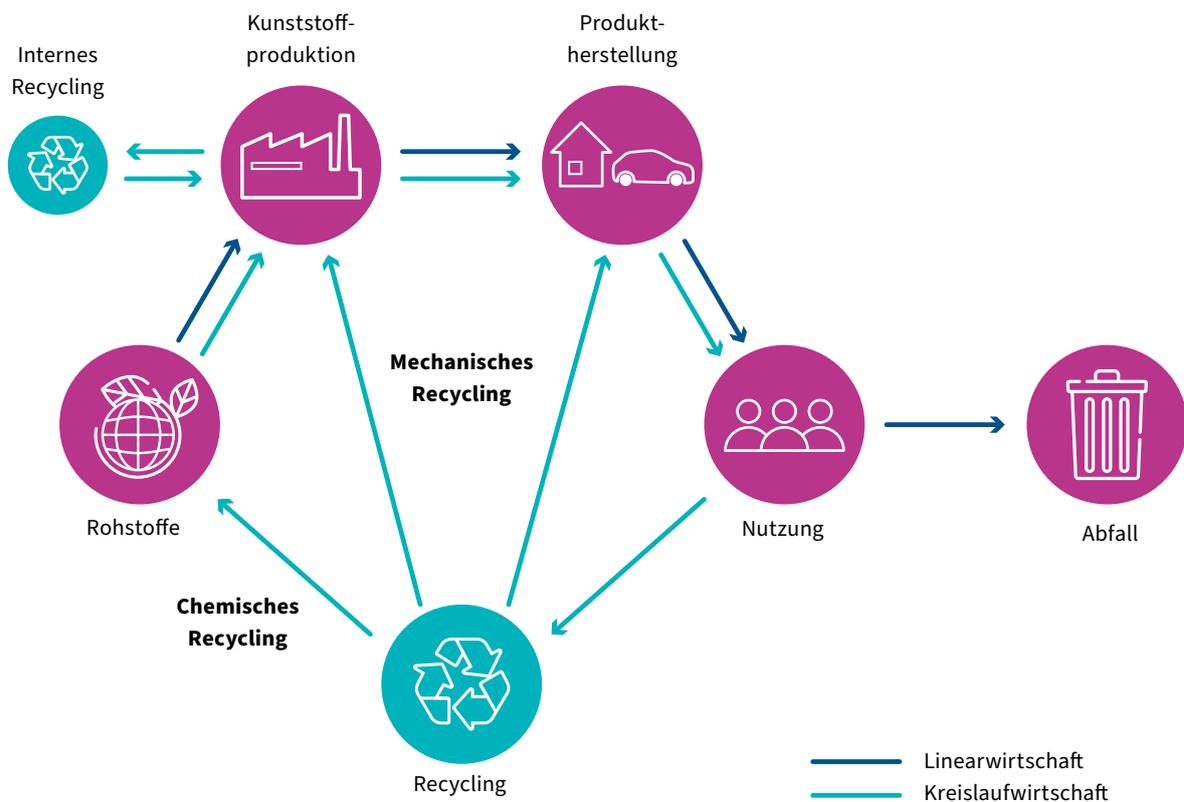


Abbildung 13: Vergleich Linear- und Kreislaufwirtschaft in der Kunststoffverarbeitung. Quelle: dena



### Best Practice

Ein Hersteller (Mittelstand) von Kunststoffprofilsystemen aus PVC setzt ein innovatives Verfahren zur Steigerung des Rezyklatanteils und zur CO<sub>2</sub>-Einsparung bei der Herstellung von Rahmenprofilen ein. Dadurch konnte der spezifische Energiebedarf pro extrudiertem Kilogramm PVC gegenüber der konventionellen Extrusionsanlage um über 30 Prozent reduziert werden. Gleichzeitig ist der Rezyklatanteil für die Rahmenprofile um 18 Prozent gestiegen. Durch die Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung und den gesteigerten Rezyklateinsatz wurden jährlich über 1.500 Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart. Weitere Einspareffekte konnten durch eine Verringerung der Ausschussrate um knapp 3 Prozentpunkte erreicht werden. Die jährliche Einsparung beträgt über 400.000 Euro, die Amortisationszeit weniger als 3 Jahre.<sup>19</sup>

Die Steigerung des Rezyklatanteils erfolgte durch die größere Dimensionierung des Extruders in Verbindung mit einer genauen Abstimmung des Extruders auf nachfolgende Komponenten (Werkzeug, Kalibrierung, Kühlstrecke, Abzug). Die Steigerung der Energieeffizienz erfolgte durch die Optimierung der Kalibrierung und der Kühlstrecke. Dabei wurde zum einen die Vakuumentleistung über speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) lastgerecht geregelt, was gegenüber der Falsch- bzw. Zusatzluftregelung im ursprünglichen System Energieeinsparungen ermöglicht. Zum anderen wurde zur Wasser-Luft-Trennung ein neuartiges Verfahren mit Schläuchen (Multischlauch) und Gefälle anstelle des ursprünglichen Systems mit Zyklotanks umgesetzt. Durch den Ersatz der Zyklotanks können die Pumpengrößen und somit der Energiebedarf des Systems reduziert werden.

<sup>19</sup> aluplast (2019), S. 4

## 3.7 Lastmanagement



### Best Practice

Der Strompreis in einem Betrieb besteht aus dem Arbeitspreis und dem Leistungspreis für die Spitzenanschlussleistung (Bereitstellungspreis). Außerordentliche Lastspitzen sind besonders teuer und ziehen bereits nach wenigen Minuten enorme Kosten nach sich. Es gilt daher, hohe Spitzenverbräuche zu vermeiden und einen gleichmäßigen Verbrauch anzustreben. Dazu muss der Lastgang so optimiert werden, dass Lastspitzen frühzeitig aufgedeckt und verhindert werden. Durch die Aufnahme eines Leistungsdiagramms kann die Tagesbelastungskurve ermittelt werden, um die Betriebszeiten der Lastspitzen zu identifizieren. Bei gleichzeitigem Betrieb mehrerer (elektrischer) Verbraucher können Energiekosten durch Lastspitzenbegrenzung gesenkt werden. Moderne Lastmanagementsysteme helfen dabei, gezielt den gleichzeitigen Einsatz vieler elektrischer Energieabnehmer zu verhindern, indem sie stufenlos und parallel alle Verbraucher in ihrer Leistung anpassen, ohne diese einfach vom Netz zu nehmen.

Für Unternehmen gibt es neben der Kostenreduzierung auch die Möglichkeit, durch Vermarktung der flexiblen Lasten Erlöse zu realisieren. Die Vermarktung läuft über einen sogenannten Pool. Den Aufbau und die Vermarktung des Pools übernimmt ein spezialisiertes Dienstleistungsunternehmen (Aggregator). In einem Pool werden Lasten verschiedener Unternehmen zusammengeführt und als gemeinsame Last vermarktet. Das Schema einer Zusammenführung von Lasten aus verschiedenen Industrieunternehmen ist in Abbildung 14 dargestellt.

Ein Kunststoffverarbeiter (Mittelstand) hat im Zuge des Umbaus einer Trafostation ein Lastmanagement eingeführt und dafür Software und Messgeräte zur Erfassung, Visualisierung und Steuerung der Prozesse installiert. Die Software vergleicht die von Messgeräten erfassten Daten mit denjenigen Leistungsgrenzen, die mit dem Energieversorger vereinbart wurden, und erstellt eine Hochrechnung auf das Ende des viertelstündlichen Messzyklus. Droht eine Überschreitung der Grenze, wird Last entsprechend einer Prioritätenliste im Schritt von 20 bzw. 25 kW abgeworfen. So können für den energieintensiven Prozess der Granulattrocknung (durch Trockenlufttrockner mit Molekularsieb) bis zu 300 kW Last für 30 bis 60 Minuten abgeworfen werden. Dies entspricht einer Reduzierung von ca. 10 Prozent des gesamten Leistungsbezugs.<sup>20</sup> In der Praxis kann auch die Energieeffizienz der Handlungssysteme (Entnahmesystem) der Spritzgießmaschinen durch Lastmanagement erhöht und mit dem Speicher der Bremsenergie kombiniert werden.

**Tip:** Lastspitzen sind besonders teuer. Selbst eine Lastspitze von nur wenigen Minuten führt zu hohen Energiekosten. Es gilt daher, Lastspitzen frühzeitig aufzudecken und zu vermeiden. In Absprache mit dem Stromversorger können durch systematisches Unterfahren der Lastspitze um 20 Prozent zu Spitzenlastzeiten Netzentgelte vermieden werden.<sup>21</sup>



Abbildung 14: Beispiel für das Zusammenführen und Kombinieren von Lasten zur Minderung von Leistungsspitzen.  
Quelle: dena (2012), S. 23

<sup>20</sup> KM (2011), S. 14 ff.

<sup>21</sup> Piterek (2018), S. 73 ff.

# 04

## ABWÄRME

In der Kunststoffindustrie wird ein Großteil der im Produktionsprozess eingesetzten Energie wieder als Wärme freigesetzt. Potenziale für Energieeinsparungen bieten sich zum einen in der Vermeidung von Abwärme als auch in der betriebsinternen Abwärmennutzung, beispielsweise um die freigesetzte Energie zur Aufbereitung von Warmwasser oder für die Beheizung von Verwaltungsgebäuden zu nutzen. Häufig fehlt die Bewertung bestehender

Potenziale im eigenen Betrieb, weil diese zum Teil schwer erfassbar sind oder versteckte Potenziale nicht hinreichend berücksichtigt werden. Die Nutzung industrieller Abwärme verfolgt ein stufenweises Vorgehen, wie die Abwärmekaskade der Abbildung 15 zeigt. Hier werden Maßnahmen zur Vermeidung und Nutzung von Abwärme nach ihrer Umsetzbarkeit priorisiert und in entsprechender Rangfolge betrachtet.

## 4.1 Vermeidung und Nutzung von Abwärme – die Abwärmekaskade

Ziel der Abwärmekaskade ist es, anhand der zur Verfügung stehenden Mittel die bestmögliche Nutzung der Abwärme zu identifizieren. Sie gibt klare Prinzipien zur Orientierung vor, die im konkreten Fall auch abweichend berücksichtigt werden oder durch vertiefte Analysen, wie z. B. eine Pinch-Analyse zur systematischen Optimierung des Energieverbrauchs von Prozessen, ergänzt werden können. Dem Prinzip „Efficiency First“ folgend gilt es zunächst Abwärme zu vermeiden, bevor sie unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten zugeführt werden kann.

Zur Verbesserung der Energieeffizienz in der Kunststoffindustrie sollte Abwärme in erster Linie durch Prozessoptimierung und Dämmung von Anlagenteilen möglichst vermieden und verringert werden, z. B. durch die Dämmung von Rohrleitungen oder durch die Nutzung einer Vakuumanstelle einer Heißlufttrocknung (siehe [Abschnitt 3.1](#)). Auch der Einsatz geringviskoser Hydrauliköle kann durch verringerte Betriebstemperaturen zur Vermeidung von Abwärme führen (siehe [Abschnitt 3.2](#)).

Jedoch ergeben sich in den Produktionsprozessen der Kunststoffverarbeitung immer noch verschiedene unvermeidbare Abwärmequellen. Die bei Spritzgieß- und Extrusionsverfahren durch Maschinen- und Produktkühlung abgeführten Wärmeströme werden vom Kühlwasser aufgenommen.

Aufgrund des relativ niedrigen Temperaturniveaus der anfallenden Abwärme in der Kunststoffverarbeitung kommt die Kälte- bzw. Stromerzeugung oder außerbetriebliche Nutzung meistens nicht infrage.

Jedoch kann diese Abwärme sinnvoll prozessintern oder für Heizzwecke betriebsintern mittels Wärmepumpen „upgecycelt“ genutzt werden, beispielsweise zur Granulat- und Werkzeugvorwärmung oder -trocknung, Trinkwassererwärmung und Gebäudebeheizung. Das Best-Practice-Beispiel im [Abschnitt 4.4](#) stellt eine Anwendung für Heizzwecke im Betrieb dar.



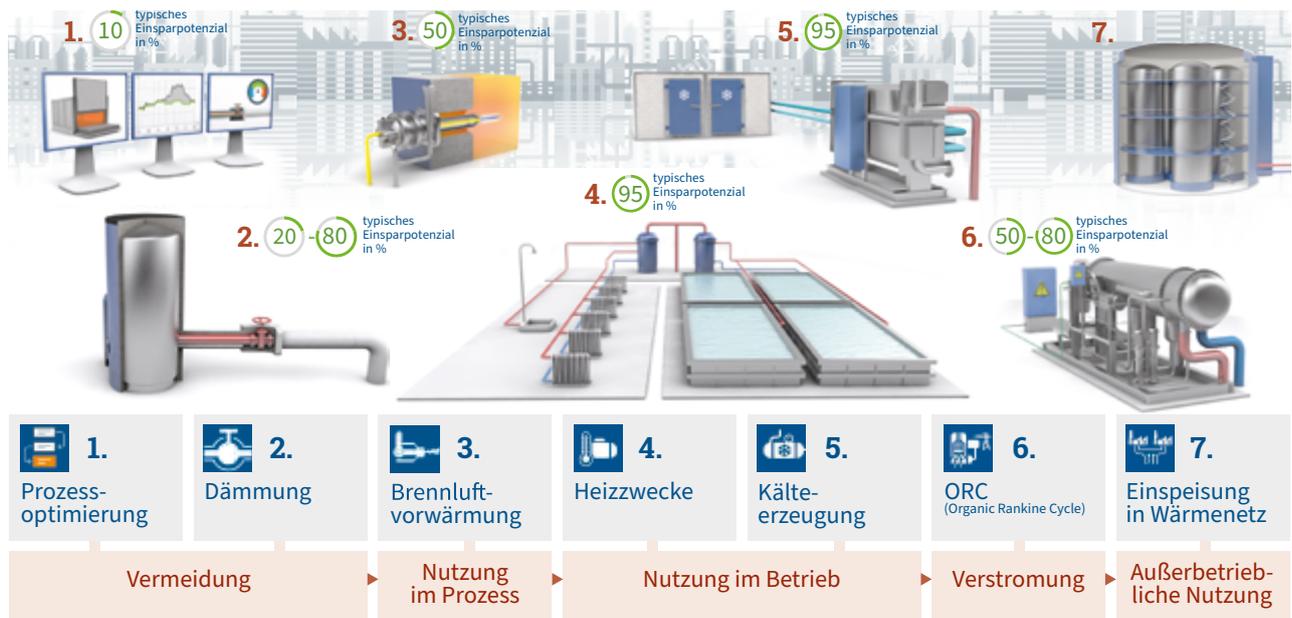


Abbildung 15: Potenziale und typische Nutzungsmöglichkeiten für industrielle Abwärme entlang der Abwärmekaskade. Quelle: dena

## 4.2 Wärmedämmung

In der Produktion von Kunststoffwaren wird bei verschiedenen Produktionsschritten Wärme benötigt, beispielsweise beim Plastifizierungsvorgang für das Aufschmelzen der Formmasse. Für die Einsparung thermischer Energie bietet die Dämmung von Anlagenkomponenten eine einfache und wirtschaftliche Lösung. Dazu gehören u. a. Wärmedämmung des Heizzylinders am Extruder (siehe Abbildung 16), Isolierung von Formen, Werkzeugen und Heißkanal sowie Dämmung der Presse im Thermoformenverfahren.

Die Zylinderheizung macht 10 bis 25 Prozent des Energieverbrauchs einer typischen Spritzgießanlage aus. Nicht isolierte Zylinder führen aufgrund der hohen Betriebstemperaturen zu hohen Wärmeverlusten und stellen gleichzeitig ein Gesundheits- und Sicherheitsrisiko dar. Da die Heizenergie für den Produktionsprozess mittels elektrischer Energie erzeugt wird, fallen im Vergleich zur Wärmeerzeugung aus Brennstoffen vergleichsweise hohe Kosten an. Dämmmaßnahmen sind daher sehr wirtschaftlich, und Auswertungen zeigen, dass durch Wärmedämmung eine Energieeinsparung bis zu 50 Prozent erzielt werden kann.<sup>22</sup> Beispielsweise können mit der Zylinderdämmung bei einer Fünf-Schicht-Blasfolienanlage mit einer Verarbeitungskapazität von 500 kg Rohmaterial pro Stunde jährlich bis zu 100.000 kWh Energie eingespart werden.<sup>23</sup>

Die Dämmung von Dampfleitungen ist eine besonders wirtschaftliche Energieeffizienzmaßnahme. Aufgrund der hohen Temperatur von Dampfsystemen lohnt sich eine regelmäßige Prüfung der Leitungen und Komponenten auf fehlerhafte Dämmung, die z. B. aufgrund von Schäden der Dämmungsschicht oder im Rahmen von Reparaturen auftreten kann.

**Tipp:** An verschiedenen Stellen der Produktion entstehen große Wärmeverluste. Eine einfache, wirtschaftliche Lösung bietet Wärmedämmung von Anlagenkomponenten, vor allem bei Zylinderdämmung. Dadurch sparen Unternehmen bis zu 50 Prozent der spezifischen thermischen Energie. Damit verbunden ist die Reduktion der Energiekosten, da die elektrische Energie für die Zylinderheizung eingespart wird.

<sup>22</sup> ExxonMobil (2018), S. 10

<sup>23</sup> Kunststoffe (2014)

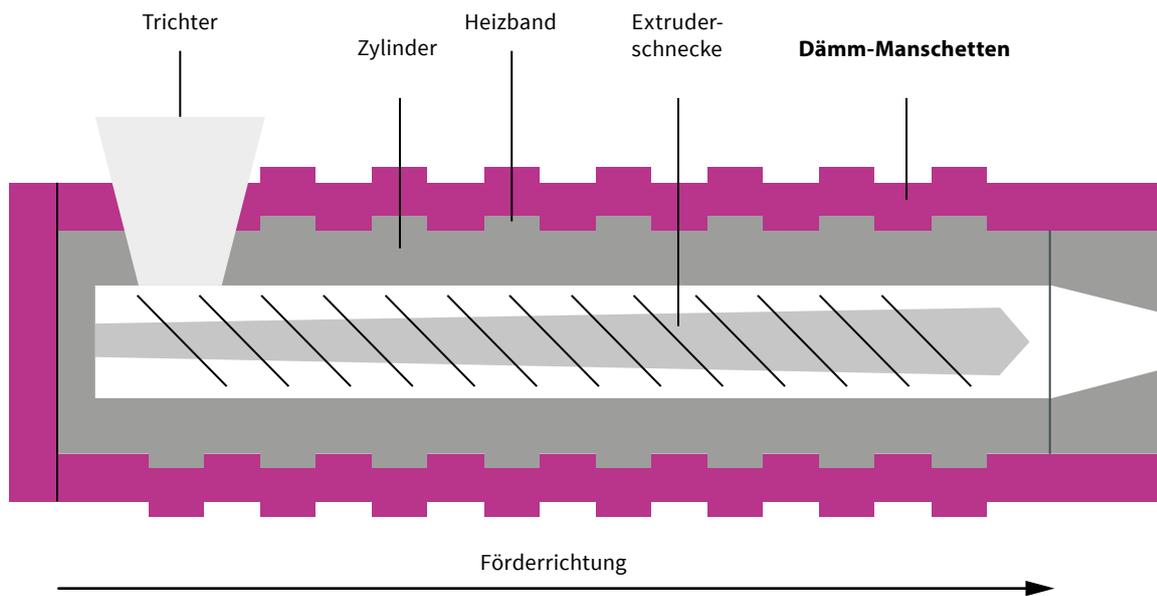


Abbildung 16: Wärmedämmung an einer Extrusionsmaschine. Quelle: dena

### 4.3 Warmwasser- und Dampfsysteme

Dampf wird als Prozesswärme, beispielsweise für die Dränplattenherstellung und Rohrspülung in der Kunststoffverarbeitung, genutzt. Es lohnt sich zu prüfen, ob dafür die Nutzung klimafreundlicher Wärmequellen wie Abwärme (siehe Kapitel 4.1), Solarthermie oder Hochtemperaturwärmepumpen zur Nutzung der Umweltwärme möglich ist. Mit modernen Kesseln werden Nutzungsgrade von 85 bis 90 Prozent erreicht, da die Abwärme beispielsweise zur Speisewasservorerwärmung (Economizer) oder Vorwärmung der Verbrennungsluft genutzt wird. Bei alten Kesseln hingegen liegt der Nutzungsgrad lediglich im Bereich zwischen 60 und 70 Prozent.<sup>24</sup> Häufig ist neben dem Nutzungsgrad Überdimensionierung eine Ursache für hohe Energiekosten des Kessels und des Dampfsystems, daher ist eine kritische Überprüfung der erforderlichen Kesselleistung wichtig.

Bei Dampf- und Heißwasserkesseln ist regelmäßiges Absalzen und Abschlammen erforderlich, um eine zu hohe Salzkonzentration zu vermeiden und die Ablagerung zu verringern. So kann die Kesselwasserqualität gewährleistet werden. Mit dem Absalz- und Abschlammwasser gehen jedoch Wärmeverluste einher, die möglichst gering gehalten werden sollten. Mit einer automatischen Absalzregelung durch Messung der Leitfähigkeit des Wassers können Einsparungen von bis zu 5 Prozent erreicht werden.

Weitere Einsparungen können durch Wärmerückgewinnung des Absalzwassers erzielt werden.<sup>25</sup> Wenn möglich sollte Heißwasser anstelle von Dampf eingesetzt werden, da die Dampferzeugung mit hohen Umwandlungsverlusten verbunden ist. Benötigen einzelne Verbraucher sehr hohen Druck, kann es sinnvoll sein, für diese einen eigenen, dezentralen Dampferzeuger zu betreiben. Bei diskontinuierlichen Verfahren sind Wärme- und Dampfspeicher sinnvoll.

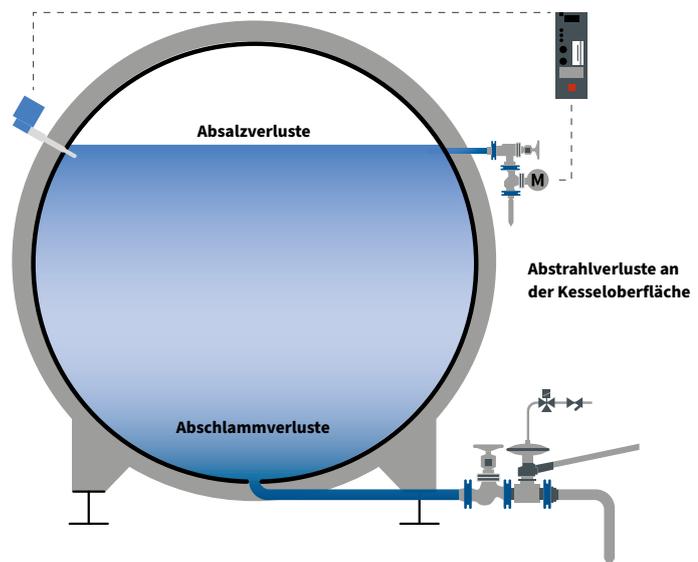


Abbildung 17: Wärmeverluste bei Dampf- und Heißwasserkesseln. Quelle: dena

<sup>24</sup> HmUKLV (2011), S. 2

<sup>25</sup> Herpertz et al. (2002), S. 87



### Innovatives Verfahren

Hochtemperaturwärmepumpen bieten die Möglichkeit, nicht nutzbare industrielle Abwärme auf ein höheres Temperaturniveau zu heben, sodass sie für Raumheizung, Bereitstellung von Prozesswasser oder Dampf bis hin zu Trocknungs- und Destillationsanwendungen genutzt werden können. Mit offenen oder semioffenen Wärmepumpensystemen (thermische und mechanische Brüdenverdichter) kann bei Quelltemperaturen von 70 bis 80 °C Prozessdampf bzw. -wärme mit einem Temperaturniveau von bis zu 200 °C erzeugt werden.<sup>26</sup>

**Tipp:** Kondensat sollte nach Möglichkeit immer zurückgeführt werden. Ist dies nicht der Fall, muss Frischwasser unter Energieeinsatz neu aufbereitet werden. Mit Kondensatrückführung ist es möglich, den Wärmebedarf zu 15 Prozent zu verringern. Gleichzeitig können die Wassergebühren reduziert werden.<sup>27</sup>

Angesichts der seit 2021 geltenden CO<sub>2</sub>-Bepreisung bietet neben Abwärmenutzung der Einsatz von Solarthermie und Umweltwärme anstelle von fossilen Brennstoffen einen ökologischen und ökonomischen Ansatz. Für Investitionen in solare Prozesswärme erhalten Betriebe Förderzuschüsse im Rahmen der Bundesförderung Energieeffizienz in der Wirtschaft. Mehr Infos zur Fördermöglichkeit finden Sie in [Kapitel 6](#).

## 4.4 Betriebsinterne Abwärmenutzung durch Abwärme-Upcycling

Eine in der bisherigen Praxis oft umgesetzte wirtschaftliche Maßnahme ist die innerbetriebliche Verwendung der Abwärme für Heizzwecke am Produktionsstandort. Als Abwärmequelle bietet sich das Kühlwasser im Kältekreislauf an ([siehe auch Abschnitt 3.5](#)). Das Kaltwasser (Vorlauf) kühlt die Werkzeuge und Produkte ab, nimmt dabei die Wärme auf und strömt zurück zur Kältemaschine (Rücklauf), wo es erneut gekühlt wird und wieder als Vorlauf zum Einsatz kommt. Als Wärmeabnehmer bieten sich die Werks- und Bürogebäude an. Normalerweise werden zur Raumheizung und Warmwasseraufbereitung der Werksgebäude Kessel mit fossilen Brennstoffen (Erdgas oder Heizöl) eingesetzt.

Durch Abwärmenutzung zur Gebäudebeheizung bzw. Trinkwassererwärmung können einerseits fossile Brennstoffe zur Wärmeerzeugung eingespart und zugleich die Kältelast der Kältemaschine verringert werden. Die im Betrieb anfallende Prozessabwärme mit niedrigen Temperaturen von ca. 15 bis 25 °C lässt sich mittels einer Wärmepumpe auf ein höheres Temperaturniveau anheben und dem Temperaturbedarf entsprechend einsetzen. Folgendes Praxisbeispiel zeigt, wie diese Maßnahme erfolgreich umgesetzt wurde.

<sup>26</sup> dena (2014b), Wärmeerzeuger, S. 12

<sup>27</sup> Herpertz et al. (2002), S. 84



### Best Practice

Ein Kunststoffverarbeiter (Mittelstand) produziert Energie- und Sanitärsysteme. Am Produktionsstandort werden PE-Behälter mit einem Fassungsvermögen von bis zu 3.000 Liter hergestellt. Eine Produktionshalle des Werkes wurde durch zwei ältere Ölkessel beheizt. Im Referenzjahr 2006 wurden ca. 159.000 Liter Heizöl benötigt. Als Teil der Optimierung wurde ein Kessel durch drei Sole-/Wasser-Wärmepumpen mit jeweils 220 kW Wärme- und 180 kW Kälteleistung ersetzt. Die Wärmepumpen wurden durch Prozesskühlwasser (Abwärme) mit ca. 12 °C als Wärmequelle betrieben. Die Abwärme aus dem Prozesskühlwasser wird mittels Wärmepumpen in Heizenergie mit 50 °C umgewandelt und zur Beheizung der Produktionshalle genutzt. Das Prozesskühlwasser wird durch den Energieentzug von ca. 12 auf 6 °C abgekühlt und kann somit wieder als Kaltwasser dem Kältekreislauf zugeführt und für den Fertigungsprozess genutzt werden. Hierdurch wird die Kältemaschine um ca. 21 Prozent entlastet. Durch die Maßnahme können 80 Prozent Heizöl zum Heizen und 40 Prozent Strom im Kühlprozess eingespart werden. Damit ergibt sich eine jährliche CO<sub>2</sub>-Einsparung von über 546 Tonnen. Die Amortisationszeit für die Investition von rund 250.000 Euro betrug ca. 2 Jahre.<sup>28</sup>



Abbildung 18: Abwärmenutzung aus der Prozesskühlung zur Raumheizung mittels Wärmepumpe. Quelle: Roth Werke GmbH

**Tipp:** Die für die Maschinen- und Produktabkühlung abgeführten Wärmeströme in der Kunststoffverarbeitung liegen meistens auf einem relativ niedrigen Temperaturniveau. In vielen Betrieben wird diese Abwärme mit niedriger Temperatur ohne weitere Nutzung an die Umgebung abgegeben bzw. abgeführt. Eine Wärmesenke mit Wärmebedarf auf niedrigem Temperaturniveau ist z. B. eine Fußbodenheizung, die bereits mit Wärme von rund 30 °C arbeitet. Außerdem kann durch Abwärme-Upcycling das niedrigere Temperaturniveau mittels Wärmepumpen angehoben und zu betriebsinternen Heizzwecken eingesetzt werden.

<b>Branche</b>	Kunststoffverarbeitung
<b>Technologie</b>	Abwärmenutzung mittels Wärmepumpen zur Raumheizung
<b>Wärmepumpentyp</b>	Sole/Wasser
<b>Heizleistung</b>	660 kW (3 × 220 kW)
<b>Art der Wärmequelle</b>	Prozesskühlung
<b>Wärmequellentemperatur</b>	12 °C
<b>Art der Wärmesenke</b>	Heizung
<b>Wärmesenktemperatur</b>	50°C
<b>Energieeinsparung</b>	1.656 MWh pro Jahr
<b>CO<sub>2</sub>-Einsparung</b>	546 Tonnen pro Jahr
<b>Investition</b>	250.000 Euro
<b>Inbetriebnahme</b>	2011
<b>Amortisationszeit</b>	ca. 2 Jahre

Tabelle 5: Überblick des Praxisbeispiels Abwärmenutzung mittels Wärmepumpen. Quelle: dena

<sup>28</sup> dena (2013)

## 4.5 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

Kunststoffverarbeitende Unternehmen benötigen Energie in Form von elektrischer Energie, Kälte und Wärme. Letztere sind zum Teil gegenläufig, d. h., im Winter wird mehr Wärme und im Sommer mehr Kälte benötigt, während der Bedarf an elektrischer Energie vergleichsweise konstant ist. Eine Kraft-Wärme-Kopplung-Anlage (KWK) bzw. ein Blockheizkraftwerk (BHKW) erzeugt thermische und elektrische Energie gleichzeitig. In Kombination mit einer Sorptionskältemaschine kann ein BHKW zu einer Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) erweitert werden und so energieeffizient und wirtschaftlich ganzjährig zur Deckung des Energiebedarfs der Kunststoffverarbeiter betrieben werden.

Die kleinsten KWKK-Anlagen bieten eine elektrische Leistung von 5 kW,<sup>29</sup> eine Wärmeleistung von 15 kW und eine Kälteleistung von 10 kW. Größere Leistungen sind je nach Anlage möglich. Die KWKK-Anlage kann optimal an den benötigten Bedarf von Strom, Wärme und Kälte angepasst werden. Die gleichzeitige Nutzung der Energieformen führt zu einem Gesamtwirkungsgrad von über 90 Prozent.<sup>30</sup> Zur ersten groben Abschätzung der Investitionskosten kann bei kleinen Anlagen von knapp 4.500 Euro/kW Kälteleistung und bei großen Anlagen von bis zu rund 1.500 Euro/kW ausgegangen werden.<sup>31</sup> Eine KWKK-Anlage ermöglicht eine höhere jährliche Betriebsdauer des BHKW und sorgt für eine bessere Ausnutzung der Investition. Somit kann die höhere Anfangsinvestition mittelfristig (in ca. 2 bis 5,5 Jahren) durch die eingesparten Betriebskosten gegenüber getrennter Stromerzeugung (Strombezug) und Kälteerzeugung ausgeglichen werden.<sup>32</sup> Darüber hinaus kann die Wirtschaftlichkeit durch Förderzuschüsse verbessert werden.



### Best Practice

Ein kunststoffverarbeitender Betrieb stellte seine Kälteerzeugung aufgrund von hohem Stromverbrauch von Kompressionskältemaschinen (KKM) auf KWKK um. Dafür wurde eine Adsorptionskältemaschine (AdKM) mit 90 kW Kälteleistung und Wasser als natürlichem Kältemittel eingesetzt. Das BHKW deckt den gesamten Strombedarf des Betriebs, und die BHKW-Abwärme wird zu 70 Prozent für die Kühlung und zu 30 Prozent zum Heizen eingesetzt. Neun Spritzgießmaschinen und drei Pressen werden mit 86 kW Kälteleistung gekühlt. Die Serverraumkühlung erfolgt über die übrigen 4 kW der AdKM. Die überschüssige Abwärme wird im Winter für die Fußbodenheizung der Produktionshalle genutzt. Durch den Einsatz des KWKK-Systems kann eine jährliche Einsparung von 50.000 Euro Energiekosten und 30 Prozent CO<sub>2</sub>-Emissionen erzielt werden (siehe auch Abbildung 19).<sup>33</sup>

**Tipp:** Eine KWKK-Anlage ist mit hohen Investitionskosten verbunden, ermöglicht jedoch eine gleichzeitige Erzeugung und Nutzung von Strom, Wärme und Kälte vor Ort. Dadurch kann neben der Verbesserung der Energieeffizienz auch der CO<sub>2</sub>-Ausstoß reduziert werden. Durch den ganzjährigen Betrieb des BHKW und die damit verbundene höhere Betriebsdauer kann die höhere Anfangsinvestition mittelfristig (in ca. 2 bis 5,5 Jahren) durch die eingesparten Betriebskosten gegenüber getrennter Stromerzeugung (Strombezug) und Kälteerzeugung ausgeglichen werden.

<sup>29</sup> ASUE (2019), S. 5

<sup>30</sup> ASUE (2019), S. 4

<sup>31</sup> ASUE (2019), S. 11

<sup>32</sup> ASUE (2019), S. 12

<sup>33</sup> Mickan (2018)

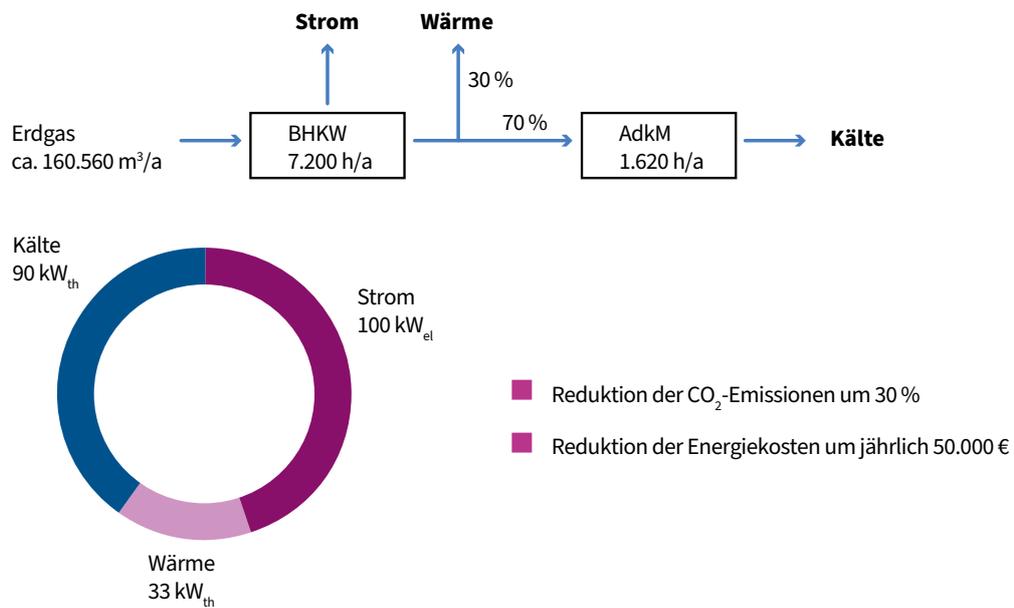


Abbildung 19: Projektbeispiel Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung einer KWKK-Anlage.  
 Quelle: eigene Darstellung nach Karoline Mickan (2018)



# 05

## QUERSCHNITTS- TECHNOLOGIEN

Querschnittstechnologien zeichnen sich dadurch aus, dass sie branchenübergreifend einsetzbar sind. Ihr Energieeffizienzpotenzial wird im Folgenden kurz vorgestellt.

## 5.1 Antriebssysteme

Mit einem Anteil von ca. 60 Prozent ist Strom der größte Energieträger in der Kunststoffverarbeitung. Der größte Anteil der elektrischen Energie wird in den Produktionsmaschinen zur Kunststoffplastifizierung verwendet. Davon ist der Großteil des Stromverbrauchs auf die Antriebe der Schnecken zurückzuführen, der zum Teil in Reibungswärme für die Plastifizierung umgewandelt wird.

Diese elektrischen Systeme haben häufig ein wirtschaftliches Energieeffizienzpotenzial von 30 Prozent und mehr.<sup>34</sup> Zur systematischen Verringerung des Stromverbrauchs ist eine Betrachtung des gesamten Antriebssystems sinnvoll, da der Gesamtwirkungsgrad entscheidend ist. Dieser berechnet sich durch die Multiplikation der Teilwirkungsgrade der einzelnen Antriebskomponenten: Elektromotor, Kraftübertragung, Blindleistungskompensation, Arbeitsmaschine sowie Steuerung und Regelung.

Die Effizienz der elektrischen Antriebe spielt eine wichtige Rolle für die kunststoffverarbeitende Branche, insbesondere angesichts des Zuwachses von vollelektrischen Spritzgieß- bzw. Hybridmaschinen. Durch den Einsatz hocheffizienter Motoren können die Stromkosten deutlich gesenkt werden.

Seit Juli 2021 gilt die „Verordnung zur Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an Elektromotoren und Drehzahlregelungen“ der Europäischen Kommission (EU 2019/1781). In Tabelle 6 sind die derzeit und die zukünftig geltenden Mindestanforderungen an das Effizienzniveau (IE) in Abhängigkeit von der Nennausgangsleistung und der Polzahl aufgelistet.

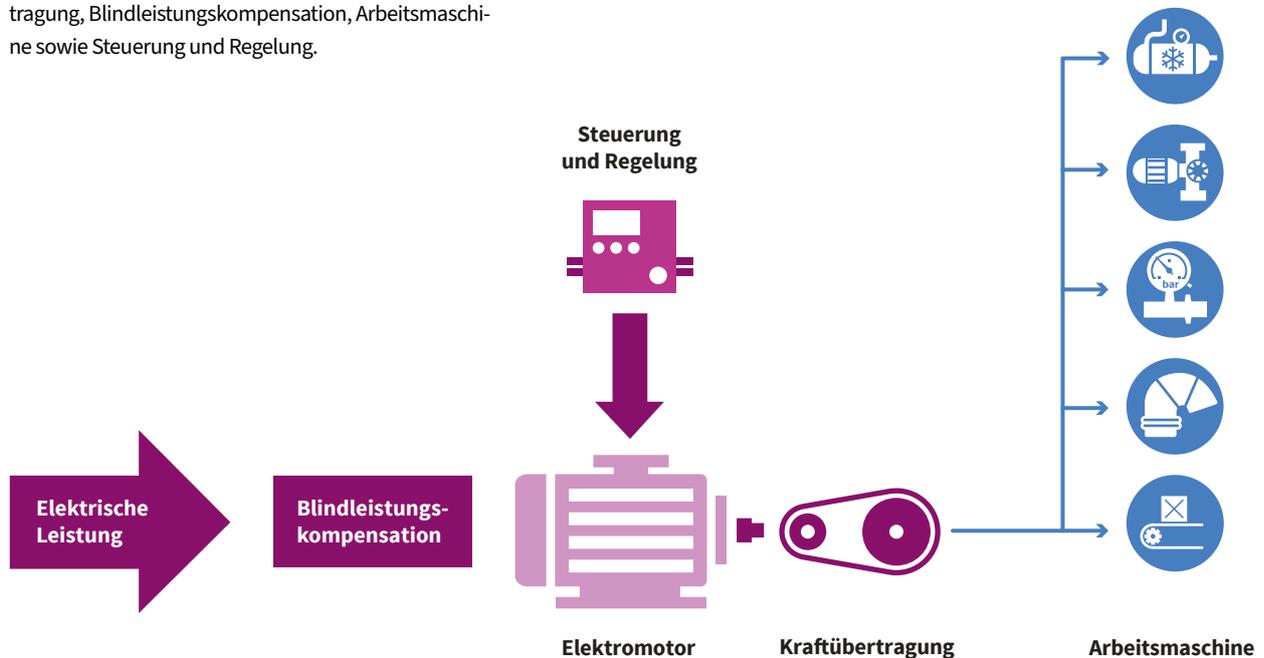


Abbildung 20: Komponenten eines elektrischen Antriebs. Quelle: dena

<sup>34</sup> dena (2013c), S. 5

Dreiphasenmotoren

	Mindestanforderung	Verpflichtend
Dreiphasenmotoren	Motoren mit Nennausgangsleistung 0,75 – 375 kW	Seit Januar 2017
	Drehzahlgeregelte Motoren mit Nennausgangsleistung 0,75 – 375 kW	
	Motoren mit Nennausgangsleistung 0,75 – 1.000 kW	Ab Juli 2021
	Motoren mit Nennausgangsleistung 0,12 – 0,75 kW	
	Motoren mit Nennausgangsspannung 0,75 – 200 kW	Ab Juli 2023
	Ex-eb-Motoren mit erhöhter Sicherheit 0,12 – 1.000 kW	
	Einphasenmotoren Nennausgangsleistung min. 0,12 kW	

Tabelle 6: Anforderungen an das Energieeffizienzniveau bei Elektromotoren gemäß Verordnung (EU) 2019/1781 der Kommission vom 01.10.2019. Quelle: dena

**Tipp:** Oft werden Motoren nicht bedarfsgerecht betrieben. Dies liegt häufig an zu hohen Sicherheitsfaktoren bei der Auslegung, einer fehlenden Leistungssteuerung für den Teillastbetrieb oder vermeidbaren Leerlaufphasen. Die Folgen sind ein unnötig hoher Energieverbrauch und somit hohe Betriebskosten. Hier können ein Frequenzumrichter und eine Steuerung für Motoren entgegenwirken. Dadurch lassen sich beispielsweise bei Kühlwasserpumpen oder Gebläsen bis zu 10 Prozent der Stromkosten einsparen.<sup>35</sup>



**Best Practice**

Ein Betreiber von Extrusionsanlagen hat im Rahmen einer grundlegenden Erneuerung und Modernisierung die alten Antriebe an Extruderanlagen ausgetauscht. Dabei wurden ein Frequenzumrichter zur Drehzahlregelung sowie IE4-Motoren eingebaut. Durch die Umrüstung konnten 75 Prozent der jährlichen Energiekosten eingespart werden.<sup>36</sup>

<sup>35</sup> Wamsbach (2017), S. 59

<sup>36</sup> Kunststoffe (2016)

## 5.2 Pumpensysteme

Kunststoffverarbeiter benötigen für die Dosierung und Compoundierung, aber auch die Kühlung der eingespritzten Kunststoffmasse eine Vielzahl unterschiedlicher Pumpen, die auf die entsprechenden Kunststoffe und Prozessstufen der Anlage abgestimmt werden müssen.

Energieeffizienzpotenziale bestehen in nahezu jedem Pumpensystem. Pumpen können bei schlechter Wartung bis zu 15 Prozent an Wirkungsgrad verlieren.<sup>37</sup> Dies kann unterschiedliche Ursachen haben, etwa Korrosion und Ablagerungen in Rohrleitungen, undichte Armaturen, zugesetzte Filter oder ein Komponententausch ohne anschließende Neuberechnung der Anlagenauslegung. Gut aufeinander abgestimmte Systembestandteile sind das Schlüsselement für geringe Gesamtkosten. Energieeffizienzmaßnahmen sollten zunächst dort vorgenommen werden, wo sie die größte Wirkung erzielen, etwa beim Rohrleitungssystem. Schrittweise arbeitet man sich dann zum Anfang der Systemkette vor, bis hin zum Antriebsmotor bzw. zur Regelung.

Für den energieeffizienten Einsatz einer Pumpe ist die Betrachtung der sogenannten Pumpenkennlinie wichtig, die das Betriebsverhalten der Pumpe darstellt. Aus der Kennlinie wird ersichtlich, welche Volumenströme die Pumpe bei verschiedenen anstehenden Gegendrücken fördern kann. Die Anlagenkennlinie beschreibt das Verhältnis zwischen dem Förderstrom (Q) und der Förderhöhe (H) des Systems.

**Tipp:** Hydraulische Spritzgießmaschinen mit servohydraulischen Antrieben haben einen geringeren Energiebedarf als Maschinen mit unregulierten Pumpen. Über den Umrichter des servohydraulischen Systems werden Druck und Volumenstrom der Pumpe geregelt. Dadurch kann der Energieeinsatz bedarfsgerecht angepasst und durchschnittlich etwa 30 Prozent Energieeinsparung bei Spritzgießmaschinen erreicht werden.<sup>38</sup>

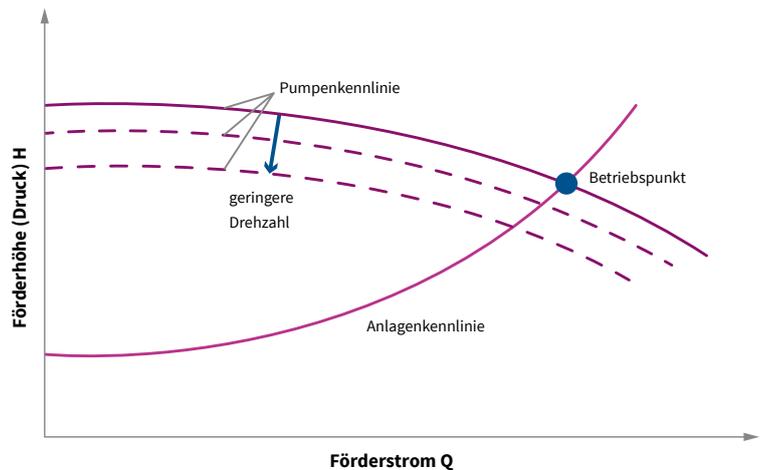


Abbildung 21: Verschieben der Pumpenkennlinie einer Kreiselpumpe durch Drehzahlregelung. Quelle: dena

Der maximal benötigte Förderstrom und die entsprechende Förderhöhe definieren zusammen den Auslegungsbetriebspunkt der Pumpe. Dieser ist bei der Planung so exakt wie möglich festzulegen. Die meisten Pumpen können mit geeigneter Regelung, wie beispielsweise Drehzahlregelung, einen weiten Betriebsbereich im Q/H-Diagramm abdecken. Über die Pumpendrehzahl  $n$  besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Förderstrom Q, Förderhöhe H und Leistung der Pumpe P:

- Der Förderstrom ist proportional zur Drehzahl:  $Q \sim n$
- Der Druck ist proportional zum Quadrat der Drehzahl:  $H \sim n^2$
- Der Leistungsbedarf ist proportional zur 3. Potenz der Drehzahl:  $P \sim n^3$

Wird im aktuellen Betrieb beispielsweise nur ein halb so großer Förderstrom benötigt, halbiert man mit einer entsprechenden Regelung die Drehzahl. Dadurch benötigt man nur noch ein Viertel des Drucks und ein Achtel der Leistung. Dieser Zusammenhang zeigt die Bedeutung der Energieeffizienzpotenziale durch Drehzahlregelung. Durch eine solche Optimierung der Regelung können durchschnittlich 35 Prozent des Energieverbrauchs von Pumpensystemen eingespart werden.<sup>39</sup>

**35%**

Prozent des Energieverbrauchs von Pumpensystemen können durch eine Optimierung der Regelung durchschnittlich eingespart werden.

<sup>37</sup> dena (2013d), S. 5

<sup>38</sup> Blesl (2017), S. 435

<sup>39</sup> dena (2013d), S. 17

## 5.3 Druckluftsysteme

Druckluft kommt in der kunststoffverarbeitenden Industrie auf vielfältige Art und Weise zur Anwendung, beispielsweise für Granulatförderung und -trocknung sowie für Formgebung (Blasformen) beim Extrusionsblasformverfahren. Sie verursacht bis zu 10 Prozent der Gesamtenergiekosten einer Spritzgießanlage. Eine Optimierung des Druckluftsystems kann bis zu 50 Prozent Energieeinsparungen erzielen.<sup>40</sup>

Sehr großes Potenzial für Energieeinsparungen liegt in der Erneuerung bzw. Optimierung der Druckluftanlage inklusive Abwärmenutzung. Zunächst sollten die Verbraucher, die Druckluft nutzen, identifiziert und im Hinblick auf die Parameter Druck sowie Druckluftmenge und -qualität bewertet werden. Danach können die Systemkomponenten bestmöglich auf die Verbraucher eingestellt und das System als Ganzes optimiert werden.

Die unterschiedlichen Druckluftanwendungen benötigen oft verschiedene Druckniveaus. Erfordern einzelne Verbraucher einen höheren Druck, so sollte für sie ein eigenes Netz oder eine dezentrale Druckerhöhung verwendet werden. Durch 1 bar Druckabsenkung können Einsparungen von 6 bis 10 Prozent realisiert werden.<sup>41</sup>

Rund 90 Prozent der elektrischen Antriebsenergie von Druckluftkompressoren fallen in Form von Abwärme an. Diese Abwärme beträgt je nach Art des Kompressors zwischen 60 und 110 °C und kann nutzbar gemacht werden. Sie lässt sich in das Heizsystem einspeisen oder für die Trinkwassererwärmung verwenden.

Bei ölgeschmierten Schraubenverdichtern wird dafür das Öl aus dem Ölkühler über einen Wärmetauscher geführt, der das Heizungswasser bis auf 70 °C erwärmen kann. Die Nutzung zur Trinkwassererwärmung auf 60 °C ist das ganze Jahr über möglich.<sup>42</sup>

Um einen Druckabfall im Netz zu verringern und auf diese Weise Materialabtrag und unnötig hohen Energieverbrauch zu vermeiden, sollte auf folgende Aspekte geachtet werden:

- Leckagen identifizieren und beseitigen
- Ablagerungen beseitigen
- Kurze Wege: Ringleitung statt Sternverteilung
- Übermäßig viele Rohrbiegungen vermeiden, z. B. Spiralschläuche in der Gussbearbeitung
- In großzügig dimensionierten Leitungen rostfreie Werkstoffe verwenden

In folgender Tabelle sind Maßnahmen zur Optimierung eines Druckluftsystems und die dadurch erzielbaren Einsparungen aufgelistet.

Maßnahmen	Energieeinsparpotenzial
Leckageüberprüfung	durchschnittlich 20 %
Übergeordnete Steuerung	bis zu 20 %
Absenkung Betriebsdruck um 1 bar	6–10 %
Kupplung nach Kugelhahn-Prinzip	bis zu 11 %

Tabelle 7: Energieeffizienzmaßnahmen und -potenzial im Druckluftnetz, Quelle: dena



### Innovatives Verfahren

Bei Druckluftnetzen, die über Jahre hinweg gewachsen sind, kann es hohe Leckageraten geben. Innovative Produkte tragen zur Automatisierung und Digitalisierung der Ortung sowie der Zustandsüberwachung bei. Zum Einsatz kommen hier flexible Module, die den Verbrauch überwachen, die Druckluft an produktionsfreien Tagen absperren und ein definiertes Stand-by-Drucklevel halten. Nach dem Absperren kann eine automatische Ortung und Erkennung von Leckagen erfolgen. Dadurch können in der Regel 20 bis 30 Prozent des Energieverbrauchs eingespart werden.<sup>43</sup>

Durch 1 bar Druckabsenkung können Einsparungen von **6–10%** realisiert werden.

<sup>40</sup> ExxonMobil (2018), S. 11

<sup>41</sup> Franke (2019), S. 92

<sup>42</sup> Bosse et al. (2016), S. 40

<sup>43</sup> Franke (2019), S. 92



## 5.4 Beleuchtungssysteme

Der Stromverbrauch durch die Beleuchtung macht in der Kunststoffindustrie bis zu 5 Prozent des Gesamtstromverbrauchs aus. Energieeffizienzmaßnahmen in diesem Bereich haben den Vorteil, dass sie während des Betriebs und mit kurzen Amortisationszeiten umgesetzt werden können. Der Energieverbrauch lässt sich durch den Einsatz hocheffizienter Leuchtmittel wie z. B. LED-Lampen und Lampen mit Reflektoren und elektronischen Vorschaltgeräten deutlich reduzieren.

Die Optimierung einer Beleuchtungsanlage erzielt dann das beste Ergebnis, wenn möglichst alle Komponenten mit einbezogen werden: in der Lichtlenkung optimierte Leuchten, Lampen mit hoher Lichtausbeute, elektronische Vorschaltgeräte mit hohen Wirkungsgraden, intelligente Lichtsteuerung sowie eine optimale Tageslichtnutzung. Werden alle Potenziale einer technischen Umrüstung voll ausgeschöpft, so lassen sich dadurch innerhalb des Beleuchtungssystems Energie- und Kosteneinsparungen von bis zu 70 Prozent erzielen.<sup>44</sup>

**Bis zu  
70%**

Energie- und Kosteneinsparungen lassen sich innerhalb des Beleuchtungssystems erzielen, wenn alle Potenziale einer technischen Umrüstung voll ausgeschöpft werden.

<sup>44</sup> dena (2014a), S. 4

# 06

## FINANZIELLE FÖRDERUNG

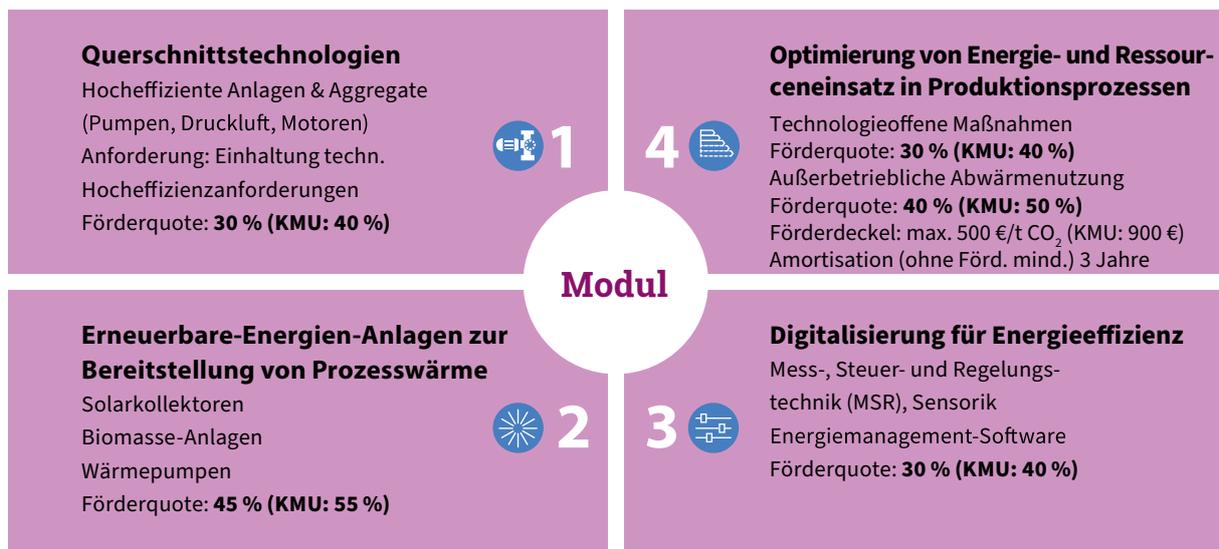


Abbildung 22: Die vier Module der Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft. Quelle: dena

Investitionen in energieeffiziente Technologien und Prozesse werden vom Staat umfangreich gefördert. Ein unbürokratisches Förderprogramm mit attraktiven Förderquoten stellt die Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft dar. Sie richtet sich an alle Branchen, Betriebsgrößen und Investitionsvorhaben zur Einsparung von Energie und Ressourcen bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen. Bei der zu beantragenden Förderung steht entweder ein direkter Investitionszuschuss beim BAFA oder ein Kredit mit Tilgungszuschuss bei der KfW zur Wahl. Eine weitere Förderoption bietet der Förderwettbewerb von VDI/VDE-IT, über welchen ebenfalls direkte Investitionszuschüsse ausgezahlt werden.

Insgesamt stehen vier Fördermodule zur Verfügung (siehe Abbildung 22). Bei den für Kunststoffbetrieben relevanten Modulen 1, 3 und 4 beträgt der Fördersatz jeweils 30 Prozent. Bei Maßnahmen zur außerbetrieblichen Abwärmenutzung beträgt der Fördersatz sogar 40 Prozent, während Prozesswärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien mit 45 Prozent der förderfähigen Investitionsausgaben gefördert wird. Kleine und mittlere Unternehmen erhalten zusätzlich einen Bonus in Höhe von 10 Prozent auf die förderfähigen Kosten. Die Förderung ist bei Querschnittstechnologien auf 200.000 Euro pro Vorhaben, in den anderen Modulen auf maximal 15 Mio. Euro pro Vorhaben begrenzt.

Die Höhe des Darlehens kann bis zu 100 Prozent der förderfähigen Investitionskosten betragen, in der Regel bis zu 25 Mio. Euro pro Vorhaben.

Der Förderwettbewerb beinhaltet die gleichen Fördertatbestände, bietet aber die Chance auf einen höheren Fördersatz. Dieser kann bei bis zu 60 Prozent liegen. Die Förderentscheidung orientiert sich an der sogenannten Fördereffizienz (Wettbewerbskriterium). Je höher die Einsparung und je geringer die beantragte Förderung ist, desto höher ist die Chance, zu den geförderten Projekten einer Wettbewerbsrunde zu gehören. Die Höhe der Förderung ist auf maximal 10 Mio. Euro pro Vorhaben begrenzt.

**Tipp:** Praktische Hinweise zur Bundesförderung Energieeffizienz, eine Informationsgrafik zu diesem Förderprogramm sowie eine Arbeitshilfe zur Ermittlung der förderfähigen Investitionsausgaben finden sich auf der dena-Projektwebsite [Leuchttürme CO<sub>2</sub>-Einsparung](#).

**Tipp:** Im Rahmen der „Bundesförderung der Energieberatung für Nichtwohngebäude, Anlagen und Systeme“ (EBN) werden Zuschüsse in Höhe von bis zu 80 Prozent für qualifizierte und anbieterunabhängige Energieeffizienzberatungen in KMU gewährt.

**Tipp:** Weitere Förderprogramme enthält die [Förderdatenbank des BMWK](#).



# Literaturverzeichnis

**AGEB – Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2020):** Bilanzen 1990–2018. <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2017.html>, Zugriff am: 30.11.2021.

**ALBA (2020):** Resources saved by recycling. Berlin.

**aluplast (2019):** ECO.PROFILE – Nachhaltige Extrusion. Abschlussbericht im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms. Karlsruhe.

**ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch (2019):** KWKK – Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung. Kraft, Wärme und Kälte aus einer Anlage. Bonn.

**Blesl, Markus und Kessler, Alois (2017):** Energieeffizienz in der Industrie. Berlin.

**Bosse, Manuel, Dippel, Martina, Kaczinsky, Thomas, Leischner Frank und Steinhäuser, Mirko (2016):** Prozessketten-orientierte Ermittlung der temperaturabhängigen Energieeinsätze und Abwärmepotenziale in der Gießerei-Industrie. Unveröffentlichter Ergebnisbericht.

**Conversio Market & Strategy (2020):** Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019. Mainaschaff.

**dena – Deutsche Energie-Agentur (2012):** Handbuch Lastmanagement. Vermarktung flexibler Lasten: Erlöse erwirtschaften – zur Energiewende beitragen. Berlin.

**dena – Deutsche Energie-Agentur (2013a):** Bewerbung Energy Efficiency Award 2013. Roth Werke GmbH. Unveröffentlicht.

**dena – Deutsche Energie-Agentur (2013b):** Ratgeber Energiemanagement. In: dena (Hrsg.), Handbuch energieeffiziente Querschnittstechnologien. Berlin.

**dena – Deutsche Energie-Agentur (2013c):** Ratgeber Motoren und Antriebssysteme. In: dena (Hrsg.), Handbuch energieeffiziente Querschnittstechnologien. Berlin.

**dena – Deutsche Energie-Agentur (2013d):** Ratgeber Pumpen und Pumpensysteme. In: dena (Hrsg.), Handbuch energieeffiziente Querschnittstechnologien. Berlin.

**dena – Deutsche Energie-Agentur (2014a):** Ratgeber Beleuchtung. In: dena (Hrsg.), Handbuch energieeffiziente Querschnittstechnologien. Berlin.

**dena – Deutsche Energie-Agentur (2014b):** Ratgeber Wärmeerzeuger und Wärmeversorgungssysteme. In: dena (Hrsg.), Handbuch energieeffiziente Querschnittstechnologien. Berlin.

**dena – Deutsche Energie-Agentur (2020):** Energy Efficiency Award. Preisträger der Kategorie Think big! Komplexe Energieeffizienzprojekte. Overath SLM GmbH und Overath EPP GmbH. Berlin.

**Destatis (2020):** Unternehmensstrukturstatistiken und Statistik für kleine und mittlere Unternehmen nach dem EU-Unternehmensbegriff. URL: <https://www.destatis.de/DE/Methoden/WISTA-Wirtschaft-und-Statistik/2020/06/unternehmensstrukturstatistiken-062020.html>, Zugriff am: 30.11.2021.

**Destatis (2021):** Statistiken zur Kunststoffindustrie in Deutschland. <https://de.statista.com/themen/3094/kunststoffindustrie-in-deutschland/#dossierKeyfigures>, Zugriff am: 30.11.2021.

**DKM Dodendorfer Kunststoff- und Metalltechnik (2019):** Wir sind Energiegewinner. Magdeburg.

**ExxonMobil (2018):** Leitfaden Energiesparen für Spritzgießbetriebe. Hamburg.

**Franke, Simone (2019):** Taschenbuch der Gießerei Praxis 2020. Berlin.

**Gerstel, Jörg (2015):** Hydrauliköl in der Spritzgießmaschine – mehr Effizienz ist möglich. <https://www.kunststoff-magazin.de/spritzgiessen/hydraulikoel-in-der-spritzgiessmaschine----mehr-effizienz-ist-moeglich.htm>, Zugriff am: 30.11.2021.

**Herpertz, Stefan, Meyer, Jörg und Trautmann, Andreas (2002):** Rationelle Energienutzung in der Kunststoff verarbeitenden Industrie – Leitfaden für die betriebliche Praxis. 1. Auflage, Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden.

**HMU KL V – Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2011):** Niedertemperatur- und Brennwertkessel. Energiespar-Informationen. 12 Wissenswertes über moderne Zentralheizungsanlagen. Wiesbaden.

**IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e. V. (2019):** Leitfaden des Runden Tisches. Eco Design von Kunststoffverpackungen. Praxisbeispiel „Joghurtbecher“. Bad Homburg.

**KM Kunststoffmagazin (2012):** PP statt PA in motornaher Anwendung. Kosten und Gewicht beim Saugrohr gesenkt. <https://www.kunststoff-magazin.de/thermoplaste/ansaugrohr-aus-pp/pp-statt-pa-in--motornaher-anwendung.htm>, Zugriff am 30.11.2021.

**KM Kunststoff Magazin (2011):** Energiekosten trimmen. Aktives Lastmanagement in der Kunststoffverarbeitung. In: Kunststoff Magazin. 08/11.

**KM Kunststoff Magazin (2017):** Energieeffizienz in der Kunststoffverarbeitung. <https://www.kunststoff-magazin.de/automatisierung/energieeinsparung---kostensenkungen-und-foerdermoeglichkeiten-ausschoepfen.htm>, Zugriff am: 30.11.2021.

**König, Michael (2020):** Einsatz von VG22-Hydraulikölen in Spritzgießmaschinen. Einfach mal Strom sparen – ein Erfahrungsbericht aus der Praxis. In: Kunststoffe 2/2020.

**Kunststoffe (2014):** Kosten bei der Blasfolienextrusion senken. Energieeffizienz auch zum Nachrüsten. <https://www.kunststoffe.de/produkte/uebersicht/beitrag/kosten-bei-der-blasfolienextrusion-senken-energieeffizienz-auch-zum-nachruesten-959744.html>, Zugriff am: 30.11.2021.

**Kunststoffe (2016):** Extrusionsanlage spart 75 % Energiekosten. <https://www.kunststoffe.de/produkte/uebersicht/beitrag/extrusionsanlage-spart-75-energiekosten-passgenaue-antriebstechnik-und-einfacher-zugriff-auf-antrieb-1410014.html>, Zugriff am: 30.11.2021.

**Mayer, Ralf (2019):** Effiziente Granulattrocknung im Vakuum. In: Plastverarbeiter. 09/19. <https://www.plastverarbeiter.de/markt/effiziente-granulattrocknung-im-vakuum.html>, Zugriff am: 30.11.2021.

**Mickan, Karoline (2018):** Kunststoffhersteller setzt auf KWKK. Kühlen und Heizen mit maßgeschneidertem Energiecontainer. In: KKA Kälte Klima Aktuell. 03/2018. Kapitel Technik. [https://www.kka-online.info/artikel/kka\\_Kunststoffhersteller\\_setzt\\_auf\\_KWKK\\_3177101.html](https://www.kka-online.info/artikel/kka_Kunststoffhersteller_setzt_auf_KWKK_3177101.html), Zugriff am: 30.11.2021.

**Piterek, Robert (2018):** Energie und Rohstoffe sparen durch digitales Gattieren. In: GIESSEREI 105. 06/2018.

**Universität Kassel (2011):** Das Potential solarer Prozesswärme in Deutschland. Teil 1 des Abschlussberichtes zum Forschungsvorhaben „SOPREN – Solare Prozesswärme und Energieeffizienz“. Kassel.

**Wamsbach, Roman (2017):** Windgebläse aus einem Guss. Moderne Antriebslösung spart Energie bei der Ofenbefuerung in der Gießerei-Industrie. In: GIESSEREI 104. 07/2017.

Checkliste	Seite	Erledigt	Prüfen	irrelevant
<b>Systematisch Energie Sparen</b>				
Umsetzung eines Energiemanagementsystems	9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schulung der Mitarbeitenden zu den am Arbeitsplatz relevanten Energieeffizienzmaßnahmen	14	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Einrichtung eines Vorschlagwesens für Mitarbeitende	14	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Einberufung eines Teams zur kontinuierlichen Verbesserung der Produkte unter Ökodesignanforderungen	14-16	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Prozesstechnologien in der Produktion</b>				
Einsatz von Vakuumtrocknern zur energieeffizienten Granulattrocknung	19	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Einsatz niedrigviskoser Hydrauliköle für Spritzgießmaschinen	20-21			
Wiederverwendung der Hydrauliköle durch Ölkonditionierung	21			
Einsatz elektromechanisch angetriebener Spritzgießmaschinen	22			
Einführung eines energieeffizienten Kühlsystems durch				
■ die Verwendung selbstlernender Anlagensteuerung	26	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
■ Abwärmenutzung	25, 26	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
■ Freikühlung	25	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
■ umweltfreundliche Kältemittel	25			
Einführung von Lastmanagement	29	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Nutzung von Abwärmequellen</b>				
Wärmedämmung von wärmeleitenden Bauteilen, Rohrleitungen und Anlagen	32	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Abwärmenutzung mittels Wärmepumpen für Heizzwecke		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
■ Prozessintern z. B. zur Vorwärmung und Trocknung	34 f.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
■ Betriebsintern z. B. zur Warmwasseraufbereitung und Gebäudeheizung	34 f.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Überprüfung der Möglichkeit zur Nutzung einer KWKK-Anlage	36	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Querschnittstechnologien</b>				
Bedarfsgerechter Betrieb der Elektromotoren mit Leistungssteuerung für Teillastbetrieb	40 f.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Einsatz von hocheffizienten Elektromotoren des Effizienzniveaus IE 3 oder IE 4	39 f.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anpassung der Förderaufgabe und Pumpenleistung an den tatsächlichen Bedarf	41	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kontrolle und gegebenenfalls Senkung des Druckniveaus aller Verbraucher (bei Bedarf Errichtung eines separaten Druckluftnetzes für Großverbraucher)	42	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Überprüfung des Druckluftsystems auf Leckagen bei Erzeugung, Aufbereitung, Verteilung, Anschlüssen und Anwenden	42	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Einsetzen von Heißwasser anstelle von Dampf, wenn möglich	33	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kondensatrückführung bei der Dampferzeugung	34	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

# Impressum

## Herausgeber:

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)  
Chausseestraße 128 a  
10115 Berlin  
T: +49 (0)30 66 777-0  
F: +49 (0)30 66 777-699  
info@dena.de  
www.dena.de

## Autorinnen und Autoren:

Armin Kühn, Projektleiter, dena  
Junxia Su, dena  
Carsten Ernst, ÖKOTEC Energiemanagement GmbH  
Knut Grabowski, ÖKOTEC Energiemanagement GmbH  
Dr. Kirsten Kubin, ÖKOTEC Energiemanagement GmbH

## Redaktion:

Oliver Jorzik, dena  
Dr. Lena Thomsen, dena

## Konzeption & Gestaltung:

Heimrich & Hannot GmbH

## Bildnachweise:

Titel – shutterstock.com/Pixel B, S. 3 – dena/photothek, S. 3 – Gesamtverband  
Kunststoffverarbeitende Industrie e. V. (GKV), S. 21 – shutterstock/Moreno Soppelsa,  
Seite 24 – Overath SLM GmbH, S. 31 – shutterstock/Apple Eyes Studio, Seite 35 – Roth Werke  
GmbH, S. 37 – shutterstock/Zoran Orcik, S. 43 – shutterstock/Vasily Smirnov

## Stand:

02/2022

## Bitte zitieren als:

Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2022): „Systematische Energieeffizienz steigern  
und CO<sub>2</sub>-Emissionen senken in der Kunststoffindustrie“

Alle Rechte sind vorbehalten. Die Nutzung steht unter dem Zustimmungsvorbehalt der dena.



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

Die Veröffentlichung dieser Publikation erfolgt im Auftrag  
des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz.  
Die Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) unterstützt  
die Bundesregierung in verschiedenen Projekten zur  
Umsetzung der energie- und klimapolitischen Ziele im  
Rahmen der Energiewende.