

Auf dem Weg zu energieautarken Werken: Entwicklung innovativer Strategien zur Steigerung der Energieeffizienz und zum Einsatz von regenerativen Energien in der Produktion

Projektleitung
Prof. Dr. Udo Gieseler

Wiss. Mitarbeit
Daniel Kühler

Partner
Ball Packaging Europe GmbH (BPE), Bonn
Effizienz-Agentur NRW (EFA NRW), Duisburg
Der Innovationsstandort e.V., Dortmund

Zeitraum
2009–2011

Förderung
Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (MIWF)
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung (EFRE)
FH-EXTRA 2009

Kontakt
Prof. Dr. Udo Gieseler
Fachbereich Informations- und Elektrotechnik
Fachhochschule Dortmund
Sonnenstraße 96
44139 Dortmund
Tel.: 0231 9112-282
E-Mail: udo.gieseler@fh-dortmund.de

Das Ziel des Vorhabens besteht in der Entwicklung einer ganzheitlichen und zukunftssicheren Strategie zur Senkung des Energieverbrauchs und zur Nutzbarmachung von regenerativen Energien in der Produktion. Im Ergebnis wird eine Strategie zur Realisierbarkeit eines energieautarken Produktionswerks dargestellt, wobei der Energieverbrauch des Werks durch Einsparungen gesenkt und durch regenerative Energien, welche „on site“ oder im Umfeld erzeugt werden, gedeckt wird.

Diese Strategie wird in Zusammenarbeit mit dem Bonner FuE-Zentrum des Getränkedosenherstellers BPE am Beispiel der Werke in Hermsdorf und Weißenthurm entwickelt. Wesentliche Schritte der Produktion sind: Tiefziehen des Dosenkörpers, waschen, trocknen, mehrfaches lackieren bzw. bedrucken und jeweils trocknen. Für diesen Prozess wird auf Basis von Erdgas Wärmeenergie erzeugt sowie Strom für Motoren und Druckluftgeneratoren eingesetzt.

Der vorliegende Bericht soll einen Einblick in die Vorgehensweise des Projekts geben. Dazu wird der Begriff des physikalischen Mindestbedarfs eingeführt und auf die Bereiche Trockner, Beleuchtung und Druckluft angewendet.

Physikalischer Mindestbedarf

Zur Beurteilung der Einsparpotenziale einzelner Prozessschritte wird eine Größe benötigt, welche den minimal möglichen Energiebedarf beschreibt. Dieser physikalische Mindestbedarf wird unter Beachtung der technisch-betrieblichen Eignung berechnet. Die Ziele dabei sind das Einhalten der gewünschten Produktqualität sowie eine hohe

Produktivität. Die Systemgrenze zur Berechnung des physikalischen Mindestbedarfs wird jeweils eng um den jeweils betrachteten Prozess gelegt. Dadurch bleiben eventuell mögliche Energierückgewinnungen bei diesem Ansatz zunächst unberücksichtigt.

Die Differenz zwischen Mindestbedarf und einem realen Prozess ist durch prinzipiell vermeidbare Verluste gekennzeichnet.

Trockner

Die Wasch-Trockner sind Durchlauföfen mit konvektiver Umlufttrocknung und einer Temperatur von circa 210°C. Aufgabe der Trockner ist die Verdampfung des anhaftenden Wassers der Dosen direkt nach dem Waschvorgang.

Für die Berechnung des physikalischen Mindestbedarfs wird angenommen, dass der Ofen aufgrund einer starken Wärmedämmung einen vernachlässigbaren Wärmeverlust hat. Der physikalische Mindestbedarf ist demnach die Verdampfungsenergie, um das Wasser auf Siedetemperatur zu erwärmen und zu verdampfen. Hinzu kommt die technisch unvermeidbare Energie zur Erwärmung der Dosen. Messungen im Werk Weißenthurm haben ergeben, dass pro Dose mindestens 1,2 g Wasser verdampft werden müssen, das anhaftende Wasser beim Einlauf in den Ofen eine Temperatur von 15°C hat und die Dosen selbst während des Durchlaufs auf 120°C erhitzt werden. Damit ergibt sich für eine Dose:

Bei 2000 Dosen pro Minute bedeutet dies eine Leistung von 148 kW. In Abbildung 1 ist diese Lei-

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{Mindestbedarf}} &= Q_D + Q_W + Q_{\text{verd}} \\
 &= m_D \cdot \bar{c}_{p,Fe} \cdot (T_{D,A} - T_{D,E}) + m_w \cdot c_w \cdot (100^\circ\text{C} - T_{w,E}) + m_w \cdot \Delta h_v \\
 &= \left(27,3 \text{ g} \cdot 0,46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (120 - 15) \text{ K} + 1,2 \text{ g} \cdot 4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (100 - 15) \text{ K} + 1,2 \text{ g} \cdot 2257 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \\
 &= 4,45 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

Q_D	Energie, um Dosen zu erwärmen	(Wh)
Q_W	Energie, um Wasser auf Siedetemperatur zu erwärmen	(Wh)
Q_{verd}	Verdampfungsenergie	(Wh)
m_D	Gewicht einer Dose	(kg)
$\bar{c}_{p,Fe}$	Mittlere spez. Wärmekapazität Stahl	(kJ/kgK)
$T_{D,A}$	Austrittstemperatur der Dosen	(K)
$T_{D,E}$	Eintrittstemperatur der Dosen	(K)
m_w	Gewicht anhaftendes Wasser	(kg)
c_w	spez. Wärmekapazität Wasser	(kJ/kgK)
$T_{w,E}$	Eintrittstemperatur des Wassers	(°C)
Δh_v	Verdampfungsenthalpie Wasser	(kJ/kg)

Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

stung der tatsächlich gemessenen Gesamtleistung von 514 kW sowie den Verlusten gegenübergestellt. Hieraus wird deutlich, dass ein erhebliches Einsparpotenzial bei den Waschtrocknern besteht.

Beleuchtung

Zur Beurteilung der Energieeffizienz der Beleuchtung kann die Lichtausbeute η genutzt werden. Sie ist das Verhältnis von Lichtstrom und elektrischer Leistung in Lumen pro Watt (lm/W). Der physikalische Maximalwert der Lichtausbeute η beträgt $\eta_{\max} = 683 \text{ lm/W}$ bei photopischem Sehen. Dieser ist jedoch nur für monochromatisches Licht und ohne Produktion von Wärme erreichbar. Zur Berechnung des physikalischen Mindestbedarfs der Beleuchtung sollte von weißem Licht, z.B. Tageslicht, ausgegangen werden. Hierzu kann die CIE-Normbeleuchtung D65 im sichtbaren Bereich $\lambda = 380 \text{ nm}$ bis 700 nm genutzt werden, im Folgenden mit $D_{65}(\lambda)$ bezeichnet (siehe [1] und Abb. 2). D65 ist eine Normlichtart, die das mittlere Tageslicht repräsentiert. $V(\lambda)$ ist der für die Berechnung notwendige spektrale Hellempfindlichkeitsgrad des Auges.

Für die Lichtausbeute ergibt sich dann folgender Maximalwert:

In den Produktionshallen in Hermsdorf sind

$$\eta_{\max, \text{weiß}} = \eta_{\max} \cdot \frac{\int_{380}^{700} D_{65}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{700} D_{65}(\lambda) d\lambda}$$

$$\eta_{\max, \text{weiß}} = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \cdot 0,3523$$

$$\eta_{\max, \text{weiß}} = 241 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$$

insgesamt 3891 Lampen installiert: 247 Quecksilberdampflampen (QDL) mit einer Effizienz von 55 lm/W und 78 QDL mit 52 lm/W, weiterhin 2336 T8-Leuchtstofflampen (LSL) mit konventionellem Vorschaltgerät mit einer Effizienz von 73 lm/W und 1230 LSD mit 45 lm/W. Diese führen auf einen jährlichen Energieverbrauch von 2,6 GWh.

Zur Bestimmung des physikalischen Mindestbedarfs der Beleuchtung wird davon ausgegangen, dass der erforderliche Lichtstrom Φ gleich bleibt und sich nur die Anschlussleistung der Lampe auf den Minimalwert vermindert. Die potenziell eingesparte Energie gegenüber dem aktuellen Stand ergibt sich dann wie folgt:

$$\varepsilon = \frac{247 \cdot 55 \text{ lm/W} + 78 \cdot 52 \text{ lm/W} + 2336 \cdot 73 \text{ lm/W} + 1230 \cdot 45 \text{ lm/W}}{3891 \cdot 241 \text{ lm/W}}$$

$$\varepsilon = 26\%$$

Das bedeutet, dass der physikalische Mindestbedarf der Beleuchtung in Hermsdorf nur etwa $26\% \times 2,6 \text{ GWh} = 0,68 \text{ GWh}$ pro Jahr beträgt.

Die Energieeffizienz der Beleuchtung wird jedoch nicht allein von der Auswahl energieeffizienter Leuchtmittel bestimmt. Lampen, Leuchtmittel und Raumeigenschaften wirken bei der Beleuchtung zusammen, so dass bei einer Optimierung des Gesamtsystems (auch mit heute schon verfügbarer Technik) weitere Einsparungen zu realisieren sind.

Druckluft

Die Nutzung der Druckluft ist mit sehr hohen Verlusten behaftet und damit sehr kostenintensiv. Bei einem idealen Druckluftsystem ohne Leckageverluste und ideal eingestellten Komponenten sind im Wesentlichen drei Einflüsse für die immer noch hohen Verluste verantwortlich: Der Wassergehalt von Luft, der Leistungsbedarf für die Verdichtung und der Druckabfall im System.

Die höchsten Verluste eines Druckluftsystems verursacht aber die Druckluftherzeugung bzw. -nutzung. Formal sind die Prozesse „Verdichtung“ und „Expansion“ polytrope Zustandsänderungen, da irreversible Vorgänge (z.B. Reibung) mit berücksichtigt werden müssen. Eine untere Grenze für den Energiebedarf kann mit Hilfe der isothermen und isentropen reversiblen Zustandsänderung für die Verdichtung berechnet werden.

Zur Bestimmung des Energiebedarfs (technische Arbeit) betrachtet man die komprimierte Luft im Druckluftkompressor als ideales Gas im offenen System. Bei Zustandsänderungen offener Systemen ist die Änderung der Verdrängungsarbeit $p \cdot V$ (z.B. Einschub des Arbeitsmittels in den Druckraum) zu berücksichtigen. Hierzu wird anstelle der Zustandsgröße U (innere Energie) die Zustandsgröße Enthalpie $H = U + pV$ benutzt [2].

Für die spezifische technische Arbeit $w_{t,12}$ bei isentroper (adiabater) Verdichtung gilt:

$$w_{t,12} = \Delta(u + pv) = h_2 - h_1$$

$$w_{t,12} = \int_1^2 dh = \int_1^2 c_p dT = c_p (T_2 - T_1)$$

Die aufzuwendende technische Arbeit entspricht dann (siehe auch [3]):

$$W_{t,12} = m \cdot (h_2 - h_1) = \rho \cdot V \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = \rho \cdot V \cdot \frac{\chi}{\chi - 1} \cdot R \cdot (T_2 - T_1)$$

$$W_{t,12} = \rho \cdot V \cdot \frac{\chi}{\chi - 1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\chi - 1}{\chi}} - 1 \right]$$

χ	Isentropenexponent	1,4
R	Allgemeine Gaskonstante der Luft	0,287 kJ/kgK
T_1	Drucklufttemperatur vor der Kompression	293 K
p_1	Umgebungsdruck	1 bar
p_2	Betriebsdruck	bar
ρ	Dichte der Luft bei 20°C	1,204 kg/m³

Für die Druckänderung bei konstanter Temperatur (isotherme Zustandsänderung) gilt:

$$p \cdot v = R \cdot T = \text{const.}$$

Die aufzuwendende Arbeit für eine isotherme Verdichtung ergibt sich zu:

$$W_{12} = -\rho \cdot V \cdot \int_1^2 p \cdot dv = -\rho \cdot V \cdot R \cdot T \cdot \int_1^2 \frac{1}{v} \cdot dv = \rho \cdot V \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{v_1}{v_2} = \rho \cdot V \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}$$

In Abbildung 3 ist der spezifische Leistungsbedarf (W_{12}/\dot{V} bzw. $W_{t,12}/\dot{V}$) gegen das Druckverhältnis p_2/p_1 aufgetragen (in Anlehnung an [4]). Markiert sind ebenfalls die Nennwerte der Kompressoren bei BPE. Diese sind demnach zwar überwiegend im „guten Bereich“ nach dem Stand der Technik, jedoch gibt es thermodynamischen Optimum (isentropische Verdichtung) noch erhebliches Optimierungspotenzial.

Zusammenfassung

Anhand der Dosenproduktion bei BPE wurde aufgezeigt, welches Einsparpotenzial bei der Produktion gegeben ist. Die gewählten Beispiele Trocknen, Beleuchtung und Druckluft sind auch auf andere Produktionswerke übertragbar.

Im Rahmen des Projekts Energieautarke Werke konnte darüberhinaus gezeigt werden, dass bei BPE eine Vollversorgung durch erneuerbare Energien nach Umsetzung aller Effizienzmaßnahmen realisiert werden kann. Hierfür wäre jedoch im Mittel eine etwa 15-fache Werksfläche sowie ein Speichermanagement für Strom notwendig.

Die Berechnungen beruhen auf dem heutigen Stand des Produktionsablaufs sowie der heutigen Systeme zur Nutzung erneuerbarer Energie. Bei

entscheidenden technischen Fortschritten in einem oder beiden dieser Bereiche ist ein energieautarkes Produktionswerk durchaus realisierbar.

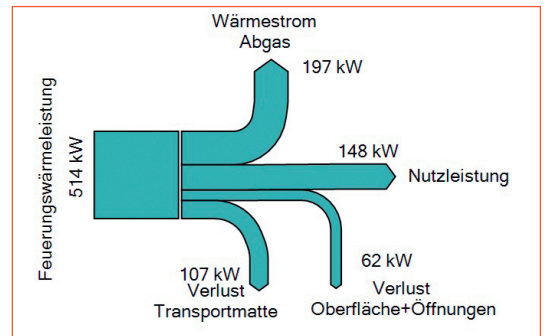


Abb. 1: Energiestromdiagramm für einen Trockner

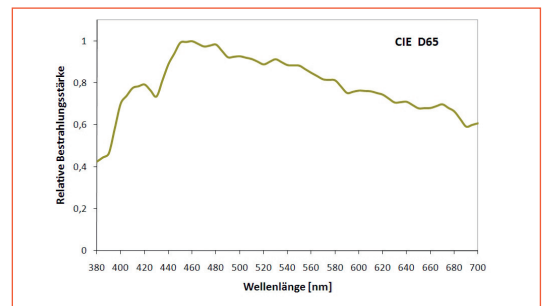


Abb. 2: Spektrum des Norm-Tageslichts D65 der CIE

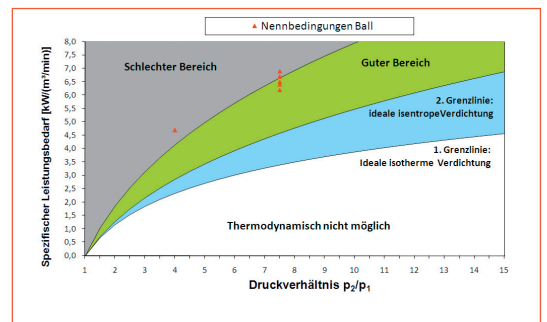


Abb. 3: Leistungsbedarf der Druckluftherzeugung bei BPE (Punkte) mit physikalischen bzw. technischen Grenzwerten (Linien)

Literatur

- [1] CIE: Commission internationale de léclairage (www.cie.co.at)
- [2] Rebhan E. (Hrsg.); Energie – Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie; Springer Verlag 2002; S. 137
- [3] Ruppelt E. (Hrsg.); Druckluft-Handbuch; 4. Auflage; Vulkan Verlag 2003
- [4] Fraunhofer ISI: Druckluft effizient, Fakten zur Druckluft, Kapitel II: Grundlagen Thermodynamik, Karlsruhe 2003 (www.druckluft-effizient.de)