

- Anordnung der Elemente der Fabrik nach logistischen Aspekten:
  - Minimierung der Durchlaufzeiten,
  - Minimierung der Transportaufwände,
- Minimierung des Flächenbedarfs oder
- Zusammenfassen von Maschinen mit ähnlichen Qualitätsanforderungen (z. B. Schwingungsfreiheit, Staubfreiheit).

Energieeffizienz spielte in diesem Zusammenhang nur in energieintensiven Branchen (Papier, Keramik, Chemie etc.) eine größere Rolle. Energieeffizienz wurde in den bisher geltenden Gestaltungsgrundsätzen und Planungszielen kaum berücksichtigt.

Energie wurde in der Fabrikplanung vor allem innerhalb der Planung von Ver- und Entsorgungssystemen betrachtet. Hierbei wurden die Ver- und Entsorgungssysteme auf Basis gegebener Anschlussleistungen der Produktionsanlagen und sonstiger (peripherer) Anlagen geplant. Eine gezielte Auswahl energieeffizienter Produktionsanlagen war bislang kein Planungsschwerpunkt. Daher fehlt bis dato auch weitgehend eine methodische Verknüpfung der technologisch orientierten Fabrikplanung mit den energietechnischen Spezialplanungen.

Auf Grund der im Kap. 1 beschriebenen Tendenzen gewinnt die Energieeffizienz derzeit auch in der weniger energieintensiven Stückgutindustrie – und namentlich im Automobilbau – zunehmend an Bedeutung.

## **4.2 Integration von Energieeffizienz-Aspekten in die Fabrikplanung**

### ***4.2.1 Handlungsansätze zur Energieeffizienz-Steigerung***

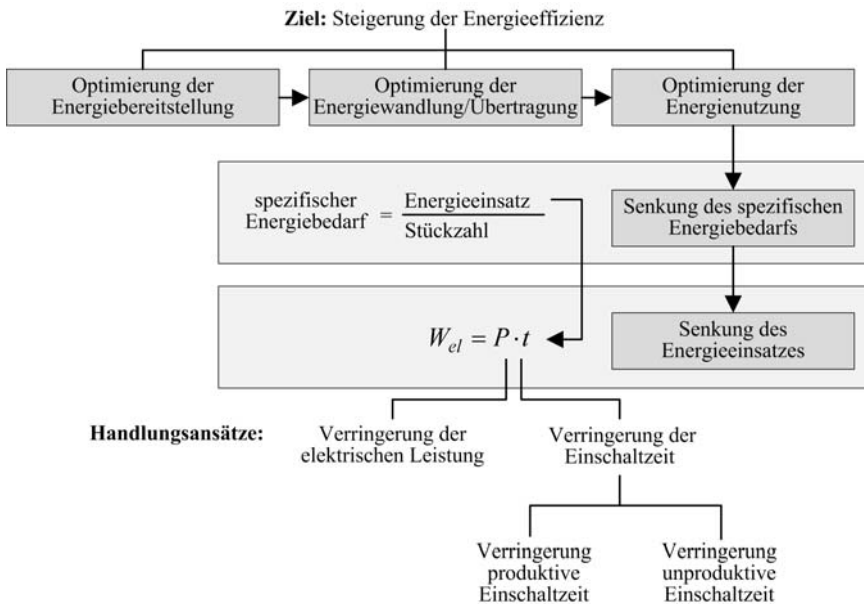
#### **4.2.1.1 Überblick**

„Passend zur Vielzahl von Prozessen und unterschiedlichen betriebsspezifischen Produktionsbedingungen gibt es ein kaum überschaubares Spektrum von technischen, betrieblichen oder organisatorischen Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz. Entsprechend kommt einer einfachen Systematisierung dieser Maßnahmen eine große Bedeutung zu.“ (Seefeldt et al. 2007)

Im Abschn. 1.1 wurde definiert, dass das System, welches bei definiertem Output den geringsten Energieeinsatz benötigt, die höchste Energieeffizienz aufweist.

Als Messgröße dient der spezifische Energiebedarf. Der spezifische Energiebedarf wird für den Vergleich von Prozessen, Betriebsmitteln und Produktionssystemen sowie als Planungsgröße genutzt. Der spezifische Energiebedarf lässt sich bei konstanter Stückzahl allein durch die Reduzierung des Energieeinsatzes senken. Bestimmungsfaktoren für den spezifischen Energiebedarf und somit für die Energieeffizienz sind im Einzelfall individuell zu ermitteln.

Dies soll zunächst am Beispiel der Elektroenergie erläutert werden (s. Abb. 4.8). Prinzipiell bestehen die Möglichkeiten, die Energiebereitstellung, die Übertragung und die Nutzung zu optimieren. Nachfolgend wird auf die Optimierung der Nutzung eingegangen: Die elektrische Arbeit ergibt sich aus der elektrischen Leistung über der Zeit (s. Gl. 3.36). Bestimmungsfaktoren der Energieeffizienz sind also die elektrische Leistung und die Einschaltzeit der elektrischen Verbraucher. Um die Energieeffizienz zu verbessern, gilt es, die Einschaltzeit, die Leistung oder beides zu verringern. Bei der Einschaltzeit können sowohl produktive als auch unproduktive Zeiten reduziert werden. Durch Optimierung von Produktionsverfahren und logistischen Abläufen können produktive Zeiten gesenkt werden (z. B. Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, kürzere Transportwege). Durch Verbesserung der Anlagensteuerung können Anlagen bedarfsweise ausgeschaltet werden, was unproduktive Zeiten bzw. Stand-by-Verbräuche vermeidet.

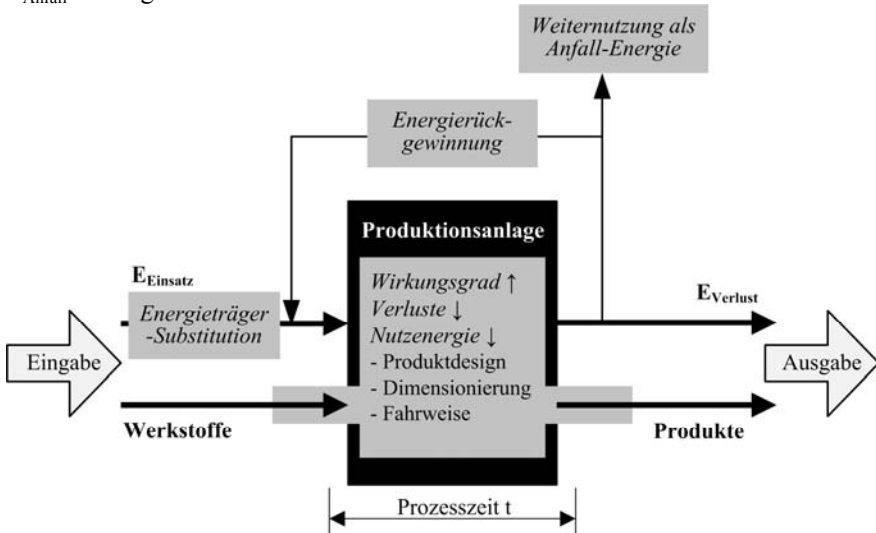


**Abb. 4.8.** Handlungsansätze zur Verbesserung der Energieeffizienz am Beispiel der Nutzung von Elektroenergie

Die Bestimmungsfaktoren der Energieeffizienz sind prozess- und anlagenspezifisch sowie abhängig von den eingesetzten Energieträgern. Eine allgemeingültige Identifikation konkreter Bestimmungsfaktoren ist nur schwer möglich. Aus die-

sem Grund werden hier Handlungsansätze vorgestellt, die auf einem allgemeinen Modell der Energieumwandlung in Produktionsanlagen beruhen.

Die Abb. 4.9 zeigt eine Produktionsanlage als Black Box, in der Energie und Werkstoffe transformiert werden. Als Eingabe werden der Energieeinsatz  $E_{\text{Einsatz}}$  und die Werkstoffe betrachtet. Als Ausgabe ergeben sich daraus die Produkte und die Verlustenergie<sup>21</sup>  $E_{\text{Verlust}}$ . Ein Teil der Verlustenergie kann als Anfall-Energie<sup>22</sup>  $E_{\text{Anfall}}$  weitergenutzt werden.



**Abb. 4.9.** Handlungsansätze zur Steigerung der Energieeffizienz in Produktionsanlagen

Als allgemeingültige Handlungsansätze zur Steigerung der Energieeffizienz in Produktionsanlagen ergeben sich:

- Substitution der eingesetzten Energieträger,
- Minderung des Bedarfs an Nutzenergie, z. B. durch:
  - energetisch optimierte Produktgestaltung,
  - energetisch optimierte Dimensionierung,
  - energiesparende Fahrweisen;
- Steigerung des Wirkungsgrads,
- Reduktion der Verlustenergie,
- Energierückgewinnung und
- Weiternutzung von Verlustenergie als Anfall-Energie.

<sup>21</sup> Als Energieverlust wird hierbei der aus einem System austretende, nicht im Sinne des Prozesses genutzte Teil der zugeführten Energie bezeichnet (VDI 2003).

<sup>22</sup> Summe der Abwärme von Personen, elektrischen Betriebsmitteln, prozesswärmetechnischen Anlagen, Warmwasseranlagen etc., die zur Wärmebilanz eines Raums beiträgt und nicht durch die Heizungsanlagen aufgebracht werden muss.

Die Handlungsansätze dienen dazu, in den Planungsaktivitäten Konzipieren und Synthese/Integration energieeffiziente Planungslösungen zu generieren bzw. Ansatzpunkte für die energetische Optimierung zu finden. Die Handlungsansätze lassen sich sowohl für Neu- und Erweiterungsplanungen als auch für die Überplanung bestehender Anlagen nutzen.

Nachfolgend werden die Handlungsansätze im Einzelnen erläutert.

#### **4.2.1.2 Substitution der eingesetzten Energieträger**

Energieträger können aus energetischen und aus Kostengründen substituiert werden. Energetisch sollten Energieträger mit einer günstigen Primärenergiebilanz bevorzugt werden (s. Abschn. 3.2).

Ein Beispiel ist der Ersatz von Elektroenergie durch Erdgas für die Warmwasserbereitung oder Prozesswärmeerzeugung (Hennicke 2005). Dabei kann Primärenergie bis zu einem Faktor von ca. 2,3 gespart werden (s. Abb. 3.4 und 3.5 im Abschn. 3.2).

#### **4.2.1.3 Minderung des Bedarfs an Nutzenergie**

##### *a) energetisch optimierte Produktgestaltung*

Die Produktgestaltung definiert bereits den Aufwand der Produktion und damit den Bedarf an Nutzenergie bei der Be- und Verarbeitung. Ansätze für eine energetisch optimierte Produktgestaltung sind:

- geringe Werkstückmassen (Einsparung von Schmelzaufwand beim Ur- und Umformen, Einsparung von Energie für den Transport),
- Formgebung, die eine energetisch günstige Fertigung zulässt (z. B. kurze Prozessketten, endformnahe Rohteile, wenig Verschnitt und wenig Spanvolumen),
- Formgebung, die eine einfache, energiesparende Reinigung im Produktionsprozess zulässt,
- energetisch günstig gestaltete Fügeverbindungen (z. B. geringe Querschnitte von Schweißverbindungen etc.),
- konstruktive Vorgabe von Stoff- und Oberflächeneigenschaften, die nur so viel wie nötig Stoffeigenschaftsänderungen und Oberflächenbehandlungen erfordern.

##### *b) energetisch optimierte Dimensionierung*

Unter der optimalen Dimensionierung ist eine den kommenden tatsächlichen Verhältnissen entsprechende Dimensionierung von Energieerzeugungs-, Energieverteil- und Energienutzungseinrichtungen zu verstehen. „Wenn die Planung vom Be-

triebsingenieur vorgenommen wird, besteht die Gefahr der Überdimensionierung oder der übermäßigen Reserven zur Begegnung von Störungen.“ (Aggteleky 1987) Aus möglichen Überdimensionierungen resultieren Teillastzustände mit schlechten Wirkungsgraden (Seefeldt et al. 2007).

Darüber hinaus erzeugt eine über den Bedarf installierte Versorgungsinfrastruktur energetische Leerlaufverluste und unnötige Investitionskosten. Ziel ist eine Dimensionierung der Anlagen und Versorgungsinfrastruktur, die dem heutigen und zukünftigen Bedarf entspricht.

### *c) energetisch optimierte Fahrweise*

Unter einer energetisch optimierten Fahrweise lassen sich zwei Optimierungsrichtungen zusammenfassen:

- Zum einen kann durch eine optimierte Auftragssteuerung ein energetisch günstiger Lastgang erzielt werden (z. B. Bildung von Auftragsblöcken zur Vermeidung von Leerlauf, Teillast und Stand-by-Zeiten, zeitversetztes Anfahren von Fertigungsanlagen).
- Zum anderen kann der Energiebedarf durch eine optimierte Anlagensteuerung gesenkt werden. Ziel einer energetisch optimierten Anlagensteuerung ist die Anpassung der Energieaufnahme an die aktuell abgeforderte Leistung (z. B. Kopplung von technischen Abluftanlagen an die SPS der Produktionsanlage, frequenzgeregelte Steuerung elektrischer Antriebe).

#### **4.2.1.4 Steigerung des Wirkungsgrads**

„Ein Wirkungsgrad ist der Quotient aus der nutzbaren abgegebenen Leistung und der zugeführten Leistung“ (VDI 2003), oder das Verhältnis zwischen nutzbarer abgegebener und zugeführter Arbeit (s. Gl. 3.8).

Der Wirkungsgrad misst die energetische Effizienz für einen bestimmten, meist den optimalen, Betriebspunkt des jeweiligen Prozesses oder der jeweiligen Anlage. Häufig können die Prozesse und Anlagen nicht über die gesamte Betriebszeit hinweg in diesem günstigen Betriebspunkt gefahren werden. Der Nutzungsgrad n bietet sich als alternative Kennzahl an. Deren Berechnung ähnelt der des Wirkungsgrads; für die zugeführte Energie und die Nutzenergie werden jedoch periodenbezogene Summen eingesetzt (z. B. Jahresverbrauch, Jahresnutzenergie).

$$n = \frac{W_{Nutz}}{W_{zu}} \quad (4.3)$$

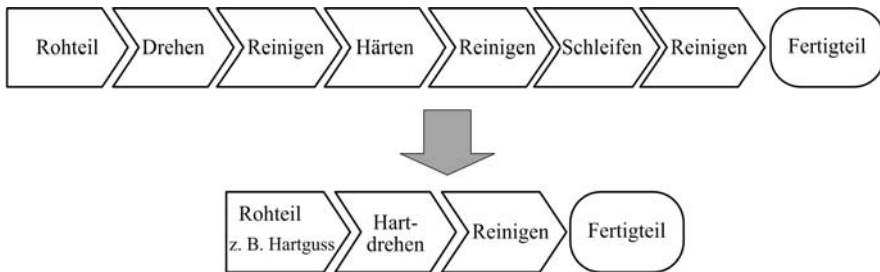
Um den Wirkungsgrad zu erhöhen, existieren wiederum mehrere generelle Lösungsansätze:

### Prozessintegration

Infolge der Multiplikation der Einzelwirkungsgrade zu einem Gesamtwirkungsgrad ist eine geringe Zahl von Energieumwandlungsstufen energetisch meist vorteilhaft (s. Gl. 3.9). Daher können verschiedene Möglichkeiten zur Verkürzung von Prozessketten dazu beitragen, den Gesamtwirkungsgrad in der Produktion zu erhöhen. Diese sind:

- Zusammenführen von mehreren Hauptprozessen zu einem Hauptprozess (z. B. Herstellung von Haupt- und Nebenformen in einem Umformprozess statt mehrerer spanender Prozesse),
- Integration von Hilfsprozessen in Haupt- oder übergeordnete Hilfsprozesse (z. B. prozessintegriertes Prüfen statt sequenzielles Fertigen – Reinigen – Prüfen).

Abbildung 4.10 illustriert den Handlungsansatz Prozessintegration an einem Beispiel: Eine konventionelle Prozesskette zur Herstellung gehärteter rotations-symmetrischer Teile wird durch eine verkürzte Prozessfolge ersetzt, in der Rohteile mit bereits ausreichender Härte eingesetzt werden und Schrupp-, Schlicht- und Feinbearbeitung auf einer Maschine erfolgen. Neben dem Härten entfallen auch mehrere (energieintensive) Reinigungsstufen.



**Abb. 4.10.** Verkürzen der Prozesskette am Beispiel Hartdrehen

### Substitution

Im Rahmen der Fabrikplanung kann dem Ansatz Steigerung des Wirkungsgrads vor allem durch die Auswahl von Anlagen und Anlagenkomponenten (z. B. Elektromotoren) mit einem hohen energetischen Wirkungsgrad entsprochen werden. Das Prinzip der Wirkungsgradverbesserung bezieht sich ebenfalls auf die Auswahl effizienter Verfahren (z. B. Stablasers vs. Scheibenlasers, Warmumformen vs. Kaltumformen) oder Materialien (z. B. Warmkleber vs. Kaltkleber).

### Prozesssicherheit/Fehlerrobustheit

Ausschuss, Fehlchargen und Nacharbeit konsumieren Energie, ohne einen adäquaten Nutzen zu generieren. Daher tragen sichere, fehlerrobuste Prozesse maßgeblich zur Energieeffizienz bei (Neugebauer 2008).

*Sophistication*<sup>23</sup>

Einige betriebliche Prozesse können durch die intelligente Nutzung natürlicher (kostenloser) Energie, Kräfte und Effekte realisiert werden. Hierzu gehören u. a. schwerkraftgetriebene Transporte, auf Sedimentation beruhende Abscheideprozesse, die solare Warmegewinnung, die Lüftung durch freie Konvektion sowie die natürliche Belichtung bzw. Verschattung.

**4.2.1.5 Reduktion von Verlusten**

„Der Energieverlust ist der aus einem System austretende, nicht im Sinne des Prozesses genutzte Teil der zugeführten Energie.“ (VDI 2003) Energieverluste setzen sich aus Umwandlungs-, Transport-, Regel-, Verteil- und Anwendungsverlusten entlang der gesamten Energieumwandlungskette zusammen (Offner 2001).

Die Ausprägung der Verluste erfolgt in drei Kategorien (Schieferdecker et al. 2006):

- direkt stoffgebundene Verluste (z. B. warmes Abwasser, heißes Abgas),
- indirekt stoffgebundene Verluste (z. B. Wärmehalt von Zwischenprodukten),
- diffuse Verluste (z. B. Wärmeverluste an der Oberfläche von Anlagen, Leckageverluste an wärmeführenden Leitungen, Reibungswärme).

Energieverluste gehen nach Gl. 4.4 in den Wirkungsgrad ein und werden deshalb prinzipiell schon vom Handlungsansatz Steigerung des Wirkungsgrads erfasst.

$$\eta = \frac{W_{Nutz}}{W_{zu}} = \frac{W_{zu} - W_{Ver.}}{W_{zu}} = 1 - \frac{W_{Ver.}}{W_{zu}} \quad (4.4)$$

Der Handlungsansatz Reduktion von Verlusten wird hier aber explizit vorgestellt, um auf folgende operationalisierte Ansätze hinzuweisen:

- Reduktion von Prozesstemperaturen,
- Verbesserung von Wärmeübertragungsprozessen (s. Abschn. 3.3.2),
- Verbesserung der Isolation von wärme- und kälteführenden Leitungen und Anlagenteilen,
- Reduktion von unproduktiven Einschaltzeiten (z. B. Stand-by),
- Reduktion von Reibungsverlusten sowie
- Vermeidung von Leckagen aus wärme- oder kälteführenden Leitungen und Anlagen durch regelmäßige Wartung und Instandhaltung.

---

<sup>23</sup> in Anlehnung an (von Gleich 1994)

#### 4.2.1.6 Energierückgewinnung

Nach der Energienutzung im Produktionsprozess und von anderen Verbrauchern verbleibt Energie, die zum Teil für eine erneute energetische Verwendung nutzbar gemacht werden kann. (Wohinz u. Moor 1989, Bundesamt für Konjunkturfragen 1992). Dabei ist zu prüfen, ob entsprechend:

- dem Medium,
- der anfallenden Energiemenge,
- dem zeitlichen Anfall/Verlauf,
- den örtlichen Gegebenheiten

geeignete Anwendungsmöglichkeiten gegeben sind (Wohinz u. Moor 1989). Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich z. B. aus:

- der Nutzung von Prozessabwärme zum Vorheizen von Bädern, Zuluftströmen etc.,
- der Rückgewinnung von Bremsenergie aus elektrischen Antrieben zur Netzspeisung.

#### 4.2.1.7 Weiternutzung von Anfall-Energie

Eine besondere Form der „Energierückgewinnung“ ist die Nutzung der spontan durch freie Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung an Räume übertragene Abwärme von Personen, elektrischen Betriebsmitteln, prozesswärmetechnischen Anlagen, Warmwasser- und anderen Anlagen zur Heizung. Diese, die Heizung unterstützende Abwärme, heißt Anfall-Energie.

Im Rahmen der Fabrikplanung ist darauf zu achten, dass diese Abwärme in die Wärmebilanz der Heizungsplanung aufgenommen wird und keine überflüssigen Heizungskapazitäten installiert werden. Gegebenenfalls gelingt es, Abwärmeströme mit einfachen Mitteln gezielt in zu beheizende Räume zu leiten (z. B. bei der Planung des Aufstellungsorts von wärmeabgebenden Aggregaten, bei der Zonierung von Gebäuden).

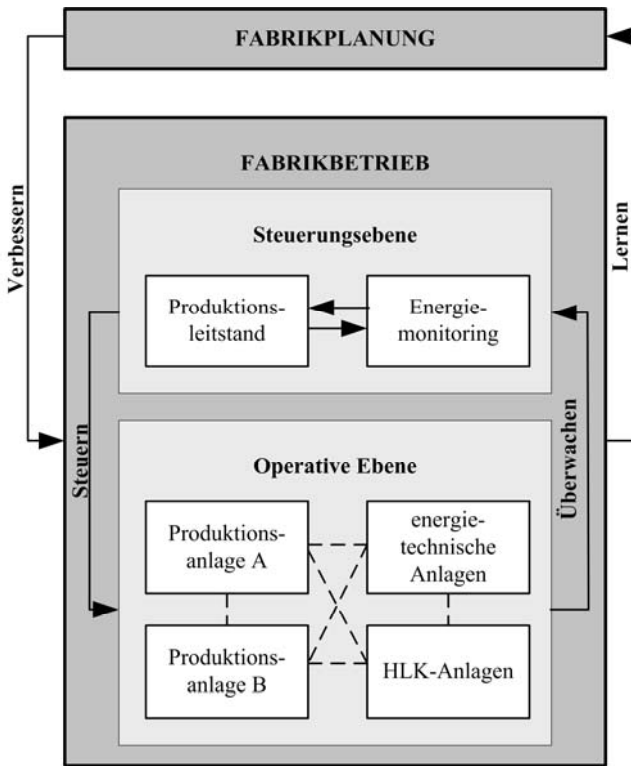
### 4.2.2 Rückkopplung zwischen Fabrikplanung und Fabrikbetrieb

Allein die Beschaffung von Energiedaten in den Ziel- und Konzeptphasen von Neu-, Erweiterungs- und Überplanungen ist oft mangelhaft. Nicht selten muss auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden, die vielfach geschätzt und häufig mit hohen Sicherheitszuschlägen behaftet sind. Deshalb ist es notwendig, die Planung energieeffizienter Fabriken eng mit dem Fabrikbetrieb, also mit energetischen Betrachtungen über den gesamten Fabriklebenszyklus (s. Abschn. 2.5), zu verknüpfen.



Abbildung 4.11 schlägt dazu zwei Regelkreise vor:

- zwischen der operativen und der Steuerungsebene im Fabrikbetrieb und
- zwischen dem Fabrikbetrieb und der Fabrikplanung.



**Abb. 4.11.** Regelkreise in der energieeffizienten Fabrik

Zwischen operativer Ebene und Steuerungsebene erfolgt die Überwachung des Energieverbrauchs durch ein entsprechendes Energiemonitoring. Die Informationen, die aus dem Energiemonitoring gewonnen werden (z. B. Lastspitzen), müssen in Zukunft noch stärker als Parameter für die Produktionssteuerung genutzt werden (z. B. Lastmanagement unter Nutzung von Anlagenleitständen). Das Energiemonitoring, die Erfassung und Bewertung von Energieverbräuchen, wird im Kap. 6 näher erläutert.

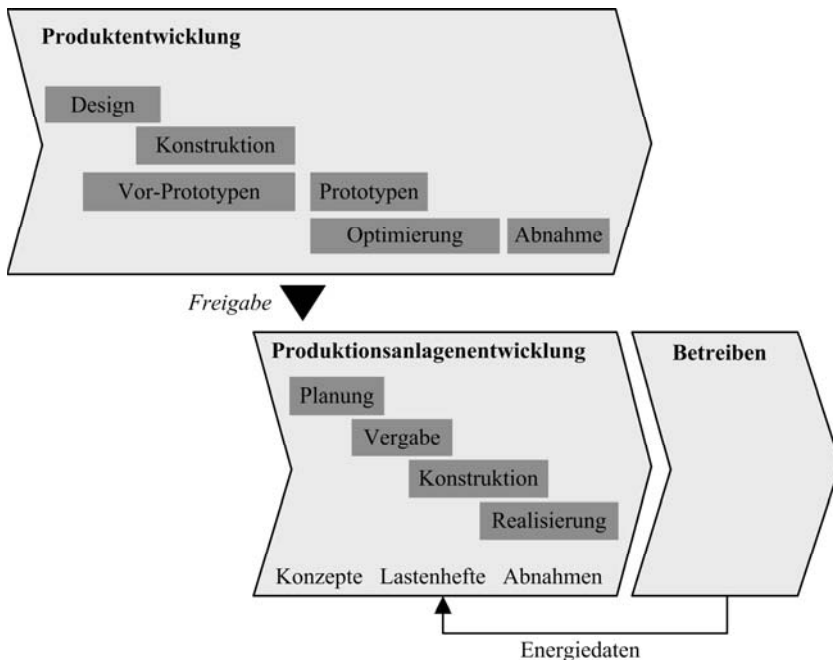
Zwischen dem Fabrikbetrieb und der Fabrikplanung ergibt sich ein Kreislauf der kontinuierlichen Verbesserung. Die Fabrikplanung lernt energetische Zusammenhänge aus dem Fabrikbetrieb kennen und generiert energetische Planungsdaten. Aus diesen Kenntnissen und deren kreativen Verarbeitung kann bei der nächsten Neu-, Erweiterungs- oder Überplanung die Energieeffizienz verbessert werden.

Für die dauerhafte Sammlung und Fortschreibung energetischer Planungsdaten unterbreitet Kap. 6 einen Vorschlag.

### 4.2.3 Simultane Produkt-, Prozess- und Anlagenplanung

Neben der methodischen Verknüpfung von Fabrikplanung und Fabrikbetrieb gilt es, die Planung von Produkt, Prozess und Produktionsanlagen aufeinander abzustimmen.

Abbildung 4.12 zeigt beispielhaft die simultane Produkt- und Produktionsanlagenentwicklung (Simultaneous Engineering) in der Automobilindustrie.



**Abb. 4.12.** Simultane Planung von Produkt und Produktionsanlage in der Automobilindustrie, in Anlehnung an (Hab u. Wagner 2006)

Beide Entwicklungsprozesse, die Produktentwicklung und die Produktionsanlagenentwicklung, enden mit dem Produktionsbeginn (SOP = Start of Production) bzw. der Markteinführung. Mit der Markteinführung bzw. dem Produktionsbeginn endet üblicherweise auch die Verantwortung der Planer (Hab u. Wagner 2006). Informationen aus der Nutzungsphase, wie Energieverbräuche und Energiekosten, fließen nicht in den Planungsprozess zurück.

Ein Schwerpunkt der energieeffizienzorientierten Fabrikplanung liegt daher in der Erweiterung der Planungsverantwortung bis hin zum Produktionsende (EOP = End of Production) (Müller et al. 2008). Energierelevante Informationen sind während des Fabrikbetriebs zu erfassen und in zukünftige Planungen zu integrieren (s. Abschn. 4.2.2).

Eine besondere Herausforderung liegt in der Beteiligung verschiedener Akteure. Während die übergreifende Fabrikplanung unternehmensintern oder von spezialisierten externen Planungsbüros erstellt wird, sind in die detaillierte Prozess- und Anlagenplanung in der Regel Experten der Anlagenlieferanten involviert.

Daraus ergibt sich eine Reihe von Schnittstellen für den Austausch von Daten, u. a. von Energiedaten. Für Lasten- und Pflichtenhefte sowie für die technische Abnahme von Anlagen sind energetische Parameter zu definieren, die im anschließenden Fabrikbetrieb überwacht werden können. Gleichzeitig bilden solche Kennzahlen die Grundlage für energietechnische Spezialprojekte (z. B. Planung der Elektroenergiebereitstellung, s. Abschn. 5.2.1).

## 4.3 Methodik zur energieeffizienzorientierten Fabrikplanung

### 4.3.1 Überblick

Die hier vorgestellte Methodik zur energieeffizienzorientierten Fabrikplanung basiert auf den im Abschn. 4.1 vorgestellten Planungsaktivitäten Systemanalyse, Systemkonzipierung, Systemsynthese/Integration und Begleitung der Systemrealisierung.

Ausgehend von den in den Abschn. 4.2.2 und 4.2.3 dargelegten Defiziten liegt ein Schwerpunkt der Methodik im Austausch von Energiedaten:

1. zwischen den Planungsaktivitäten der Fabrikplanung und dem Fabrikbetrieb sowie
2. zwischen verschiedenen Fachdisziplinen (Technologieentwicklung, Anlagenentwicklung etc.).

Abbildung 4.13 zeigt die Methodik im Überblick.

Für die einzelnen Planungsaktivitäten lassen sich die wichtigsten Inhalte wie folgt zusammenfassen:

- In der Planungsaktivität Systemanalyse werden Energiedaten und -kennzahlen ermittelt. Diese dienen der Beschreibung der Ausgangssituation und zur Zielbestimmung (z. B. Vorgaben zur Energieeinsparung in Prozent).
- Während der Systemkonzipierung und Systemsynthese/Integration werden mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad Lösungen entworfen und schließlich zur Realisierung ausgewählt.
  - Die Suche nach energieeffizienten Lösungen unterstützen die im Abschn. 4.2.1 vorgestellten Handlungsansätze.
  - Die entworfenen Lösungen sind auch unter energetischen Gesichtspunkten zu optimieren, zu variieren und zu bewerten (s. Planungsgrundsätze,

Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben

Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, Th.; Strauch, J.

2009, XX, 339 S. 164 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-540-89643-2