

2 Energieeinsatz in der Fahrzeugfertigung

In diesem Kapitel wird auf die Grundlagen und den theoretischen Hintergrund dieser Forschungsarbeit eingegangen. Wichtige Begrifflichkeiten im Bereich der Fertigung und der Energieflüsse werden erläutert. Außerdem werden die wichtigsten Elemente des Fabriksystems und die Subsysteme innerhalb dieses Umfeldes vorgestellt, um später Energie im Kontext der Fertigung zu erläutern. Dabei wird der Fokus auf der Automobilfertigung, den Energieformen und den Umwandlungsarten in diesem Bereich liegen.

2.1 Produktion und Fertigung

Um ein einheitliches Verständnis für die Begrifflichkeiten und Synonyme zu erzeugen, ist es wichtig im Vorhinein „Produktion“ und „Fertigung“ im industriellen Kontext zu definieren. Das Gabler Wirtschaftslexikon beschreibt beide Begriffe synonym als den „*Prozess der zielgerichteten Kombination von Produktionsfaktoren (Input) und deren Transformation in Produkte*“ (Voigt et al. 2014). Der industrielle Produktionsbegriff beschreibt also ein breites Spektrum an Transformationsprozessen zur Gütererzeugung. Darunter fallen nicht nur Konsumgüter, sondern auch chemische Stoffe und Lebensmittel. Der Begriff der Fertigung beschreibt allerdings konkreter die Herstellung von Gütern in einem industriellen, beziehungsweise handwerklichen Umfeld (Bibliographisches Institut 2013). Im Kontext dieser Arbeit werden beide Begriffe synonym verwendet.

2.1.1 Die Produktionsumgebung als Teil der Fabrik

Der Prozess zur Herstellung von Automobilen findet in der Regel in darauf ausgerichteten Fabriken statt. Diese lassen sich nach Schenk und Wirth als System in Anlehnung an die Systemtheorie beschreiben (Schenk und Wirth 2004, S. 77–101). Dabei umfasst das Fabrikssystem verschiedene Subsysteme und Einzelelemente, die unterschiedliche Aufgaben erfüllen und miteinander über Beziehungen verbunden sind. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel für ein solches System mit seinen verbundenen Elementen und Subsystemen. Des Weiteren ist in der Abbildung die Systemgrenze zu sehen, die das System räumlich von seinem Systemumfeld abgrenzt. Dieses System transformiert Systemeingangsgrößen innerhalb der verschiedenen Elemente und unter Berücksichtigung des Systemumfeldes in Systemausgangsgrößen, wie Produkte. Die einzelnen Systemelemente können nicht nur physisch vorhandene Anlagen und Ressourcen darstellen, sondern auch Prozess- und Steuerungselemente, die ebenfalls für den Fabrikbetrieb notwendig sind. In dieser Arbeit wird der Fokus auf den physisch vorhandenen Elementen des Fabriksystems und seinen Subsystemen liegen. Einzelne Elemente und Subsysteme der Fabrik können außerdem mit der Umwelt, beziehungsweise mit dem Systemumfeld, interagieren und werden von ihr beeinflusst.

Die physisch vorhandenen Systeme innerhalb des Fabriksystems sind nach Schenk und Wirth das Produktionssystem und das Gebäudesystem. Das Produktionssystem umfasst dabei alle Anlagen und Ressourcen, die zur Fertigung und Montage von Produkten innerhalb des Fabriksystems wertschöpfende Tätigkeiten ausführen und direkt für diese Tätigkeiten benötigt werden. Diese schließen auch die Fördertechnik und Logistikanlagen mit ein (Schenk und Wirth 2004, S. 81; Westkämper 2006, S. 34).

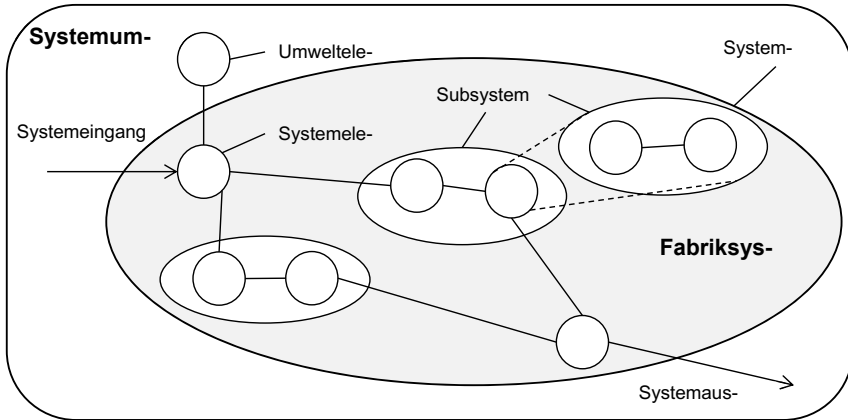


Abbildung 5: Aufbau eines Fabrikssystems (in Anlehnung an Schenk und Wirth 2004, S. 80; Westkämper 2009, S. 25)

Dabei sollte es nicht gleich gesetzt werden mit dem Produktionssystem, wie es von Clarke beschrieben wird. Jene Art von Produktionssystemverständnis umfasst im Gegensatz zu Schenk und Wirth Arbeitsprinzipien, Produktionsplanung und –steuerung, einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess und beruht auf dem Toyota Produktionssystem (TPS) (Clarke 2005, S. 71–125).

Das Gebäudesystem umfasst das Gebäude mit seiner definierten Gebäudehülle und die technische Gebäudeausrüstung (TGA). Dabei stellt dieses Subsystem die Abgrenzung der Produktionsumgebung nach außen dar, um die Produktionsumgebung gegen Umwelteinflüsse abzusichern (Schenk und Wirth 2004, S. 149).

Ein Beispiel für eine vereinfachte physische Produktionsumgebung innerhalb des Fabrikssystems ist in Abbildung 6 dargestellt. Diese zeigt nicht nur das Produktionssystem, sondern auch das Gebäudesystem inklusive der TGA. Weiterhin ist beispielhaft ein Fertigungsprozess zu sehen, der den Transformationsprozess innerhalb des Produktionssystems symbolisiert.

Für diesen Transformationsprozess (Fertigungsprozess) sind häufig eine Vielzahl von Inputs notwendig. Diese Inputs sind nicht nur Rohmaterialien und Halbzeuge, sondern auch andere notwendige Eingangsgrößen des Prozesses, wie zum Beispiel Energie in verschiedenen Formen und Hilfsstoffe wie Öle oder Kühlschmierstoffe. Im Transformationsprozess werden die Materialien bearbeitet und mit Hilfe der Produktionsanlagen in das gewünschte Halbzeug oder Endprodukt überführt. Arbeitskräfte erfüllen dabei verschiedenste Aufgaben, von der manuellen Bearbeitung bis zur Anlagensteuerung und der Instandhaltung. Die Produktionsanlagen fassen die Fertigungsanlagen und nötigen Neben- und Hilfsanlagen zusammen. Im Fertigungsprozess entstehen nicht nur Endprodukte, sondern es entstehen auch unerwünschte Nebenprodukte wie Abwärme, Abfälle und Abwässer, die aus dem System entfernt werden müssen (Hesselbach et al. 2008, S. 3).

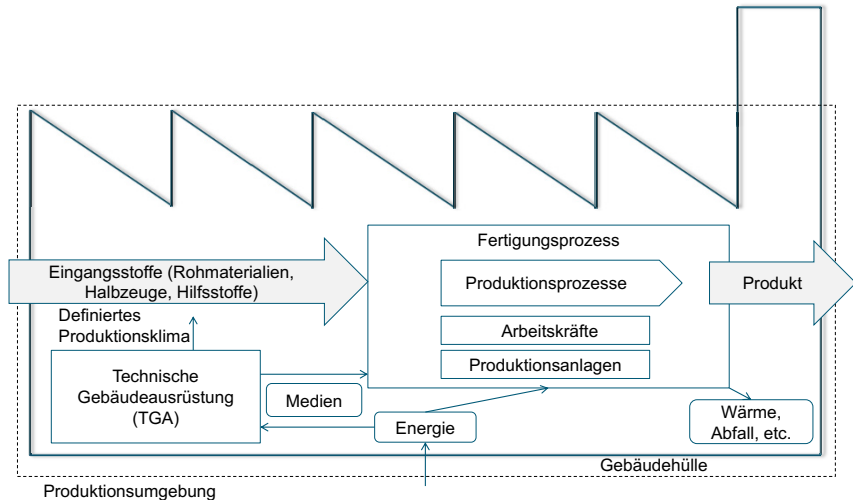


Abbildung 6: Physische Produktionsumgebung (vgl. Hesselbach et al. 2008, S. 3)

Die Gebäudehülle stellt einen klar abgegrenzten Bereich für die Fertigung zur Verfügung; sie schützt Personal und Anlagen vor Umwelteinflüssen. Innerhalb der Gebäudehülle ist nach den jeweiligen Anforderungen des Fertigungsprozesses ein definiertes Produktionsklima zu schaffen. Dieses Produktionsklima muss nicht nur für die Prozesse eine adäquate Umgebung darstellen, sondern auch für die dort beschäftigten Mitarbeiter. Spezifische Umgebungsbedingungen werden durch die TGA hergestellt, überwacht und gesteuert. Diese versorgt die Produktionshalle mit Frischluft, Wärme, Kälte und Licht. Sie wird zudem benötigt für die Medienversorgung der Fertigungsprozesse. Darunter fallen Druckluft, technische Wärme und Kühlwasser (Hesselbach 2012, S. 304).

2.1.2 Peripherer Aufbau der Produktionsumgebung

In Abschnitt 2.1.1 wurde bereits die Produktionsumgebung beschrieben, in der die wertschöpfenden Prozesse für die Produktion, unter anderem von Fahrzeugen, stattfinden. Um Wege zur Reduzierung des Energieverbrauchs der Produktionsumgebung aufzuzeigen, müssen Bilanzraum und Verbraucherstruktur genauer dargestellt werden. Für die detailliertere Beschreibung der Bilanzräume wird das Modell peripherer Ordnung von Produktionsprozessen nach Wirth herangezogen und auf den Betrachtungsraum Automobilfertigung angepasst (Wirth 1989, S. 25). Der Aufbau des Modells ist in Abbildung 7 dargestellt.

Dabei stehen die Produktionsanlagen des Hauptprozesses im Mittelpunkt der Betrachtung, während die peripheren Anlagen entsprechend ihrer funktionalen Nähe zu diesem Hauptprozess angeordnet sind. Die Anlagen der 1. Peripherie sind direkt vom Produktionsprogramm abhängig. Darunter fallen Fördertechnik und Prüfeinrichtungen, sowie die übergeordneten Systeme zur Produktionssteuerung. Anlagen der 2. Peripherie sind solche, die direkt an die Produktionsanlagen des Hauptprozesses gekoppelt sind. Darunter fallen zum Beispiel Hydraulikaggregate und die technische Absaugung, aber auch die Arbeitsplatzbeleuchtung für die Mitarbeiter und

optische Messeinrichtungen. Diese Anlagen sind unabdingbar für die Funktion des wertschöpfenden Prozesses.

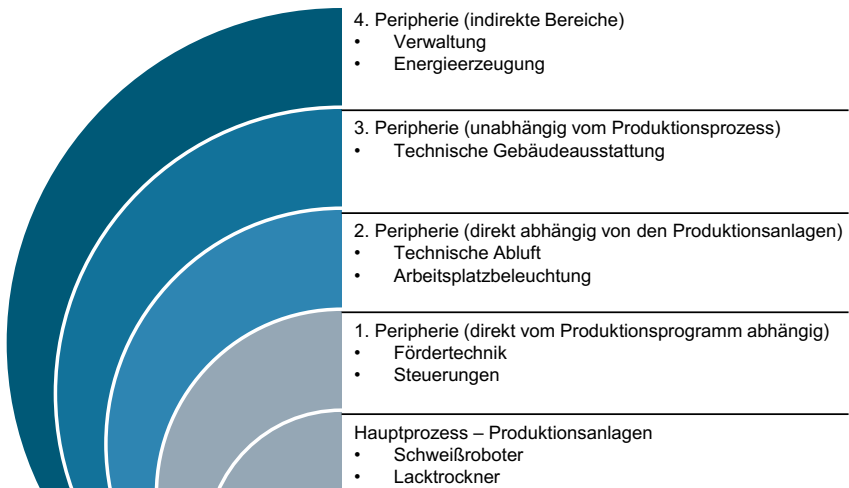


Abbildung 7: System peripherer Ordnung (in Anlehnung an Schenk und Wirth 2004, S. 94–96; Engelman 2009, S. 75)

Unter der 3. Peripherie lassen sich die Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) zusammenfassen. Sie sind nicht direkt an die wertschöpfenden Prozesse gekoppelt, sondern werden in der Regel von diesen unabhängig gesteuert. Auf Grundlage von Engelman und Schenk und Wirth wurde das Modell um die 4. Peripherie ergänzt, die die indirekten Bereiche wie Verwaltung und Energieverteilung außerhalb der Produktionshallen zusammenfasst. Diese Bereiche sind oft ausgelagert, so übernehmen häufig Energieversorgungsunternehmen die Erzeugung der elektrischen Energie (Schenk und Wirth 2004, S. 94–96; Engelman 2009, S. 75–76).

2.1.3 Prozesse der Fahrzeugfertigung

Die Fahrzeugfertigung ist ein diskreter Fertigungsprozess, bei dem Einzelgüter gefertigt werden, die zählbar sind und in ihre Einzelteile zerlegt werden können. Die Fertigung von Halbzeugen und die finale Endmontage steht bei dieser Art der Fertigung im Mittelpunkt (Oracle 2013, S. 63; Dangelmaier 2013, S. 13). Im Gegensatz dazu steht die Prozessfertigung, in der oftmals Schüttgut oder lose Ware produziert wird. Darunter fallen zum Beispiel pharmazeutische Produkte, Lebensmittel und Raffinerieprodukte. Diese werden in thermischen und/oder chemischen Prozessen erzeugt und können nur schwer oder gar nicht in ihre Ausgangsstoffe zerlegt werden (Loos 1995, S. 214–217).

Bei der Automobilproduktion werden die Automobilkomponenten in vier Hauptgewerken und Komponentenbereichen produziert, um anschließend in den Vor- und Endmontagelinien der Automobilfabrik montiert zu werden (Kropik 2009, S. 11). Mit dem Begriff der Fahrzeugfertigung werden zumeist die letzten Produktionsstufen der Automobilfertigung bezeichnet. Dabei

handelt es sich um das Presswerk, den Karosseriebau (Rohbau), die Lackiererei und die Montage. Sie werden in der Regel als Gewerke bezeichnet und sind in Abbildung 8 inklusive des wichtigsten Fertigungsverfahrens nach DIN 8580 dargestellt (Askar 2008, S. 10; Kropik 2009, S. 11; DIN 8580, S. 7).

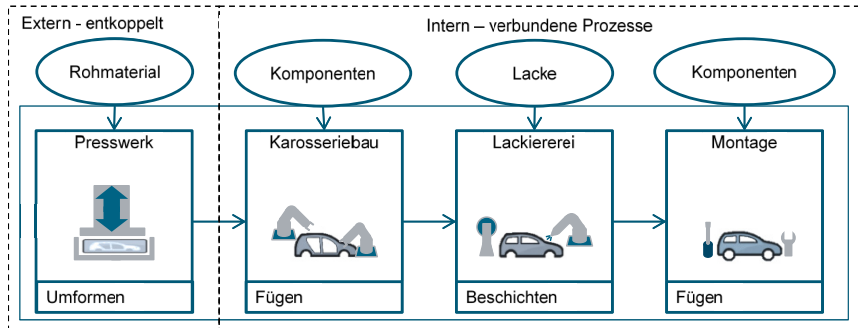


Abbildung 8: Gewerke des Fahrzeugbaus und Hauptfertigungsverfahren nach DIN 8580 (vgl. Askar 2008, S. 10; Kropik 2009, S. 11; DIN 8580, S. 7)

Die Fahrzeugfertigung beginnt im Presswerk mit dem Umformen der Außenhaut und der Strukturbauteile aus Stahlcoils oder anderen Halbzeugen. Dieser Prozess findet häufig separat statt und ist nicht zwangsläufig mit den weiteren Prozessen direkt verbunden. Zudem verfügt das Presswerk über ein besonders großes Produktspektrum, dementsprechend ist keine einheitliche Zählgröße vorhanden. Aus diesem Grunde wird es in dieser Arbeit analog zur Komponentenfertigung behandelt.

Die vollendeten Presswerksteile werden anschließend in die verbundenen Prozesse des Fahrzeugbaus transportiert, die die Karosserie und das Endprodukt herstellen. Im Karosseriebau werden Komponenten und weitere Pressteile über eine Vielzahl von Fügeverfahren miteinander verbunden, um die Gesamtkarosserie herzustellen.

Anschließend werden in der Lackiererei die Karossen beschichtet und hierbei der Korrosionsschutz und die Lackfarbe aufgetragen. Diese haben hohen Einfluss auf die Haltbarkeit der Karosserie und das Aussehen des Gesamtfahrzeugs.

Danach findet in der Montage der letzte Schritt der automobilen Wertschöpfungskette statt, bei dem die verschiedenen Komponenten und Anbauteile an der lackierten Karosserie angebracht werden (Kropik 2009, S. 10; Dörmer 2013, S. 11). Diese Fügeschritte werden zumeist noch manuell oder halbautomatisiert durchgeführt.

Im Rahmen dieser Ausarbeitung wird das Augenmerk auf die abschließenden Produktionsschritte der Fahrzeugproduktion gerichtet, da hier die Karosserie und somit das Gesamtprodukt seine Form annimmt und diese in der Regel an einem Standort gebündelt sind. Zusätzlich ist in diesen Bereichen der Wertschöpfungsanteil der Automobilhersteller (OEM = Original Equipment Manufacturer) besonders hoch. Die Komponentenfertigung, unter die auch die Motoren-, Getriebe- und Fahrwerksproduktion fallen, wird auf Grund ihres hohen Zuliefereranteils

nicht zum Fahrzeugbau gezählt (Omar 2011, S. 15–17); auch das Presswerk wird aufgrund seiner externen Stellung in die Betrachtung nicht mit einbezogen. Auf die Vorgänge und Verbraucherstruktur innerhalb der Einzelgewerke wird in Abschnitt 2.3.2 näher eingegangen.

2.2 Energieflüsse im industriellen Kontext

Energie (E) ist eine extensive Zustandsgröße eines betrachteten thermodynamischen Systems. Diese Größe umfasst die kinetische Energie (E_{kin}), die potentielle Energie (E_{pot}) und die innere Energie des Systems (U).

$$E = U + E_{kin} + E_{pot} \quad (2.1)$$

Die innere Energie kann herunter gebrochen werden in verschiedene Untergruppen, wie Strahlungsenergie, chemische Energie, Nuklearenergie und elektrische Energie (Struchtrup 2014, S. 34–36). Komponenten der inneren Energie sind relevant für das Energieniveau eines betrachteten Systems. Diese Menge an Energie kann nur durch einen Transport von Energie über die Systemgrenzen hinaus geändert werden. Dabei erfolgt der Energietransport zumeist durch die Verrichtung von Arbeit an einem anderen System und durch einen Austausch von Wärme oder Materie (Baehr und Kabelac 2012, S. 48).

Des Weiteren gilt für Energie der 1. Hauptsatz der Thermodynamik (Struchtrup 2014, S. 33):

„Energie kann nicht produziert oder vernichtet werden, sie kann nur ausgetauscht oder umgewandelt werden von einer Energieform in eine andere.“

Daraus folgt, dass ein System keine Energie „verbraucht“, sondern Energie innerhalb eines Systems nur umgewandelt werden kann. Der gängige Begriff des Energieverbrauches ist somit aus thermodynamischer Sicht inkorrekt. Er wird aber aus Gründen des Verständnisses in dieser Arbeit genutzt, um die Energie zu beschreiben, die in das Fabrikssystem transportiert und dort umgewandelt wird, sodass das Fabrikssystem den energetischen Endverbraucher darstellt.

Die verschiedenen Formen von Energie können jeweils in zwei Anteile unterteilt werden: die Exergie und die Anergie. Exergie ist der Teil der Energie, der unter vorgegebenen Randbedingungen in andere Energieformen überführt werden kann und somit weiter für andere Anwendungen nutzbar ist. Der Anteil der Exergie an der vorhandenen Energie eines Systems bestimmt somit die Qualität und Anwendungsmöglichkeiten der betrachteten Energie. Im Gegensatz dazu ist die Anergie der Anteil der Energie, der nicht in andere Energieformen überführt werden kann. Daraus ergibt sich, dass mit dem Anergieanteil einer Energieform keine Arbeit verrichtet werden kann (VDI 4661, S. 7).

2.2.1 Energieumwandlung und Energieformen

Im vorangegangenen Unterkapitel wurde bereits die Möglichkeit eines Energieaustausches zwischen Systemen und über Systemgrenzen hinaus angesprochen. Diese Möglichkeiten sind die Verrichtung von Arbeit, Wärmeaustausch und Transport von Materie.

Die Verrichtung mechanischer Arbeit (W) ist eine Prozessgröße, die das Produkt einer Kraft (F) und einer Veränderung des Angriffspunktes der Kraft darstellt. Ein System kann also an einem anderen thermodynamischen System Arbeit verrichten und somit die Energie innerhalb dieses Systems erhöhen, weil in diesem Zusammenhang Energie über die Systemgrenzen über-

tragen wird. Diese Energieabgabe wird mit einem positiven Vorzeichen versehen. Um die verrichtete Arbeit bewerten zu können, ist es wichtig, den Zeitfaktor mit einzubeziehen. Dies wird mit Hilfe der Prozessvariable Leistung (P) dargestellt. Diese stellt das Produkt aus einer Kraft und der Geschwindigkeit des Angriffspunktes dieser Kraft dar (Struchtrup 2014, S. 37–38).

Eine andere Möglichkeit des Energietransfers stellt der Transport elektrischer Ladungsträger zwischen zwei Punkten mit unterschiedlichem elektrischem Potential dar. Dies ist im eigentlichen Sinne ein Austausch von Materie, wird aber als die Verrichtung von elektrischer Arbeit beschrieben. Unter Einbeziehung des Zeitfaktors ergibt sich die elektrische Leistung. Diese Leistung ist definiert als das Produkt aus Spannung (U_{el}) und der Stromstärke (I_{el}) (Baehr und Kabelac 2012, S. 65):

$$P_{el} = U_{el} * I_{el} \quad (2.2)$$

Für die Verrichtung elektrischer Arbeit kann die Formel (2.3) herangezogen werden. Diese beschreibt die elektrische Arbeit als Produkt der elektrischen Leistung und der Zeit (Müller et al. 2009, S. 89).

$$W_{el} = P_{el} * t \quad (2.3)$$

Aus diesem Grunde werden häufig Lastgänge zur Beschreibung der momentanen Leistungswerte genutzt. Über eine Berechnung der Fläche unterhalb des Lastganges kann dann die elektrische Arbeit ermittelt werden. Ein Beispiel für einen solchen Lastgang ist in Abbildung 9 zu sehen (Müller et al. 2009, S. 93).

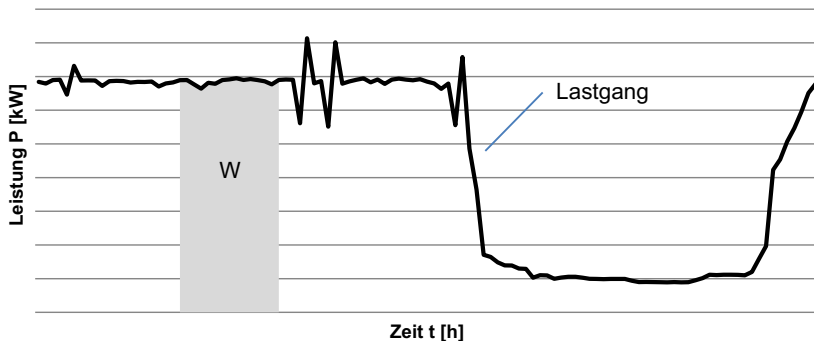


Abbildung 9: Beispiellastgang und Nutzung zur Ermittlung der elektrischen Arbeit (in Anlehnung an Müller et al. 2009, S. 93)

Zur Änderung der Energie eines Systems ist es auch möglich, thermische Energie (Wärme) zu transferieren. Dazu muss zwischen den betrachteten Systemen eine Temperaturdifferenz vorliegen.

“Wärme ist Energie, die allein auf Grund eines Temperaturunterschieds zwischen einem System und seiner Umgebung (oder zwischen zwei Systemen) über die gemeinsame Systemgrenze übertragen wird.“ (Baehr und Kabelac 2012, S. 69)

Der Wärmestrom ($\dot{Q}_H$) fließt immer vom System mit der höheren Temperatur (T_H) in Richtung des Systems mit der niedrigeren Temperatur (T_N). Der Einsatz eines Generators ermöglicht es

diesen Wärmeaustausch zur Erzeugung von elektrischer Leistung zu nutzen. Die unten stehende Formel beschreibt die mögliche Leistung in einem idealen System ohne Verluste (Baehr und Kabelac 2012, S. 532):

$$P_{el} = \left(1 - \frac{T_N}{T_H}\right) \dot{Q}_H \quad (2.4)$$

Für die Übertragung dieser Energieformen können eine Vielzahl von Apparaturen und Anlagen eingesetzt werden, die unterschiedliche Wirkungsgrade besitzen. Der Wirkungsgrad ist definiert durch das Verhältnis der zugeführten Arbeit (W_{Zu}) und der nutzbaren Arbeit (W_{Nutz}).

$$\eta = \frac{W_{Zu}}{W_{Nutz}} ; 0 < \eta < 1 \quad (2.5)$$

Einige Beispiele für Transformationsprozesse, nötige Apparaturen und Wirkungsgrade der Umwandlung sind in Tabelle 1 zu sehen.

Tabelle 1: Ausgewählte Energieumwandlungsprozesse und deren Wirkungsgrade (Müller et al. 2009, S. 76; Jaschke 2015, S. 5)

Umwandlung von	in .. Energie	Apparatur	Wirkungsgrad
elektrischer Energie	elektrische	Transformator	95 %
	mechanische	Elektromotor	95 %
	chemische	Akkumulator	70 %
	thermische	Elektrisches Heizen	100 %
	Strahlungs-	Glühlampe	5 %
		Laser	bis zu 35 %
		LED	bis zu 90%
mechanischer Energie	elektrische	Generator	95 %
	mechanische	Getriebe	99 %
	thermische	mechanische Bremse	100 %
thermischer Energie	elektrische	Thermoelement	5 %
	mechanische	Dieselmotor	35 %
		Ottomotor	25 %
chemischer Energie	elektrische	Batterie	5 %
		Brennstoffzelle	35 %
	thermische	Kohleheizung	25 %

Die hier gezeigten Beispiele machen klar, dass zwischen den einzelnen Umwandlungsprozessen erhebliche Unterschiede in ihren Wirkungsgraden bestehen und somit die Energieausbeute

stark variiert. So ist insbesondere eine Umwandlung von elektrischer Energie in Strahlungsenergie mit hohen Verlusten verbunden, da ein hoher Anteil nicht in Strahlungsenergie, sondern in thermische Energie umgewandelt wird. Im Gegensatz dazu ist die Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische Energie mit wenig freierwerdender Wärme möglich. Daraus resultiert ein hoher Wirkungsgrad bei der Umwandlung in diese Energieform (VDI 4661, S. 17–18).

Neben den verschiedenen Energieformen werden in der Literatur unterschiedliche Typen von Energie, je nach Stufe in der Nutzungskette und Einsatz in Prozessen, unterschieden. So zeigt Abbildung 10 ein Beispiel für die Energienutzungskette im industriellen Umfeld, von der Primärenergie bis zur Energiedienstleistung, auf.

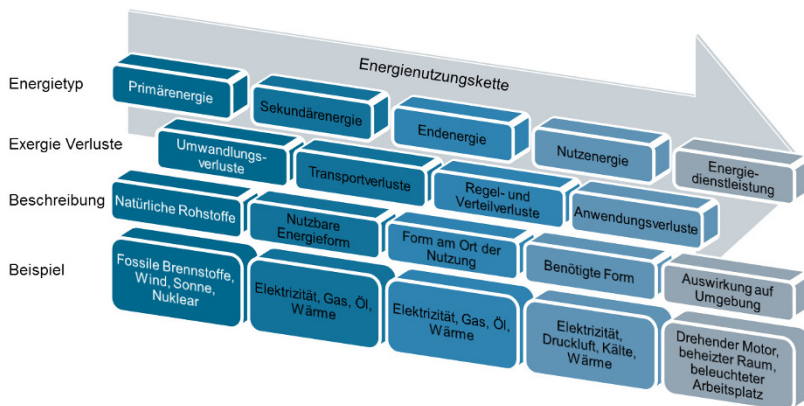


Abbildung 10: Energienutzungskette (vgl. Engelmann 2009, S. 32)

Unter den Energietyp Primärenergie fallen Energieträger wie fossile Brennstoffe, erneuerbare Energiequellen und Nuklearkraft, welche in Kraftwerken in Sekundärenergie umgewandelt werden. Sekundärenergie wird anschließend zum Beispiel in Form von Elektrizität zum Endverbraucher transportiert (VDI 4661, S. 11–13). Nutzenergie ist der Energietyp, den ein Empfänger für die Ausübung der vorgesehenen Tätigkeit benötigt. Dieser Empfänger kann jede Art von Energieverbraucher sein, wie zum Beispiel Werkzeugmaschinen, Roboter oder Computer. Innerhalb des Verbrauchers findet die letzte Umwandlung der Nutzenergie in eine Energiedienstleistung statt. Diese kann aus verschiedensten Applikationen wie dem Drehen eines Rotors oder der Erwärmung eines Raumes bestehen (Engelmann 2009, S. 33). All diese Energieumwandelungsschritte gehen stets mit einer Umwandlung von Exergie in Anergie einher. Für die Betrachtung von Energieverbräuchen wird in der Regel die Nutzenergie verwendet. Diese ist zumeist leitungsgebunden und durch Messtechnik gut erfassbar (VDI 4661, S. 11–13).

2.2.2 Energieeffizienz

Der Effizienz-Begriff findet in vielen Bereichen Anwendung und ist nicht auf den Bereich Energie und Produktion beschränkt. Eine allgemeine Definition findet man in der DIN EN ISO 9.000, die Effizienz als Quotient aus dem erreichten Ergebnis und den eingesetzten Ressourcen beschreibt (ISO 9000, S. 46).

Energieeffizienz im thermodynamischen Kontext wird genutzt, um die Qualität eines Umwandlungsprozesses beschreiben zu können. Dies wird in der Regel direkt über den Wirkungsgrad der Umwandlung ausgedrückt. Neben der thermodynamischen Begriffsdefinition von Energieeffizienz existieren verschiedenste Interpretationen und Definitionen, je nach Bilanzraum und Betrachtungsobjekt. Diese reichen vom Vergleich auf internationaler Ebene zwischen Staaten, über Konzerne, bis hin zu einzelnen Verbrauchsgütern. So kann der Begriff zu verschiedenen Zeiten und an verschiedenen Orten oder Umständen unterschiedlich interpretiert werden (European Commission 2009, S. 27–30).

Ein Versuch einer allgemeingültigen Definition wurde von Neugebauer unternommen. Dieser beschreibt Energieeffizienz als das Verhältnis zwischen dem Output und dem Energie-Input. Dies bedeutet, dass besonders effiziente Prozesse ein Höchstmaß an Wertschöpfung bei minimalem Ressourceneinsatz und Energieeinsatz erzielen (Neugebauer et al. 2011, S. 1). Zur Beschreibung dieses Verhältnisses werden zumeist Energiekennzahlen eingesetzt, auf die in Abschnitt 2.2.3 näher eingegangen wird. Diese haben, wie Zein beschreibt, nur eine klare Aussagekraft, wenn man diese im Verhältnis zu Grenzwerten oder relativen Veränderungen über die Zeit betrachtet (Zein 2013, S. 35).

Zusammengefasst kann man von energieeffizienten Prozessen sprechen, wenn im Vergleich zu anderen Prozessen mit einem Minimum von Energie eine Leistung oder ein Produkt erzeugt wird, welches den gleichen Mehrwert für den Anwender darstellt. Auf die Schwierigkeiten bei der Ermittlung geeigneter Kennzahlen und Erreichung eines energetischen Minimums wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen.

2.2.3 Betriebliche Energiekennzahlen

Kennzahlen werden in allen Unternehmensbereichen zur Beurteilung der erreichten Leistung und Zielwertkontrolle genutzt. Sie werden in der Regel als Führungsgrößen und Regelgrößen für komplexe Systeme herangezogen, die teilweise dynamischen Umwelteinflüssen unterliegen und deshalb einer Steuerung bedürfen. Dazu gibt die Kybernetik einen Regelkreis vor, durch den auf eventuelle Störgrößen und auch auf unvorhergesehene Einflüsse reagiert werden kann. Dies ist der Vorteil gegenüber der reinen Steuerung (Baetge 1974; Beer 1994). Dieser Regelkreis ist in Abbildung 11 dargestellt.

Die Führungsgröße (w) gibt den Soll-Wert vor. Dies können etwa absolute Kosten-Ziele, spezifische oder auch absolute Energieverbräuche seien. Die Regeldifferenz (e) zeigt die Lücke zur Zielerreichung auf, während innerhalb des Regelgliedes die Entscheidungen in Form der Reglerausgangsgröße (y_r) getroffen werden und die Stellgröße (y) die veränderten Pläne und Maßnahmen auf Grundlage von y_r darstellt. Die Laststörgröße (z_y) wiederum fasst äußere Einflüsse auf die Stellgröße zusammen. Dabei kann es sich um Anforderungen innerhalb des Unternehmens handeln, aber auch um Umfeldänderungen. Die Versorgungsstörgröße (z_x) stellt eine weitere äußere Einflussgröße dar, die Auswirkungen auf die Regelgröße (x) hat. Dies kön-

nen neue Gesetze oder erhöhter Wettbewerb sein. Die Rückführgröße (r) wird wiederum erzeugt durch das vorhandene Kennzahlensystem, das den aktuellen Ist-Wert zurückgibt (Baetge 1974, S. 30–35).

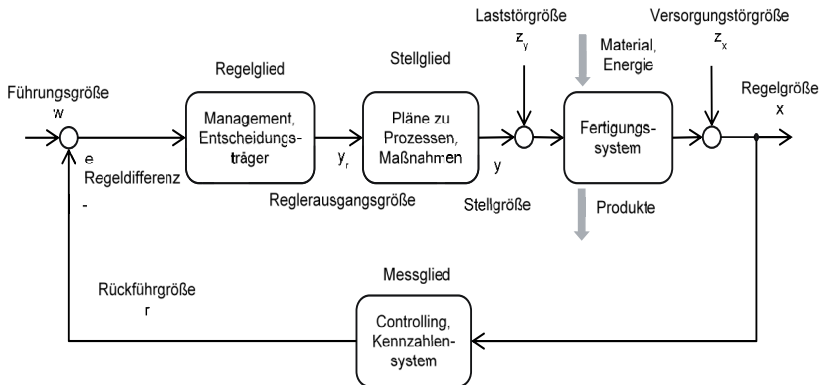


Abbildung 11: Regelkreis der Kybernetik (in Anlehnung an Baetge 1974, S. 30; Herrmann 2010, S. 103; Haag 2013, S. 36)

Um diesen Regelkreis in Unternehmen zu integrieren bedarf es Kennzahlensysteme, die als Messglied für unterschiedliche Zwecke genutzt werden können. Je nachdem, welches System betrachtet wird, sind sie für die Analyse und Steuerung geeignet. Dabei lassen sich diese beiden Verwendungsarten in weitere unterteilen, welche in Abbildung 12 zu sehen sind (Bauer 1988, S. 43).

Unter die Analyse fallen der Zeitvergleich und der Querschnittsvergleich. Bei dem Zeitvergleich findet eine Gegenüberstellung der erhobenen Kennzahlen über einen festgelegten Zeithorizont statt. Dabei wird die räumliche und zeitliche Bilanzgrenze unverändert gelassen. Das bedeutet, dass beispielhaft immer ein Jahr als Betrachtungszeitraum gewählt und die Veränderungen der Kennzahl zwischen einzelnen Betrachtungszeiträumen untersucht werden. Beim Querschnittsvergleich werden gleiche, beziehungsweise vergleichbare Bilanzgrenzen für mindestens zwei verschiedene Entitäten gewählt. Dies ist notwendig, um die Kennzahlen dieser Entitäten miteinander vergleichen zu können und das System mit den besseren Kennzahlen zu identifizieren. Dabei ist es von besonderer Bedeutung, die Vergleichbarkeit der betrachteten Entitäten sicherzustellen, um richtige Ergebnisse zu generieren (Bauer 1988, S. 43–44; Löffler 2011, S. 4).

Des Weiteren ergeben sich durch die Nutzung von Kennzahlen die Möglichkeit der Regelung, wie sie der kybernetische Regelkreis dargestellt. Dabei wird zum einen in der Planung und Strategie eine Kennwertvorgabe gemacht (analog der Führungsgröße) und zum anderen ein Soll-Ist-Vergleich (analog der Regeldifferenz) durchgeführt. Soll-Ist-Vergleich, Querschnittsvergleich und Zeitvergleich fallen unter die Rubrik des Kennzahlenvergleichs. Die Kennwertvorgabe mündet allerdings auch in einen Kennzahlenvergleich, da eine Kennwertvorgabe ohne Soll-Ist-Vergleich nicht sinnvoll erscheint (Bauer 1988, S. 43–44; Haag 2013, S. 37).

Für die energetische Analyse von Anlagen und Prozessen sind diverse Kennzahlen möglich. Diese haben das Ziel die Energieeffizienz eines Systems erfassbar, messbar und vergleichbar zu machen.

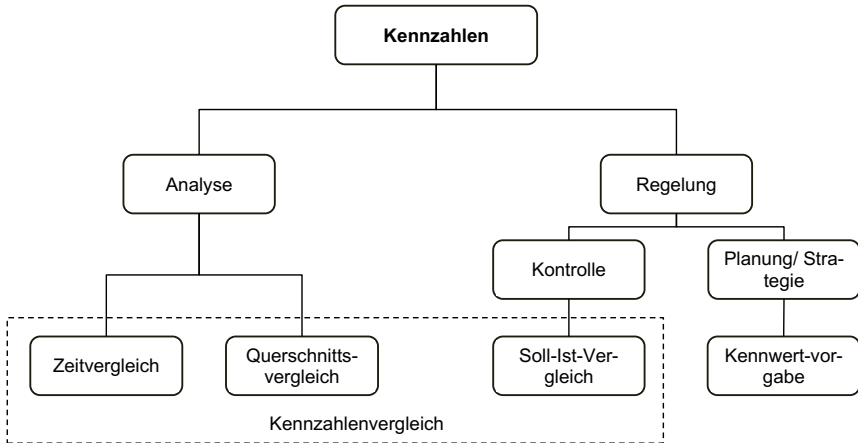


Abbildung 12: Verwendungszeck von Kennzahlen (vgl. Bauer 1988, S. 43)

Mögliche Energiekennzahlen sind (VDI 4661, S. 34–37; Engelmann 2009, S. 34):

- Energieverbrauch
- Spezifischer Energiebedarf (Energieintensität pro Teil)
- Wirkungsgrade
- Leistungs- und Arbeitszahl
- Nenndaten und Leistungsbegriffe
- Benutzungsgrad, Belastungsgrad
- Ausnutzungsdauer und Arbeitsausnutzung.

Für die Bildung von Kennzahlen im industriellen Umfeld legen Müller und Löffler nahe, neben absoluten Energiegrößen auch Verhältniszahlen (spezifischer Energiebedarf, Energieintensität) zu bilden und diese als Energieleistungskennzahl zu nutzen. Die Berechnung einer solchen Kennzahl ist in Formel (2.6) dargestellt.

$$\text{Energiekennzahl} = \frac{\text{Energiegröße}}{\text{Bezugsgröße}} \quad (2.6)$$

Dabei wird betont, dass die Auswahl der richtigen Energiekennzahl von hoher Bedeutung ist. Je nach Erkenntnisinteresse kann die Energie- und Bezugsgröße variieren, beziehungsweise können auch mehrere Kennzahlen zum Einsatz kommen (Müller und Löffler 2011, S. 128). Eine Auswahl von möglichen Energie- und Bezugsgrößen ist in Tabelle 2 zu sehen.

Die Energiegrößen wurden bereits anhand der Energienutzungskette in Abbildung 10 dargestellt und finden sich auch in der VDI Norm 4661 wieder (VDI 4661, S. 16–22). Für die Nutzung als Energiekennzahl eignen sich vor allem die Primär- und Endenergie, da sie gut errechnet oder gemessen werden können.

Die Primärenergie stellt dabei eine geeignete Energiegröße zur Betrachtung des Verbrauchs natürlicher Ressourcen bei der Energiegewinnung dar. Die Endenergie ist durch Messungen und Abrechnungen eine gut belegbare Größe, die zur Ermittlung einer Energiekennzahl herangezogen werden kann. Die Nutzenergie wiederum ist für größere Produktionsbereiche wesentlich aufwändiger zu bestimmen, kann aber für Kennzahlen bei der Betrachtung von Einzelanlagen genutzt werden (Müller und Löffler 2011, S. 128–130).

Tabelle 2: Energiegrößen/Energiewirkungsgrößen und Bezugsgrößen für Energiekennzahlen (vgl. Müller und Löffler 2011, S. 128)

Energiegrößen/ Energieformen	Primärenergie, gesamt	Primärenergie, nicht erneuerbar	Endenergie	Nutzenergie
Bezugsgrößen				
produzierte Einheiten [Anzahl, kg]	x	x	x	(x)
Wertschöpfung [€]	x	x	x	-
Materialeinsatz [kg]	x	x	x	(x)
Personalaufwand [h]	x	x	x	-
Gebäudefläche [m ²]	x	x	x	(x)
Brutto-Rauminhalt [m ³]	x	x	x	(x)
x: nutzbar	(x): eingeschränkt nutzbar		- : nicht nutzbar	

Bezugsgrößen sollen den Nutzen der im Produktionsbetrieb eingesetzten Energie darstellen (Nutzen-Aufwand). Dieser kann von Betrieb zu Betrieb, aber auch innerhalb eines Betriebes, variieren, sodass Bezugsgrößen für die jeweilige Betrachtungseinheit angepasst werden müssen. Auf einzelne Bezugsgrößen geht auch Löffler im Rahmen eines Berichtes der Sächsischen Energieagentur ein. Diese sind die in Tabelle 2 dargestellten Größen und werden nachfolgend kurz erläutert (Löffler 2011, S. 14–20).

Produzierte Einheiten: Ausbringungsmenge eines produzierenden Unternehmens in Stück, Masse oder Volumen. Diese Bezugsgröße wird in der Regel bereits erfasst und ist somit leicht zu implementieren. Schwierigkeiten können bei einer Variabilität von gefertigten Produkten und fehlender Zuordnung der Energieverbräuche auftreten. Querschnittsvergleiche sind bei dieser Bezugsgröße möglich, solange die Produkte ähnlich sind.

Wertschöpfung: Die Wertschöpfung steht für den monetären Nutzen, den ein Unternehmen durch die Herstellung von Produkten und Dienstleistung erzeugt. Wertschöpfung ist als Bezugsgröße grundsätzlich geeignet, da sie die erbrachten Vorleistungen in der Wertschöpfung, im Gegensatz zum Umsatz als Bezugsgröße, berücksichtigt und somit direkt den Energieaufwand dem Nutzen gegenüberstellt. Problematisch ist die Kopplung an aktuelle Preisschwankungen, da dadurch wird ein Zeitvergleich erschwert wird. Letztlich ist auch die Vergleichbarkeit von Unternehmen der gleichen Branche mit anderem Produktportfolio gering.

Materialeinsatz: Verbrauch an Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen und Einsatz von Halbzeugen in Stück, Masse und Volumen. Dabei wird ein weiterer Aufwand als Bezugsgröße gewählt. Somit wird allerdings nicht der Nutzen adressiert. Sinnvoll kann diese Bezugsgröße dennoch sein, sofern die Ausgangsmaterialien besser erfassbar sind als die Endprodukte, beziehungsweise diese einheitlicher sind. Auch das europäische System für Umweltmanagement und Umweltbetriebsprüfung (EMAS) fordert eine Darstellung des Materialeinsatzes innerhalb der Umwelterklärung, sodass diese Informationen häufig bereits vorliegen und hier als Bezugsgröße Anwendung finden können (Europäische Kommission 2013, S. 24).

Personalaufwand: Der Personalaufwand beschreibt die abgeleisteten Arbeitsstunden pro Zeitraum und wird häufig bereits über die Lohn- und Gehaltsabrechnungen der Mitarbeiter ausgewiesen. Alternativ ist auch eine Berücksichtigung der Mitarbeiter zu einem bestimmten Stichtag möglich. Dies deckt allerdings keine Schwankungen in der Mitarbeiterzahl oder auch der Arbeitszeitregelung ab. Sinnvoll ist der Personalaufwand als Bezugsgröße, wenn eine Vielzahl an Dienstleistungen und Produkten erzeugt wird und deshalb eine erschwerte Messung dieses Nutzens vorliegt.

Gebäudefläche: Je nach Anwendungsfall gibt es verschiedenste Flächen innerhalb von industriellen Bauten, die als Bezugsgröße Verwendung finden. Diese sind zum Beispiel die in der DIN 277 festgelegte Netto- und Bruttogrundfläche (DIN 277, S. 10). Für die Nettogrundfläche sind die Innenmaße der betrachteten Räume maßgeblich, die in Miet- und Kaufverträgen ausgewiesen werden. Dadurch ergibt sich eine in der Regel bekannte und belastbare Bezugsgröße. Bei der Berechnung der Bruttogrundfläche werden die leicht ermittelbaren Gebäudeaußenmaße und Geschoßebenen verwendet (DIN 277, S. 10). Für die Berechnung einer Verhältniszahl ist die Nettogrundfläche zu präferieren, weil sie genauere und besser vergleichbare Ergebnisse liefert. Auch die Energieeinsparverordnung (EnEV) nimmt Bezug auf die Gebäudefläche als Bezugsgröße. Diese Gebäudenutzfläche wird aus dem beheizten Gebäudevolumen und einem zusätzlichen Faktor berechnet. Das Gebäudevolumen ist das von der Gebäudehülle umschlossene Volumen, das direkt oder indirekt beheizt wird (Bundesrepublik Deutschland 2007, S. 1552). Flächenbezugsgrößen sollten insgesamt nur für einen Vergleich von Gebäuden eingesetzt werden, in denen die gebäudetechnischen Verbräuche klar von den Produktionsanlagen zu trennen sind oder aber ähnliche Prozesse stattfinden.

Brutto-Rauminhalt: Der Brutto-Rauminhalt ist das über die Außenmaße ermittelte Gebäudevolumen. Dabei wird die Bruttogebäudefläche mit der Geschosshöhe multipliziert. Die Vorschrift zur Ermittlung der Höhe findet sich in der DIN 277 (DIN 277, S. 10). Für Industriebauten mit lichten Höhen von mehreren Metern bietet der Brutto-Rauminhalt in der Regel besser vergleichbare Ergebnisse als die Bruttogrundfläche.

Die erwähnten Energie- und Bezugsgrößen zur Ermittlung von energetischen Kennzahlen haben individuelle Vor- und Nachteile und sollten je nach Betrachtungsrahmen und Randbedingungen angepasst werden. Wichtig ist, hier auch mehrere Kennzahlen zuzulassen, sollte dies für die angestrebte Kennzahlennutzung nötig sein (Müller und Löffler 2011, S. 129-130).

2.2.4 Einflussfaktoren auf die Energiebilanz eines Betriebes

Bei der Festlegung der Energiekennzahlen ist nicht nur die Bildung der Verhältniszahl von hoher Bedeutung; auch die Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen ist hervorzuheben. Diese Einflussgrößen beeinflussen nicht nur die Bildung der Kennzahl, sondern auch die Vergleichbarkeit zwischen den erhobenen Energiekennzahlen. In der Abbildung 13 sind verschiedene Einflussfaktoren auf die abgeleitete Energiekennzahl dargestellt. Diese sieben Einflussfaktoren

sind in ihrer Einflussgröße auf die Energiekennzahlen von unterschiedlicher Bedeutung. Im Folgenden wird kurz auf diese eingegangen. Die VDI Richtlinie 4661 bietet zu dem individuellen Einfluss der verschiedenen Faktoren eine kurze Beschreibung (VDI 4661, S. 39–45).

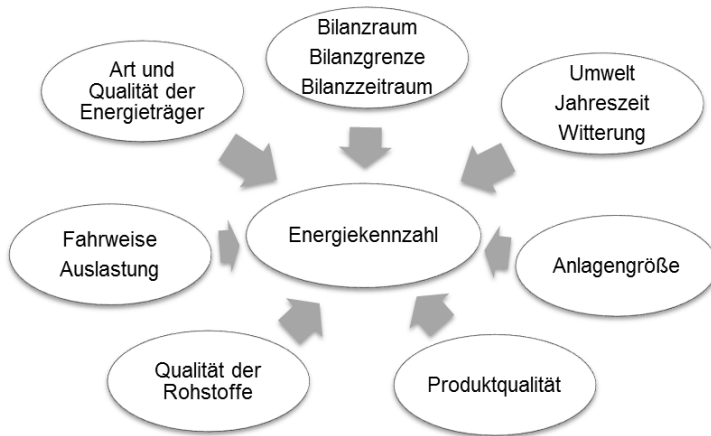


Abbildung 13: Einflussfaktoren auf die Energiekennzahlen (in Anlehnung an Gesellschaft Energietechnik 2003, S. 25)

Als wichtigster Einflussfaktor auf die energetischen Kennzahlen stellt sich die Festlegung der Bilanzgrenzen, und damit der physischen Bilanzräume und des Bilanzzeitraumes, dar. Beides wird individuell auf den betrachteten Gegenstand festgelegt und ist maßgeblich für die Aussagekraft der Kennzahl. Der Bilanzraum kann einzelne Komponenten, ganze Anlagen, Prozessketten, Standorte oder Unternehmen umfassen. Wichtig ist es, vor der Kennzahlenerhebung, den Bilanzraum klar zu benennen und zu bestimmen, welche Nebenaggregate, wie zum Beispiel Fördereinrichtungen und Beleuchtung, als Teil der Bilanzgrenzen zu betrachten sind. Dies ist vor allem zu beachten, wenn die Kennzahlen später für Querschnitts-, Zeit und Soll-Ist-Vergleiche herangezogen werden sollen (Löffler 2011, S. 21). Neben dem Bilanzraum ist auch der Bilanzzeitraum von Bedeutung. So sollten auch hier aussagekräftige Größen gewählt werden. Zum Beispiel ist ein einzelner Sommermonat nicht ideal, um Kennzahlen für eine Heizungsanlage zu ermitteln.

Bei der Bildung von energetischen Verhältniszahlen kommt auch der Auslastung innerhalb der Bilanzgrenzen eine hohe Bedeutung zu. Dies ist darin begründet, dass sich bei den meisten Anlagen der Energieverbrauch aus einem fixen Grundbedarf und einem variablen Energiebedarf zusammensetzt, der auslastungsabhängig ist. Das heißt bei einer geringeren Ausbringung sinkt der Energiebedarf nicht entsprechend, sodass sich die Energiegröße nicht entsprechend der Bezugsgröße ändert und somit der spezifische Verbrauch steigt. Dazu schlägt die VDI 4661 die Dokumentation der Auslastung während eines Bilanzzeitraumes vor (VDI 4661, S. 40).

Außerdem sind die Qualität der Rohstoffe und Halbzeuge, sowie die Produktqualität und die Qualität der Energieträger weitere Einflussfaktoren. So muss eventuell mehr Energie eingesetzt werden, wenn Roh- und Ausgangsstoffe nicht der benötigten Qualität entsprechen, das Endpro-

dukt aber Qualitätsstandards erfüllen muss. Beispielhaft können zusätzliche Trocknungsprozesse notwendig werden, wenn der Feuchtegehalt des Rohmaterials wider Erwarten sehr hoch sein sollte. Ein zu hoher Feuchtegehalt hätte zur Folge, dass mehr Energie für die Verdampfung notwendig wäre. Auch die Güte der eingesetzten Brennstoffe bestimmt den Energieverbrauch von Anlagen, da die chemische Zusammensetzung der Stoffe den Brenn- und Heizwert bestimmt (VDI 4661, S. 44–45).

Des Weiteren hat auch die Größe der Anlagen Einfluss auf den Energieverbrauch, da etwa leistungstärkere Elektromotoren in der Regel einen höheren Wirkungsgrad besitzen. Dies wirkt sich allerdings nur positiv aus, wenn die Motoren auch im richtigen Betriebspunkt laufen und nicht über- oder unterdimensioniert sind (VDI 4661, S. 39).

Nicht zuletzt beeinflussen die Klimazone, Jahreszeit und die Witterung die Energiekennzahlen. So ist der Energieverbrauch der Raumheizung maßgeblich von den Außentemperaturen abhängig (Löffler 2011, S. 30).

2.2.5 Energieeffizienzpotentiale und -barrieren

Um das Erreichen energetisch verbesserter Prozesse als Zielstellung dieser Arbeit zu gewährleisten, ist eine Ermittlung des realisierbaren minimalen Energiebedarfs für die jeweilige Tätigkeit notwendig. Dieser minimale Bedarf ist prozessspezifisch sehr unterschiedlich und muss individuell ermittelt werden. Dabei kann zwischen dem thermodynamisch erreichbaren Minimum und einem idealen Energiebedarf unterschieden werden (Zein 2013, S. 78). Die thermodynamische Grenze stellt dabei eine rein rechnerische Größe dar. Sie wird bestimmt durch eine Berechnung der notwendigen Energiemengen für eine bestimmte Tätigkeit, zum Beispiel das Schmelzen von Aluminium. Dabei werden Umwandlungsverluste innerhalb von Anlagen nicht betrachtet, sodass dieser Wert real nicht erreicht werden kann (Choate und Green 2003, S. 6). Ideale Energiebedarfe wie sie Zein definiert werden im Gegensatz dazu häufig über Vergleiche von Anlagen oder ganzer Fabrikssysteme ermittelt. Dazu werden zumeist statistische Vergleichsmethoden angewendet, die Energiebedarfe von realen Prozessen gegenüberstellen und versuchen aus diesen die energieeffizientesten Prozesse zu ermitteln. Verschiedenste Methoden können dafür verwendet werden; so nutzt Boyd die SFA (Stochastic Frontier Analysis) und Zein die DEA (Data Envelopment Analysis) (Boyd 2005, S. 7; Zein 2013, S. 62).

Zusätzlich zur Schwierigkeit der Ermittlung des erreichbaren idealen Energiebedarfes können Hemmnisse dem Erreichen dieser Werte im Wege stehen. Dabei kann es sich um wirtschaftliche Einschränkungen oder physikalische und thermodynamische Grenzen der jeweiligen Technologie handeln (Zein 2013, S. 78; Gutowski et al. 2013, S. 5). In Abbildung 14 sind die beiden energetischen Grenzen und die Hindernisse zum Erreichen dieser dargestellt.

Ein Hindernis beim Erreichen der thermodynamischen Grenze stellt vor allem die fehlende Technologie und dadurch unvermeidliche Umwandlungsverluste dar. Diese Technologielücke kann nur durch neue Prozesstechnik und Produktionsverfahren verkleinert werden (Gutowski et al. 2013, S. 5). Im Gegensatz dazu steht die Kluft zwischen dem aktuellen Energiebedarf und einem erreichbaren idealen Energiebedarf. Diese wird häufig als Energieeffizienzlücke (engl. energy efficiency gap) bezeichnet (Jaffe und Stavins 1994). Sie repräsentiert noch nicht realisierte Energieeffizienzpotentiale, die auf Grund verschiedener Hemmnisse und Barrieren nicht erkannt und/oder nicht umgesetzt wurden. Viele Autoren gehen auf die Gründe der Entstehung einer solchen Lücke aus unterschiedlichen Perspektiven näher ein. Diese Vielzahl an Ansätzen werden in vier Haupthindernissen zusammengefasst: Diese sind fehlendes Wissen, organisatorische Defizite, Profitabilitätsrisiken und eine begrenzte Rationalität (Jaffe und Stavins 1994,

S. 808; Schleich 2009, S. 2151–2153; Thollander und Palm 2013, S. 35–57; Schmid 2004, S. 33–56).

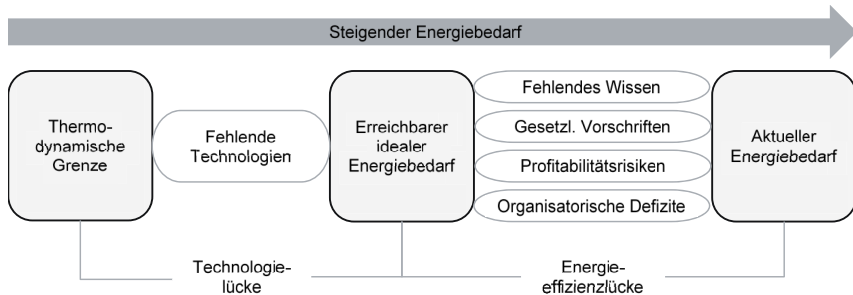


Abbildung 14: Gründe zur Begünstigung der Effizienzlücke (in Anlehnung an Zein 2013, S. 78; Schleich 2009, S. 2151–2153; Gutowski et al. 2013, S. 5)

Schmid und Schleich beschreiben fehlendes Wissen als ein häufiges Hindernis für die Implementierung von energieeffizienteren Prozessen innerhalb von Unternehmen. Fehlendes Wissen umfasst dabei eine Fülle von Defiziten.

Diese sind im Folgenden dargestellt und kurz erläutert (Schmid 2004, S. 33–56; Schleich 2009, S. 2151–2153):

- Mangelnde Informationen über die aktuellen Energieströme und Verbrauchswerte innerhalb des Unternehmens; meistens darin begründet, dass die Erfassung relevanter Daten mit hohen Kosten verbunden ist und nicht direkt zu Einsparungen führt.
- Unzureichende Informationen über das wirtschaftliche Potential von Effizienzmaßnahmen. Bei der Berechnung des Reduzierungspotentials werden häufig nicht alle vermiedenen Kosten berücksichtigt, sodass das energetische Potential und somit das Kostenpotential falsch eingeschätzt wird und die Investitionen als nicht wirtschaftlich betrachtet werden.
- Unvollkommene Informationsbereitstellung durch Anlagenlieferanten; dadurch wird ein Unternehmen daran gehindert sich für die energieeffizienteste Anlage zu entscheiden, selbst wenn dies ein Einkaufsziel sein sollte.
- Asymmetrische Informationsverteilung über potentielle Energieeinsparmaßnahmen; nicht alle Informationen liegen auch dort vor, wo sie den meisten Nutzen entfalten.

Neben dem fehlenden Wissen innerhalb des Unternehmens, können auch organisatorische Defizite zur Entstehung einer Energieeffizienzlücke führen. Diese sind zum Beispiel eine geringe Priorisierung von Energieeffizienz durch das Management und in Folge dessen auch eine geringere Wertschätzung durch die Mitarbeiter, da eine Identifikation mit den Unternehmensinteressen dadurch kaum vorhanden ist (DeCanio 1993, S. 907–908).

Als weiteres Defizit wird das Investor-Nutzer-Dilemma (split-incentives) gesehen, bei dem ein Zielkonflikt innerhalb des Unternehmens besteht. Beispielhaft ist der Einkauf bemüht das Produkt mit den geringsten Investitionen zu beschaffen, während der Betreiber das Produkt mit den geringsten Folgekosten beschaffen möchte (DeCanio 1993, S. 907–908; Schmid 2004, S. 45).

Außerdem stellen auch monetäre Risiken Hemmnisse dar, die zur Bildung der Energieeffizienzlücke beitragen. Diese sind das Fehlen von Investitionsmitteln oder hohe Zinslasten. Solche Kapitalbeschränkungen verhindern, dass eigentlich wirtschaftlich rentable Maßnahmen umgesetzt werden. Fehlende Mittel für benötigtes Personal sind außerdem ein Grund für das Entstehen der Energieeffizienzlücke, zumal für die Bewertung und Implementierung von Effizienzmaßnahmen geschultes Personal vorhanden sein muss (Schmid 2004, S. 41).

Als letzter, aber nicht unwichtiger Punkt, wird auf die begrenzte Rationalität der Mitarbeiter eingegangen. Dies bedeutet, dass die Mitarbeiter verschiedene Routinen oder Daumenregeln nutzen, die zwar in zufriedenstellenden Ergebnissen resultieren, allerdings teilweise verhindern, dass Effizienzmaßnahmen umgesetzt werden (Schleich 2009, S. 2153). Ein Beispiel dafür gibt Almeida in Bezug auf Elektromotoren. So werden diese häufig nach Lieferzeit und Preis bestellt, während die Betriebskosten keine Relevanz haben, obwohl gerade die Betriebskosten als besondere Kostentreiber bei Elektromotoren identifiziert wurden (Almeida, Edmar Luiz Fagundes de 1998, S. 643–653).



Abbildung 15: Kontinuierliche Verbesserung im Rahmen der ISO 50001 (ISO 50001, S. 6)

Um diesen Hemmnissen und Barrieren zu begegnen, wird häufig ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KVP) zur Verbesserung der energiebezogenen Leistungen innerhalb eines produzierenden Unternehmens eingeführt. Die ISO 50001 Energiemanagementsysteme gibt für die kontinuierliche Verbesserung einen Prozess in 5 Schritten vor, der in Abbildung 15 zu sehen ist (ISO 50001, S. 6). Da es sich um eine Norm bezüglich eines Managementsystems handelt, sind die einzelnen Schritte des Prozesses auch auf einer höheren Unternehmensebene angesiedelt. So muss durch das Management eine Energiepolitik festgelegt werden, in der auch die Ziele zur Verbesserung der energiebezogenen Leistung beschrieben werden. Die energiebezogene Leistung fasst in diesem Fall alle Leistungssteigerungen mit energetischem Bezug zusammen, zum Beispiel Steigerung der Energieeffizienz und Reduzierung des Energieeinsatzes (ISO 50001, S. 9). Anschließend findet eine Energieplanung statt, dem folgt die Einführung des Systems und die Kontrolle und Überwachung durch eine Auditierung des Systems und durch das Managementreview.

Insbesondere der Energieplanungsprozess innerhalb der ISO 50001 macht konkretere Vorgaben zur energetischen Bewertung des Systems, Identifizierung von Potentialen und Zielen. Hinter diesem Prozess steht das Ziel die energiebezogene Leistung zu verbessern (ISO 50001, S. 13). Eine Darstellung dieses Planungsprozesses findet sich in Abbildung 16. In dieser werden sowohl die Eingabeparameter für die Planung, als auch die energetische Bewertung und Ergebnisausgabe von links nach rechts dargestellt.

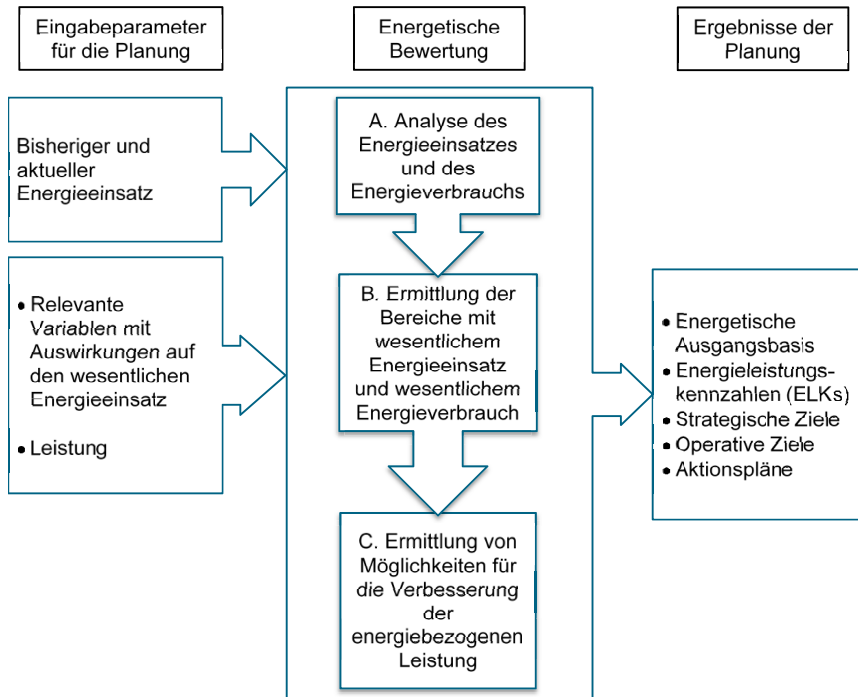


Abbildung 16: Energieplanungsprozess nach ISO 50001 (ISO 50001, S. 22)

Die energetische Bewertung, als Fokus des Prozesses, wird in drei Schritten durchgeführt. In der Analyse werden der bisherige und aktuelle Energieeinsatz untersucht. Zusätzlich werden relevante Variablen mit Auswirkungen auf den wesentlichen Energieeinsatz benannt (Einflussfaktoren) und die Leistung anhand von Kennzahlen bestimmt (z.B. dem spezifischen Energieeinsatz) (ISO 50001, S. 13–14). Anschließend werden aus diesen Informationen die Bereiche mit wesentlichem Energieeinsatz identifiziert und Verbesserungsmöglichkeiten ermittelt. Ergebnisse der Planung sind dann die energetische Ausgangsbasis, Ziele und Aktionspläne um diese Ziele zu erreichen.

2.3 Energieflüsse in der Automobilfertigung

Energie wird bei jedem Schritt der industriellen Automobilfertigung benötigt. Eine Vielzahl von Maschinen, Aggregaten und Unterstützungsprozessen müssen mit Energie versorgt werden, um die wertschöpfenden Prozesse durchzuführen. Dabei werden verschiedene Formen von Nutzenergie eingesetzt, um die entsprechenden Verbraucher zu versorgen. Zur Bewertung der Energieflüsse werden unterschiedlichste Kennzahlen auf verschiedenen Ebenen im Automobilunternehmen erhoben, auf die in den folgenden Abschnitten näher eingegangen wird.

2.3.1 Energetische Kennzahlen in Automobilunternehmen

Kennzahlen, die zur Verwendung in der Analyse und Steuerung genutzt werden, haben im energetischen Bereich eine Vielzahl von Ausprägungen. Diese variieren je nach Zielstellung und Ebene im Unternehmen. Diese Ebenen von Automobilunternehmen sind in Abbildung 17 dargestellt.

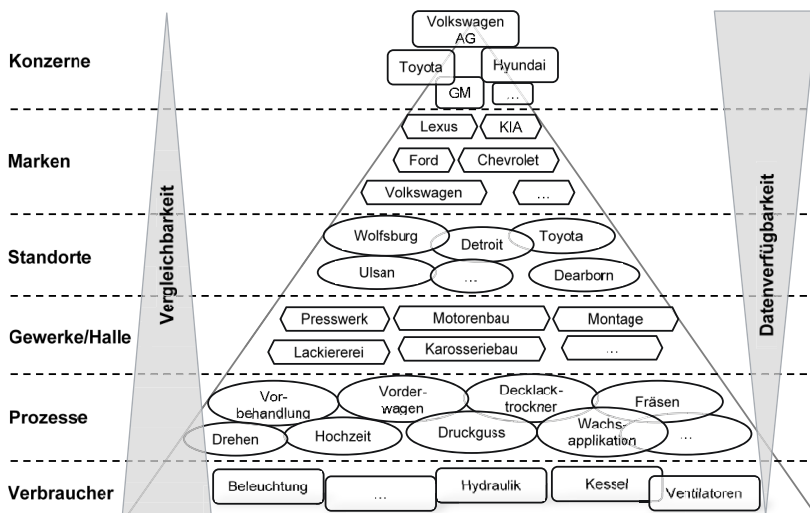


Abbildung 17: Ebenen in Unternehmen der Automobilfertigung

Die Konzernebene umfasst alle Automobilmarken eines Gesamtkonzerns. So besteht zum Beispiel Volkswagen zurzeit aus zwölf eigenständigen Marken für die Produktion von Fahrzeugen und Motorrädern (Stand Dezember 2016), während sich General Motors aus elf Hauptmarken zusammensetzt (Stand Dezember 2016) (Volkswagen AG 2016; General Motors 2016). Diese Marken sind auf der Markenebene verortet. Dabei können einzelne Marken Teil eines Gesamtkonzerns, aber auch eigenständig sein. Die Produktionsstandorte der Marken sind auf der Standortebebene dargestellt. Auf dieser findet die Komponenten- und Fahrzeugproduktion der Automobilmarken statt. Die Standorte können je nach Aufgabenspektrum sehr stark in ihrer Größe und Mitarbeiterzahl variieren, sodass auch die Anzahl an Gewerken und Hallen zwischen

den Standorten verschieden ist. Innerhalb der Hallen finden auf der vorletzten Unternehmensebene die Prozesse statt. Diese sind je nach Gewerk sehr unterschiedlich. Verschiedenste Maschinen und Anlagen werden benötigt, um die wertschöpfende Tätigkeit durchzuführen. Als letzte Ebene ist die Verbraucherebene vorhanden. Die Verbraucher sind einzelne Anlagen oder Komponenten, die Bestandteil der Prozesse sind. Weiterhin ist anzumerken, dass die Datenverfügbarkeit mit abnehmendem Unternehmensebene geringer wird, während die Vergleichbarkeit zunimmt. Dies liegt darin begründet, dass auf den oberen Ebenen Abrechnungsrelevante Energiedaten erhoben werden. Diese Daten sind allerdings stark aggregiert und decken somit eine Vielzahl von Prozessen ab.

Die Erfassungsebenen von Kennzahlen variieren von der obersten Konzernebene, die alle Produktionsstandorte umfasst, bis hinunter zur Prozessebene, auf dieser werden teilweise einzelne Anlagenkomponenten erfasst. Sonderbereiche wie Finanzdienstleister, Vertriebszentren oder externe Dienstleister fallen nicht darunter, da sich die vorliegende Arbeit auf die Produktionsstandorte konzentriert. Auf Konzernebene werden Umwelt- und Energiekennzahlen zumeist in jährlichen Nachhaltigkeitsberichten nach außen kommuniziert. Die Bildung solcher Kennzahlen orientiert sich in der Regel an der DIN EN ISO 50001 Energiemanagementsysteme und den darin enthaltenen Energieleistungskennzahlen (ELKs) (ISO 50001, S. 13). Diese ELKs können einfache Energieverbrauchswerte über eine bestimmte Zeit sein, aber auch Kennzahlen aus komplexen multivariaten Modellen oder spezifische Energieaufwendungen pro Produkt oder Umsatz. Für eine Zertifizierung ist es notwendig Kennzahlen herzuleiten und diesen Vorgang zu dokumentieren. Dabei ist wichtig, dass diese Kennzahlen die energiebezogene Leistung des Betriebes abbilden. Sofern sich relevante Einflüsse innerhalb des Betriebes ändern, ist es auch nötig, die ELK anzupassen (ISO 50001, S. 14). Dies ist von besonderer Bedeutung für Unternehmen, da auch Anleger wie der Norwegian Government Pension Fund Global (GPF) umwelttechnische und damit energetische Gesichtspunkte in ihre Investmententscheidungen einbeziehen (Dimson et al. 2013, S. 5; PRI 2005). Dazu werden die internationalen Umwelt rankings, wie das Carbon Disclosure Project (CDP) oder der Dow Jones Sustainability Index (RobecoSAM), herangezogen, die auch eine Erfassung von Energiedaten auf der Konzernebene fordern (CDP 2014, S. 13; RobecoSAM 2015, S. 57–60). Diese Umwelt rankings nutzen dabei die Richtlinien der Global Reporting Initiative (GRI), in der für Energie verschiedene Kennzahlen festgelegt sind. Diese sind unter anderem der Energieverbrauch des Unternehmens, die Energieintensität und die Reduzierung des Energieverbrauchs durch Effizienzmaßnahmen. Die Energieintensität wird berechnet, indem der Unternehmensverbrauch an Energie über alle Ebenen aggregiert und durch eine geeignete Größe geteilt wird. Diese Größe ist im automobilen Umfeld zumeist die Anzahl der produzierten Fahrzeuge, kann aber auch eine wirtschaftliche Kennzahl, wie die Wertschöpfung oder der Umsatz, sein (Global Reporting Initiative 2013, S. 88; Müller und Löffler 2011, S. 128). Problematisch bei dieser einfachen Kennzahlenbildung können verschiedene Einflussfaktoren auf unterschiedliche Energiearten und Betrachtungsebenen sein. So korreliert der Bedarf an elektrischer Energie und Brenngasen für die direkte Nutzung in Fertigungsprozessen stark mit der Stückzahl, während der Raumwärmebedarf von den Außentemperaturen abhängt (Hell et al. 2015, S. 528). Trotz dieser Einschränkungen ist die am weitesten verbreitete Kennzahl weiterhin der Endenergieverbrauch pro hergestelltem Fahrzeug (Fzg). Dieser ist für diverse Hersteller in Abbildung 18 dargestellt. Diese Energiekennzahl gibt Aufschluss darüber wieviel Energie über alle Energiearten (Summe elektrische Energie, Wärme und Brenngasen in MWh) in den Produktionsstätten der Einzelunternehmen pro Fahrzeug benötigt wurde.

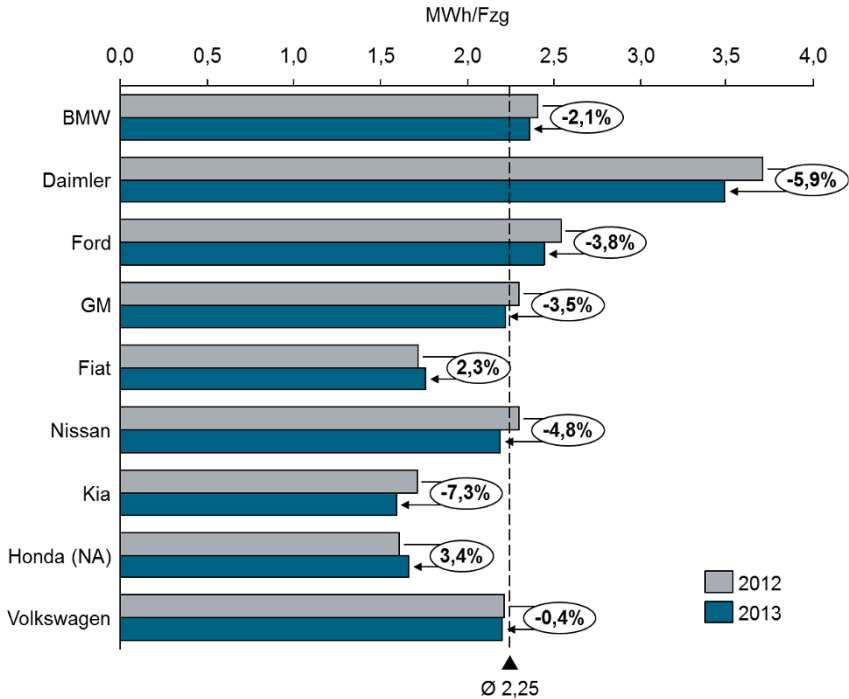


Abbildung 18: Spezifische Energieverbräuche von Automobilkonzernen und Marken (BMW Group 2014, S. 8; Daimler 2014; FCA Group 2014, S. 141; Ford Motor Company 2014, S. 302; Nissan Motor Corporation 2014, S. 31; Kia Motors 2014, S. 76–86; Volkswagen AG 2014b, S. 31)

Die spezifischen Energieverbräuche der Automobilkonzerne und –marken schwanken zwischen 1,6 MWh/Fzg im Falle von KIA und 3,5 MWh/Fzg für Daimler. Wie bereits in Abschnitt 2.2.3 erwähnt, haben unterschiedliche Fertigungsinhalte und Produktunterschiede einen entscheidenden Einfluss auf die Vergleichbarkeit und Aussagekraft der Kennzahl. Das führt dazu, dass sich diese Kennzahlen nur für einen Zeitvergleich, eine Kennwertvorgabe und dementsprechend für einen Soll-Ist-Vergleich eignen. Ein Querschnittsvergleich ist auf dieser Basis aus benannten Gründen nicht zu empfehlen.

Die nächste Ebene ist die Markenebene. Auf dieser werden die einzelnen Produktionsstätten der Marken eines Konzerns erfasst, sofern es sich um einen Mehrmarkenkonzern handeln. Bei Einzelmarken ohne Konzernmutter stellt die Markenebene die höchste Aggregationsstufe für Energiekennzahlen dar. Diese Ebene entspricht in ihren Kennzahlen der Konzernebene, da auch auf ihr diverse Fertigungsbereiche und Nicht-Fertigungsbereiche aggregiert werden.

Auf der Standortebene sind die einzelnen Produktionsstandorte der Automobilunternehmen zu finden. Diese umfassen neben den Einzelgewerken meist unterstützende Bereiche, wie die Pla-

nung, Versorgungstechnik und Gastronomie. Auf dieser Ebene finden zum Beispiel die Umweltmanagement Audits nach EMAS (Eco-Management and Audit Scheme) statt (Europäische Kommission 2013). Diese verlangen eine Umwelterklärung für jeden nach EMAS zertifizierten Bilanzraum. Dazu gehört auch eine Betrachtung der Energieeffizienz, welche durch mehrere Kennzahlen beschrieben wird. Diese Kennzahlen umfassen den Gesamtenergieverbrauch in MWh oder GJ und Gesamtverbrauch an Energie aus erneuerbaren Energiequellen als Systeminput. Des Weiteren wird auch der Systemoutput betrachtet. Bei diesem handelt es sich um die jährliche Gesamtbruttowertschöpfung in Millionen Euro oder die jährliche Gesamtausbringungsmenge in Tonnen für produzierende Unternehmen. Aus dem Gesamtenergieverbrauch und dem Output wird ferner eine Verhältniszahl gebildet, die den spezifischen Energieverbrauch des Standortes widerspiegelt (Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union 2009b, S. 37). Zusätzlich zu diesen verpflichtenden Angaben werden zumeist die Fahrzeugstückzahlen der Standorte in den Umwelterklärungen kommuniziert und daraus die Verhältniszahl MWh pro Fahrzeug gebildet (Daimler AG 2015, S. 22). Auch hier unterscheiden sich die Energiekennzahlen durch die unterschiedliche Beschaffenheit der Bilanzräume sehr stark. So schwanken sie bei Volkswagen zwischen 2,3 MWh/Fzg in Emden und 6,7 MWh/Fzg in Hannover. Bei der Betrachtung der verbrauchten Energie pro Tonne (produziertes Fahrzeug) relativiert sich der Unterschied zwischen Emden (1,3 MWh/t) und Hannover (2,4 MWh/t) (Volkswagen AG 2014a). Dies zeigt vor allem den Einfluss der gewählten Betrachtungsgröße und damit die Auswirkungen auf die Vergleichbarkeit der Energiekennwerte.

Neben den aus EMAS bekannten Kennzahlen sind auf der Standortebene weitere Indikatoren möglich, um die Energieeffizienz von automobilen Fertigungsstätten zu bewerten. So nutzt die US Amerikanische Environmental Protection Agency (EPA) einen Punktwert auf Basis der Stochastic Frontier Analysis (SFA). Dabei werden Automobilstandorte auf Basis ihrer Energieverbräuche, Stückzahlen und Witterungsbedingungen miteinander verglichen (Boyd 2005, S. 15). Zusätzlich ist es auf dieser Betrachtungsebene möglich, eine flächenbezogene Energiekennzahl zu nutzen. Dafür ist es allerdings notwendig, die technische Gebäudeausrüstung separat von den Produktionsanlagen zu bilanzieren (Müller und Löffler 2011, S. 123).

Die nächste Betrachtungsebene bildet die Gewerke- und Hallenebene. Diese Ebene umfasst die abgeschlossene Produktionsumgebung, wie sie in Abschnitt 2.2.1 Abbildung 6 bereits dargestellt wurde. Dabei werden nicht nur die wertschöpfenden Prozesse betrachtet, sondern auch die nötige Peripherie von der 1. bis zur 3. Peripherie (Schenk und Wirth 2004, S. 94–96; Engelman 2009, S. 75). Die 4. Peripherie wird an dieser Stelle separat berücksichtigt, da sie zumeist mehrere Gewerke und Hallen versorgt. Bei Betrachtungen auf Gewerkeebene kann der Endenergieverbrauch als Energiegröße und die produzierten Einheiten als Bezugsgröße dienen. Derartige Kennzahlen sind für einen energetischen Vergleich wesentlich aussagekräftiger als solche auf Standortebene, da es sich bei Einzelgewerken um homogenere Entitäten handelt. Innerhalb der separaten Gewerke werden ähnliche Produkte gefertigt und Prozesse verwendet. Die Bezugsgröße kann im Falle von Karosseriebau, Lackiererei und Montage die Einzelkarosserie, beziehungsweise das Fahrzeug sein. Auch spezielle auf den Prozess ausgerichtete Kennzahlen sind hier bereits möglich. So schlägt der Bericht des Bayrischen Landesamtes, für Lackierereien, eine Betrachtung der Energieverbräuche pro lackierter Fläche vor (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2006, S. 6).

Das Vorhandensein einer einheitlichen Bezugsgröße trifft zumindest für den Fahrzeugbau zu, während die Komponenten- und Presswerksproduktion zumeist inhomogener ist. Zusätzlich zu diesen Kennzahlen finden auf der Hallenebene noch Kennzahlen zur Energieeffizienz von Ge-

bäuden Verwendung. Diese werden zum Beispiel durch die DIN V 18599 festgelegt, die Verfahren zur energetischen Bewertung von Gebäuden vorgibt. So wird in der Norm der Primärenergiebedarf des Gebäudes ermittelt und auf die Nettogrundfläche bezogen, um eine Vergleichbarkeit herzustellen. Dabei bezieht sich der Energiebedarf auf die 3. Peripherie und nicht auf die vorhandenen Produktionsanlagen und deren Peripherie 1. und 2. Ordnung (DIN 66001, S. 52). Weitere mögliche Bezugsgrößen sind der Personalaufwand innerhalb der Bilanzgrenze und der Brutto-Rauminhalt.

Die unterste Ebene für Energiekennzahlen in Automobilunternehmen ist die Prozess- und Anlagenebene. Auf dieser sind die einzelnen Prozesse der Fertigung und die Anlagen der Peripherie zu finden. Dabei können Prozesse aus einer Vielzahl von Anlagen bestehen, um die wertschöpfende Tätigkeit auszuführen. Möglich ist andererseits auch, dass eine Einzelanlage die gesamte Aufgabe erfüllt. Kennzahlen müssen auf dieser Ebene klarer auf die betrachtete Anlage und den Prozess ausgerichtet sein. Für viele Prozesse im Fahrzeugbau ist die Kennzahl analog zum Gewerk eine Verhältniszahl aus dem Endenergieverbrauch und den produzierten Fahrzeugen. Für die Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) kann sich die Verhältniszahl auch auf die Bilanzfläche oder den Bruttorauminhalt beziehen, sofern einzelne Anlagen oder Anlagencluster räumlich voneinander getrennt sind (Löffler 2011, S. 21).

Des Weiteren ist auf der Anlagenebene die Nutzung von weiteren energetischen Kennzahlen möglich, darunter Wirkungsgrade und Nutzungsgrade, die auf Grund der erhöhten Komplexität auf höheren Betrachtungsebenen kaum genutzt werden können (VDI 4661, S. 16-19). Auch der Effizienzgrad, der den erhobenen Wert einer Anlage ins Verhältnis zu einem Referenzwert setzt, kann auf dieser Ebene zur Anwendung kommen. Dieser muss allerdings auch für jede Anlage einzeln ermittelt werden (Schieferdecker 2006, S. 46).

2.3.2 Energieverbraucher im Fahrzeugbau

In diesem Abschnitt soll näher auf die Energieverbraucher in den Gewerken des Fahrzeugbaus eingegangen werden. Ein Beispiel für den Aufbau und die Energieflüsse in einer Automobilfertigung ist in Abbildung 19 zu sehen. Neben den Produktionsanlagen ist auch die TGA abgebildet. Zusätzlich zu dem Fertigungsfluss und den Energieflüssen ist auch der jeweilige Energieanteil des Gewerkes dargestellt. Dieser Anteil wurde von Engelmann für das Volkswagen Werk in Zwickau erhoben, er umfasst sowohl die elektrische Energie, den Wärme- und Kältebedarf, als auch die eingesetzten fossilen Energieträger (Engelmann 2009, S. 65).

Wie in Abschnitt 2.1.3 dargestellt durchlaufen die Bauteile und Karossen die drei Hauptgewerke (Karosseriebau, Lackiererei und Montage) nacheinander. Die in Abschnitt 2.1.2 beschriebene Struktur der peripheren Ordnung lässt sich in allen Gewerken des Fahrzeugbaus identifizieren und kann bis zur 3. Peripherie zu einzelnen Gewerken zugeordnet werden. Die 4. Peripherie nimmt dagegen eine übergeordnete Stellung ein, da sie in der Regel im Standort vorhanden ist, aber nicht direkt zur Produktion von Fahrzeugen beiträgt. Aus diesem Grund liegt der Fokus auf den Hauptprozessen und der 1. bis 3. Peripherie, die die Energieverbrauchsstruktur im Fahrzeugbau bilden.

Die Verteilung der Energieverbräuche auf die Prozess- und Peripherieanlagen unterscheidet sich dabei stark nach den einzelnen Gewerken. Die eingesetzten Energieträger sind Elektrizität, Wärme, Kälte, fossile Brennstoffe und erneuerbare Energien. Auch die Anteile des Energiebedarfs der einzelnen Gewerke sind stark unterschiedlich. Man kann erkennen, dass sich der Hauptteil des Energiebedarfs in der Lackiererei verorten lässt, während sich Montage und Karosseriebau in etwa die Waage halten.

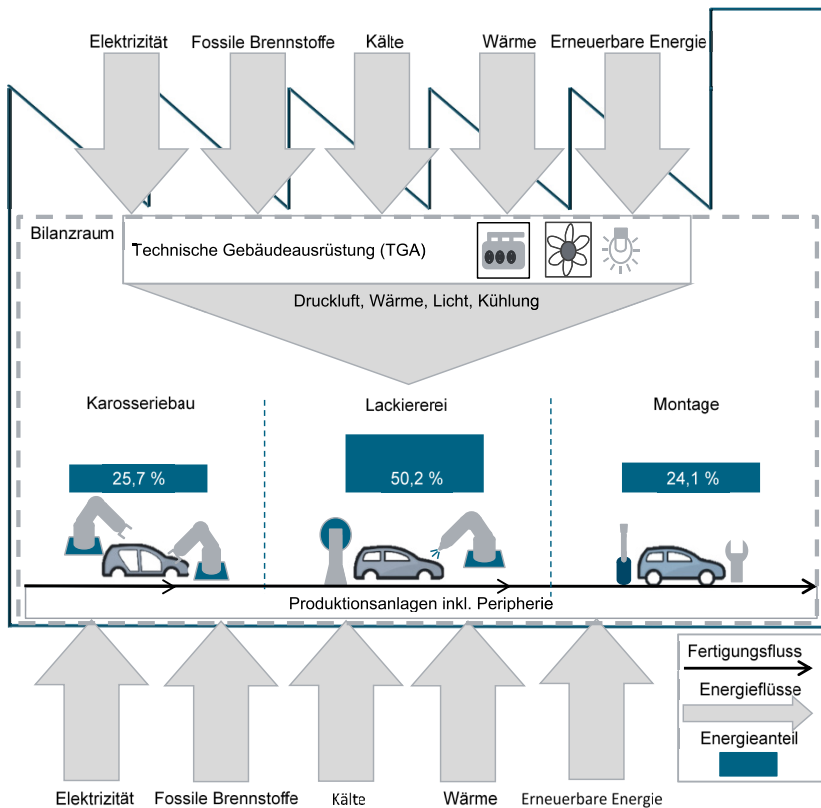


Abbildung 19: Gewerke des Fahrzeugbaus inklusive der Energieflüsse und Energieverteilung (vgl. Hesselbach et al. 2008, S. 3; Kropik 2009, S. 11; Engelmann 2009, S. 65)

Am Anfang der Prozesskette steht der Karosseriebau im Mittelpunkt der Betrachtung, in dem die einzelnen Komponenten zu einer Gesamtkarosserie gefügt werden. Ein Beispiel für die Fertigungsfolgen im Karosseriebau erweitert um die peripheren Systeme ist in Abbildung 20 dargestellt. Innerhalb des Karosseriebaus werden die Zusammenbauteile (ZSBs) gefertigt und die vollständige Karosserie gefügt. Zuerst werden die ZSBs gefügt, um anschließend den Unterbau zu vervollständigen und in den sogenannten Geometrie Stationen (GEO) auszuschweißen. Anschließend folgen die Seitenteile und Aufbauten für die Gesamtkarosserie, sodass am Ende die Türen sowie Heck- und Frontklappe mit der Karosserie verbunden werden können. Innerhalb dieser Prozesse kommen unterschiedliche Fügeverfahren zum Einsatz, darunter Laserschweißverfahren, Widerstandspunktschweißen, Kleben oder Nieten. Diese benötigen elektrische Energie als Energieträger. Die Peripherie 2. Ordnung nimmt im Karosseriebau eine hervorgehobene Stellung ein, weil dort häufig die technische Absaugung und Kühlkreisläufe vorhanden sind, die direkt an die Fügeprozesse gekoppelt sind. Hier wird elektrische Energie zum Betrieb der

Ventilatoren und der Kältemaschinen benötigt. Die technische Absaugung übernimmt die Aufgabe, Rauchgase und Luftbelastungen, die durch den Fügeprozess entstehen, aus der Umgebung abzusaugen und somit eine saubere Raumlufte für die Mitarbeiter sicherzustellen. Die Peripherie 3. Ordnung stellt die Umgebungsbedingungen für die Durchführung des Hauptprozesses her und versorgt die Karosseriebauhalle mit Luft, Wärme und Licht. Dabei wird sowohl elektrische Energie als auch Wärme als Energieträger eingesetzt (Engelmann 2009, S. 75–85).

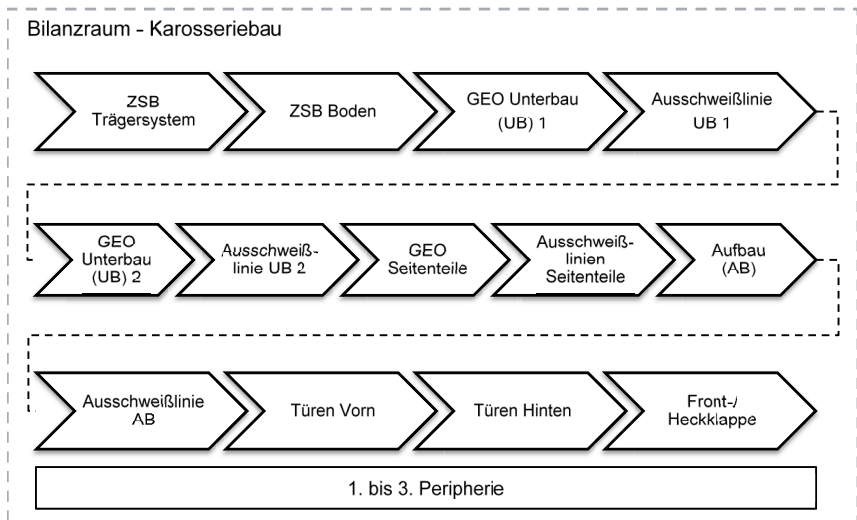


Abbildung 20: Bilanzraum des Karosseriebaus (in Anlehnung an Engelmann 2009, S. 79)

Nach Beendigung der Prozessfolge im Karosseriebau wird die gefügte Karosserie in die Lackiererei überführt. In der Lackiererei kommen verschiedenste Arten von Verfahren zum Schutz der Karosserie vor äußeren Einflüssen und zur Farbgebung zum Einsatz. Diese unterscheiden sich stark von den eingesetzten Technologien im Hauptprozess und der 2. Peripherie. In Abbildung 21 sind die Hauptprozessschritte in der Lackiererei dargestellt. Es gibt allerdings auch weitere Variationen des Lackauftragsprozesses. Für Informationen zu den verschiedenen Prozessarten sei hier die VDI Richtlinie 3455 empfohlen (VDI 3455).

Die gefügte Karosserie durchläuft in der Lackiererei zuerst die Vorbehandlung (VBH). In dieser werden die Karossen gereinigt, phosphatiert und passiviert, um sie für die nachfolgenden Schritte vorzubereiten. Dabei kommen verschiedene Bäder zum Einsatz, die unterschiedliche chemische Verbindungen enthalten, um den Prozess sicher zu stellen. Im Anschluss an die VBH findet die kathodische Tauchlackierung (KTL) statt. Dabei werden mit Hilfe eines Gleichspannungskonverters Lackpartikel aus einem Chemikalienbad an der Karosserieoberfläche abgeschieden. In beiden Prozessen sind die Hauptenergieverbraucher die Umwälzpumpen für die individuellen Bäder, die mit elektrischer Energie betrieben werden. Diese stellen sicher, dass eine vollständige Umspülung der Karosse erfolgt. Zusätzlich stellen die Anlagen der 1. Peripherie Wärme bzw. Kälte für das optimale Prozessfenster zur Verfügung.

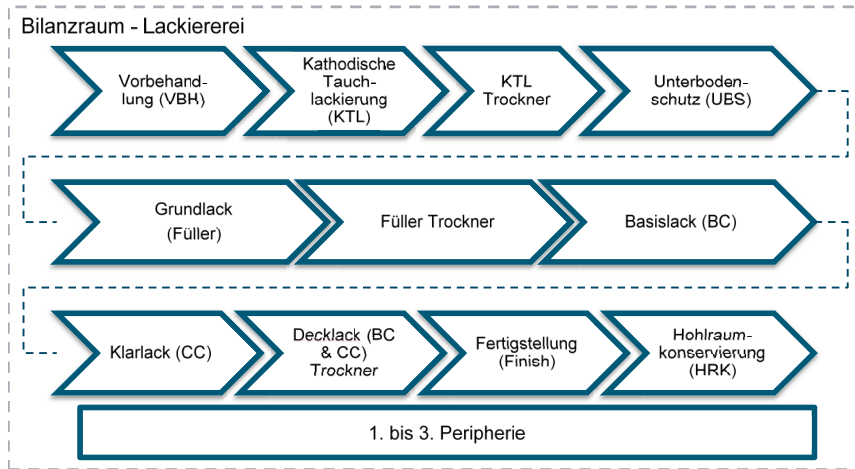


Abbildung 21: Bilanzraum für das Gewerk Lackiererei (in Anlehnung an Seiffert und Braess 2005, S. 571)

Im nächsten Prozess findet ein Einbrennen und Trocknen der Karossen im KTL Trockner statt. Dabei kommen thermische Nachverbrennungsanlagen (TNV) zum Einsatz. Diese reinigen die Abluft aus den Trocknerbereichen ab und sorgen gleichzeitig für die Wärmeversorgung innerhalb des Trockners. Hier wird neben Erdgas zur direkten Verbrennung auch elektrische Energie für die Zu-, Um- und Abluftventilatoren benötigt. Der nächste Prozessschritt ist der Auftrag des Unterbodenschutzes (UBS). Das heißt am Karosserieboden wird Polyvinylchlorid (PVC) mit Robotern und mithilfe manueller Arbeit aufgetragen. Dieser Arbeitsgang schützt die Karosserieunterseite vor Korrosion und Beschädigung. Im Anschluss daran findet die Lackierung der Karosserie durch den Auftrag von Nasslacken im Sprühverfahren statt. Dabei werden im Grundlack (Füller)-, Basislack (BC)- und Klarlackbereich (CC) größtenteils Roboter oder automatisierte Sprühanlagen eingesetzt. Die Farbversorgung findet in der Regel pneumatisch statt. Der Farbauftrag erfolgt dann durch elektrostatische Rotationsglocken oder Luftzerstäuber. In den Lackkabinen kommt den Anlagen der zweiten Peripherie eine besondere Rolle zu. Dabei handelt es sich hierbei sowohl um Lüftungsanlagen mit Erhitzern und Kälteaggregaten, als auch um Nass- oder Trockenabscheider zur Reinigung der Kabinenluft und Reduzierung von Overspray. Von besonderer Bedeutung sind die Lüftungsanlagen, weil der Lackauftrag unter bestimmten klimatischen Bedingungen geschehen muss, um eine geeignete Qualität sicherzustellen. Für wasserbasierte Lacke gilt ein Temperaturfenster zwischen 20 und 26 °C bei einer relativen Luftfeuchte von 60 – 70 % (VDI 3455, S. 32). Dieses wird durch Erhitzer, Befeuchter und gegebenenfalls Kälteanlagen bereitgestellt. Somit wird neben elektrischer Energie für Lüftungsanlagen und Roboter auch Wärmeenergie und Kälte benötigt. Im Anschluss an die Applikation der einzelnen Lackschichten durchläuft die Karosse einen Trockner, in dem der Grundlack (Füller) bei einer Temperatur von ca. 165 °C und der Basis- und Klarlack bei einer Temperatur von ca. 140 °C getrocknet werden. Dazu werden analog zum KTL-Trockner Erdgasbrenner und Ventilatoren benötigt. In der Fertigstellung erfolgen die Endkontrolle und die Beseitigung von Kleinstfehlern auf dem Lack. Diese Fehler werden mit Hilfe von Handwerkzeugen beseitigt, die häufig pneumatisch angetrieben werden. Zur Erkennung dieser Fehler

werden die Karossen durch Lichttunnel gefahren, in denen auch kleinste Unebenheiten für die Mitarbeiter erkennbar sind. Somit ist auch hier der Hauptenergieträger elektrische Energie. Im Anschluss an die Endkontrolle werden die lackierten Karossen mit Heißwachs „geflutet“. Dies geschieht, um Spalte und Flansche zu versiegeln und somit Spaltkorrosion vorzubeugen. Dabei wird die Karosse mit Hilfe von Erdgasbrennern auf 70 – 80 °C erwärmt und dann mit ca. 120 °C heißem Wachs geflutet. Dementsprechend kommt hier sowohl Erdgas als auch elektrische Energie für den Betrieb von Lüftern und Pumpen zum Einsatz. Dabei erstarrt das Wachs nur teilweise am kühleren Blech, sodass das restliche Wachs aus den Hohlräumen wieder auslaufen kann (Seiffert und Braess 2005, S. 566–580).

Nach der Hohlraumkonservierung wird die Karosserie an die Endmontage übergeben und die letzten Fertigungsschritte vor der Auslieferung an den Kunden finden statt. In der Endmontage wird die lackierte Karosserie in diversen Arbeitsschritten mit verschiedensten Komponenten wie dem Antriebsstrang, dem Motor und dem Fahrwerk verbunden. Die Montage kann in drei generelle Abschnitte aufgeteilt werden: den Inneneinbau, die Fahrwerksmontage und die Fahrzeugfertigstellung. Komponenten und Module werden für diese Schritte durch die Vormontage bereitgestellt und an die Hauptmontagelinie verbracht (Roscher 2008, S. 19). Der Bilanzraum auf Basis von Roscher wurde zusätzlich um die Rollenprüfstände und die Fahrzeugdichtheitsprüfung erweitert. Zusätzlich werden sowohl die peripheren Anlagen als auch die Anlagen der Vormontage in den Bilanzraum aufgenommen. Die einzelnen Schritte dieses Prozesses sind in Abbildung 22 zu sehen.

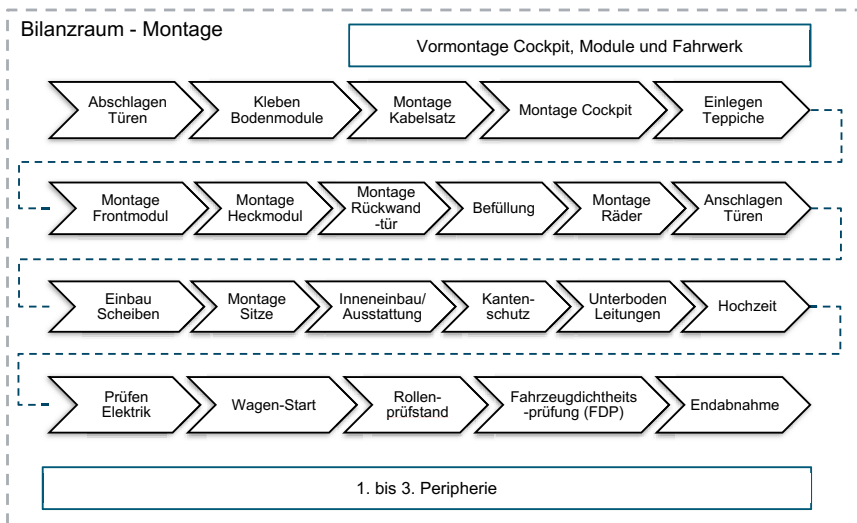


Abbildung 22: Bilanzraum für das Gewerk Montage (in Anlehnung an Roscher 2008, S. 19)

Aufgrund der häufig schlechten Zugänglichkeit werden in der Montage noch viele Schritte manuell oder halbautomatisiert durchgeführt. Das führt dazu, dass die Anlagen des Hauptprozesses nicht maßgeblich den Energieverbrauch für das Gewerk Montage bestimmen. Die Anlagen der 2. und vor allem der 3. Peripherie sind hier die energetischen Hauptverbraucher (Imgrund 2011, S. 46). Die dritte Peripherie versorgt die Mitarbeiter mit dem geeigneten Arbeitsklima, sie stellt

Frischlucht, Licht und Wärme zur Verfügung. Somit sind elektrische Energie und Wärme die Hauptenergieträger Neben dem Anbringen von Anbauteilen findet auch die Befüllung des Autos mit Fluiden statt. Diese sind unter anderem Bremsflüssigkeit, Öle und Treibstoff. Des Weiteren wird nach dem Wagen-Start auf einem Rollenprüfstand die Funktion des Fahrzeuges getestet; hier sorgt die Peripherie 2. Ordnung für die Absaugung der Schadstoffe (Roscher 2008, S. 19). Im Anschluss daran wird außerdem die Fahrzeugdichtigkeitsprüfung durchgeführt, in der das Fahrzeug auf Wassereintritt geprüft und zumeist auch gewaschen wird. Anschließend erfolgt die Endabnahme und Auslieferung.

Steigerung der Energieeffizienz von Fabriken der
Automobilproduktion

Dehning, P.

2017, XV, 143 S. 65 Abb., 26 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-19097-2