Im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE)

ECODESIGN
1. Teil

Schulung „Entwicklung energieeffizienter Maschinen und Geräte“

Timo Schudeleit inspire AG / ETH Zürich
Lukas Weiss inspire AG / ETH Zürich
Rainer Züst Züst Engineering AG

Version: 11.12.2014

Auftraggeber

Bundesamt für Energie (BFE), EnergieSchweiz, CH-3003 Bern

Das BFE ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer

inspire AG / ETH Zürich, sowie Züst Engineering AG

Autoren

Timo Schudeleit, inspire AG / ETH Zürich

Lukas Weiss, inspire AG / ETH Zürich

Rainer Züst, Züst Engineering AG

Begleitgruppe

Sepp Keller (Vorsitz), Swissmem

Christoph Blättler, Swissmem

Roland Frick, Swissmechanic

Felix Heimgartner, SMZ

Roger Roth, IST

Christian Wirz, WERZ / HSR

Jacques Richard, HES

Adriano Nasciuti, SUPSI

Martin Stöckli, inspire academy / inspire AG

Conrad Brunner, S.A.F.E.

Die Planungshilfe „Evaluation energieeffizienter Maschinen & Geräte“ wurde im Rahmen des Schulungsprojekts „Systematische Konzeption & Ausgestaltungen der Schulung inkl. Umsetzung“ im Bereich energieeffizienter Maschinen & Geräte“ im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE) verfasst.

Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

inspire AG / ETH Zürich
CLA, ETH Zentrum
CH-8092 Zürich

Telefon +41 44 633 08 03

weiss@inspire.ethz.ch / www.inspire.ethz.ch

Züst Engineering AG
Eichbühlstrasse 6
8607 Seegräben

Telefon +41 44 932 51 59

rainer.zuest@zuestengineering.ch / www.zuestengineering.ch

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 3
1. Einleitung 5
1.1 Allgemeine Motivation 6
1.2 Struktur des Dokuments & Methodik 7
1.3 Praxisbeispiel: „PHILIPS Café Gourmet“ 9
2. Baustein 1: Datenerfassung 10
2.1 Datensammlung 11
2.2 Systemabgrenzung 13
2.3 Messung 15
2.4 Anwendungsbeispiel 16
3. Baustein 2: Analyse 17
3.1 Diagrammanalyse 18
3.2 Sankey Diagramm 18
3.3 Portfolioanalyse 20
3.4 Anwendungsbeispiel 21
4. Baustein 3: Evaluation 23
4.1 Evaluation der Betriebszustände 24
4.2 Effizienzkennwerte 26
4.3 Anwendungsbeispiel 28
5. Baustein 4: Verbesserungsmaßnahmen 29
5.1 Normen und Richtlinien 30
5.2 Nachhaltigkeitsbezugsrahmen 32
5.3 Qualitative Lösungsbewertung 33
5.4 Quantitative Lösungsbewertung 35

5.5 Anwendungsbeispiel 37
6. Baustein 5: Implementierung 38
6.1 Integration in die Entwicklung 39
6.2 Integration in den Kaufprozess 41
6.3 Integration in die Nutzung 43
6.4 Anwendungsbeispiel 44
7. Zusammenfassung 45
8. Bibliographie 47
9. Appendix 49

1

Einleitung

Dieses Dokument dient der Unterstützung von Herstellern bei der Konzeption von energieeffizienten Maschinen und Geräten. Im Folgenden wird das Wort „Produkte“ als Synonym für Maschinen und Geräte verwendet und Maschinen- und Gerätehersteller werden als Hersteller bezeichnet.

Hersteller sollen von einem Set an Methoden und Werkzeugen profitieren, um das omnipräsente Thema „Energieeffizienz“ bestmöglich in ihre Entwicklungszyklen zu integrieren. Käufer können einen Einblick in die Energieeffizienzkennzeichnung und die (ökonomischen sowie ökologischen) Einsparpotentiale energieeffizienter Produkte bekommen.

Dieses Kapitel beleuchtet die Wichtigkeit von Energieeffizienz und gibt einen Überblick über den Aufbau des Dokuments.

1.1 Allgemeine Motivation

Seit der industriellen Revolution hat der weltweite Konsum an Primärenergie stetig zugenommen und führt zu einer zunehmenden Ressourcenverknappung sowie einer Steigerung der Treibhausgasemissionen. The industrielle Sektor trägt zu 42,6% des weltweiten Elektrizitätsverbrauchs bei [1]. In den EU27-Staaten liegt dieser Wert sogar bei 61,61% [2], wie Abbildung 1 illustriert. Zur gleichen Zeit wird das Energieeinsparpotential von herstellenden Unternehmen auf 20% bis 2050 geschätzt [3]. Damit trägt die Industrie nicht nur zu einem Hauptteil der Treibhausgasemissionen bei, sondern besitzt auch einen großen Hebelarm, um den weltweiten Energieverbrauch und den damit verbundenen Ausstoß von CO_2 und anderen Treibhausgasen zu reduzieren.

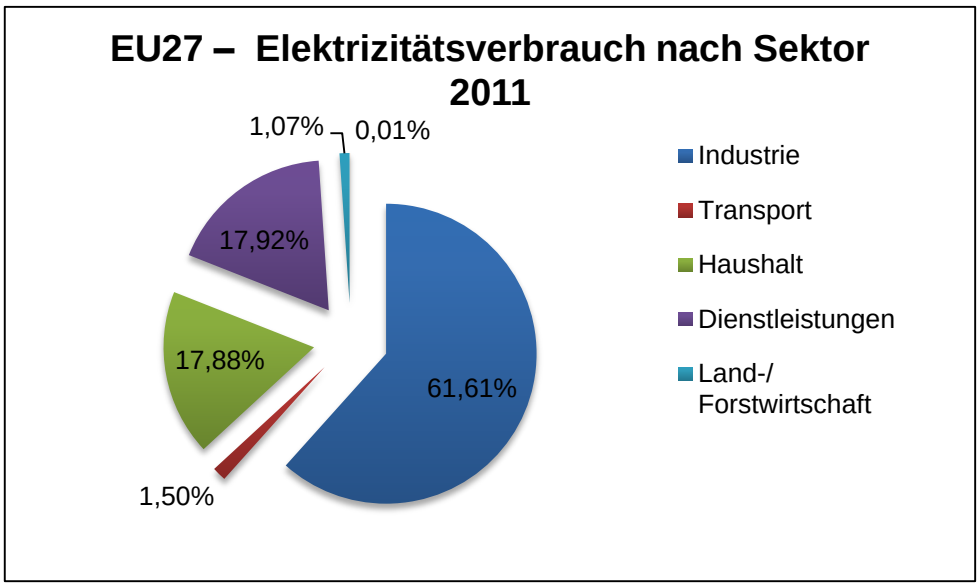


Abbildung 1: EU27 – Elektrizitätsverbrauch bei Sektor in 2011 [2].

Von institutioneller Seite wird dem Ganzen durch die Direktive 2009/125/EC [4] über energieverbrauchsrelevante Produkte und sowie den Energieeffizienzrichtlinien 2012/27/EU [5] Nachdruck verliehen. Der Anreiz für Hersteller sowie Käufer ist dabei vor allem ökonomischer Natur und soll die Wettbewerbsfähigkeit steigern:

> *"We are not doing this because we want to be tree-huggers. We're doing this to become more competitive, more efficient." (Bill Bartlett, Corporate Affairs Director @ McCain Foods,2009)*

Dieser Trend, durch Nachhaltigkeitsüberlegungen die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern, sagt auch Schaltegger [6] voraus.

1.2 Struktur des Dokuments & Methodik

Die Struktur des Dokuments ist in Abbildung 2 dargestellt. Die allgemeine Motivation zur Steigerung der Energieeffizienz durch die Herstellung sowie durch den Kauf von energieeffizienten Produkten (1) wird einleitend beschrieben. Darauffolgend wird die Methodik zur Steigerung der Energieeffizienz von Produkten vorgestellt (1). Die Methodik besteht aus fünf Bausteinen, denen jeweils ein eigenes Kapitel gewidmet ist (2-6). Am Ende befindet sich eine Zusammenfassung des Dokuments (7).

Abbildung 2: Struktur des Dokuments.

Abbildung 3 zeigt die Bausteine zur Steigerung der Energieeffizienz von Produkten, die zugleich die allgemeingültige Methodik darstellen:

1. Datenerfassung: Sammeln von energierelevanten Daten
2. Analyse: Aufbereitung und Analyse gesammelter Daten
3. Evaluation: Handlungsfelder identifizieren
4. Verbesserungsmaßnahmen: Ableiten und auswählen von Verbesserungsmaßnahmen
5. Implementierung: Integrieren der Verbesserungsmaßnahmen in den Produktlebenszyklus

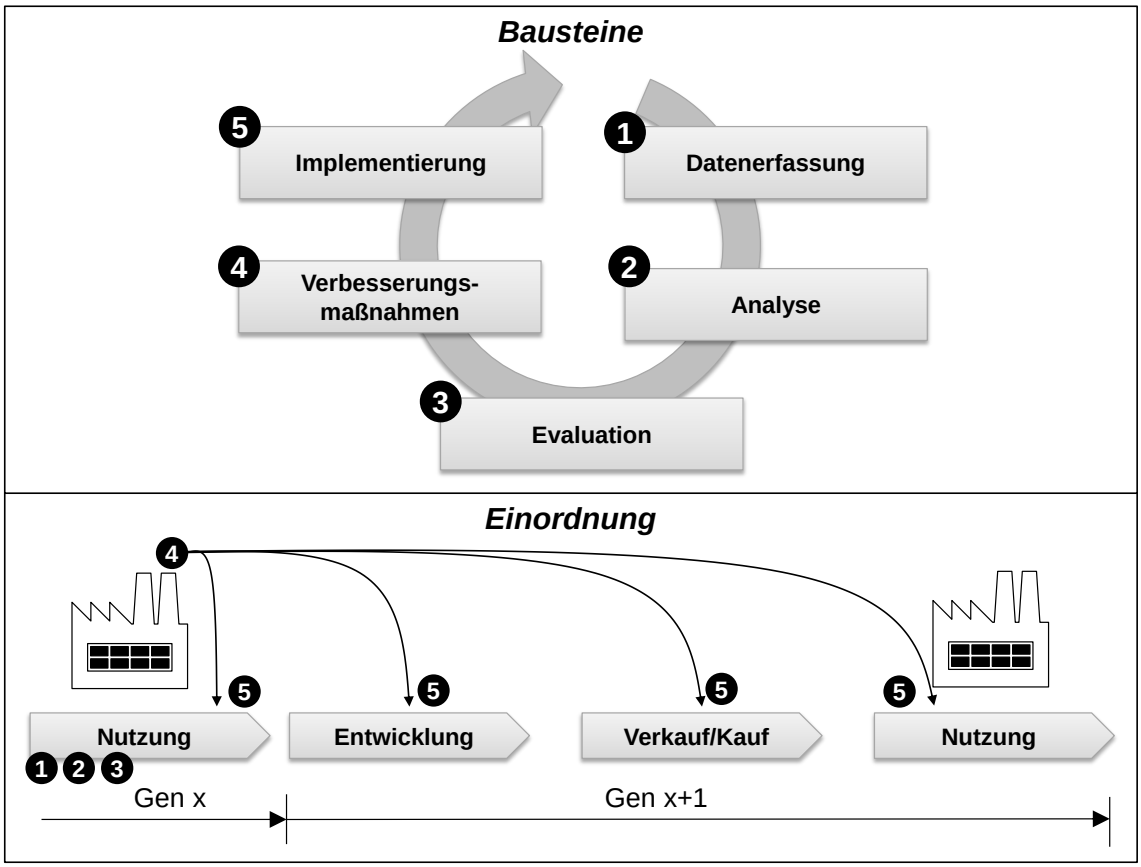


Abbildung 3: Methodik und Bausteine zur Steigerung der Energieeffizienz von Produkten.

Die Bausteine lassen sich den Lebenszyklusphasen zuordnen. Soweit es sich um aktive Produkte handelt, wird von der Nutzungsphase ausgegangen. Die Datengewinnung in dieser Phase ist praxisnah und stellt die Relevanz der Betrachtung sicher (Baustein 1). Basierend auf den erfassten Daten erfolgt die Analyse (Baustein 2), um die relevanten Informationen herauszufiltern und zu strukturieren. Nachfolgend wird das bestehende Produkt bewertet und es werden Haupthandlungsfelder identifiziert (Baustein 3). Für diese Handlungsfelder werden Verbesserungsmassnahmen entwickelt, bewertet und ausgewählt (Baustein 4). Je nach Integrationsaufwand bietet sich eine Implementierung in verschiedenen Lebenszyklusphasen an (Baustein 5). Tendenziell können kleine Änderungen während der Nutzung der jeweiligen Produktgeneration umgesetzt werden, wohingegen grundlegende Änderungen bei der Entwicklung, dem Kauf bzw. Verkauf sowie der Nutzung der folgenden Generation zu berücksichtigen sind. In dem vereinfachten Model werden Lösungszyklen innerhalb einer Phase (z.B. innerhalb der Entwicklung) vernachlässigt, da diese in den entsprechenden Organisationen bereits vorhanden sind.

1.3 Praxisbeispiel: „PHILIPS Café Gourmet“

Zur Veranschaulichung und Steigerung der Nachvollziehbarkeit ist ein durchgängiges Praxisbeispiel aus dem Alltag gewählt, an dem die Anwendung der allgemeingültigen Methoden und Werkzeuge gezeigt wird. Auf diese Weise soll der Zyklus zu Steigerung der Energieeffizienz von der Datensammlung über die Analyse und Evaluation bis hin zur Lösungsfindung und Implementierung systematisch durchgespielt werden. Abbildung 4 zeigt die Kaffeemaschine „PHILIPS Café Gourmet“, die im Folgenden als Praxisbeispiel dient.

Abbildung 4: Darstellung des Praxisbeispiels: „PHILIPS Café Gourmet“.

Folgende Leitfragen stellen sich bei der energetischen Betrachtung einer Kaffeemaschine:

- Wie viel Energie verbraucht eine Kaffeemaschine im Büroalltag?
- Wo sind Möglichkeiten die Energieeffizienz zu steigern?
- In welchen Betriebssituationen lässt sich die Energieeffizienz steigern?

2

Baustein 1: Datenerfassung

Abbildung 5 illustriert das Ziel, die Inhalte sowie das Ergebnis des Bausteins 1 „Datenerfassung“.

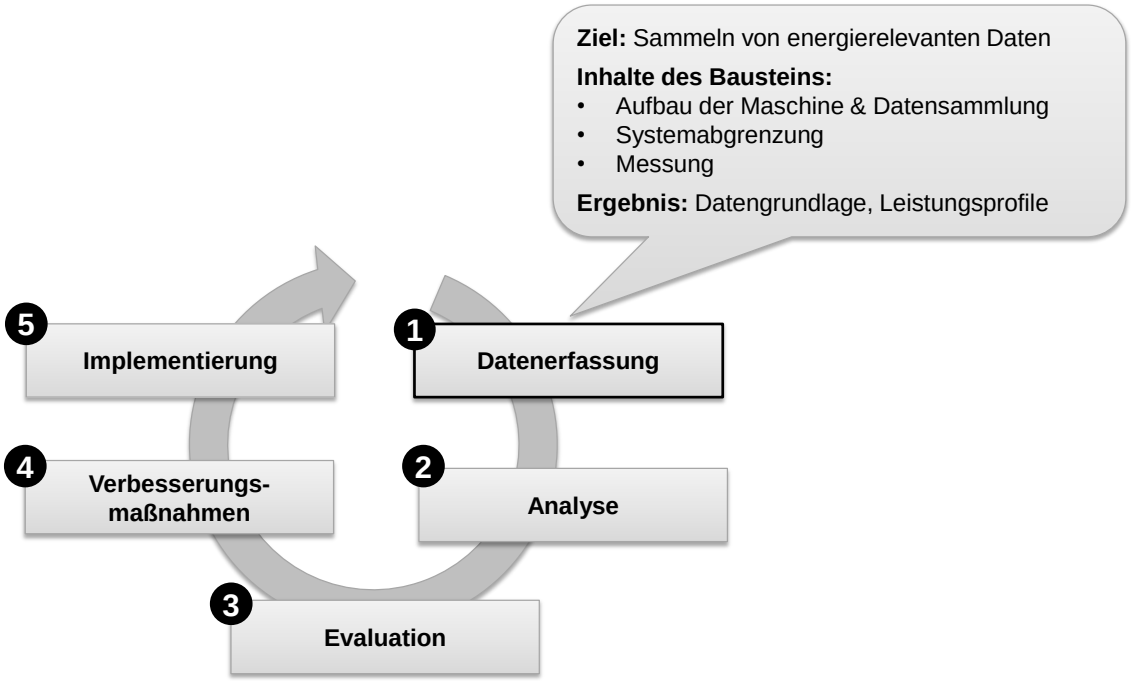


Abbildung 5: Ziel, Inhalt und Ergebnis des Bausteins 1 „Datenerfassung“.

Das Ziel ist einen umfassenden Datensatz an energierelevanten Daten zu sammeln. Dazu gehören Datenblätter, Anleitungen und Pläne, um mit dem Aufbau des Produktes vertraut zu werden, aber auch messtechnisch erfasste Daten. Vor der Messung muss das System sinnvoll abgegrenzt werden, um den Aufwand für die darauffolgenden Bausteine im Rahmen zu halten und trotzdem eine aussagekräftige Beurteilung zu ermöglichen. Das Ergebnis des Bausteins 1 ist eine umfassende Datengrundlage insbesondere Leistungsprofile, um über den Energieverbrauch Aussagen treffen zu können.

2.1 Datensammlung

Die Datensammlung dient dazu, alle Informationen die im Zusammenhang mit dem Energiekonsum stehen zusammenzustellen. Die Datensammlung soll folgende Zwecke erfüllen:

- Klarheit über den Aufbau des Produktes
- Klarheit über die Funktionen des Produktes
- Klarheit über Leistungskennwerte des Produktes

Abbildung 6 zeigt den Aufbau des Praxisbeispiels. Der Hersteller verfügt über Zeichnungen, Schaltpläne und Stücklisten, die den Aufbau noch weitaus detaillierter darstellen.

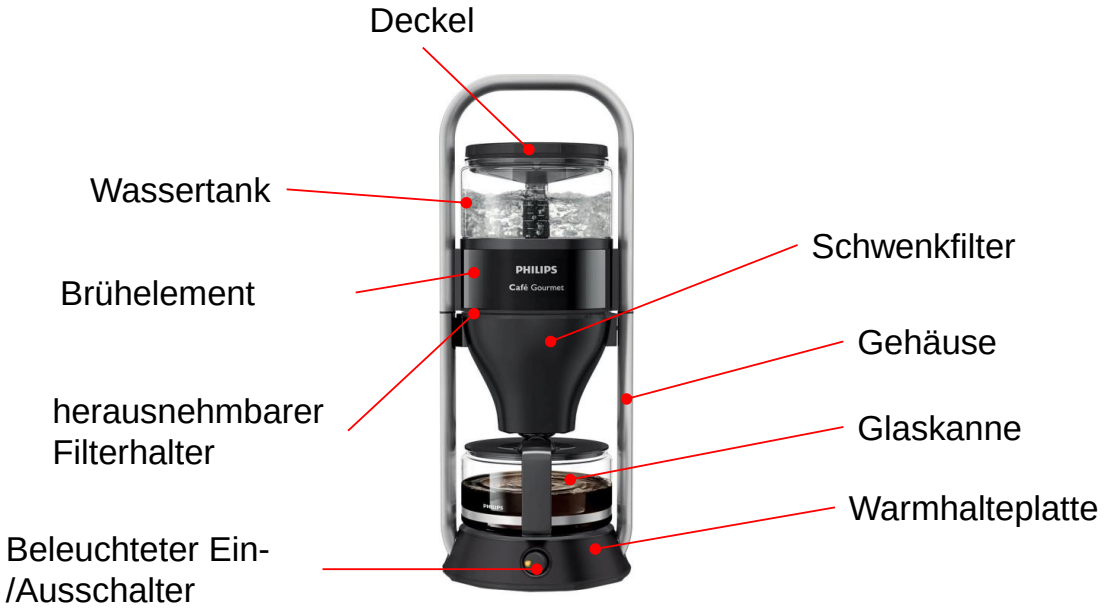


Abbildung 6: Aufbau des Praxisbeispiels: „PHILIPS Café Gourmet“.

Ebenfalls aus den Datenblättern zu entnehmen sind die Kennwerte eines Produktes. Diese sind erforderlich, um die Funktionen des Produktes nachvollziehen zu können und abschätzende Rechnungen durchzuführen. Ein Ausschnitt aus der Produktbeschreibung des Praxisbeispiels ist in Abbildung 7 aufgeführt. Die Kaffeemaschine verfügt über eine Glaskanne, die maximale Leistung ist mit 1300W spezifiziert und pro Brühvorgang sind maximal 10 Tassen möglich. Des Weiteren wird die Kaffeemaschine über einen manuellen Ein- und Ausschalter betätigt. Der Kaffee in der Glaskanne wird durch eine Warmhalteplatte warm gehalten und die Brühtemperatur beim Kochvorgang ist mit 93°C angegeben.

Name: Philips Café Gourmet

Kanne: Glaskanne

Leistung: 1300 Watt

Tassen pro Brühvorgang: 10

…

Komforteigenschaften: beleuchteter Ein- und Ausschalter,…

Ausstattungsmerkmale: …, Warmhalteplatte

Sonstiges: … / Brühtemperatur 93°C

Abbildung 7: Leistungskennwerte des Praxisbeispiels: „PHILIPS Café Gourmet“.

2.2 Systemabgrenzung

Durch das Festlegen von Systemgrenzen werden der Betrachtungsgegenstand und die notwendigen Stoff- und Energieflüsse von und zu der Umwelt festgelegt. Die Systemabgrenzung erfolgt in drei Schritten:

1. Systemgrenzen skizzieren
2. Energieflüsse eintragen
3. Stoffflüsse eintragen

Die Systemabgrenzung für das Praxisbeispiel ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Kaffeemaschine wird mit elektrischem Strom betrieben und wandelt mit der Zeit Wasser sowie Kaffeepulver in Kaffee und Kaffeesatz um, wobei Abwärme entsteht und sauberer Kaffeefilter in benutzten Kaffeefilter umgewandelt wird.

Abbildung 8: Systemgrenzen des Praxisbeispiels: „PHILIPS Café Gourmet“.

Nachdem das System mit allen Energie- und Stoffflüssen abgegrenzt ist, muss eine Auswahl an Flüssen getroffen werden, welche als relevant für das jeweilige Ziel (hier: Reduktion des Energieverbrauchs) betrachtet wird. Abbildung 9 zeigt die Stoff- und Energieflüsse des Praxisbeispiels sowie deren Messgrößen. Die für den Energieverbrauch als relevant erachteten Größen sind in dunkelgrau hervorgehoben.

Abbildung 9: Stoff- und Energieflüsse des Praxisbeispiels.

2.3 Messung

Elektrische Arbeit ist das Integral der Leistung über die Zeit, also die Fläche unter der Leistungskurve ($\mathrm{E} = \int_0^t P(t)dt$). Für die Leistungsmessung sind kommerzielle Geräte verfügbar, wie z.B. von Fluke oder Kometec (siehe Abbildung 10). Bei komplexeren Produkten (z.B. Werkzeugmaschinen) kommen mehrkanalige Messgeräte zum Einsatz, die das Leistungsprofil der energierelevanten Komponenten einzeln in einer zeitgleichen Messung aufnehmen.

Fluke Leistungsmessgerät

Kometec Leistungsmessgerät

Multikanalmesssystem

Abbildung 10: Messgeräte zur Bestimmung des elektrischen Leistungsprofils [7-9].

Für Messung des Volumenstroms von Druckluft werden thermische Strömungssensoren eingesetzt und im Bedarfsfall die Leistung des Volumenstroms mit Hilfe eines elektrischen Äquivalents in elektrische Leistung umgerechnet. Zur Messung des Volumenstroms von Flüssigkeiten werden Durchflussmesser eingesetzt.

Neben der Messung lassen sich bereits erste Berechnungen durchführen. Die Menge des gekochten Kaffees kann durch Zählen bestimmt werden. Eine Zeitmessung ist nicht erforderlich, wenn über mindestens einen Zyklus (hier ein Kochzyklus) des Leistungsprofils aufgezeichnet wird. Im Praxisbeispiel kann so der Kaffeekonsum sowie die Betriebsdauer wie folgt abgeschätzt werden:

$$Kaffeekonsum\left[\frac{Kannen}{Jahr}\right] = \frac{Kaffeekonsum\left[\frac{Tassen}{Tag}\right] \times Arbeitstage\left[\frac{Tage}{Jahr}\right]}{Kannenfassungsvermögen\left[\frac{Tassen}{Kanne}\right]},$$

$$Betriebsdauer\left[\frac{Stunden}{Jahr}\right] = Betriebsdauer\left[\frac{Stunden}{Tag}\right] \times Arbeitstage\left[\frac{Tage}{Jahr}\right].$$

2.4 Anwendungsbeispiel

Abbildung 11 zeigt das Anwendungsbeispiel, auf welches die zuvor vorgestellten Schritte angewendet werden sollen.

1. Bitte grenzen Sie die Fräsmaschine gegen die Systemumgebung ab.
2. Bitte beschriften Sie die Hauptkomponenten, welche für den Energieverbrauch der Maschine verantwortlich sind.
3. Bitte zeichnen Sie die hinein- und herausfließenden Energie- und Ressourcenflüsse ein.

Abbildung 11: Anwendungsbeispiel: Aufbau und Systemabgrenzung.

Abbildung 12 zeigt eine mögliche Lösung für die Anwendung der zuvor vorgestellten Werkzeuge auf das Beispiel.

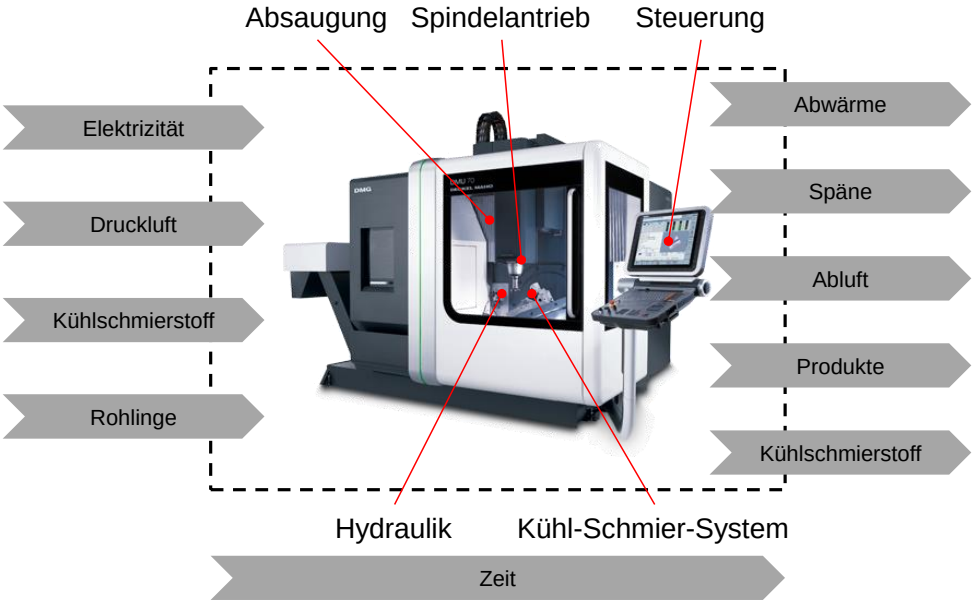


Abbildung 12: Anwendungsbeispiel: Aufbau und Systemabgrenzung (Lösung).

3

Baustein 2: Analyse

Abbildung 13 illustriert das Ziel, die Inhalte sowie das Ergebnis des Bausteins 2 „Analyse“.

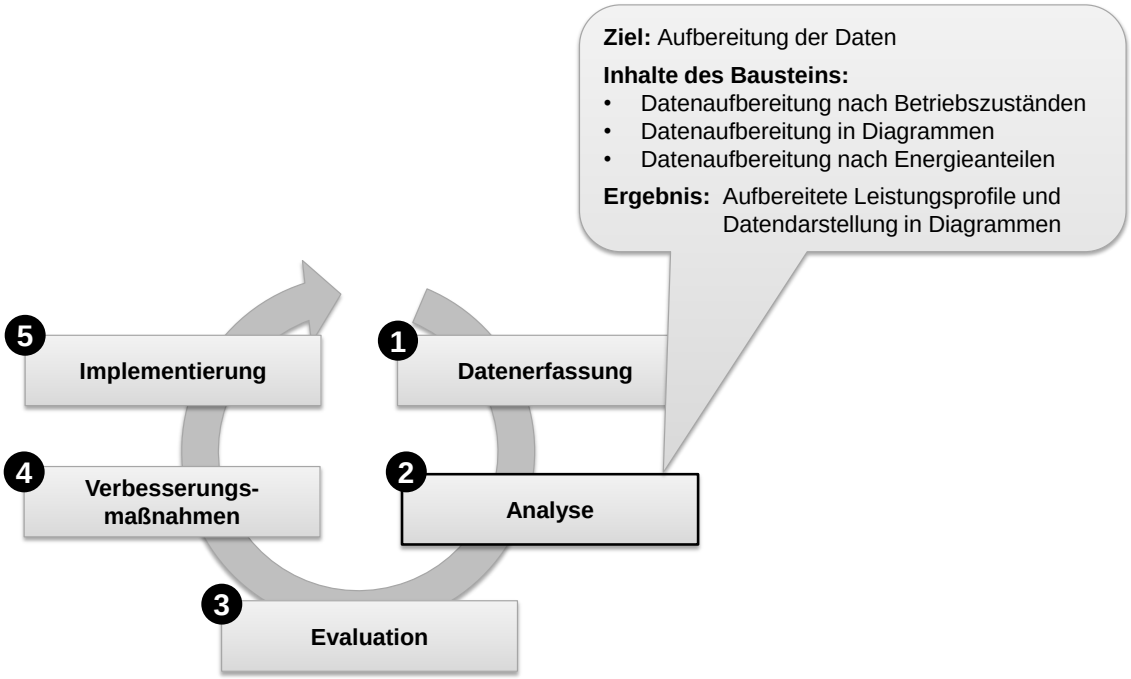


Abbildung 13: Ziel, Inhalt und Ergebnis des Bausteins 2 „Analyse“.

Die Analyse zielt auf die Strukturierung und Aufbereitung von Daten ab. Die Datenaufbereitung nach Betriebszuständen empfiehlt sich, um ineffiziente Betriebszustände zu identifizieren und diese gezielt zu adressieren. Die Datenaufbereitung soll somit Klarheit schaffen und Ansatzpunkte für die nachfolgende Evaluation schaffen. Die Energieanteile bzw. Leistungsniveaus lassen sich den einzelnen Komponenten zuordnen, um so deren Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch zu veranschaulichen. Mit der Portfolioanalyse können die kritischen Komponenten identifiziert und erste Strategien zur Verbesserung abgeleitet werden. Ergebnis der Analyse ist ein Set aus aufbereiteten Leistungsprofilen und Datendarstellungen in Diagrammen.

3.1 Diagrammanalyse

Die Diagrammanalyse erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden die verschiedenen Betriebszustände des jeweiligen Produktes spezifiziert. Im zweiten Schritt werden die Betriebszustände dem Leistungsverlauf im Diagramm zugeordnet. Auf diese Weise wird ein Zusammenhang zwischen den verschiedenen Leistungsniveaus und den Funktionen des Produktes hergestellt. Abbildung 14 zeigt das schematische Leistungsprofil des Praxisbeispiels inklusive der Zuordnung der Betriebszustände: Kaffeekochen und Warmhalten sowie Ein- und Ausschalten. Die Fläche unter dem Leistungsprofil ist ein Maß für die im Betrieb benötigte Energiemenge. Ziel ist es, Verbesserungsmaßnahmen zu finden, durch welche sich die Fläche unter dem Leistungsprofil verkleinern lässt.

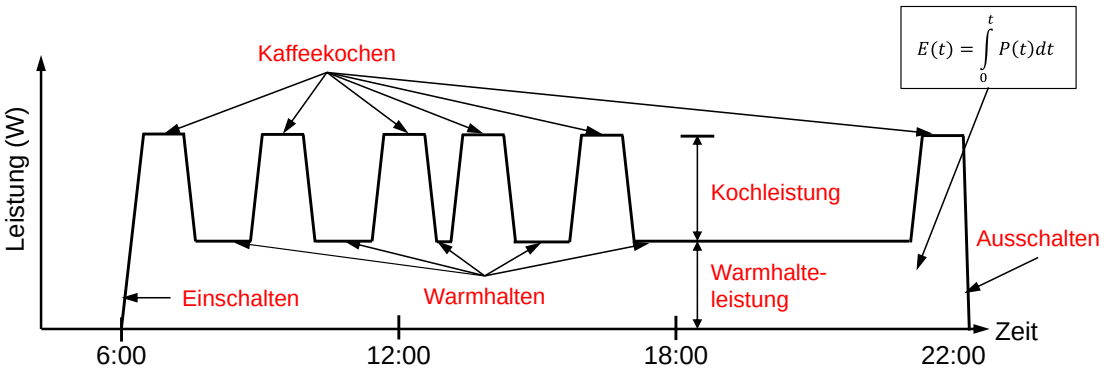


Abbildung 14: Schematisches Leistungsprofil des Praxisbeispiels.

3.2 Sankey Diagramm

Die Darstellung im Sankey Diagramm geht auf den irischen Ingenieur Captain Sankey zurück, welcher die Energieflüsse anhand von Pfeilen dargestellt hat, um die thermische Effizienz von Dampfmaschinen zu veranschaulichen und zu bewerten. Abbildung 15 zeigt ein solches Sankey Diagramm, das die Verluste von Druckluft von der Herstellung bis zur Nutzung in den Aggregaten zu zeigt. Es wird deutlich, dass nur etwa 5% der aufgebrachten Leistung in Form von Druckluft am Aggregat zur Verfügung stehen und die Kompressorverluste, die Anlauf- und Nachlaufverluste sowie die Druckverluste die Haupthandlungsfelder sind, welche zusammen 70% des Energieverlusts ausmachen.

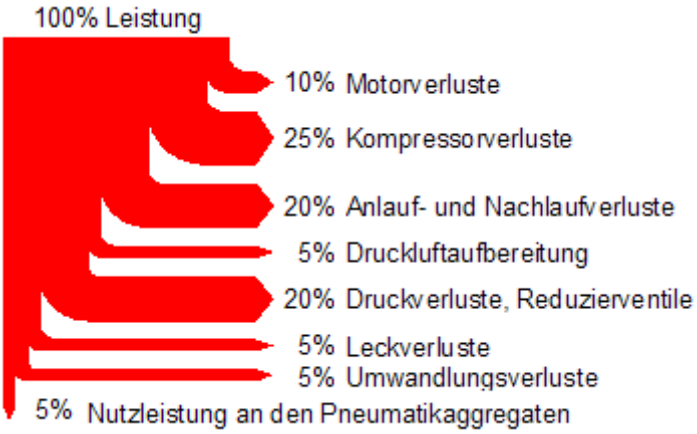


Abbildung 15: Sankey Diagramm von Druckluft [10].

Folgende Annahmen liegen einem Sankey Diagramm zugrunde:

- Die Pfeilbreite ist proportional zum dargestellten Wert (z.B. 5 cm für 5 kW)
- Keine Speicher („Was rein geht, geht auch wieder raus“)
- Momentaufnahme (kein zeitlicher Verlauf)

Die Sankey Darstellung eignet sich für die visuelle Momentaufnahme des Betriebszustandes eines jeden Produktes. Abbildung 16 veranschaulicht, wie aus dem Leistungsverlauf des Praxisbeispiels ein Sankey Diagramm erstellt werden kann.

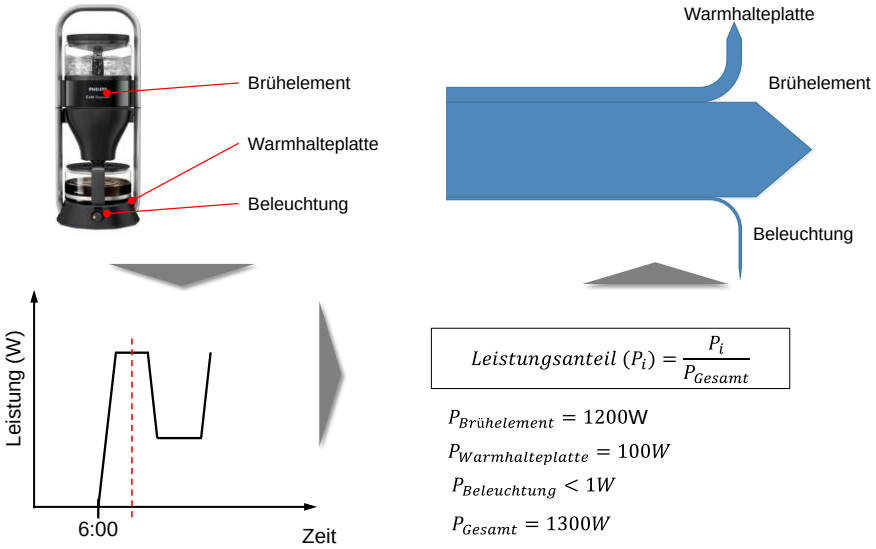


Abbildung 16: Erstellung eines Sankey Diagramms am Praxisbeispiels.

Im ersten Schritt ist ein Betriebszustand (hier „Kaffeekochen“) zu wählen, für welche das Sankey Diagramm erstellt werden soll. Für diese Momentaufnahme ist den energiekonsumierenden Komponenten ein Leistungswert zuzuordnen, der mit einer Mehrkanalmessung direkt bestimmt wird. Bei einer Messung an der Hauptleitung erfolgt die Bestimmung indirekt aus dem Leistungsverlauf in Kombination mit den Betriebszuständen. Für jede Komponente wird ein Leistungsanteil berechnet, welcher proportional zur Breite des Pfeils im Sankey Diagramm ist (z.B. 5 cm bei 50% und 2,5 cm bei 25%, etc.). Im Praxisbeispiel wird deutlich, dass das Brühelement den Hauptanteil der Energie während des Kaffeekochens konsumiert. Auf die gleiche Weise kann ein Sankey Diagramm für den Betriebszustand „Warmhalten“ erstellt werden, um Aussagen über den zeitlich dominierenden Betriebszustand treffen zu können.

4

3.3 Portfolioanalyse

Ein bekannter Vertreter für die Portfolioanalyse ist die BCG-Matrix. Im Allgemeinen beinhaltet die Portfolioanalyse die Visualisierung von zwei Konfliktvariablen, die Klassifizierung in Sektoren und die sektorabhängige Entscheidungsfindung. Thiede et al. [11] haben die Portfolioanalyse erstmals im Bereich der Energieeffizienz eingesetzt. Der Weg zu einem Energieportfolio besteht aus vier Schritten:

1. Definieren von zwei Konfliktvariablen, z.B. Betriebsdauer und Leistungsaufnahme
2. Zeichnen des Portfolios
3. Eintragen der Energieverbraucher
4. Entwickeln von Strategien, um sich von kritischen Quadranten in weniger kritischen zu bewegen.

Abbildung 17 zeigt die Portfolioanalyse für das Praxisbeispiel. Das Brühelement verfügt über eine hohe Betriebsdauer sowie eine hohe Leistungsaufnahmen, wodurch ein hoher Anteil des totalen Energieverbrauchs verursacht wird. Die Reduktion der Betriebsdauer sowie der Leistungsaufnahme sind mögliche Stellschrauben zur Steigerung der Energieeffizienz. Die Warmhalteplatte sowie die Beleuchtung befinden sich aufgrund ihrer geringeren Leistungsaufnahme in einem weniger kritischen Quadranten. Die Reduktion der Betriebsdauer ist eine sinnvolle Strategie zur Effizienzsteigerung.

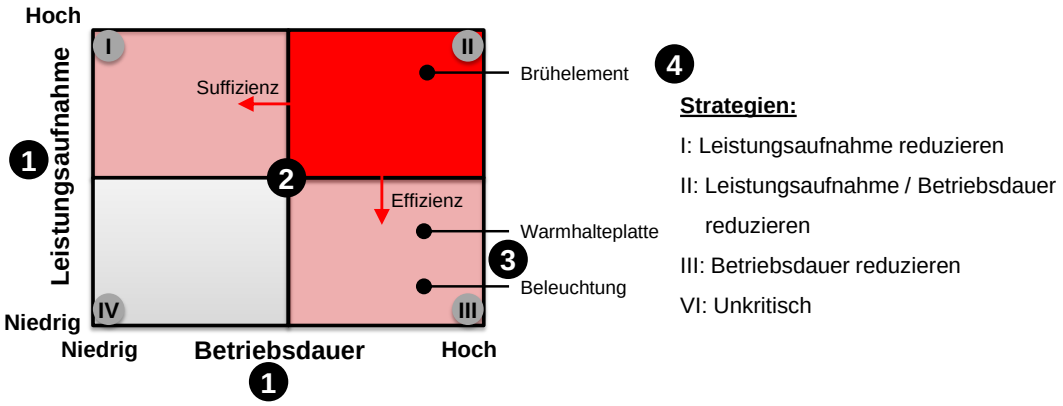


Abbildung 17: Portfolioanalyse am Praxisbeispiel [11].

3.4 Anwendungsbeispiel

Abbildung 18 zeigt das Anwendungsbeispiel auf welches die zuvor vorgestellten Werkzeuge angewendet werden sollen.

1. Bitte führen Sie eine Diagramm-Analyse durch. Bitte benennen Sie dazu die mit Pfeilen markierten Ereignisse bzw. Leistungsanteile für den schematischen Verlauf eines Fräsprozesses.
2. Bitte zeichnen Sie für den mit t_{Sankey} markierten Zeitpunkt ein Sankey-Diagramm.

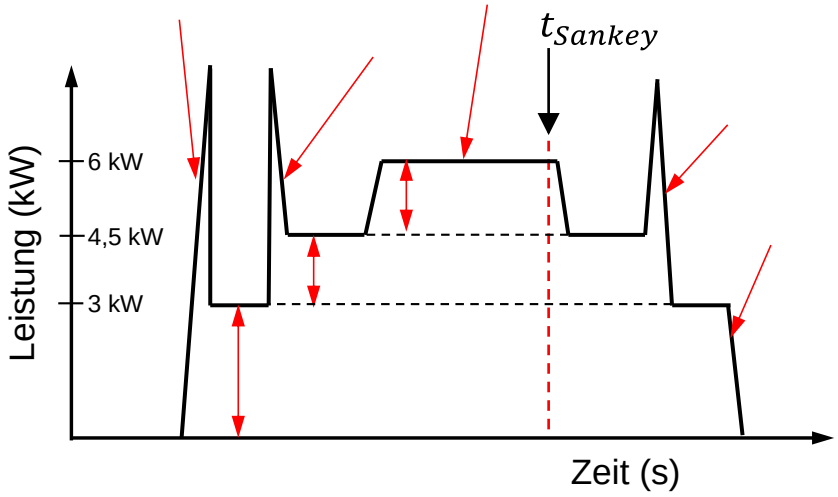


Abbildung 18: Anwendungsbeispiel: Diagramm-Analyse und Sankey-Diagramm.

Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen mögliche Lösungen für die Anwendung der zuvor vorgestellten Werkzeuge auf das Beispiel.

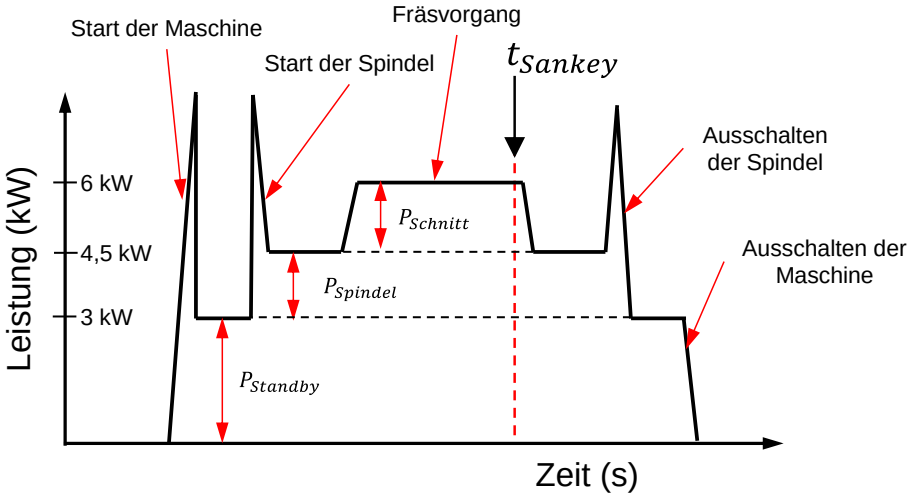


Abbildung 19: Anwendungsbeispiel: Diagramm-Analyse (Lösung).

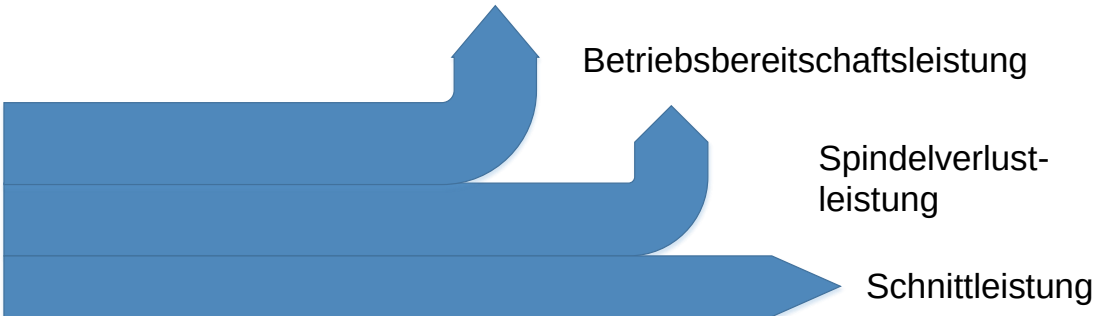


Abbildung 20: Anwendungsbeispiel: Sankey-Diagramm (Lösung).

4

Baustein 3: Evaluation

Abbildung 21 illustriert das Ziel, die Inhalte sowie das Ergebnis des Bausteins 3 „Evaluation“.

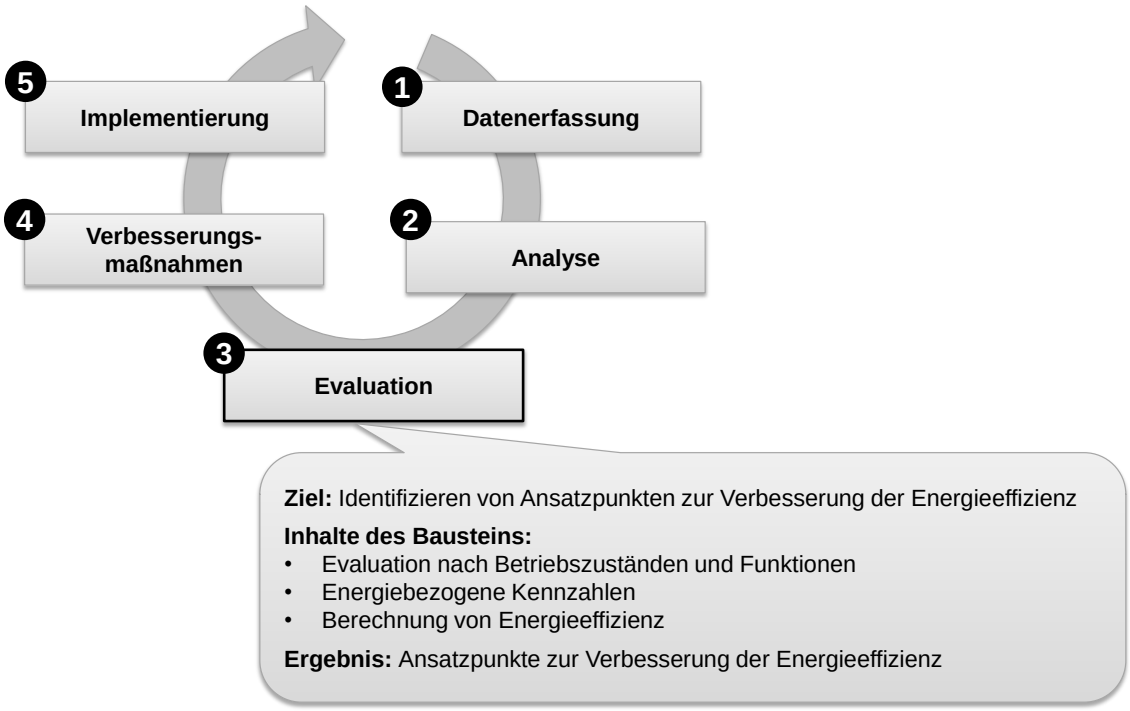


Abbildung 21: Ziel, Inhalt und Ergebnis des Bausteins 2 „Evaluation“.

Ziel ist die Identifikation von vielversprechenden Ansatzpunkten zur Steigerung der Energieeffizienz des jeweiligen Produkts. Eine Evaluation nach Betriebszuständen ermöglicht eine Identifikation der Phasen des Betriebs, welche den größten Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch haben und wo die Ansatzpunkte zur Verbesserung zu finden sind. Für die direkte energetische Bewertung dienen energiebezogene Kennzahlen sowie die Berechnung der Energieeffizienz. Ergebnis der Evaluation ist eine Auswahl an Ansatzpunkten zur Steigerung der Energieeffizienz, um Verbesserungsmaßnahmen ableiten und bewerten zu können.

4.1 Evaluation der Betriebszustände

Nachdem der Aufbau und die Funktionen des Produktes bekannt sind, muss der Zusammenhang von Betriebszuständen und den energiekonsumierenden Komponenten hergestellt werden. Das Zusammenspiel von Betriebszuständen und Komponenten kann nach der Messung und der Analyse in Diagrammen vollständig durchgeführt werden. Abbildung 22 zeigt wie eine solche Zuordnung erfolgen kann anhand des Praxisbeispiels. Beim Einschalten des Hauptschalters werden die Beleuchtung, das Brühelement sowie die Warmhalteplatte eingeschaltet. Nach dem Aufheizen läuft der Kaffee durch, wobei weiterhin alle Komponenten aktiv sind. Dies gilt auch für den Betriebszustand bei dem der Kaffee warmgehalten wird, in dem das Brühelement nicht weiter benötigt wird.

- **Zustand „Aus“:** Hauptschalter ist ausgeschaltet. Beleuchtung, Brühelement und Warmhalteplatte sind ausgeschaltet.

Hauptschalter „ein“

- **Zustand „Aufwärmen“:** Hauptschalter eingeschaltet. Beleuchtung ist eingeschaltet, Brühelement und Warmhalteplatte heizen auf.

Brühelement aufgeheizt

- **Zustand „Kaffeekochen“:** Hauptschalter eingeschaltet. Beleuchtung ist eingeschaltet, Brühelement und Warmhalteplatte aufgeheizt. Kaffee läuft durch den Filter.

Kaffee ist durchgelaufen

- **Zustand „Warmhalten“:** Hauptschalter eingeschaltet. Beleuchtung ist eingeschaltet, Brühelement und Warmhalteplatte sind eingeschaltet. Kaffee befindet sich in der Glaskanne.

Abbildung 22: Zuordnung von Betriebszuständen und Komponenten am Praxisbeispiel.

Für das Beispiel der Kaffeemaschine lässt sich die in Tabelle 1 aufgelistete Zuordnung aufstellen. Bei komplexeren Beispielen kommen Funktionen wie Standby oder Betriebsbereit hinzu.

Tabelle 1: Zuordnung von Betriebszuständen und Komponenten.

Komponente	Zustand 1: Kaffeekochen	Zustand 2: Warmhalten	Zustand 3: Aus
Ein-/Ausschalter	Ein	Ein	Aus
Brühelement	Ein	Ein	Aus
Warmhalteplatte	Ein	Ein	Aus

Für jeden Betriebszustand können Kennzahlen entwickelt werden. Variablen um die Fläche unter dem Leistungsprofile zu reduzieren sind die Leistungsaufnahme selbst und die Zeit. Aus diesem Grund können leistungs-/energiebezogene sowie zeitbezogene Kennzahlen unterschieden werden, um die kritischen Betriebszustände zu identifizieren. Beispiele dazu sind in Abbildung 23 aufgelistet.

Leistungs-/Energiebezogen	Zeitbezogen
$S_P = \frac{P_{Warmhalten}}{P_{Kaffeekochen}}$	$S_t = \frac{t_{Aufwärmen}}{t_{Einschaltdauer}}$
$S_P = \frac{P_{Kaffeekochen} - P_{Warmhalten}}{P_{Kaffeekochen}}$	$S_t = \frac{t_{Aufwärmen}}{t_{Kaffeekochen}}$
$S_E = \frac{E_{Kaffeekochen}}{E_{Gesamt}}$	$S_t = \frac{t_{Kaffeekochen}}{t_{Einschaltdauer}}$
$S_E = \frac{E_{Warmhalten}}{E_{Gesamt}}$	$S_t = \frac{t_{Warmhalten}}{t_{Einschaltdauer}}$

Abbildung 23: Betriebszustandskennzahlen am Praxisbeispiel.

4.2 Effizienzkennwerte

Nach ISO 9000 [12] ist Effizienz definiert als „Verhältnis zwischen dem erreichten Ergebnis und den eingesetzten Ressourcen“. In der Literatur findet sich eine Vielzahl an Effizienzkennwerten, die sich auf folgende drei Grundtypen herunterbrechen lassen:

1. Energieintensität: Energieverbrauch pro Produktionseinheit (Stück, Zyklus, etc.)
2. Spezifischer Energieverbrauch: Energieverbrauch pro Masse, Volumen, Fläche oder Länge
3. Umwandlungseffizienz: Energieabgabe zu Energieverbrauch

Abbildung 24 veranschaulicht diese drei Grundtypen am Praxisbeispiel:

1. Energieintensität: Energieverbrauch pro Tasse
2. Spezifischer Energieverbrauch: Energieverbrauch pro Volumen
3. Umwandlungseffizienz: Energieverbrauch pro Wärme (Temperatursteigerung des Wassers)

- **Def. Effizienz**: «Verhältnis zwischen dem erreichten Ergebnis und den eingesetzten Ressourcen» DIN EN ISO 9000:2000

- **Energieintensität (EI):**

$$EI = \frac{Energieverbrauch}{Produktionseinheit}$$

- **Spezifischer Energieverbrauch (SEC):**

$$SEC = \frac{Energieverbrauch}{Masse, Volumen, Fläche, Länge}$$

- **Umwandlungseffizienz (η_{conv}):**

$$\eta_{conv} = \frac{Energieabgabe}{Energieverbrauch}$$

Abbildung 24: Energieeffizienzkennwerte am Praxisbeispiel [13].

Beispiele für weitere Energieeffizienzkennwerte anderer Produkte sind in Abbildung 25 dargestellt. Bei der Motorenherstellung in einem Motorenwerk kann die Energieintensität als Energieverbrauch pro Motor oder bei einer Waschmaschine als Energieverbrauch pro Wäsche quantifiziert werden. Ein populäres Beispiel ist der spezifische Energieverbrauch von Autos, welcher als Volumen an Kraftstoff bezogen auf die zurückgelegte Strecke quantifiziert wird. Die Umwandlungseffizienz ist bei Gasturbinen eine entscheidende Größe, bei der die Menge an verbrauchtem Gas in kWh in Relation zur gewonnenen elektrischen Energie gestellt wird. Die Energieeffizienzkennwerte sind spezifisch für das Produkt und in Abhängigkeit der verfolgten Strategie zu entwickeln.

- **Energieintensität (EI):**

$$EI = \frac{Energieverbrauch}{Motor}; EI = \frac{Energieverbrauch}{Wäsche}$$

- **Spezifischer Energieverbrauch (SEC):**

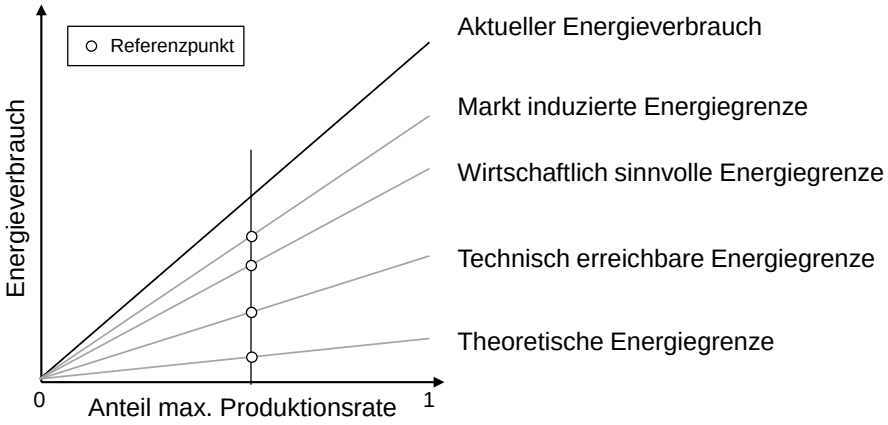
$$SEC = \frac{Volumen\ an\ Kraftstoff}{Strecke}$$

- **Umwandlungseffizienz (η_{conv}):**

$$\eta_{conv} = \frac{Elektrische\ Energie\ [kWh]}{Gas\ [kWh]}$$

Abbildung 25: Beispiele für Energieeffizienzkennwerte [14-17].

Die Energieeffizienzkennwerte führen nur dann zu einer Aussage über den Stand der Technik, wenn einen Referenzwert vergleichend hinzugezogen wird. Zum Beispiel: Auto A verbraucht 5 L pro 100 km während Auto B 10 L pro 100 km verbraucht. Es kann der Schluss gezogen werden, dass Auto A doppelt so effizient ist wie Auto B. Wie an diesem Beispiel veranschaulicht, eignen sich Benchmark-Produkte, um Energieeffizienzaussagen zu treffen. Darüber hinaus können zum Vergleich das auf dem Markt erhältliche, das technisch mögliche, das wirtschaftlich sinnvolle und das theoretische erreichbare Limit hinzugezogen werden. Abbildung 26 illustriert die Benchmark-Möglichkeiten in Abhängigkeit der Produktionsrate. Für den Vergleich wird der Energieverbrauch des zu untersuchenden Produktes ins Verhältnis zum Energieverbrauch eines Vergleichsproduktes gesetzt.



$$\eta_{ref} = \frac{Energieverbrauch_{Benchmark}}{Energieverbrauch_{Produkt}}$$

Abbildung 26: Effizienz als Benchmark [18].

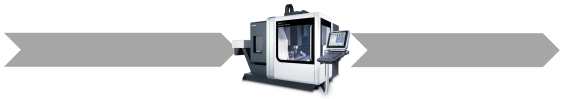
4.3 Anwendungsbeispiel

Abbildung 27 zeigt das Anwendungsbeispiel auf welches die zuvor vorgestellten Werkzeuge angewendet werden sollen. Bitte entwickeln Sie jeweils eine Energieeffizienzkennzahl vom Typ:

1. Energieintensität (EI),
2. Umwandlungseffizienz (η_{conv}) und
3. Spezifischer Energieverbrauch (SEC).

$$EI = \frac{Energieverbrauch}{physikalischer\ Ausgangswert}$$

$$\eta_{conv} = \frac{Energieabgabe}{Energieverbrauch}$$



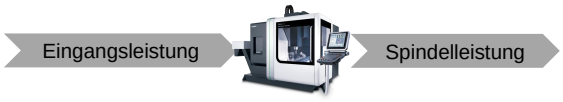
$$SEC = \frac{Energieverbrauch}{Masse, Volumen, Fläche, Länge}$$

Abbildung 27: Anwendungsbeispiel: Energieeffizienzkennzahlen.

Abbildung 28 zeigt eine mögliche Lösung für die Anwendung der zuvor vorgestellten Energieeffizienzkennzahlen auf das Beispiel.

$$EI = \frac{Energieverbrauch}{Bauteil}$$

$$\eta_{conv} = \frac{Spindelleistung}{Eingangsleistung}$$



$$SEC = \frac{Energieverbrauch}{Spanvolumen}$$

Abbildung 28: Anwendungsbeispiel: Energieeffizienzkennzahlen (Lösung).

5

Baustein 4: Verbesserungsmaßnahmen

Abbildung 29 illustriert das Ziel, die Inhalte sowie das Ergebnis des Bausteins 4 „Verbesserungsmaßnahmen“.

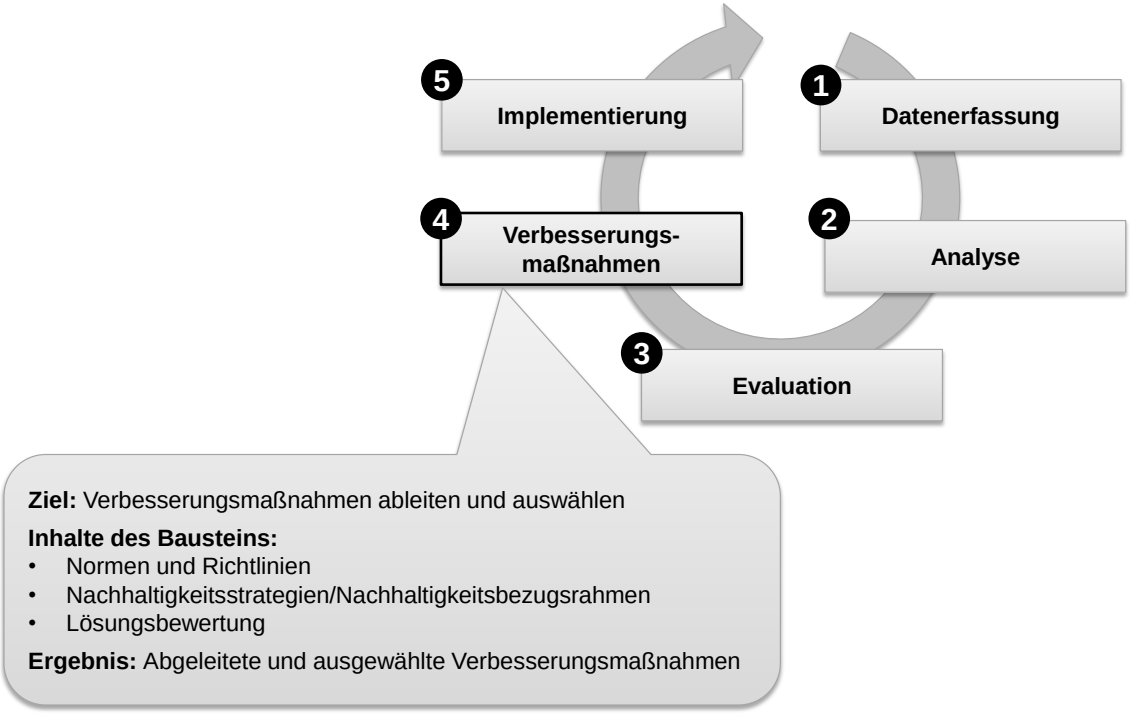


Abbildung 29: Ziel, Inhalt und Ergebnis des Bausteins 4 „Verbesserungsmaßnahmen“.

Das übergeordnete Ziel ist es, Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten und auszuwählen. Dazu werden Normen, Managementsystem und Richtlinien mit Relevanz für das Thema Energieeffizienz vorgestellt, welche Informationen und Vorgehensweisen zur Steigerung der Energieeffizienz enthalten. Des Weiteren wird ein Bezugsrahmen vorgestellt, der auf Nachhaltigkeitsstrategien basiert und zur ganzheitlichen Lösungsfindung dient. Danach wird der Fokus auf qualitative sowie quantitative Methoden zur Lösungsbewertung gelegt, die der Entscheidungsfindung dienen. Ergebnis dieses Bausteins soll eine Reihe an ausgewählten

Verbesserungsmaßnahmen sein, die sich für die Implementierung zur Steigerung der Energieeffizienz des Produktes eignen.

5.1 Normen und Richtlinien

Normen

In der Literatur finden sich eine Reihe von Normen und Richtlinien zur Steigerung der Energieeffizienz von Produkten. Im Folgenden soll ein allgemeiner Überblick über diese Normen und Richtlinien ohne Anspruch auf Vollständigkeit gegeben werden.

Neben der populären ISO 9000 Familie zur Verankerung von Qualitätszielen in der Organisation sind zwei weitere Normen mit Fokus auf Umweltmanagement (ISO 14000 Familie) und Energiemanagement (ISO 50000 Reihe) für die Steigerung von Energieeffizienz von Bedeutung (siehe Abbildung 30). Diese Managementsysteme basieren allgemein auf dem PDCA (Plan-Do-Check-Act) Problemlösungszyklus popularisiert durch W.E. Deming [6].

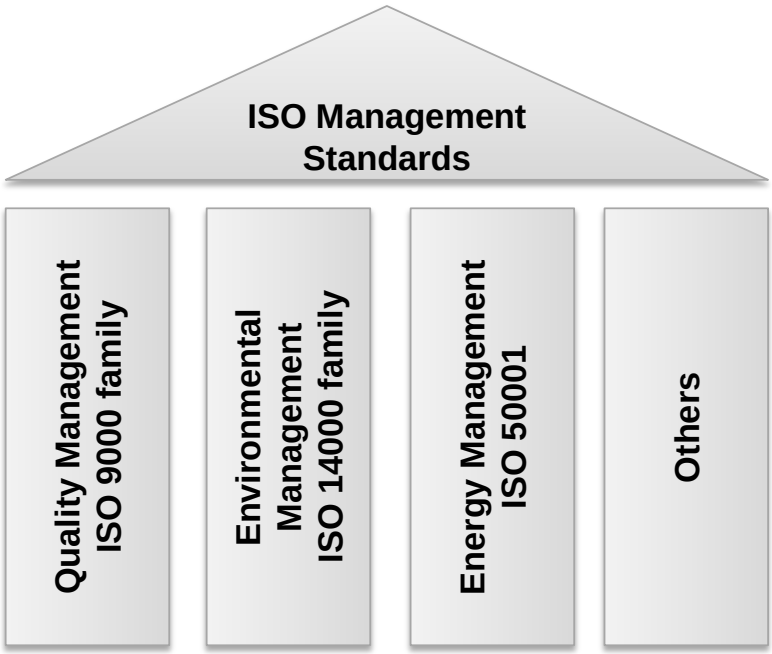


Abbildung 30: ISO Management Standards.

ISO 14955-1 ist eine produktspezifische Norm für Werkzeugmaschinen zur spanenden und formenden Metallbearbeitung [19]. Im normativen Teil werden Prüfverfahren zu energetischen Bewertung vorgestellt. Im informative Anhang befindet sich eine umfangreiche Liste von bewährten Verbesserungsmaßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz mit folgendem Fokus:

- Gesamtmaschinenkonzept
- Antriebe
- Hydraulische Systeme
- Pneumatische Systeme
- Elektrische Systeme
- Kühl- und Schmiersysteme
- Peripheriesysteme
- Leitfaden für energieeffiziente Nutzung
- Steuerungssysteme

Richtlinien

Die EU hat als Ziel den CO_2-Ausstoß bis 2020 in Bezug auf 1990 um 20% zu reduzieren. Zur Realsierung werden kritische Produkte definiert, die besonderen Richtlinie unterzogen werden. Fokusprodukte müssen folgende Kriterien erfüllen:

- eine erhebliche Absatzmenge haben
- eine erhebliche Umweltauswirkung haben
- ein erhebliches Verbesserungspotential aufweisen

Die Festlegung der Fokusprodukte und die Definition von Ökodesignanforderungen erfolgt in der Richtlinie 2009/125/EC [4]. Ein Auszug an Fokusprodukten ist in Abbildung 31 dargestellt.

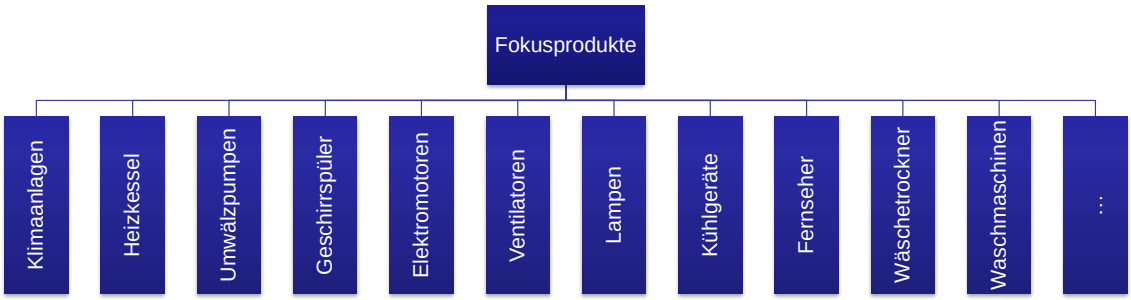


Abbildung 31: Fokusprodukte nach Richtlinie 2009/125/EC [4]

Produkte, die als Fokusobjekte klassifiziert sind, müssen bestimmt energetische Standards erfüllen, um auf dem Europäischen Markt verkauft werden zu dürfen. Diese Standards werden durch die Energieeffizienzkennzeichnung (kurz: EE-Kennzeichnung) in der Richtlinie 2010/30/EU [20] beschrieben. Über die EE-Kennzeichnung wird die Zulassung auf dem Europäischen Markt geregelt. Bei Kühlschränken müssen beispielsweise seit Juli 2012 alle Neugeräte im Handel mindestens mit A+ gelabelt sein, um für den Europäischen Markt zugelassen zu werden. Auch Werkzeugmaschinen wurden in einer Voruntersuchung als relevant im Sinne der Richtlinie eingestuft. Die EE-Kennzeichnung gestaltet sich allerdings aufgrund der Komplexität dieser Maschine und der Vielseitigkeit in der Anwendung als Herausforderung, welche in den kommenden Jahren zu lösen ist. Auf die EE-Kennzeichnung wird in Kapitel 6.2 weiter eingegangen.

5.2 Nachhaltigkeitsbezugsrahmen

Das Framework zur Steigerung der Nachhaltigkeit basiert auf zwei grundlegenden Prinzipien zur Energieverbrauchsreduktion sowie drei Handlungsfeldern, die auch als Nachhaltigkeitsstrategien bezeichnet werden.

Maßnahmen um den Energieverbrauch im Betrieb zu reduzieren lassen sich auf zwei grundlegende Prinzipien zurückführen (siehe Abbildung 1):

1. **Verbrauchsreduktion durch technische Maßnahmen:** Diese Prinzip zielt drauf ab, das Leistungslevel zu reduzieren, um die Fläche unter dem Leistungsverlauf und den Energieverbrauch zu verringern. Technische Maßnahmen sind häufig mit zusätzlichen Kosten verbunden, weshalb diese während der Anschaffungsphase eine große Aufmerksamkeit bekommen.
2. **Verbrauchsreduktion durch organisatorische Maßnahmen:** Dieses Prinzip zielt drauf ab, die Prozesszeit zu reduzieren, um die Fläche unter dem Leistungsverlauf zu verringern. Organisatorische Maßnahmen sind meistens mit keinen oder geringen Kosten verbunden und gehen mit einer Produktivitätssteigerung einher. Aus diesem Grund sind sie besonders attraktiv für eine Optimierung von bestehenden Systemen.

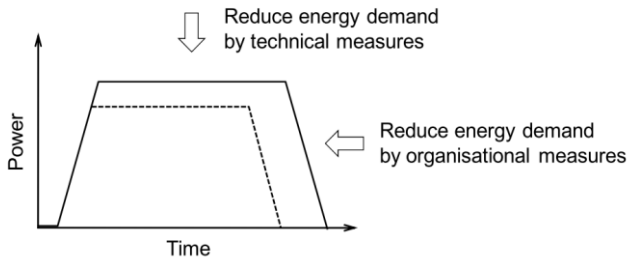


Abbildung 32: Prinzipien zur Einsparung von Energie [21, 22]

Neben den beiden Prinzipen werden drei Nachhaltigkeitsstrategien unterschieden:

1. **Substitution:** Minimierung der Verluste/Umweltbelastung durch Technologiewechsel
2. **Effizienz:** Verbessern des Wirkungsgrades um Verluste zu minimieren
3. **Suffizienz:** Genügsamkeit, Erreichen des vorgegebenen/ übergeordneten Ziels mit minimalen Mitteln

Der Unterschied zwischen den Nachhaltigkeitsstrategien ist in Abbildung 33 veranschaulicht. Ein Produkt wandeln Energie und/oder Material am Eingang in Energie und/oder Material am Ausgang um. Substitution bezeichnet einen Eingriff in das System, bei dem Änderungen am Eingang (z.B. Einsatz erneuerbarer Energien anstelle von Benzin) oder des Systems (z.B. Verwendung eines Fahrrads anstelle des Autos) vorgenommen werden. Effizienz zielt auf die Reduktion der Verluste (z.B. verbessern des Wirkungsgrades eines Elektromotors) ab, ohne das System an sich in Frage zu stellen. Suffizienz stellte die Frage nach der Reduzierung des Bedarfs (z.B. Gebäudeklimatisierung im Sommer abstellen).

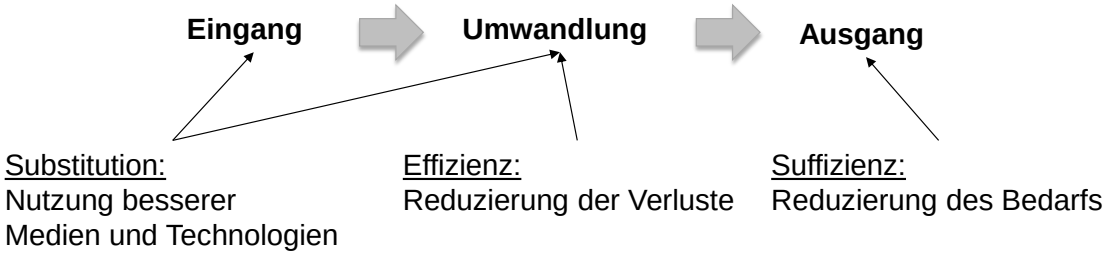


Abbildung 33: Nachhaltigkeitsstrategien.

Das Nachhaltigkeitsframework trägt die Prinzipien zur Verbesserung der Nachhaltigkeit gegenüber den Nachhaltigkeitsstrategien auf und ermöglicht ein gezieltes Brainstorming. Das Nachhaltigkeitsframework für das Praxisbeispiel ist in Abbildung 34 dargestellt.

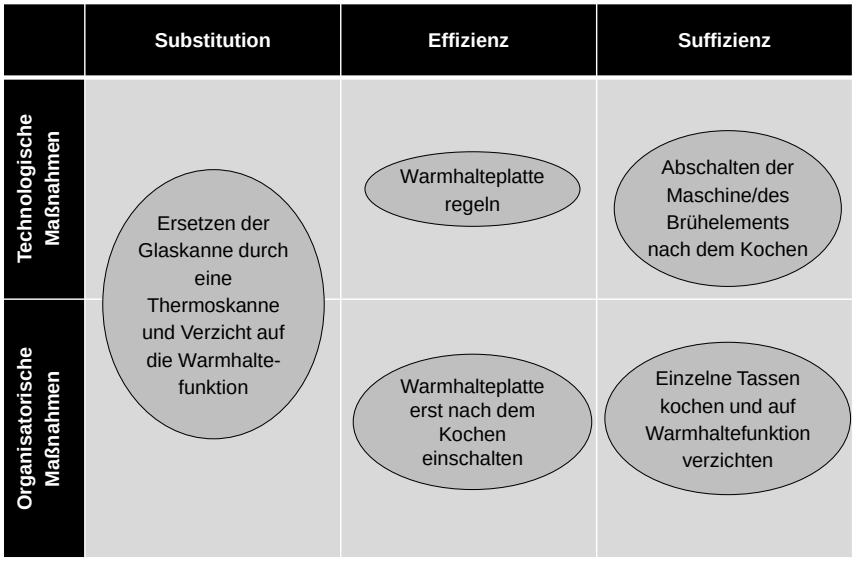


Abbildung 34: Nachhaltigkeitsframework des Praxisbeispiels [23].

Im Praxisbeispiel lassen sich mit Hilfe des Nachhaltigkeitsframeworks fünf Verbesserungsmaßnahmen ableiten:

1. Abschalten der Maschine/des Brühelements nach dem Kochen
2. Einzelne Tassen kochen und auf die Warmhaltefunktion verzichten
3. Ersetzen der Glaskanne durch eine Thermoskanne und Verzicht auf die Warmhalteplatte
4. Warmhalteplatte regeln
5. Warmhalteplatte erst nach dem Kochen einschalten

Im Folgenden muss das Potential der Verbesserungsmaßnahmen abgeschätzt und die Lösungsvorschläge bewertet werden. Dazu eignen sich qualitative und quantitative Methoden zur Lösungsbewertung (Kapiteln 5.3 und 5.4).

5.3 Qualitative Lösungsbewertung

Die qualitative Lösungsbewertung eignet sich, um die Anzahl an möglichen Lösungen mit akzeptablem Aufwand zu reduzieren, Konsens in der Gruppe zu finden und kostengünstige Verbesserungsmaßnahmen schnell zu veranlassen. Ein Vorschlag ist, die Verbesserungsvorschläge nach mindestens folgenden drei Kriterien zu bewerten:

- **Effektivität:** Ist es die richtige Maßnahme um das Problem zu lösen?
- **Machbarkeit:** Ist die Maßnahme umsetzbar (z.B. bzgl. Kosten)?

- **Wirkung:** Hat die Maßnahme andere positive oder negative Auswirkungen?

Die qualitative Bewertung kann auf einer dreistufigen Skala positiv/neutral/negativ (+/o/-) erfolgen. Für das Praxisbeispiel ist eine qualitative Bewertung in Abbildung 35 dargestellt. Es kann direkt entnommen werden, dass die Maßnahmen „Abschalten des Brühelements nach dem Kochen“ und „Thermoskanne und Verzicht auf Warmhalteplatte“ eine durchgängig positive Bewertung nach den drei Kriterien haben und für die darauffolgende Implementierung zu favorisieren sind.

Nr.	Ziel	Maßnahme	Effektivität (+/0/-)	Machbarkeit (+/0/-)	Wirkung (+/0/-)
1	Warmhalte-verluste reduzieren	Abschalten der Maschinen ach dem Kochen	+	+	-
2		Abschalten des Brüh-elements nach dem Kochen	+	+	+
3		Einzelne Tassen kochen	+	+	0
4		Thermoskanne & Verzicht auf Warmhalteplatte	+	+	+
5		Warmhalteplatte regeln	-	+	+
6	Leistungs-level beim Kochen reduzieren	Warmhalteplatte erst nach dem Kochen einschalten	-	+	+

Abbildung 35: Qualitative Maßnahmenbewertung für das Praxisbeispiel.

5.4 Quantitative Lösungsbewertung

Im Folgenden soll eine Auswahl an drei Verfahren zur quantitativen (ökonomischen) Lösungsbewertung vorgestellt werden:

1. Break-Even Analyse
2. Total Cost of Ownership
3. Net Present Value

Aufgrund von mangelnder Datenlage wird von dem Bezug auf das Praxisbeispiel abgesehen.

Die **Break-Even Analyse (BEA)** dient der Kostenbewertung von Investitionen, wobei der Break-Even Punkt den Zeitpunkt beschreibt, zu dem sich eine Investition auszahlt. Durch Energieeffizienzmaßnahmen sind Kostenersparnisse im Bereich von laufenden Kosten zu erwarten, welche mit den Investitionskosten konkurriert. Die Berechnung, um zwei Produktvarianten (mit und ohne Investment in Energieeffizienzmaßnahmen) miteinander zu vergleichen erfolgt in drei Schritten:

1. Gewinnfunktion aufstellen
2. Kostenfunktion aufstellen
3. Break-Even Punkt bestimmen

Die Berechnung des Break-Even Punktes und die Darstellung der Kostenfunktionen sind in Abbildung 36 illustriert. Die vielversprechendsten Investitionen (die mit dem besten Kosten-Nutzen-Verhältnis) werden implementiert.

Für mehr Informationen wird auf weiterführende Literatur verwiesen [24].

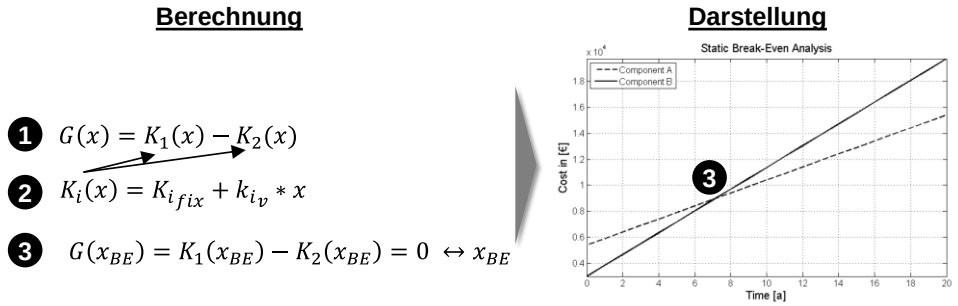


Abbildung 36: Break-Even Punkt Bestimmung.

Die **Total Cost of Ownership** (TCO) Berechnung dient der Abschätzung der Gesamtkosten bei der Kaufentscheidungen. Das Verfahren hat seine Wurzeln in der IT. TCO ist eine ganzheitliche Kostenbetrachtung, welche über die Anschaffungskosten hinaus Kosten für die Nutzung (z.B. Reparatur, Wartung oder Energiekosten) sowie für die Entsorgung umfasst. Es gibt eine Vielzahl an Modellen bzw. Methoden zur TCO Berechnung. Wichtige Vertreter sind VDMA 34160 [25], VDI 2884 [26] und DIN EN 60300-3-3 [27].

Die Berechnung des **Net Present Value (NPV)** (Kapitalwerts) dient der Abschätzung, ob sich eine Investition innerhalb eines gegebenen Zeitraums auszahlt. Ein Beispiel zur NPV Berechnung ist in Abbildung 37 und Abbildung 38 dargestellt. Die Summe der Present Values (PV), welche den Zinssatz sowie den Future Vale (FV) berücksichtigen, ergibt den NPV. Ist der NPV positiv, hat sich die Investition nach der Zeitspanne (hier n=4) rentiert.

- Projektkosten: 9000€
- Zinssatz für das Darlehen: 10% pro Jahr
- Zu erwartende Cashflows/Future Values (FV): Y1: 2000€, Y2: 3000€, Y3: 3000€, Y4: 4000€

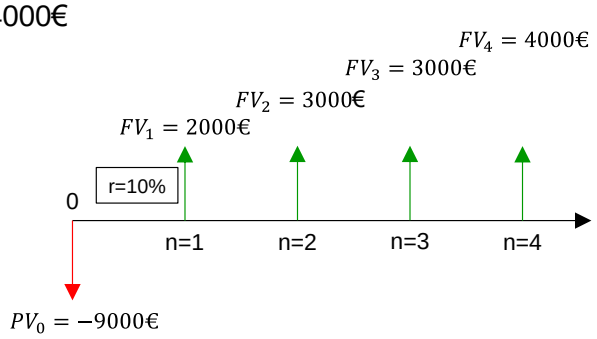


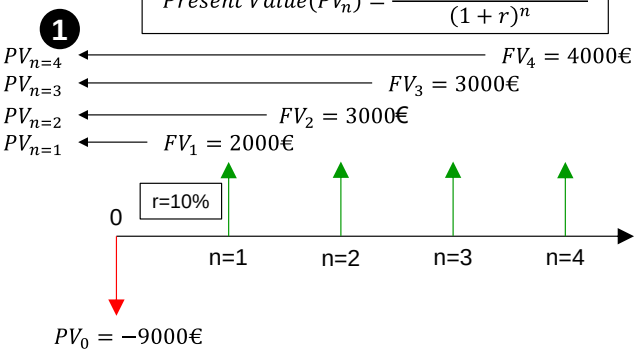
Abbildung 37: Beispiel Net Present Value (NPV) Berechnung (Teil 1).

Vorgehen:

1. Berechnung, wieviel der zukünftige Kapitalfluss Heute wert ist (PV)
2. Berechnung des Gesamtkapitalwerts (NPV)
3. NPV positiv → lohnende Investition

$$Present\ Value(PV_n) = \frac{Future\ Value\ (FV_n)}{(1+r)^n}$$

$$Net\ Present\ Value(NPV) = \sum_{n=0}^{n=n_max} PV_n$$



2
$PV_0 = -9000{,}00€$
$PV_{n=1} = 1818{,}18€$
$PV_{n=2} = 2479{,}24€$
$PV_{n=3} = 2253{,}94€$
$PV_{n=4} = 2732{,}05€$

3
$NPV = 283{,}51€$

Lohnende Investition nach 4 Jahren: $Net\ Present\ Value = 283{,}51€$
Lohnende Rendite mit jedem Folgejahr ($FV_5 = 4000€ \rightarrow NPV = 2767{,}20€$)

Abbildung 38: Beispiel Net Present Value (NPV) Berechnung (Teil 2).

5.5 Anwendungsbeispiel

Abbildung 39 zeigt das Nachhaltigkeitsframework, welches am Beispiel einer Fräsmaschine angewendet werden soll, um die Energieeffizienz zu Steigern.

1. Bitte finden je eine technologische Maßnahme für die Nachhaltigkeitsstrategien Substitution, Effizienz und Suffizienz.
2. Bitte finden je eine organisatorische Maßnahme für die Nachhaltigkeitsstrategien Substitution, Effizienz und Suffizienz.

	Substitution	Effizienz	Suffizienz
Technologische Maßnahmen			
Organisatorische Maßnahmen			

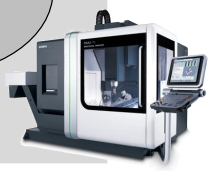


Abbildung 39: Anwendungsbeispiel: Nachhaltigkeitsframework.

Abbildung 40 zeigt eine mögliche Lösung für die Anwendung des zuvor vorgestellten Nachhaltigkeitsframework auf das Beispiel.

	Substitution	Effizienz	Suffizienz
Technologische Maßnahmen	Luftkühlung durch Wasserkühlung ersetzen	Effizienteres Spindel-aggregat	Automatische Abschaltung der Hilfsaggregate in Standby
Organisatorische Maßnahmen	In der Produktion energieeffiziente Maschinen bevorzugt einsetzen	Energie-optimale Prozessführung	Maschine in der Mittagspause ausschalten

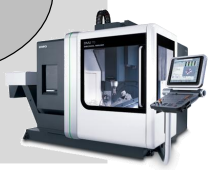


Abbildung 40: Anwendungsbeispiel: Nachhaltigkeitsframework (Lösung).

6

Baustein 5: Implementierung

Abbildung 41 illustriert das Ziel, die Inhalte sowie das Ergebnis des Bausteins 5 „Implementierung“.

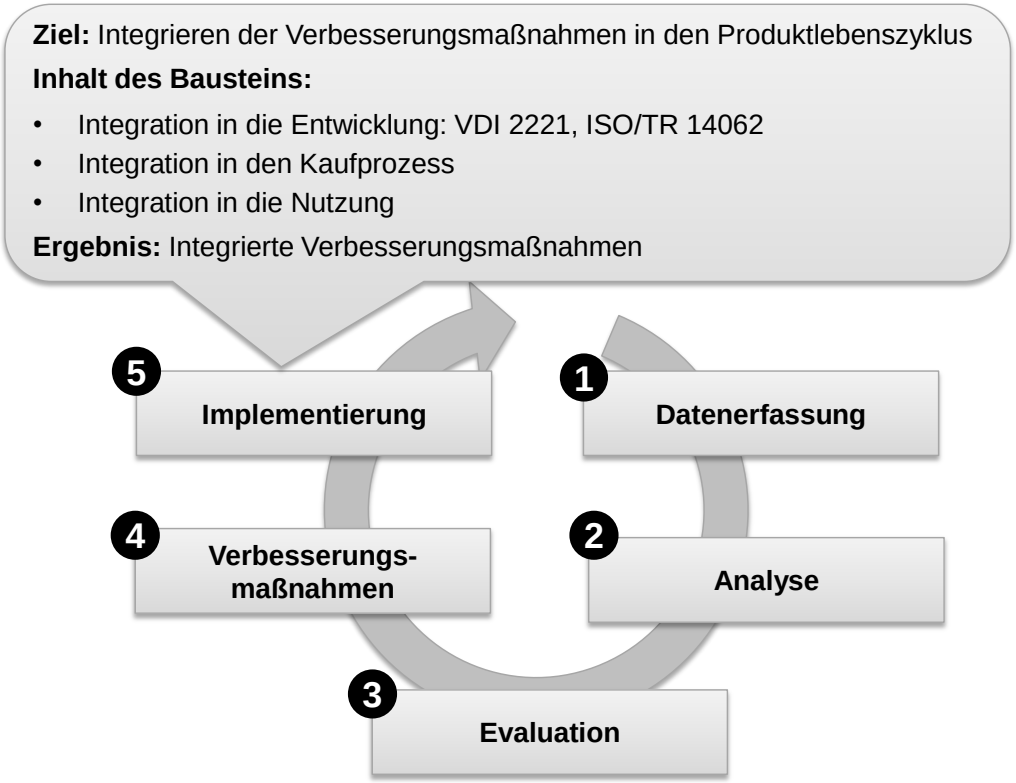


Abbildung 41: Ziel, Inhalt und Ergebnis des Bausteins 5 „Implementierung“.

Die ganzheitliche Steigerung der Energieeffizienz erfordert eine vollständige Integration von Energieeffizienz von der Produktentwicklung über den Kaufprozess bis hin zur Nutzung. Die Integration der energetischen Verbesserungsmaßnahmen in diese Phasen wird im Folgenden behandelt.

6.1 Integration in die Entwicklung

In der Literatur ist eine Vielzahl an Produktentwicklungsprozessen zu finden. Die VDI-Richtlinie 2221 *„Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte"* [28] ist im deutschsprachigen Raum verbreitet. Der Entwicklungsprozess ist in vier grundlegenden Phasen (Planung, Konzeption, Entwurf und Ausarbeitung) unterteilt. Bei dem Teilweise überlappendem und rekursivem Vorgehen werden sieben Arbeitsschritte unterschieden, an deren Ende jeweils ein Ergebnis steht:

- Klären und Präzisieren der Aufgabe: Anforderungsliste
- Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen: Funktionsstruktur
- Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen: prinzipielle Lösungen
- Gliederung in realisierbare Module: Modulare Struktur
- Gestalten der maßgebenden Module: Vorentwürfe
- Gestalten des gesamten Produktes: Gesamtentwurf
- Ausarbeitung der Ausführungs- und Nutzungsangaben: Produktdokumentation

Demgegenüber steht der Lebenszyklus eines Produktes von der Entwicklung über die Beschaffung und Produktion bis hin zur Nutzung und Entsorgung. Die VDI-Richtlinie bietet zwei Anknüpfungspunkte zur Integration von Energieeffizienz in den Entwicklungsprozess (siehe Abbildung 42):

1. Integration von Anforderungen der späteren Lebensphasen (z.B. Energieverbrauch während der Nutzungsphase) in die Planungsphase während des Klärens und Präzisierens der Aufgabe
2. Berücksichtigung der Vor- und Nachteile der Lösungsalternativen bei der Gliederung in realisierbare Module am Ende der Konzeptionsphase bzw. Anfang der Entwurfsphase

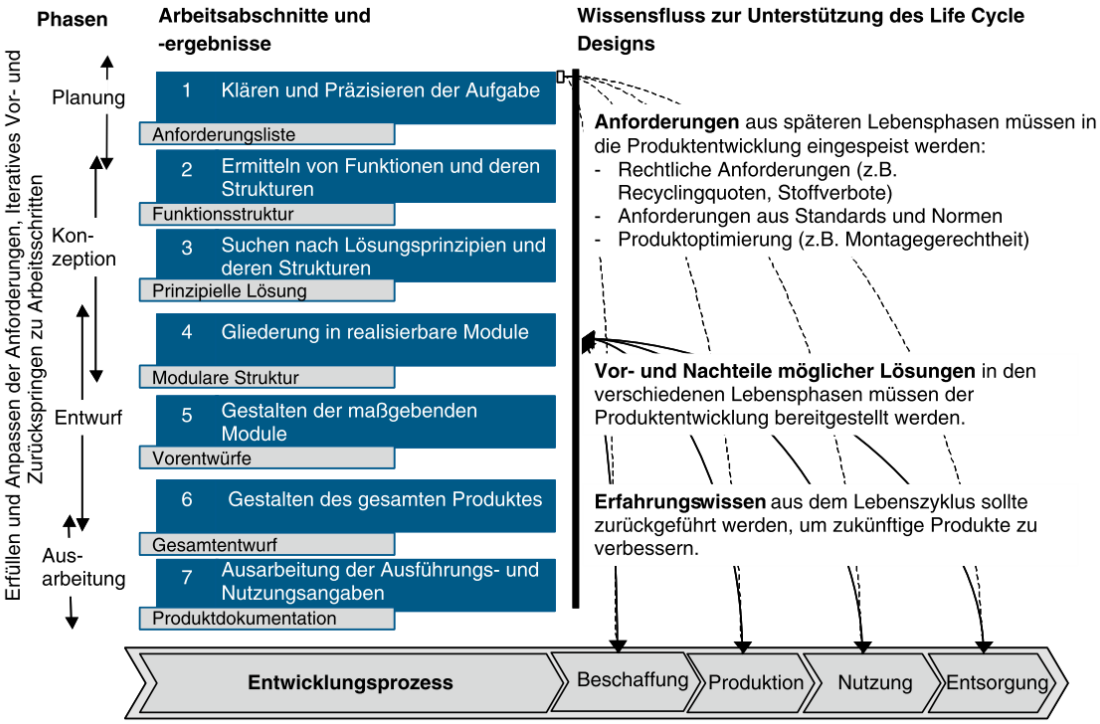


Abbildung 42: Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in den Produkt-entwicklungsprozess [29].

Die ISO/TR 14062 [30] behandelt die Integration von Umweltaspekten in Produktdesign und -entwicklung. Dabei wird vorgeschlagen, den Produktlebenszyklus von der Materialgewinnung über die Verarbeitung, die Auslieferung, Nutzung und Instandhaltung bis hin zur Entsorgung und

Wiederverwertung zu betrachten. Als Inputs werden der Material- und Energieeintrag betrachtet. Als Outputs werden Bei-Produkte, Emissionen, Abwasser und Abfall berücksichtigt. Aus der Energie- und Stoffbilanz lassen sich Umwelteinflüsse wie Ozonabbau oder Beitrag zur Ressourcenverknappung abschätzen. Anhand der Umwelteinflüsse lässt sich das Produkt bereits in der Produktentwicklung ökologisch bewerten. Des Weiteren schlägt die ISO/TR 14062 [30] vor, wie sich diese Umweltaspekte in den Entwicklungsprozess integrieren lassen (siehe Appendix: Abbildung 50).

6.2 Integration in den Kaufprozess

Wie in Kapitel 5.1 vorgestellt, werden Energieeffizienzkennzeichnungen genutzt, um den Markt zu regulieren, indem ineffiziente Produkte nicht für den Verkauf zugelassen werden. Die Abstufung unter den zugelassenen Produkten (z.B. beim Kühlschrank A+ bis A+++) ermöglicht dem Kunden weiter zwischen den Produkten nach ihrer Effizienz und dem voraussichtlichen Stromverbrauch zu differenzieren. Auf diese Weise hat sich eine Vielzahl an Labels zu Marketing-Siegeln entwickelt. Eine Auswahl ist in Abbildung 43 dargestellt.

Auswahl an Effizienz- und Ökolabel (von links nach rechts)

- EU-Label* → Energieeffizienz von Haushaltsgeräten
- Blauer Engel* → umweltgerechte Produkte und Dienstleistungen
- EU–Eco-Label* → Bewertung von Produkten und Dienstleistungen
- ENERGY STAR** → Energieeffizienz von Bürogeräten
- Blue Competence*** → Innovations- und Technologieführerschafts-Label

*Selbstdeklarierung/Zertifizierung durch die RAL gGmbH
**Selbstdeklarierung/Zertifizierung durch SWICO (Wirtschaftsverband der digitalen Schweiz)
***Selbstdeklarierung/Zertifizierung durch den VDMA

Abbildung 43: Auswahl an Eco-Labels [29].

Dass die Investition in effiziente Produkte zu Strom- und somit zu Kosteneinsparungen führen kann, ist in Abbildung 44 veranschaulicht.

Klasse	Verbrauch pro Jahr	Kosten pro Jahr (26,5 Cent/kWh)	Ersparnis pro Jahr	Break-Even
A+++	Ca. 166 kWh	44€	116€	Ca. 3 Jahre
A	Ca. 270 kWh	72€	88€	Ca. 4 Jahre
C	Ca. 600 kWh	160€		

Abbildung 44: Energieeffizienzbetrachtung am Beispiel eines Kühlschranks [29].

Ein Sprung von einer zur nächst höheren Effizienzstufe des EU-Labels bedarf einer Steigerung der Effizienz bzw. einer Reduktion des Energieverbrauchs um 20%. Ein Gerät der Klasse A+++

verbraucht somit 60% weniger Energie im standardisierten Test als ein Gerät der Klasse A. Ein Beispiel für die Kostenersparnis ist im unteren Bereich der Abbildung 44 gegeben. In vielen Haushalten befinden sich Kühlschränke der Effizienzklasse C (ca. 10 Jahre alt), welche heute auf dem EU Markt zum Neuverkauf nicht mehr zugelassen sind. Eine Investition in einen neuen Kühlschrank der Effizienzklasse A (der untersten zugelassenen Effizienzklasse) würde sich bereits nach 4 Jahren auszahlen. Bei dem Kauf eines Kühlschranks der Effizienzklasse A+++ kann der Break-Even Punkt bereits nach 3 Jahren erreicht werden. Bei einer durchschnittlichen Lebensdauer eines Kühlschranks von mehr als 10 Jahren macht somit eine Investition in einen energieeffizienten Kühlschrank nicht nur ökologisch Sinn.

Zur Unterstützung der Auswahl von energieeffizienten Produkten für Haushalt, Haus, Beleuchtung, Büro/TV, Freizeit, etc. eignet sich die Webseite http://www.topten.ch, welche für das Beispiel Kaffeemaschinen in Abbildung 45 dargestellt ist.

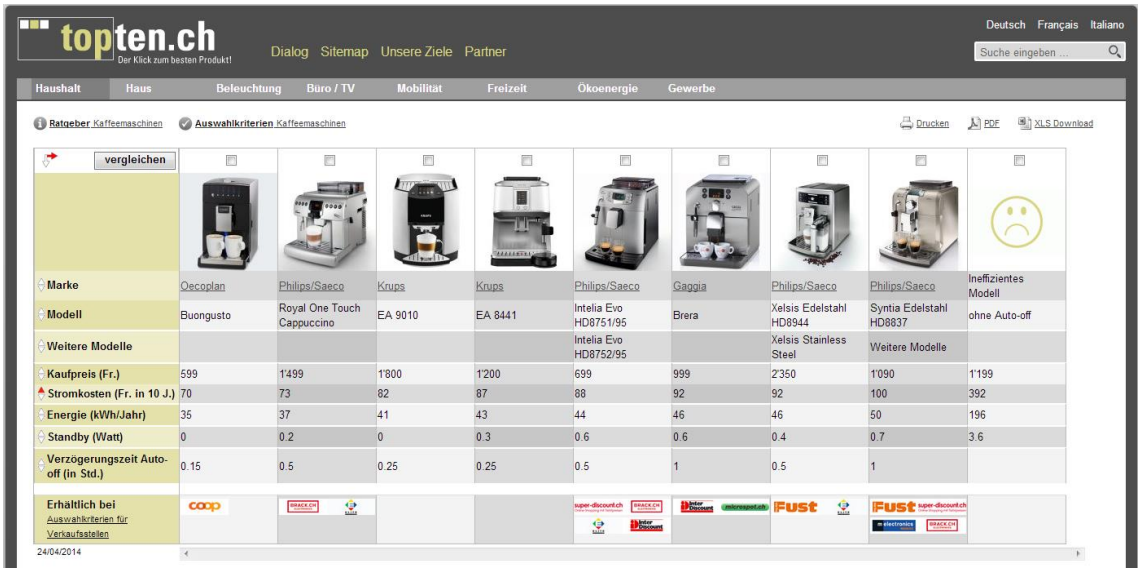


Abbildung 45: Auswahl energieeffizienter Produkte anhand von www.topten.ch.

6.3 Integration in die Nutzung

Ist das Produkt nach Energieeffizienzrichtlinien entwickelt und von dem Käufer gekauft, muss dieses vorrausschauend genutzt werden, damit das vollständige Einsparungspotential des Designs zur Geltung kommt. Ein Kühlschrank der Klasse A+++ ist bspw. ineffizient, wenn der Nutzer die Tür über lange Zeiträume offen lässt. Aus diesem Grund stellt sich die Frage nach der energieeffizienten Nutzung. Adressiert werden dabei mögliche verschwenderische Nutzungsmöglichkeiten des Produktes, die durch das Produktdesign nicht unterbunden werden konnten oder zur Aufrechterhaltung der Nutzungsvielfalt absichtlich nicht unterbunden wurden (z.B. Sportmodus beim Auto). Abbildung 46 zeigte eine Auswahl an Beispielen, wie Energieeffizienz in die Nutzungsphase integriert werden kann.

Bedienungsunterstützung (1)

Integration in Trainings (2)

Hinweise auf der Homepage (3)

Nutzerhandbuch (4)

Abbildung 46: Beispiele zur Integration von Energieeffizienz in die Betriebsphase [29].

Durch Bedienungsunterstützung (1) im Auto kann dem Nutzer die Möglichkeit gegeben werden, zwischen Sport-Modus und Eco-Modus zu wählen. Darüber hinaus kann der Verbrauch (z.B. der Kraftstoffverbrauch beim Auto) angezeigt werden und den Bediener zur energieeffizienten Nutzung bewegen. Bei komplexen Produkten wie z.B. Werkzeugmaschinen kann Energieeffizienz in das Training der Bediener (2) eingebunden werden. Auf diese Weise wird der Bediener dafür sensibilisiert, die Maschine z.B. in Leerlaufzeiten wie etwa der Mittagspause oder vor Wochenenden und Feiertagen komplett abzuschalten, anstelle sie in den Standby-Modus zu versetzen. Hinweise auf der Homepage (3) sowie im Nutzerhandbuch (4) ermöglichen interessierten Nutzern Wege zur energieeffizienten Nutzung zu finden.

6.4 Anwendungsbeispiel

Die Verbesserungsmaßnahmen sollen exemplarisch in den firmenspezifischen Entwicklungszyklus integriert werden.

1. Bitte zeichnen Sie den Entwicklungsprozess in Ihrer Firma auf.
2. Bitte identifizieren Sie die Prozessschritte in denen die Modulare Struktur Ihres Produktes festgelegt wird.
3. Bitte überlegen Sie ein schrittweises Vorgehen, um Energieeffizienz in die Modulare Struktur ihres Produktes zu integrieren.

Abbildung 47 zeigt eine mögliche Lösung für die Integration von Energieeffizienz in den Entwicklungszyklus des Anwendungsbeispiels. Basierend auf einer Leistungsmessung werden Daten gesammelt und ausgewertet. Für die verschiedenen Anwendungsfälle der Maschine werden Strategien entwickelt, um die Energieeffizienz zu steigern. Zunächst werden die Verbesserungsmaßnahmen bei der Maschineneinstellung berücksichtigt, später mit der Entwicklung einer Konfigurationslogik, die durch einen Modulbaukasten für energieintensive Komponenten in der Entwicklung umgesetzt wird. Die verschiedenen Aufwendungen zur Steigerung der Energieeffizienz werden in den Verkaufsprozess integriert.

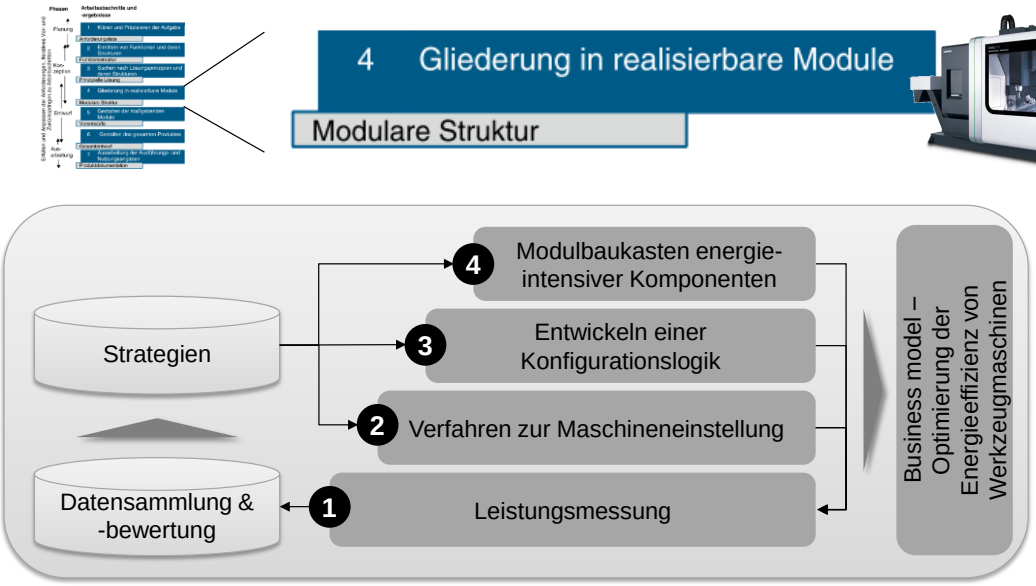


Abbildung 47: Anwendungsbeispiel: Integration in den Entwicklungsprozess (Lösung).

7

Zusammenfassung

Abbildung 48 zeigt die Zusammenfassung der Bausteine zur Steigerung der Energieeffizienz von Produkten.

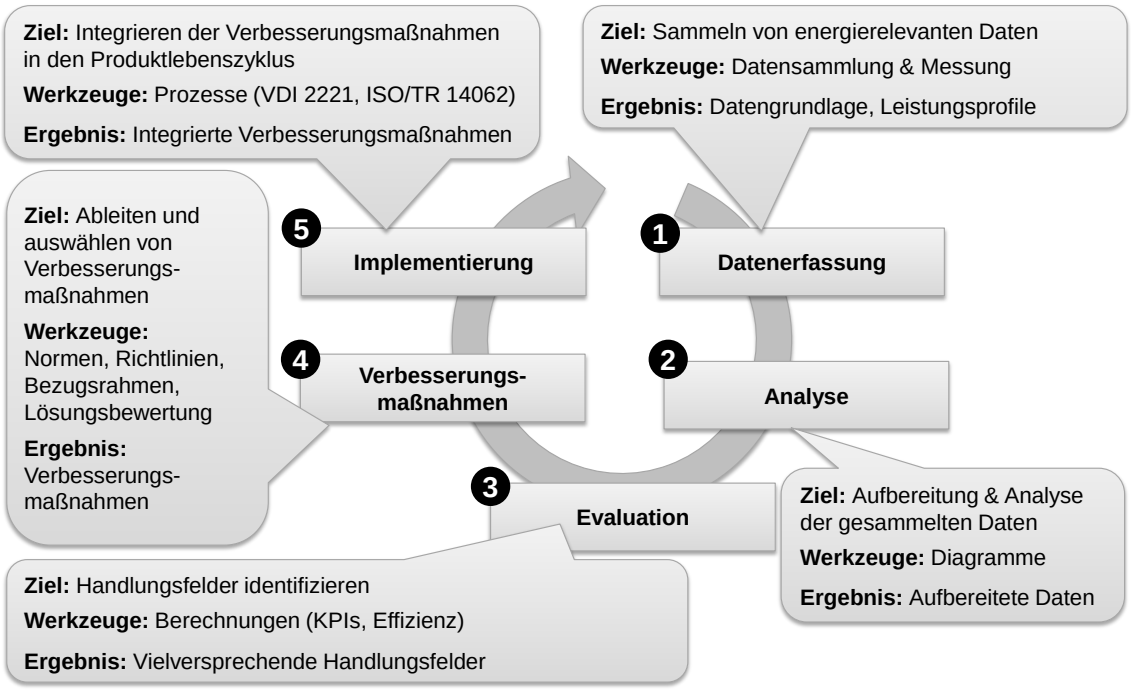


Abbildung 48: Zusammenfassung der Bausteine zur Steigerung der Energieeffizienz.

Das Vorgehen zur Steigerung der Energieeffizienz von Produkten besteht aus fünf aufeinander aufbauenden Bausteinen, welche von der Analyse des Ist-Zustands bis zur Implementierung der Verbesserungsmaßnahmen reichen:

1. **Datenerfassung:** Ziel ist das Sammeln von Daten, mit denen Aussagen über die Energieeffizienz des Produktes gemachen werden können oder auf diese Einfluss haben,

wie z.B. Zeiten oder das Leistungsprofile oder auch die Produktbeschreibung von der sich auf den Aufbau schließen lässt.

2. **Analyse:** Die gesammelten Daten werden aufbereitet, strukturiert und visualisiert (z.B. in Sankey Diagrammen). Mit Hilfe der Portfolioanalyse lässt sich der Fokus in die richtige Richtung lenken.
3. **Evaluation:** Es werden gezielt Kennwerte (z.B. Effizienzkennwerte) berechnet, um vielversprechende Handlungsfelder zu identifizieren.
4. **Verbesserungsmaßnahmen:** Für die identifizierten Handlungsfelder werden mit Hilfe von Normen, Richtlinien sowie Frameworks (z.B. dem Nachhaltigkeitsframework) Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet. Diese werden qualitativ und/oder quantitativ bewertet, um die Maßnahmen herauszustellen, welche das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis bieten.
5. **Implementierung:** Die Verbesserungsmaßnahmen können auf unterschiedliche Weise in die Entwicklung (z.B. in den Entwicklungsprozess nach VDI 2221), in den Kaufprozess (z.B. durch Kennzeichnung) sowie in die Nutzung des Produktes (z.B. durch Bedienungsunterstützung) integriert werden.

Abbildung 49 zeigt die Einordnung der Bausteine zur Steigerung der Energieeffizienz in den Produktlebenszyklus. Während die Datenerfassung, Analyse, Evaluation und das Ableiten von Verbesserungsmaßnahmen maßgeblich während der Nutzung durchgeführt wird, lassen sich die Verbesserungsmaßnahmen von der Nutzung eines Produktes (Generation X) über die Entwicklung, den Verkauf und die Nutzung der nächsten Produktgeneration (Generation X+1) implementieren. In dem vereinfachten Model werden Lösungszyklen innerhalb einer Phase (z.B. innerhalb der Entwicklung) vernachlässigt.

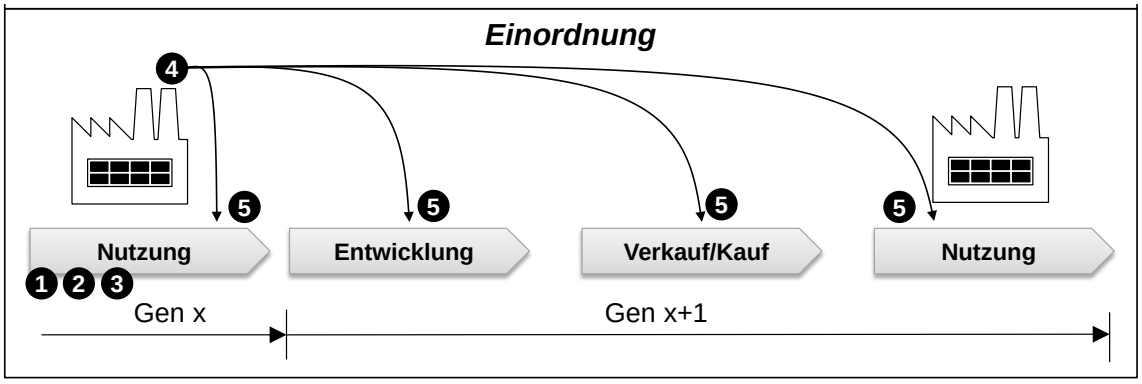


Abbildung 49: Einordnung Bausteine zur Steigerung der Energieeffizienz.

8

Bibliographie

1. International Energy Agency. *IEA Key World Energy Statistics*. 2013 [cited 2014 31.03.2014]; Available from: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2013.pdf.
2. European Commission, *Eurostat - Energy balance sheets 2010-2011*. 2013 ed ed. Energy balance sheets. 2013, Luxembourg: Publications Office. 555.
3. Gutowski, T.G., J.M. Allwood, C. Herrmann, and S. Sahni, *A Global Assessment of Manufacturing: Economic Development, Energy Use, Carbon Emissions, and the Potential for Energy Efficiency and Materials Recycling.* Annual Review of Environment and Resources, Vol 38, 2013. **38**: p. 81-106.
4. European Commission, *Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products.* Official Journal of the European Union, 2009. **L 285/10**.
5. European Union. *Directive 2012/27/EU of the european parliament and of the council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC*. Official Journal of the European Union 2012 [cited L 315/1; Available from: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:315:0001:0056:EN:PDF.
6. Schaltegger, S., R.L. Burritt, and H. Petersen, *An Introduction to Corporate Environmental Management: Striving for Sustainability*. 2003: Greenleaf Publishing Limited.
7. Gontarz, A., L. Weiss, and K. Wegener, *Energy consumption measurement with a multichannel measurement system on a machine tool*. 2010: Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Institute of Machine Tools and Manufacturing.
8. Fluke Corporation. *Fluke Leistungsmessgerät*. 2014 [cited 2014 25.06.2014]; Available from: www.fluke.com.
9. Kometec. *CA 8200 Leistungsmessgerät*. 2014 [cited 2014 25.06.2014]; Available from: www.kometec.de.
10. Gloor, R. *Energieeinsparungen bei Druckluftanlagen in der Schweiz*. 2000 [cited 2014 16.05.2014]; Available from: http://www.energie.ch/themen/industrie/druckluft/.
11. Thiede, S., G. Posselt, and C. Herrmann, *SME appropriate concept for continuously improving the energy and resource efficiency in manufacturing companies.* CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2013. **6**(3): p. 204-211.
12. ISO, *ISO 9000:2005 - Quality management systems - Fundamentals and vocabulary*. 2005.

13. Bunse, K., J. Sachs, and M. Vodicka, *Evaluating energy efficiency improvements in manufacturing processes*, in *Advances in Production Management Systems. New Challenges, New Approaches*. 2010, Springer. p. 19-26.
14. Audi AG. 2014 [cited 2014 25.06.2014]; Available from: www.audi.de.
15. V-ZUG AG. 2014 [cited 2014 25.06.2014]; Available from: www.vzug.com.
16. Sulzer AG. 2014 [cited 2014 25.06.2014]; Available from: www.sulzer.com.
17. Cars Concept 2014. 2014 [cited 2014 25.06.2014]; Available from: www.oncarnews.com
18. Zein, A., *Transition towards energy efficient machine tools*. Sustainable production, Life cycle engineering and management. 2012, Heidelberg; New York: Springer.
19. ISO, *ISO 14955-1:2014 - Machine tools - Environmental evaluation of machine tools - Part 1: Design methodology for energy-efficient machine tools*. 2014.
20. European Union. *Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the indication by labelling and standard product information of the consumption of energy and other resources by energy-related products*. 2010 [cited 2014 18.06.2014]; Available from: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0001:0012:en:PDF.
21. GE Fanuc. *The Environmenttal and Economic Advantages of Energy-Efficient Motors*. 2008 [cited 2014 04.04.2014]; Available from: http://leadwise.mediadroit.com/files/2928energy%20saving_wp_gft688.pdf.
22. Zein, A., W. Li, C. Herrmann, and S. Kara, *Energy Efficiency Measures for the Design and Operation of Machine Tools: An Axiomatic Approach*, in *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, J. Hesselbach and C. Herrmann, Editors. 2011, Springer: Berlin Heidelberg. p. 274-279.
23. Herrmann, C., *Ganzheitliches Life Cycle Management: Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen*. VDI-Buch. 2010, Berlin: Springer.
24. Schweitzer, M. and E. Troßmann, *Break-even-Analysen: Methodik und Einsatz*. 2., neubearb. und erg. Aufl ed. Betriebswirtschaftliche Forschungsergebnisse. 1998, Berlin: Duncker & Humblot. XI, 522 S.
25. VDMA, *VDMA 34160:2006-06 - Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen*. 2006.
26. VDI, *VDI 2884:2005-12 - Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC)*. 2005.
27. DIN EN, *DIN EN 60300-3-3:2005-03 - Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-3: Anwendungsleitfaden - Lebenszykluskosten (IEC 60300-3-3:2004)*. 2005.
28. VDI, *VDI 2221 - Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. 1993.
29. Mansour, M., *Informations- und Wissensbereitstellung für die lebenszyklusorientierte Produktentwicklung*. 2006: Vulkan-Verlag.
30. ISO, *ISO/TR 14062:2002 - Environmental management - Integrating environmental aspects into product design and development*. 2002.

9

Appendix

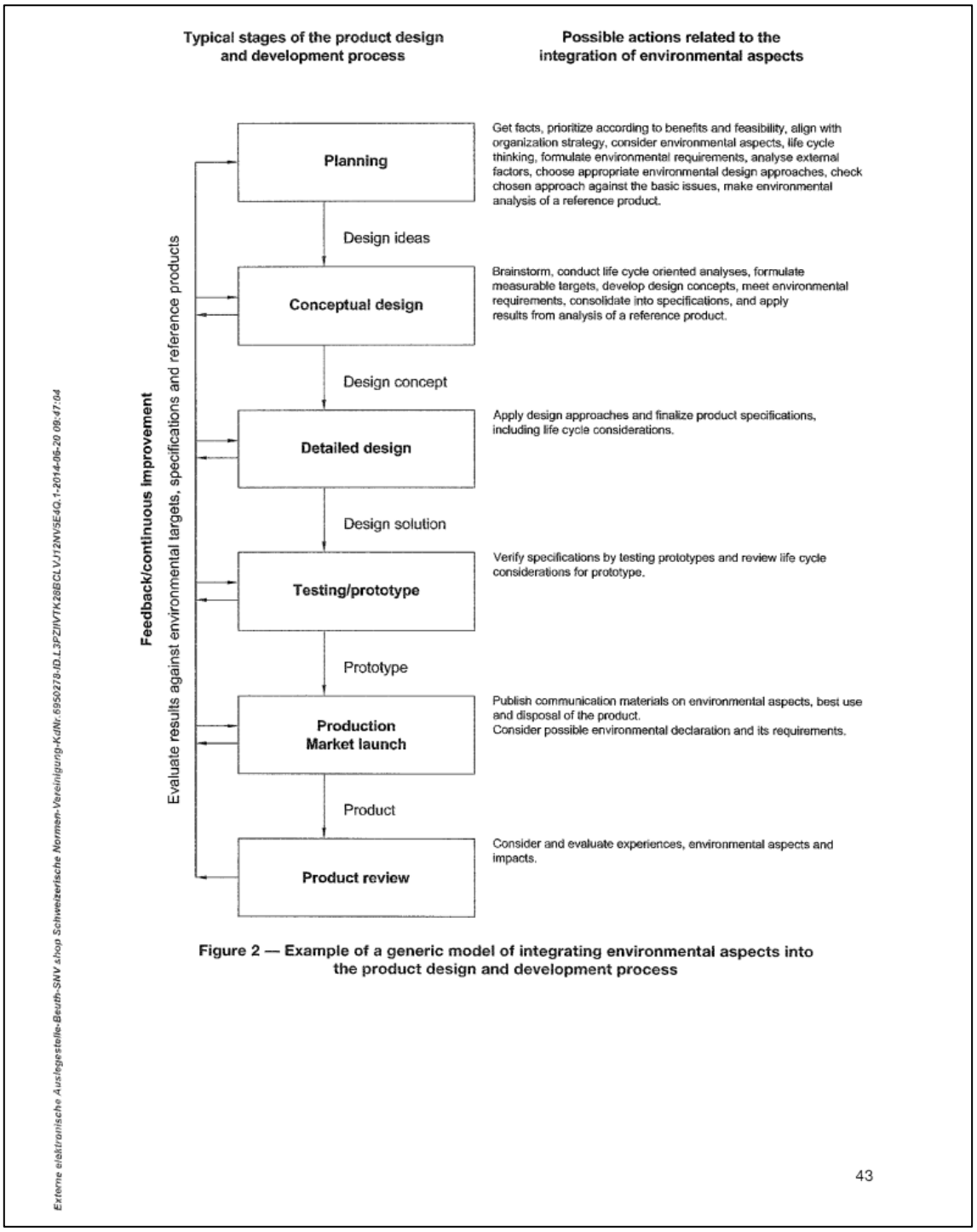


Abbildung 50: Ausschnitt aus der ISO/TR 14062 [30].