

Methodik zur Erweiterung von Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Astrid Weyand, M. Sc.

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Sebastian Thiede

Tag der Einreichung: 29. April 2024

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Juni 2024

Darmstadt 2024

D17

Weyand, Astrid: Methodik zur Erweiterung von Lernfabriken um das Thema
Ressourceneffizienz

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2024

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-275898

Tag der mündlichen Prüfung: 12.06.2024

Veröffentlicht unter CC BY 4.0 International

VORWORT DES HERAUSGEBERS

Die Ressourceneffizienz spielt eine entscheidende Rolle bei der Klimawende, da sie dazu beiträgt, den Verbrauch natürlicher Ressourcen zu reduzieren und gleichzeitig die Produktivität zu steigern. Durch eine effizientere Nutzung von Rohstoffen, Wasser und Energie können Unternehmen und Gesellschaften ihre Umweltauswirkungen verringern und gleichzeitig Kosten senken. Um Entscheidungen über umzusetzende Effizienzmaßnahmen zu treffen, existieren verschiedene Methoden, die bei der Bewertung der Ressourcenbedarfe eingesetzt werden können, um Ressourcenverschwendungen zu identifizieren. Diese reichen von einfachen Methoden, wie Checklisten oder der ABC-Analyse von Anschlussleistungen, bis zu komplexen, zeitaufwändigen Methoden wie der Ökobilanz. Alle Methoden haben das Ziel, sogenannte Hotspots oder Stellhebel in der Produktion zu identifizieren, bei denen ein besonders hoher Ressourcenbedarf vorliegt und bei denen dadurch ein besonders hohes Einsparpotenzial erzielt werden kann.

Lernfabriken bieten geeignete Lernumgebungen, um diese Methodenkompetenzen zu vermitteln. Aufgrund der großen Vielfalt bestehender Hotspot-Analysemethoden müssen die Betreiber von Lernfabriken jedoch die für ihre Zielgruppe und ihre jeweiligen Anforderungen am besten geeigneten Methoden auswählen. Obwohl sich für jede Methode Vor- und Nachteile finden lassen, fehlt den Betreibern von Lernfabriken eine Orientierungshilfe, welche Methoden und welche Vergleichskriterien sie bei der Annäherung an das Thema Ressourceneffizienz berücksichtigen sollten.

An diesem Punkt setzt die vorliegende Dissertation von Frau Astrid Weyand auf. Das übergeordnete Ziel ihrer Dissertation ist die Entwicklung einer Methodik zur Erweiterung bestehender Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz. Die entwickelte Methodik soll Lernfabrikbetreiber dazu befähigen, Ressourceneffizienzworkshops an bereits bestehenden Prozessketten durchzuführen, ohne dafür neue Anlagen zu beschaffen oder gar neue Gebäude errichten zu müssen.

Darmstadt, Juni 2024

Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

VORWORT DER AUTORIN

Jetzt liegt tatsächlich die fertige Dissertation vor mir und ich möchte die Gelegenheit nutzen, mich herzlich zu bedanken!

Zunächst bei Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold für die Betreuung der Arbeit - herzlichen Dank, dass du diesem „fremden“ Thema nicht nur mit Offenheit begegnet bist, sondern mich darin bestärkt und vielfältig unterstützt hast. Außerdem vielen Dank an Prof. Dr.-Ing. Sebastian Thiede für die bereitwillige Übernahme des Koreferats und das Feedback zur Idee und Arbeit.

Ein großer Dank gilt auch meinen Kolleg*innen des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen, an dem die Dissertation entstand. Ich hatte das große Glück, in den Forschungsaustauschen von gleich zwei Gruppen Ideen diskutieren und mich fachlich - wie es der Name vermuten lässt - austauschen zu können. Hierfür gilt der Dank insbesondere Dr. Judith Enke, Dr. Rupert Glass, Dr. Antonio Kreß, Dr. Thomas Riemann, Jannik Rosemeyer und Jonas Barth für die herzliche und vorbehaltlose „Aufnahme“ im Lernfabrikschwerpunkt. Danke, dass ihr euer Wissen mit mir geteilt habt!

Außerdem bedanken möchte ich mich ganz herzlich bei Stefan Seyfried und Dr. Thomas Kohne für die strategisch und fachlich herausragenden Diskussionen im „neuen“ Strategie-Schwerpunkt und die Unterstützung während der gesamten Institutszeit.

Neben der fachlichen Zusammenarbeit gilt Dr. Thomas Kohne, Ghada Elserafi und Lars Petruschke auch ein großes Dankeschön für die Zusammenarbeit im Rahmen der Gruppenleitung, die ich als Nebenprojekt zur Dissertation bekleiden durfte. Die Zeit war überaus lehrreich und sicherlich prägend für meinen weiteren Lebensweg – ich danke euch herzlich für die vielfältige Unterstützung.

Und letztlich geht auch ein großes Dankeschön an mein privates Umfeld; meiner Familie, meinen Freunden und Marius danke ich herzlich für den starken Rückhalt, auf den ich mich immer verlassen konnte.

Darmstadt, April 2024

Astrid Weyand

KURZFASSUNG

Im Zuge des Klimawandels und der globalen Bestrebungen für ein nachhaltiges Leben auf der Erde gerät auch die Ressourceneffizienz, also der effiziente Umgang mit vorhandenen Ressourcen, zunehmend in den Fokus der Industrie. Dafür ist die Vermittlung von Kompetenzen von Nöten, wofür sich sogenannte Lernfabriken bewährt haben. Dennoch ist Ressourceneffizienz in Lernfabriken nach wie vor weniger verbreitet als etwa Themen der Digitalisierung oder Lean Production. Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, systematisch zu erarbeiten, wie bestehende Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz erweitert werden können.

Dafür werden zunächst relevante Begrifflichkeiten abgegrenzt und in einer systematischen Literaturanalyse ermittelt, welche Kompetenzen im Kontext Ressourceneffizienz in der Industrie zu vermitteln sind. Diese Kompetenzen werden anschließend mit typischen Vorgehensweisen zur Steigerung von Ressourceneffizienz abgeglichen und in Bezug zu den Vorteilen von Lernfabriken gesetzt. Daraus ergeben sich drei Aspekte, die bei der entwickelten Methodik im Fokus stehen. Zum einen ist das die Vermittlung von Methodenkompetenz hinsichtlich sogenannter Hotspotanalysemethoden. Mit diesen können kritische Stellen (Hotspots) im Produktionsprozess identifiziert werden. Im Anschluss können als zweiter Aspekt Ressourceneffizienzmaßnahmen für diese Stellhebel gesucht und in der Lernfabrik veranschaulicht werden. Und zum dritten werden die Teilaspekte in einem ganzheitlichen Vorgehen zusammengeführt.

Die resultierende Methodik beinhaltet insgesamt fünf Schritte. Zunächst müssen Randbedingungen wie das vorhandene Budget für die Erweiterung oder die bereits vorhandene Infrastruktur analysiert werden, wobei ein entsprechender Fragebogen unterstützen kann. Im nächsten Schritt wird passend zu diesen Randbedingungen ermittelt, welche Hotspotanalysemethoden oder auch -methoden geschult werden sollen. Dafür wurde ein adaptierbares Vergleichstool entwickelt. Analog gilt dies auch für den dritten Schritt; die Auswahl der Ressourceneffizienzmaßnahmen, die in der Lernfabrik gezeigt werden sollen. Auch hierfür wurde im Rahmen der Arbeit ein Maßnahmentool entwickelt, welches knapp 120 Ressourceneffizienzmaßnahmen systematisch kategorisiert und dabei auch lernfabrik-spezifische Kriterien wie den Umbauaufwand berücksichtigt. Im vierten Schritt werden basierend auf den zuvor getroffenen Entscheidungen Kompetenzen und die für die Vermittlung notwendige Infrastruktur abgeleitet. Im fünften Schritt erfolgt dann parallel die Umsetzung der Kompetenzen in entsprechenden Lernmodulen und, nach Abgleich mit der vorhandenen Infrastruktur, die Umsetzung der technischen Anforderungen. Die entwickelte Methodik konnte in zwei Lernfabriken in Darmstadt sowie in einer Lernfabrik in Aachen angewendet und evaluiert werden. Die Evaluationsergebnisse konnten die Erfüllung der zuvor aufgestellten Anforderungen belegen und Anhaltspunkte für zukünftige Arbeiten aufzeigen.

ABSTRACT

In the wake of climate change and global efforts to achieve a sustainable life on earth, resource efficiency, i.e. the efficient use of existing resources, is becoming the focus also for the industry. This requires the imparting of competencies, for which so-called learning factories have proven to be suitable. Nevertheless, resource efficiency is still less widespread in learning factories compared to other topics such as digitalization or lean production. The aim of this dissertation is to systematically examine how existing learning factories can be expanded to include the topic of resource efficiency.

Therefore, relevant terms are first defined and a systematic literature analysis is carried out to determine which competencies need to be taught in the context of resource efficiency in industry. These competencies are then compared with typical approaches to increase resource efficiency and connected to the benefits of learning factories. This results in three aspects that are the focus of the developed methodology. The first is the teaching of methodological competencies in regard to so-called hotspot analysis methods. These can be used to identify critical spots (hotspots) in the production process. Secondly, resource efficiency measures for these hotspots can then be researched and demonstrated in the learning factory. And thirdly, the sub-aspects are brought together in a holistic approach.

The resulting methodology comprises a total of five steps. First, boundary conditions such as the budget for the expansion or the existing infrastructure must be determined. A corresponding questionnaire can be used in this step. The next step is to determine which hotspot analysis method or - methods should be trained based on these boundary conditions. For this purpose, an adaptable tool was developed. The same applies to the third step; the selection of resource efficiency measures to be demonstrated in the learning factory. Another tool was also developed for this purpose, which systematically categorizes almost 120 resource efficiency measures and takes into account learning factory-specific categories such as the reconstruction effort. In the fourth step, competencies and the infrastructure required for teaching these competencies are derived based on the decisions made previously. In the fifth step, the competencies are then implemented in corresponding learning modules and in parallel, after the alignment with the existing infrastructure, the technical requirements are implemented.

The methodology developed was applied and evaluated in two learning factories in Darmstadt and in a learning factory in Aachen. The evaluation results confirm the previously established requirements and provide an outlook for future work.

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis -----	I
Abbildungsverzeichnis -----	IV
Tabellenverzeichnis -----	VI
Abkürzungsverzeichnis -----	VIII
1 Einleitung -----	1
1.1 Motivation und Zielstellung-----	1
1.2 Aufbau der Arbeit-----	4
2 Stand der Forschung und Praxis -----	7
2.1 Lernfabriken zur Kompetenzentwicklung-----	7
2.1.1 Begriffsdefinition und -abgrenzung-----	7
2.1.2 Methoden zur Gestaltung und Erweiterung von Lernfabriken-----	12
2.2 Ressourceneffizienz-----	18
2.2.1 Begriffsdefinition und -abgrenzung-----	18
2.2.2 Kompetenzen für Ressourceneffizienz-----	19
2.2.3 Vorgehensweisen zur Steigerung der Ressourceneffizienz-----	28
2.2.4 Hotspot-Analysemethoden-----	32
2.2.5 Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz-----	46
2.3 Zwischenfazit – Ressourceneffizienz in Lernfabriken-----	48
3 Zielkonkretisierung und Forschungskonzeption -----	50
3.1 Anforderungen an die Methodik-----	50
3.2 Abgrenzung des Untersuchungsrahmens-----	51
3.3 Lösungsansatz-----	52
4 Methodik zur Erweiterung von Lernfabriken um Ressourceneffizienz -----	56
4.1 Struktur der Methodik-----	56
4.2 Schritt 1: Definition und Analyse der Randbedingungen-----	58
4.3 Schritt 2: Auswahl der Hotspot-Analysemethoden-----	59
4.3.1 Aufbau und Grundprinzipien der Bewertung-----	59
4.3.2 Entwicklung der Bewertungskriterien-----	60

4.3.3	Definition der Skaleneinteilung	63
4.3.4	Ermittlung der Gewichtungsfaktoren	68
4.3.5	Ergebnis der Bewertung	70
4.4	Schritt 3: Auswahl der Ressourceneffizienzmaßnahmen	71
4.5	Schritt 4: Konkretisierung der intendierten Kompetenzen	78
4.6	Schritt 5: Lernmodulkonzept und technische Erweiterung	80
4.6.1	Schritt 5.1: Lernmodulkonzept	80
4.6.2	Schritt 5.2: Technische Erweiterung	81
4.7	Zwischenfazit	82
5	Anwendung und Evaluation der Methodik	84
5.1	Anwendung der Methodik	84
5.1.1	Erweiterung der CiP	84
5.1.2	Erweiterung des ILC	87
5.1.3	Erweiterung der LEP	91
5.2	Evaluationskonzept und Diskussion der Ergebnisse	94
5.3	Zwischenfazit	101
6	Zusammenfassung und Ausblick	102
6.1	Zusammenfassung	102
6.2	Ausblick	104
7	Literaturverzeichnis	108
Anhang		126
Anhang A-1	Bewertungstabelle Methodensammlung	127
Anhang A-2	Kategorien von Maßnahmenkatalogen	130
Anhang A-3	Kompetenztabelle für Ressourceneffizienz	132
Anhang A-4	Kompetenztabelle für die verschiedenen Hotspot-Analysemethoden	134
Anhang A-5	Fragebogen zur systematischen Ermittlung der Randbedingungen von Lernfabriken	142
Anhang A-6	Aufschlüsselung der Kostenpunkte zur Bewertung der Hotspot-Analysemethoden	145
Anhang A-7	Reflexionsfragen für die einzelnen Hotspot-Analysemethoden	146

Anhang A-8	Handlungsempfehlungen für die Erweiterung der CiP-----	151
Anhang A-9	Handlungsempfehlungen für die Erweiterung des ILC-----	154
Anhang A-10	Handlungsempfehlungen für die Erweiterung der LEP -----	157
Anhang A-11	Zusammenfassung der Rückmeldungen der Befragung -----	160
Anhang A-12	Handlungsleitfaden zur Anwendung der Methodik -----	163

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1-1: Ressourcenbedarf verschiedener Länder und global im Verhältnis zur Kapazität, ausgedrückt in Erden	2
Abbildung 1-2: Treiber für Ressourceneffizienz in der Produktion.....	3
Abbildung 1-3: Forschungskonzeption der vorliegenden Forschungsarbeit	5
Abbildung 2-1: Abgrenzung und Einteilung von Kompetenzen	9
Abbildung 2-2: Typischer Aufbau einer Kompetenztabelle	9
Abbildung 2-3: Taxonomiestufen für Kompetenzen	10
Abbildung 2-4: Gestaltungsdimensionen von Lernfabriken und deren Ausprägungen	11
Abbildung 2-5: Vorgehen zur kompetenzorientierten Gestaltung von Lernfabriken	13
Abbildung 2-6: Generische Vorgehensweise zur Erweiterung bestehender Lernfabriken.....	17
Abbildung 2-7: Darstellung des Zusammenhangs von natürlichen und materiellen, betrieblichen Ressourcen	19
Abbildung 2-8: Zusammenfassung des Vorgehens der systematischen Literaturanalyse	21
Abbildung 2-9: Vorgehensweisen zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Vergleich	31
Abbildung 2-10: Abgeleitete Vorgehensweise zur Umsetzung von Ressourceneffizienz in der Produktion	32
Abbildung 2-11: Vorgehen zur Durchführung einer Ökobilanz.....	34
Abbildung 2-12: Beispielhafte Darstellung einer CO ₂ -Bilanz für ein Pumpenlaufrad	36
Abbildung 2-13: Beispielhafte Darstellung einer Materialflusskostenrechnung (Kostensicht), dargestellt als Sankey-Diagramm	37
Abbildung 2-14: Beispielhafte Darstellung der Energiewertstrommethode, angewendet auf die ETA-Lernfabrik	39
Abbildung 2-15: Beispielhafte Darstellung der ABC-Analyse bezogen auf die Anschlussleistung von Maschinen	40
Abbildung 2-16: Beispielhafte Darstellung der Portfolio-Matrix	41
Abbildung 2-17: Beispielhafte Darstellung des kumulierten Energieaufwands.....	42

Abbildung 2-18: Beispielhafte Darstellung des kumulierten Rohstoffaufwands	43
Abbildung 3-1: Vorgehen zur Ableitung der Haupt- und Teilkompetenzen zur Steigerung der Ressourceneffizienz.....	53
Abbildung 3-2: Ableitung der Hauptkompetenzen und notwendigen Infrastruktur aus dem Vorgehen zur Steigerung der Ressourceneffizienz	54
Abbildung 4-1: Grafische Darstellung des Gesamtvorgehens zur Erweiterung von Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz	57
Abbildung 4-2: Übersicht über die vier Aspekte der Randbedingungen von bestehenden Lernfabriken.....	59
Abbildung 4-3: Vorgehen bei der Durchführung des Methodenvergleichs.....	60
Abbildung 4-4: Prozess zur Auswahl der Kategorien für Ressourceneffizienzmaßnahmen.....	72
Abbildung 4-5: Screenshot des Maßnahmentools zur vereinfachten Nutzung des Ressourceneffizienz-Maßnahmenkatalogs.....	78
Abbildung 4-6: Beispiele implementierter Ressourceneffizienzmaßnahmen in der ETA-Fabrik	82
Abbildung 5-1: Aufbau der Prozesslernfabrik CiP	84
Abbildung 5-2: Energiewertstrom der CiP-Lernfabrik.....	86
Abbildung 5-3: Prozesskette des ILC	88
Abbildung 5-4: ABC-Analyse und CO ₂ -Bilanz des ILC.....	90
Abbildung 5-5: Prozesskette der LEP.....	91
Abbildung 5-6: CO ₂ -Bilanz der LEP für den ineffizienten Zustand.....	93
Abbildung 5-7: Konzept für das CO ₂ -Dashboards in der LEP.....	94
Abbildung 5-8: Fotos der Umsetzung in der LEP	94

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1-1: Voraussetzungen zum erfolgreichen Kompetenzerwerb im Zusammenhang mit Lernfabriken -----	3
Tabelle 2-1: Kategorien zur Einordnung der Artikel von Lernfabrik-Erweiterungen ----	14
Tabelle 2-2: Übersicht der Vorgehensweisen zur Erweiterung von Lernfabriken -----	16
Tabelle 2-3: Zusammenfassung der analysierten Quellen nach für die Arbeit relevanten Aspekten -----	26
Tabelle 2-4: Zusammenfassung der Hotspot-Analysemethoden -----	43
Tabelle 2-5: Übersicht über Maßnahmenkataloge zum Thema Ressourceneffizienz---	47
Tabelle 2-6: Einordnung der Vorarbeiten der Autorin sowie der vorliegenden Arbeit in relevante Teilaspekte der Forschungsfrage -----	49
Tabelle 3-1: Übersicht über die Abgrenzungsdimensionen der Methodik -----	52
Tabelle 3-2: Hauptkompetenzen und notwendigen Infrastruktur zur Steigerung der Ressourceneffizienz-----	54
Tabelle 4-1: Übersicht über die aufgestellten Bewertungskategorien -----	62
Tabelle 4-2: Aufwände und Nutzen der einzelnen Methoden, angewendet in der Lernfabrik der TU Darmstadt -----	67
Tabelle 4-3: Resultierende Skaleneinteilung für jedes Kriterium-----	68
Tabelle 4-4: Beispielhafter Paarvergleich zur Ermittlung der Gewichtungsfaktoren ---	69
Tabelle 4-5: Beispielhafte Gewichtung direkt mit Zahlen -----	69
Tabelle 4-6: Bewertung der Hotspot-Analysemethoden bei gleicher Gewichtung der Kriterien -----	70
Tabelle 4-7: Übersicht über bestehende Kategorien zur Einteilung von Ressourceneffizienzmaßnahmen und Fabrikelementen -----	72
Tabelle 4-8: Auszug aus dem Katalog für Ressourceneffizienzmaßnahmen (Filterkategorien)-----	73
Tabelle 4-9: Auszug aus dem Katalog für Ressourceneffizienzmaßnahmen (Priorisierungskategorien)-----	76
Tabelle 4-10: Unterteilung der Bewertung für die einzelnen Priorisierungskategorien des Maßnahmenkatalogs -----	76
Tabelle 4-11: Auszug aus den erweiterten Kompetenztabellen für die CO ₂ -Bilanz ----	78

Tabelle 4-12: Auszug aus den erweiterten Kompetenztabellen für die ABC-Analyse --	79
Tabelle 4-13: Grundkonzept für ein Lernmodul zum Thema Ressourceneffizienz -----	80
Tabelle 5-1: Vergleich der Hotspot-Analysemethoden für die Randbedingungen der Erweiterung der CiP -----	85
Tabelle 5-2: Vergleich der Hotspot-Analysemethoden für die Randbedingungen der Erweiterung des ILC -----	88
Tabelle 5-3: Vergleich der Hotspot-Analysemethoden für die Randbedingungen der Erweiterung der LEP -----	92
Tabelle 5-4: Anforderungen an die Methodik und zugeordnete Evaluationsthesen----	95
Tabelle 5-5: Durchschnittliche Punktzahl und Standardabweichung der Befragung für jede Evaluationsthese -----	96

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Kurzzeichen	Begriff
AR	erweiterte Realität (englisch: Augmented Reality)
BaFin	Bundesanstalt für Finanzdienstleistungsaufsicht
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (früher BMU)
CF	CO ₂ -Bilanz (englisch: Carbon Footprint)
CiP	Center für industrielle Produktivität
CIRP	International Academy for Production Engineering (Collège International pour la Recherche en Productique)
CLF	Lernfabrik-Konferenz (englisch: Conference on Learning Factories)
CSRD	Richtlinie zur Nachhaltigkeitsberichterstattung (englisch: Corporate Sustainability Reporting Directive)
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DRM	Design Research Methodology
ESCO	European Skills, Competences, Qualifications and Occupations (Datenbank)
ETA	Name des Sitzes der gleichnamigen Forschungsgruppe des PTW (wörtlich: Energieeffizienz-, Technologie- und Anwendungszentrum)
EUREM	Training für europäische Energiemanager*innen (englisch: European Energy Manager Training)
EWSM	Energiewertstrommethode
IALF	International Association of Learning Factories
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
ifu	Institut für Umweltinformatik Hamburg
IIM	Institut für Innovation und Industrie Management

ILC	Innovation & Learning Center (Lernfabrik in Aachen)
IoT	Internet der Dinge (englisch: Internet of Things)
IPA	Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
IRP	International Resource Panel
iwf	Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
ITA	Institut für Textiltechnik Aachen
GHG	Treibhausgas (englisch: Greenhouse Gas)
GWP	Treibhauspotenzial (englisch: Global Warming Potential)
KSS	Kühlschmierstoff
LCA	Ökobilanz (englisch: Life Cycle Assessment)
LEP	Lernfabrik in der ETA-Fabrik (wörtlich: Lernfabrik für Energieproduktivität)
MFCA	Materialflusskostenrechnung (englisch: Material Flow Cost Accounting)
NiFaR	Niedersächsische Lernfabrik für Ressourceneffizienz
PCF	Produktspezifische CO ₂ -Bilanz (englisch: Product Carbon Footprint)
PM	Portfolio-Matrix
PTW	Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen
RFID	Technologie zur Identifizierung mit Hilfe elektromagnetischer Wellen (englisch: radio-frequency identification)
RM	Reinigungsmaschine
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
UBA	Umweltbundesamt
UNEP	United Nations Environment Programme
VDI	Verband deutscher Ingenieure
VDI ZRE	Verband deutscher Ingenieure – Zentrum Ressourceneffizienz
ViREG	Virtual Resource Efficiency Gateway

VR	Virtuelle Realität (englisch: Virtual Reality)
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development
WRI	World Resources Institute
WSM	Wertstrommethode
WZM	Werkzeugmaschine

1 EINLEITUNG

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur systematischen Erweiterung von Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz. Dafür wird zunächst in Abschnitt 1.1 die zu Grunde liegende Motivation sowie die abgeleitete Zielstellung ausgeführt. Anschließend erfolgt in Abschnitt 1.2 eine Erläuterung des Aufbaus der Arbeit.

1.1 Motivation und Zielstellung

Als Menschheit nachhaltig, also dauerhaft über viele kommende Generationen gut und sicher auf der Erde leben zu können, ist das Ziel der zunehmenden, globalen Nachhaltigkeitsbewegung (Tagesschau, 2022; The Washington Post, 2023). Auch wenn der Begriff der Nachhaltigkeit ursprünglich aus der Forstwirtschaft stammt und dort einen Zustand beschreibt, in dem nur so viel abgeholzt wird, wie auch nachwachsen kann (Carlowitz, 1713), wird er heutzutage vor allem bezogen auf die Menschheit und deren Lebensgrundlage verstanden. So heißt es etwa im 1987 erschienenen Brundtland-Bericht, dass „[...] nachhaltige Entwicklung die Bedürfnisse der aktuellen Generation befriedigt, ohne zukünftige Generationen daran zu hindern, ihre eigenen Bedürfnisse zu erfüllen“ (United Nations, 1987). Zu diesem Verständnis und der Verantwortung, weltweit für gute Lebensperspektiven heutiger und zukünftiger Generationen zu Sorgen, hat sich die internationale Staatengemeinschaft bereits 2015 mit der Agenda 2030 bekannt (Generalversammlung Vereinte Nationen, 2015).

Diesem Bekenntnis entgegen steht ein zunehmender Ressourcenbedarf und eine drohende Ressourcenknappheit, die die Befriedigung der grundlegenden Bedürfnisse vieler Menschen akut gefährdet (IRP, 2020; UNEP, 2023). Um das Missverhältnis zu beziffern, ermittelt das Global Footprint Network jedes Jahr den sogenannten Earth Overshoot Day, Erdüberlastungstag auf Deutsch, der angibt, wann der Bedarf der Menschen an ökologischen Ressourcen die Kapazitäten der Erde in dem Jahr übersteigt. Damit einher geht die Berechnung, wie viele Erden die Menschheit hypothetisch benötigen würde, um diesen Bedarf dauerhaft zu decken. 2022 wären dazu laut dem Netzwerk 1,7 Erden notwendig gewesen. Hätten alle Menschen auf der Erde einen Lebensstil wie in Deutschland, wären es sogar drei Erden. (Global Footprint Network, 2022) In der Realität steht allerdings nur eine Erde zur Verfügung. In Abbildung 1-1 sind diese Zusammenhänge sowie Ressourcenbedarfe im Verhältnis zur Kapazität der Erde für beispielhafte Länder dargestellt.

Anzahl der Erden, die nötig wären, wenn alle so leben würden wie in...

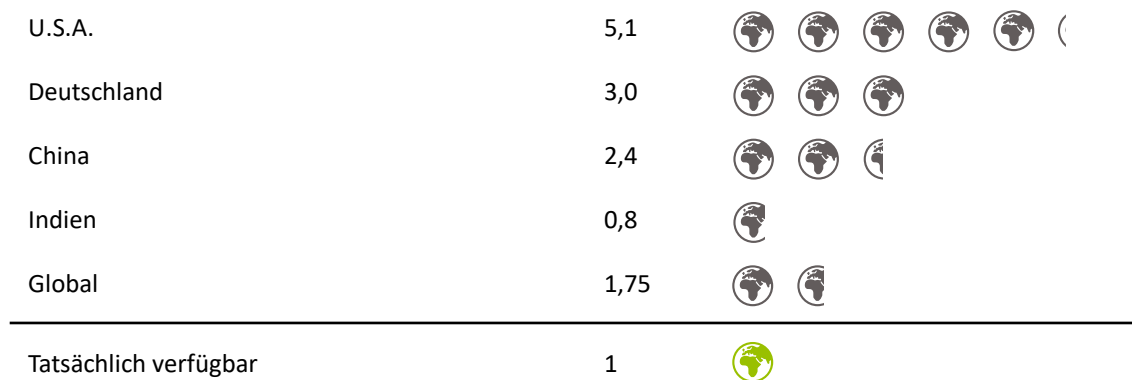


Abbildung 1-1: Ressourcenbedarf verschiedener Länder und global im Verhältnis zur Kapazität, ausgedrückt in Erden, eigene Darstellung in Anlehnung an Global Footprint Network (2022)

Auch der Bericht des International Resource Panels (IRP) des Umweltprogramms der Vereinten Nationen zeigt, dass der globale Ressourcenbedarf drastisch gestiegen ist: benötigte die Menschheit 1970 noch 27 Milliarden Tonnen Primärmaterial, war es 2017 mit 92 Milliarden Tonnen schon mehr als dreimal so viel. Der Studie zu Folge könnte der Ressourcenbedarf bis 2060 auf 143–190 Milliarden Tonnen ansteigen. (IRP, 2019, S. 7–9) Damit einher gehen schon jetzt als negativ zu bewertende Folgen wie der Klimawandel (IRP, 2020, S. 13) oder die Tatsache, dass Menschen daraufhin ihre Lebensgrundlage verlieren und unfreiwillig umziehen müssen (UNEP, 2023).

Diese Folgen wirken sich nicht nur über den zunehmenden gesellschaftlichen Druck auf Unternehmen aus. Auch die Politik fordert und fördert den effizienten Umgang mit Ressourcen durch Unternehmen. Dies geschieht bspw. mit dem Deutschen Ressourceneffizienzprogramm, welches diverse Maßnahmen zur Förderung von Ressourceneffizienz vorsieht (BMU, 2020). Aber auch aus wirtschaftlicher Sicht betrifft Ressourceneffizienz produzierende Unternehmen, denn der Material- und Energieverbrauch verursacht im Schnitt über 40 % der Gesamtkosten (Statistisches Bundesamt, 2019). In Abbildung 1-2 sind Treiber für Ressourceneffizienz in Unternehmen zusammengefasst. Sie setzen sich zusammen aus druckerzeugenden Faktoren (sogenannte Push-Faktoren) und Anreizen (sogenannte Pull-Faktoren). Auch in Megatrendstudien und in der Produktionsforschung wird das Thema Ressourceneffizienz bereits seit einiger Zeit als wichtiges Thema erachtet (Abele & Reinhart, 2011; Grömling & Haß, 2009; Herrmann, 2010).

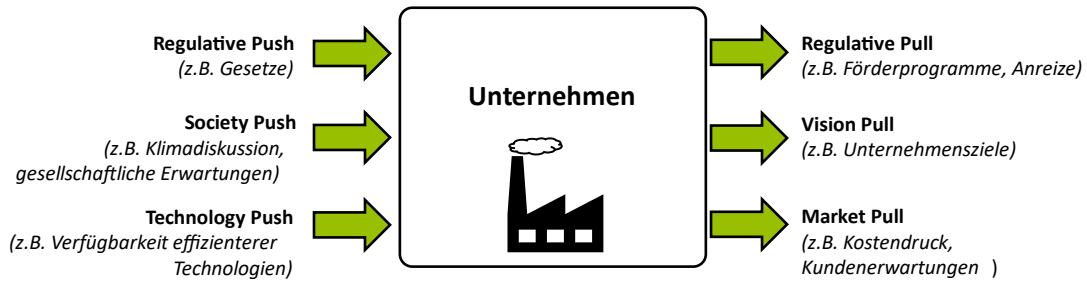


Abbildung 1-2: Treiber für Ressourceneffizienz in der Produktion, eigene Darstellung adaptiert nach Fichter (2005) und Thiede (2012)

Um Ressourceneffizienz in Unternehmen verbessern zu können, sind unter anderem entsprechende Kompetenzen bei den Mitarbeiter*innen essentiell (Alayón et al., 2022). Ihnen muss die Notwendigkeit bewusst sein, um Veränderungen anzustoßen und Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz erfolgreich zu implementieren. Um effektiv Kompetenzen für die Produktion aufzubauen, hat sich das Konzept der Lernfabriken bewährt (Adolph et al., 2014; Cachay et al., 2012; Chryssolouris et al., 2013). Lernfabriken ermöglichen durch die Abbildung realer Problemsituationen, einen Wechsel an theoretischen und praktischen Phasen und dem teils selbstorganisierten Lösungsprozess einen besonders effizienten Kompetenzaufbau. Tabelle 1-1 gibt einen Überblick über Aspekte von Lernfabriken, die Voraussetzungen zur Kompetenzentwicklung begünstigen.

Tabelle 1-1: Voraussetzungen zum erfolgreichen Kompetenzerwerb im Zusammenhang mit Lernfabriken, eigene Darstellung in Anlehnung an Tisch und Metternich (2017), Glass (2021, S. 20) und Kreß (2022, S. 35)

Voraussetzungen zur Kompetenzentwicklung	Adressierung in Lernfabriken
Realistische Problemsituation/ Bezug zum Prozess der Arbeit	Simulation realer Produktionsprozesse, Problemlösung an realen Problemen
Selbständige Handlung/ Lernende sind aktiv	Eigenständige Anwendung von Wissen in der Lernfabrik (Praxisübung)
Wechsel zwischen Denken und Tun	Alternieren von Praxisphasen in der Lernfabrik und Theoriephasen im Seminarraum
Wechsel zwischen Selbst- und Fremdsteuerung	Extern vorgegebene Lernziele und Aufgaben + selbstgesteuerter Wissenseinsatz in der Lernfabrik
Kollektivierung	Selbstorganisiertes Lernen in Gruppen
Motivation der Lernenden	Motivation durch den Realitätscharakter und die direkte Auswirkung von Handlungen

Diesen Vorteilen gegenüber steht aber unter anderem die Einschränkung des Kostenfaktors: neben den Kosten für den Betrieb sind schon für den Aufbau einer Lernfabrik inklusive ggf. benötigter Halle erhebliche finanzielle Mittel erforderlich (Tisch & Metternich, 2017). Außerdem kann der Aufbau von Lernfabriken mehrere Monate bis Jahre beanspruchen (Kreß, 2022, S. 36). Auch wenn in neuen Lernfabriken zunehmend das Thema Ressourceneffizienz adressiert wird, dominieren nach wie vor andere Themen wie bspw. Industrie 4.0 oder Lean Production die Lernfabrik-Landschaft (Callupe et al., 2021; Heinze et al., 2021, S. 20). Könnten diese bestehenden Lernfabriken genutzt werden, um dort auch Ressourceneffizienz zu schulen, ließen sich Zeit, Kosten und nicht zuletzt Ressourcen für Neubauten sparen und dennoch zielgerichtet Kompetenzen vermitteln, um mehr Unternehmen zu einem ressourceneffizienten Verhalten zu befähigen.

Vor dem Hintergrund der dargelegten Notwendigkeit für Ressourceneffizienz in der Produktion sowie dem hohen finanziellen Aufwand insbesondere beim Neubau einer Lernfabrik adressiert die vorliegende Arbeit deswegen die folgende Forschungsfrage:

Forschungsfrage: Wie können bestehende Lernfabriken systematisch erweitert werden, um dort das Thema der Ressourceneffizienz in der Produktion zu vermitteln?

Dafür ist es zunächst notwendig, zu ermitteln, welche Kompetenzen und Methoden im Kontext des Themas Ressourceneffizienz als relevant erachtet werden können. Anschließend wird analysiert, welche Anforderungen sich dadurch an die Infrastruktur der Lernfabrik ergeben und wie abgeleitete Workshopmodule aussehen können. Zusammenfassend wird die folgende Zielstellung verfolgt:

Forschungsziel: Entwicklung und Erprobung einer ganzheitlichen Methodik zur systematischen Erweiterung bestehender Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz, unter Berücksichtigung notwendiger Kompetenzen im Zusammenhang mit der technischen Infrastruktur sowie dem Workshopkonzept.

1.2 Aufbau der Arbeit

Zur Erreichung des Forschungsziels wird ein Forschungskonzept genutzt, welches in Abbildung 1-3 grafisch dargestellt ist. Das Forschungskonzept dient der systematischen Erarbeitung neuer Erkenntnisse und der Einordnung entsprechender Methoden, die bei der Erarbeitung zum Einsatz kommen. Das Forschungsvorgehen wurde in der vorliegenden Arbeit entsprechend der Design Research Methodology (DRM, Blessing & Chakrabarti, 2009) konzipiert. Die DRM bietet ein vierschrittiges Vorgehen zur systematischen Identifikation von Bedürfnissen und der Entwicklung von entsprechenden Gestaltungslösungen. Vor diesem Hintergrund ist die Methode für das Forschungsziel der Entwicklung einer Methodik zur Erweiterung von Lernfabriken um das Thema

Ressourceneffizienz anwendbar. Im Folgenden werden die vier Schritte des DRM in den Zusammenhang mit der vorliegenden Forschungsarbeit gesetzt und genauer beschrieben.

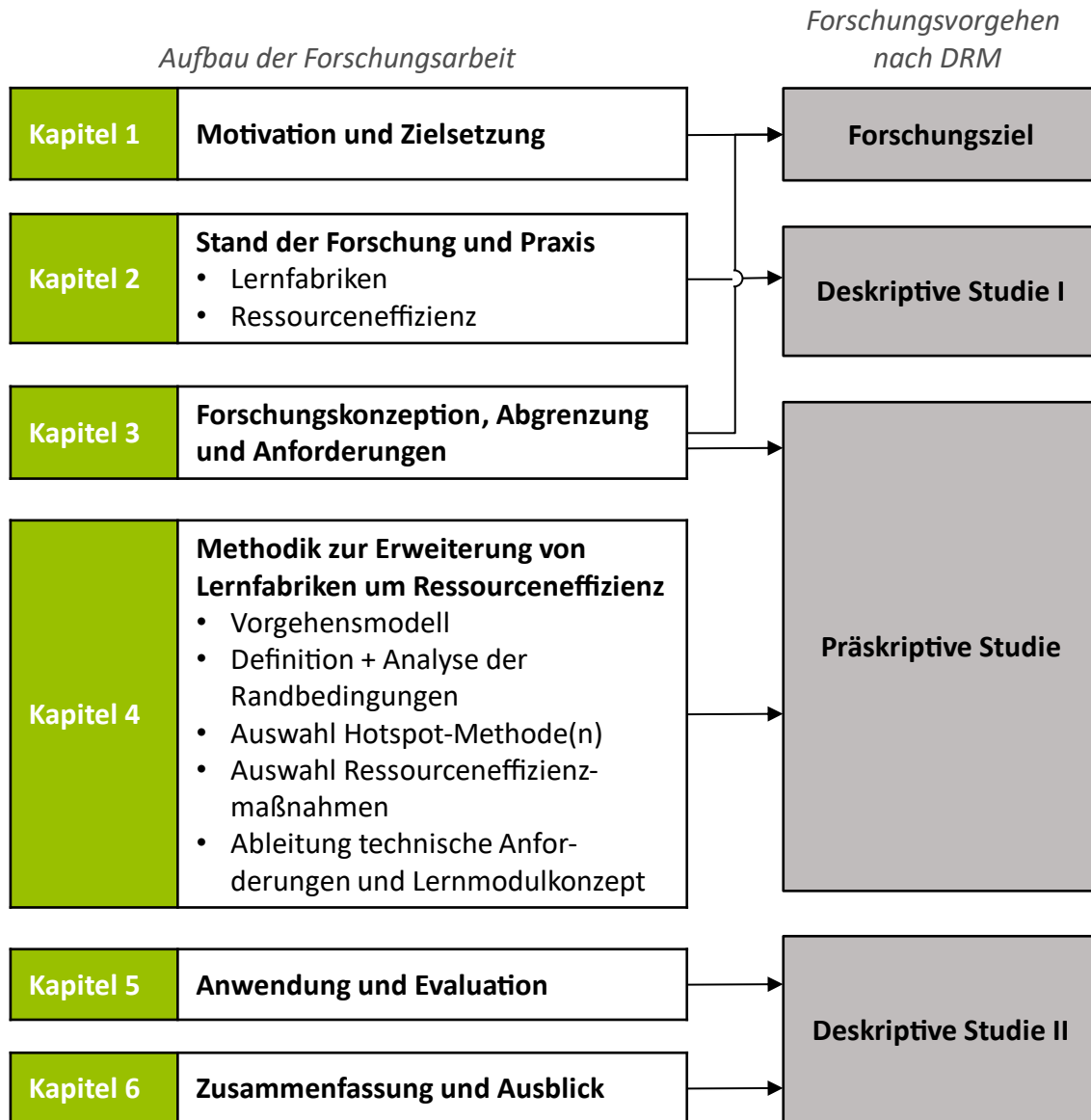


Abbildung 1-3: Forschungskonzepktion der vorliegenden Forschungsarbeit, eigene Darstellung in Anlehnung an Blessing und Chakrabarti (2009)

Im ersten Schritt der DRM findet die Forschungseingrenzung statt. Das Forschungsfeld sowie die Problemstellung werden umrissen und das konkrete Forschungsziel formuliert. Letzteres ist bereits im vorangegangenen Abschnitt erfolgt, die Abgrenzung wird in Kapitel 3 konkretisiert. Im zweiten Schritt der DRM, der sogenannten ersten deskriptiven Studie, wird ein grundlegendes Verständnis zum Stand der Forschung und Praxis erarbeitet. In der vorliegenden Arbeit geschieht dies in Kapitel 2 mit genaueren Ausführungen zu den zwei Hauptaspekten der Forschungsfrage: dem Thema der Lernfabriken

und dem Thema der Ressourceneffizienz. Im Anschluss an die erste deskriptive Studie erfolgt in der DRM eine präskriptive Studie, die den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit bildet und nach der Beschreibung des Konzeptes in Kapitel 3 vorrangig in Kapitel 4 ausgeführt wird. Dies beinhaltet die Erarbeitung und Beschreibung der fünf Teilschritte der Methodik. Im letzten Schritt der DRM, der zweiten deskriptiven Studie, werden die entwickelten Lösungen angewendet und evaluiert. Dies erfolgt in Kapitel 5 und wird in Kapitel 6 mit Zusammenfassung und Ausblick abgeschlossen.

2 STAND DER FORSCHUNG UND PRAXIS

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit zwei Themen – Lernfabriken und Ressourceneffizienz – zu denen im Folgenden jeweils der Stand der Forschung und Praxis aufbereitet wird. Zunächst wird mit der Definition relevanter Begriffe das Lernsystem Lernfabrik näher betrachtet. Im Anschluss werden Designansätze zur (Neu-)Gestaltung von Lernfabriken gegenübergestellt und im Kontext der Arbeit hinsichtlich ihrer Relevanz eingeordnet.

Anschließend wird das Thema Ressourceneffizienz adressiert, indem ebenfalls zunächst auf die relevanten Begriffe eingegangen wird. Im Anschluss erfolgt eine systematische Literaturanalyse zu Kompetenzen, die für das Thema relevant sind, und es werden Methoden und Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz erläutert. Abschließend erfolgt ein Fazit des Kapitels, in dem die Adressierung von Ressourceneffizienz in Lernfabriken betrachtet wird.

2.1 Lernfabriken zur Kompetenzentwicklung

Im folgenden Abschnitt wird zunächst auf Lernfabriken eingegangen, da dieses Konzept im Sinne der Zielstellung der Arbeit eine zentrale Rolle einnimmt. Dafür wird in Abschnitt 2.1.1 zunächst erläutert, was im Rahmen der Arbeit unter einer Lernfabrik verstanden wird und wie dies mit dem Begriff der Kompetenzen zusammenhängt. Im Anschluss erfolgt eine Darstellung von bisherigen Ansätzen zur Erweiterung von Lernfabriken in Abschnitt 2.1.2.

2.1.1 Begriffsdefinition und -abgrenzung

Kompetenzen

Lernfabriken stellen eine geeignete Methode dar, um systematisch Kompetenzen im Kontext der Produktion zu entwickeln (Abele et al., 2015; Majid Ansari, 2019, S. 24). Bevor also das Konzept der Lernfabrik erläutert werden kann, muss zunächst eine Einordnung und Abgrenzung des Begriffes der Kompetenzen gegeben werden – auch wenn hierfür keine einheitliche Definition vorliegt (Erpenbeck et al., 2017; Siegert et al., 2020). Im Kontext von Lernfabriken wird häufig auf die Definition von Erpenbeck und Rosenstiehl zurückgegriffen, die Kompetenzen als erlernbare, individuelle Voraussetzungen zum kreativen und selbstorganisierten Handeln in offenen, unsicheren, komplexen und dynamischen Situationen definieren (Erpenbeck et al., 2017). Kompetenzen werden demnach erst in Situationen mit unscharfen oder sogar fehlenden Zielvorgaben sichtbar und ermöglichen dort das selbstständige Handeln (Tenberg, 2011). Solche neuartigen Situationen sind im Produktionskontext vorzufinden, was die Beliebtheit dieser Definition im Lernfabrikkontext erklärt. Das wird auch in Siegert et al. (2020) deutlich, die in

ihrem Review-Artikel eine Übersicht über bestehende Definitionen des Kompetenzbegriffes geben und eine Definition erarbeiten, die insbesondere auf die Produktion ausgerichtet ist. Diese Definition weist deutliche Parallelen zu der von Erpenbeck und Rosenstiel (2017) auf und lautet wie folgt (übersetzt aus dem Englischen):

„Kompetenzen stellen die Gesamtheit der Fähigkeiten, Fertigkeiten und des vorhandenen Wissens dar, um komplexe, dynamische und manchmal chaotische Situationen angemessen zu erfassen, zu analysieren, zu bewerten und Entscheidungen zu treffen, unter Berücksichtigung der relevanten Ziele.“ (Siegert et al., 2020)

Auch wenn im alltäglichen Sprachgebrauch oft gleichbedeutend verwendet, ist der Begriff der Kompetenzen von den Begriffen Wissen, Fähigkeiten, Fertigkeiten und Qualifikationen zu unterscheiden (Erpenbeck et al., 2017). Zu diesen Begriffen existieren ebenfalls unterschiedliche Modelle (Tenberg, 2011). Wissen kann als Verknüpfung von Informationen, Fakten, Prinzipien, Theorien und Praktiken mit einem konkreten Arbeits- oder Studienfeld verstanden werden (Erpenbeck & Sauter, 2015, S. 2; Probst et al., 2012, S. 23). Fähigkeiten und Fertigkeiten geben darauf basierend an, inwieweit vorhandenes Wissen von Individuen angewendet werden kann, um bestimmte Aufgaben in diesem konkreten Kontext zu bearbeiten. Fähigkeiten beschreiben dabei, grundsätzliche körperliche und geistige Voraussetzungen, also inwieweit ein Individuum „fähig“ ist, bestimmte Handlungen auszuführen. Die Handlungsfähigkeit in gleichbleibenden Situationen, bspw. in Montageprozessen, stellt eine Fertigkeit dar. (Jung, 2010) Der Begriff der Qualifikation schließlich umfasst Fähigkeiten und Fertigkeiten zur anforderungsorientierten Handlung (Erpenbeck et al., 2017).

Im Gegensatz zu Kompetenzen umfassen Qualifikationen keine kreativen, selbstorganisierten Handlungen (Heyse & Erpenbeck, 2009). Kompetenzen können als Zusammenwirken von Wissen und Qualifikationen beschrieben werden, wie in Abbildung 2-1 auf der linken Seite grafisch dargestellt (Erpenbeck et al., 2017). Auf der rechten Seite der Abbildung sind die vier Kompetenzklassen dargestellt, in die Erpenbeck et al. (2017) Kompetenzen einteilen. Eine trennscharfe Abgrenzung dieser vier Klassen ist nicht möglich. Trotzdem wird darüber eine Systematisierung von Kompetenzen ermöglicht (Heyse & Erpenbeck, 2009). Im Zusammenhang mit Lernfabriken werden insbesondere die Fach- und Methodenkompetenzen adressiert und in Lernzielen formuliert (Tisch, 2018), wobei sich auch Quellen finden, die die Adressierung der anderen drei Kompetenzgruppen in Lernfabriken belegen (zusammengefasst in Abele et al., 2019, S. 33–35). Die Kompetenzklasse der Fach- und Methodenkompetenzen umfasst die Anwendung von systematischen Vorgehensweisen und Methoden zur selbstständigen Lösungsentwicklung (Erpenbeck et al., 2017).

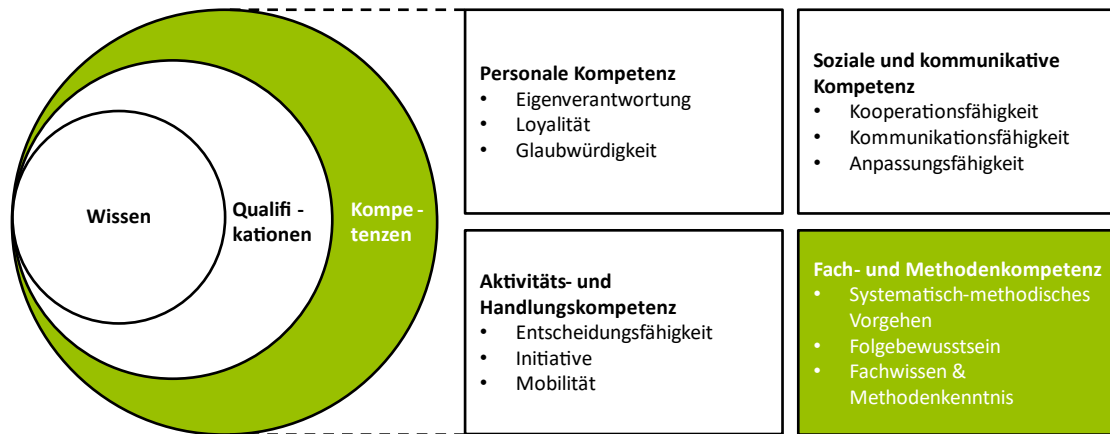


Abbildung 2-1: Abgrenzung und Einteilung von Kompetenzen, eigene Darstellung in Anlehnung an Erpenbeck et al. (2017, S. 17) sowie Heyse und Erpenbeck (2009)

Zur Sammlung von Kompetenzen für bestimmte Themen bieten sich Kompetenztabellen an, in der mit Hilfe der sogenannten Kompetenztransformation Handlungen und Wissensselemente zugeordnet werden können. Die Kompetenztabellen umfassen in der Regel Hauptkompetenzen, untergeordnete Sub- oder Teilkompetenzen, zuordenbare Handlungen und das dafür notwendige Wissen (Tisch, 2018). Der typische Aufbau einer Kompetenztabelle ist in Abbildung 2-2 dargestellt.

Intendierte Hauptkompetenz 1	Teilkompetenz 1.1	Zuordenbare, beobachtbare Handlungen	Zugrundeliegendes Wissen
	Teilkompetenz 1.2	Zuordenbare, beobachtbare Handlungen	Zugrundeliegendes Wissen
	Teilkompetenz 1.3	Zuordenbare, beobachtbare Handlungen	Zugrundeliegendes Wissen
...

Vorgehen bei Soll -Bestimmung der intendierten Kompetenzen ➔

Vorgehen bei der Analyse des Ist -Zustandes bestehender Lernmodule ➔

Abbildung 2-2: Typischer Aufbau einer Kompetenztabelle, eigene Darstellung in Anlehnung an Tisch (2018, S. 141)

Um intendierte, sprich beabsichtigte Kompetenzen zu ermitteln, wird in der Regel mit der Bestimmung der Hauptkompetenzen gestartet, die anschließend in Teilkompetenzen aufgeteilt werden. Für diese Teilkompetenzen gilt es zu identifizieren, bei welchen Handlungen diese erforderlich sind. Darauf aufbauend können in Lernfabriken bspw. Übungen gestaltet werden, die genau diese Handlungen beinhalten, um die entsprechenden Teilkompetenzen zu vermitteln und/oder zu überprüfen. Letztlich sollte für die Teilkompetenzen auch ermittelt werden, welches Wissen der Handlung bzw.

Kompetenz zu Grunde liegt. Dieses Wissen sollte vor oder während der Übung vermittelt werden, damit der Kompetenzerwerb erfolgreich ist. (Glass, 2021; Tisch, 2018)

Kompetenzen können nach sogenannten Taxonomiestufen unterschieden werden, die vereinfacht ausgedrückt den Grad der Komplexität bzw. die Anforderungen an die Lerner*innen angeben. Ursprünglich von Bloom (1976) entwickelt, wurden die Taxonomiestufen von Anderson et al. (2001) verändert und ergänzt. Abbildung 2-3 stellt den Stand von Anderson und Kraftwohl dar und nennt für jede der Stufen synonyme Verben, die bei der Formulierung der Kompetenzen in den entsprechenden Stufen genutzt werden können.

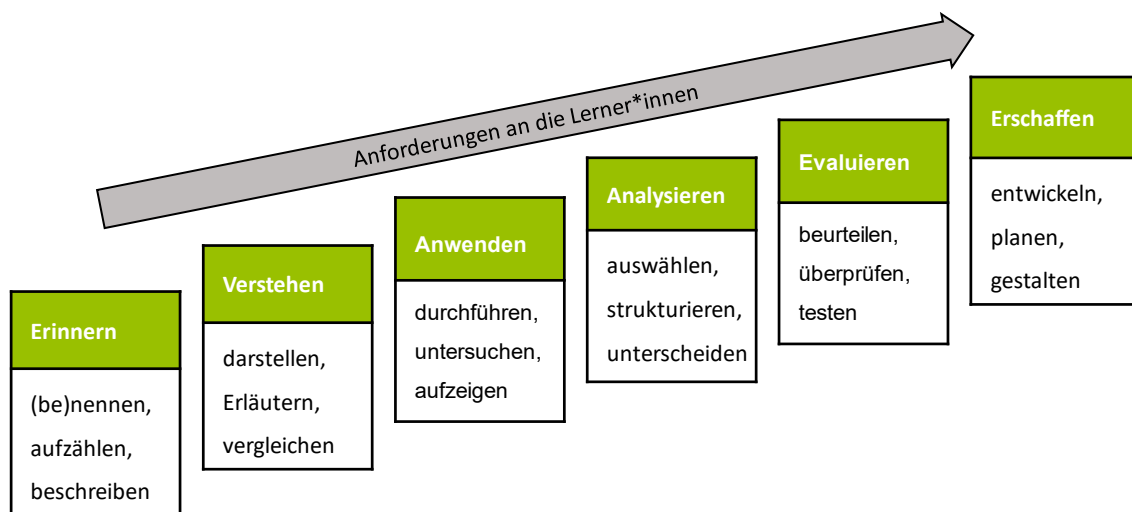


Abbildung 2-3: Taxonomiestufen für Kompetenzen, eigene Darstellung in Anlehnung an Anderson et al. (2001)

Lernfabriken

Nach der Beschreibung von Begriffen im Kontext von Kompetenzen erfolgt die Erläuterung von Lernfabriken als Orte des kompetenzorientierten Lernens. Die International Association of Learning Factories, kurz IALF, führt auf ihrer Homepage die folgende Definition für eine Lernfabrik auf (übersetzt aus dem Englischen):

*„Eine Lernfabrik ist eine Lernumgebung, in der Prozesse und Technologien auf einem realen Industriestandort basieren, der einen direkten Zugang zum Produktentstehungsprozess (Produktentwicklung, Produktion, Qualitätsmanagement, Logistik) ermöglicht. Lernfabriken basieren auf einem didaktischen Konzept, das den Schwerpunkt auf experimentelles und problemorientiertes Lernen legt. Die Philosophie der kontinuierlichen Verbesserung wird durch eigenes Handeln und die interaktive Beteiligung der Teilnehmer*innen gefördert.“* (International Association of Learning Factories, 2021)

Konkretisiert wird diese Definition durch sechs Gestaltungsdimensionen, die in Abbildung 2-4 auf der linken Seite zu sehen sind.

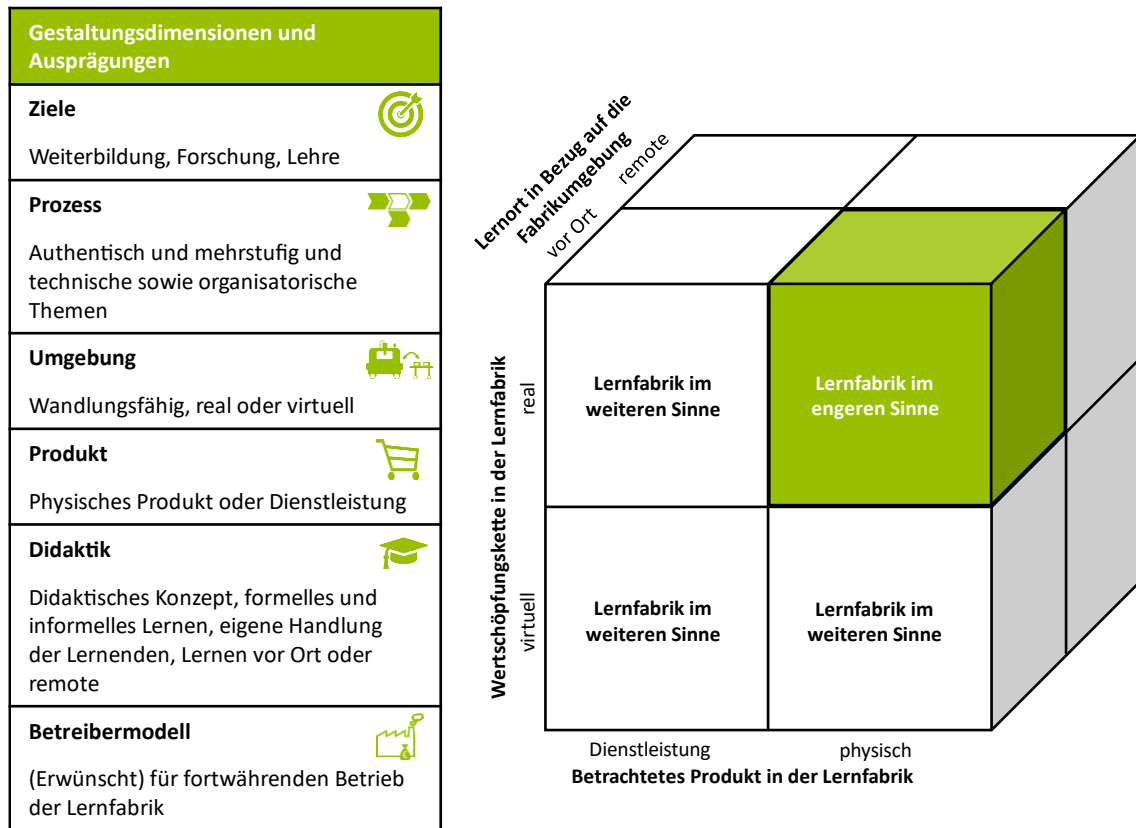


Abbildung 2-4: Gestaltungsdimensionen von Lernfabriken und deren Ausprägungen (links) sowie Einteilung von Lernfabriken im engeren und weiteren Sinne (rechts), eigene Darstellung in Anlehnung an Abele et al. (2015)

Ziele von Lernfabriken können entweder Weiterbildung, Forschung und/oder Lehre sein. Wie der aufgeführten Definition zu entnehmen ist, müssen realistische, mehrstufige Produktionsprozesse abgebildet werden, die sowohl technische als auch organisatorische Aspekte berücksichtigen. Die Lernumgebung muss wandlungsfähig sein und eine reale Wertschöpfungskette beinhalten. (Abele et al., 2015) Liegt die Wertschöpfungskette im virtuellen Raum vor, bspw. bei Virtual-Reality-Anwendungen wie in Riemann et al. (2021) beschrieben, ist von Lernfabriken im weiteren Sinne die Rede. Unterschieden nach Lernfabriken im weiteren und engeren Sinne wird auch bei den Ausprägungen der Gestaltungsdimension Produkt. So können in Lernfabriken physische Produkte hergestellt und in Workshops analysiert werden, was der Definition im engeren Sinne entspricht. Möglich sind jedoch auch Lernfabriken, deren Produkt eine Dienstleistung ist – hier handelt es sich dann um Lernfabriken im weiteren Sinne. Auch beim didaktischen Konzept, welches formelles und informelles Lernen sowie eigene Handlungen der Lernenden ermöglichen muss, zeigt sich die Unterscheidung zwischen Lernfabriken im engeren und weiteren Sinne. Letzteres gilt, wenn der Lernprozess nicht vor Ort, sondern remote stattfindet. Diese Einteilung von Lernfabriken ist in Abbildung 2-4 auf der rechten Seite grafisch dargestellt. Die letzte Gestaltungsdimension einer Lernfabrik ist das

Betreibermodell, welches vorhanden sein muss, um den fortwährenden Betrieb der Lernfabrik zu ermöglichen.

Der Lernprozess findet in Lernfabriken arbeitsbasiert statt, was bedeutet, dass Lern- und Arbeitsort nicht identisch sind (Abele et al., 2017). Das hat den Vorteil, dass die Abstraktion von Problemstellungen über die eigene Arbeitsumgebung hinaus ermöglicht wird (Abele et al., 2017). Außerdem können Prozessveränderungen ohne Einschränkung der Stabilität, Effizienz oder Qualität in der Arbeitsumgebung variiert und ausprobiert werden (Tisch et al., 2014). Durch die Abbildung von realen, praxisnahen Prozessketten in Lernfabriken kommt dennoch die Nähe zur Arbeitsaufgabe zum Tragen – ein großer Vorteil, der sonst dem arbeitsgebundenen Lernens zugeordnet werden kann (Tisch & Metternich, 2017).

Die im letzten Satz der IALF-Definition von Lernfabriken geforderte, kontinuierliche Verbesserung bezieht sich nicht nur auf die Lerninhalte, sondern auch auf die Lernfabrik selbst. Genau wie Produkte oder Technologien unterliegen auch Lernfabriken einer Art Lebenszyklus bestehend aus den Phasen Planung, Entwicklung, Aufbau, Vertrieb/Beratung/Verkauf, Nutzung und Umgestaltung (Tisch & Metternich, 2017). Wie der Zielstellung in Kapitel 1.1 zu entnehmen ist, fokussiert sich die vorliegende Arbeit auf die Lebensphase der Lernfabrikumgestaltung. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass das Thema der Ressourceneffizienz die bestehenden Themen der jeweiligen Lernfabrik nicht ersetzt, wie es das Wort Umgestaltung suggeriert, sondern diese erweitert. Deswegen wird im Folgenden die Begrifflichkeit der Erweiterung von Lernfabriken gewählt. Bei der Erweiterung von Lernfabriken bestehen methodische Überschneidungen mit der Planung und Entwicklung, zusammengefasst als Gestaltung bezeichnet, weswegen diese Methoden im folgenden Abschnitt ebenfalls aufgegriffen werden.

2.1.2 Methoden zur Gestaltung und Erweiterung von Lernfabriken

Über die Jahre wurden diverse Methoden zur Gestaltung von Lernfabriken veröffentlicht, vorrangig im Rahmen der Lernfabrik-Community und der zugehörigen, CIRP-gesponserten Lernfabrik-Konferenz (Conference on Learning Factories, CLF). Kreß et al. (2021) haben verschiedene Gestaltungsansätze hinsichtlich ihrer Einsatzhäufigkeit analysiert und ermittelt, dass der von Tisch et al. (2015), näher beschrieben in Tisch (2018), bisher am meisten Verwendung fand. Dieser Gestaltungsansatz ist in Abbildung 2-5 grafisch dargestellt.

Das Zentrum dieses Ansatzes bilden die intendierten Kompetenzen, die sich aus dem organisationalen Umfeld, den Unternehmenszielen¹ und der Zielgruppe ableiten lassen.

¹ Mit Unternehmen ist hier die Lernfabrik gemeint. Um Missverständnisse zu vermeiden, wird im Folgenden stattdessen die Formulierung „Ziele der Lernfabrik“ verwendet.

Aufbauend auf den intendierten Kompetenzen kann die sozio-technische Infrastruktur mit Produkt und Prozess sowie die didaktische Infrastruktur, zu der bspw. die eingesetzten Lernmethoden gehören, abgeleitet werden. Die Ermittlung der intendierten Kompetenzen auf Basis der organisationalen Rahmenbedingungen bezeichnen Tisch et al. (2015) dabei als erste didaktische Transformation. Die intendierten Kompetenzen anschließend in Infrastrukturanforderungen zu überführen, ist die zweite didaktische Transformation.

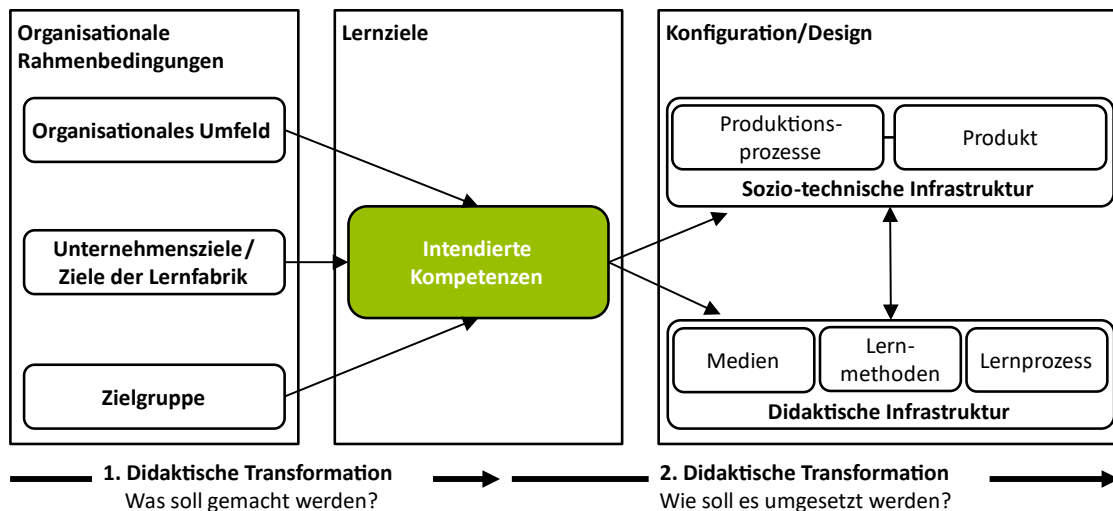


Abbildung 2-5: Vorgehen zur kompetenzorientierten Gestaltung von Lernfabriken, eigene Darstellung in Anlehnung an Tisch et al. (2015) und Tisch (2018)

Wie geschrieben dient der Ansatz von Tisch et al. (2015) der initialen Gestaltung von Lernfabriken. In diesem Ansatz sind keine Schritte enthalten, die explizit die Erweiterung oder Umgestaltung von Lernfabriken adressieren. Aus diesem Grund werden im Folgenden zusätzlich Methoden untersucht, die sich explizit mit dieser Lebensphase einer Lernfabrik beschäftigen. Die Untersuchung basiert dabei auf den Vorarbeiten von Enke (2020). Die Autorin Enke hat in ihrer Dissertation 164 Artikel untersucht, die im Rahmen der CLF veröffentlicht wurden. Diese Artikel hat sie den Lernfabrik-Lebensphasen zugeordnet und konnte somit zeigen, dass lediglich 16 % der veröffentlichten Artikel die Phase der Umgestaltung adressieren. Die Analyse von Enke umfasst die Jahre 2015–2018, weswegen für die hier vorliegende Arbeit die Jahre 2019–2023 zusätzlich analysiert werden. Die Analyse fokussiert sich darauf, inwiefern neue Vorgehensweisen zur Erweiterung von Lernfabriken publiziert wurden. Die Ergebnisse können in fünf verschiedene Kategorien eingeteilt werden, je nachdem wie für die Erweiterung vorgegangen wird. Diese Einteilung ist in Tabelle 2-1 zusammengefasst.

Die jeweils in den Artikeln adressierten Themen sind in Klammern hinter den Quellen aufgeführt. Für eine Erläuterung der jeweiligen Themen wird an dieser Stelle auf die Artikel selbst verwiesen.

Tabelle 2-1: Kategorien zur Einordnung der Artikel von Lernfabrik-Erweiterungen

	Erweiterung von Lernfabriken...
Kategorie 1	... ohne konkrete Vorgehensweise
Kategorie 2	... ohne konkrete Vorgehensweise, aber mit vorheriger Aufstellung von intendierten Kompetenzen/Lernzielen
Kategorie 3	... mit konkreter Vorgehensweise, in der allerdings nicht die bestehende Infrastruktur berücksichtigt wird
Kategorie 4	... mit der konkreten Vorgehensweise von Tisch (2018)
Kategorie 5	... mit konkreter Vorgehensweise zur Erweiterung inklusive Berücksichtigung bestehender Infrastruktur

In Artikeln der **Kategorie 1** werden umgesetzte Erweiterungen in bestehenden Lernfabriken beschrieben, die als Inspiration oder Kopiervorlage für andere Lernfabriken dienen können. Bei der Umsetzung der Erweiterung ist bei den Artikeln dieser Kategorie allerdings keine auf Schritten basierende Vorgehensweise und keine vorherige Aufstellung intendierter Kompetenzen dargestellt. Dieser Kategorie zugeordnet werden die Artikel von Helm et al. (2014, Nachhaltigkeit)², Bender et al. (2015, Produktentwicklung), Blöchl und Schneider (2016, Intralogistik mit Industrie 4.0), Gräßler et al. (2016, cyberphysische Produktionssysteme), Schuhmacher und Hummel (2016, cyberphysisches Logistiksystem), Juraschek et al. (2017, Kreislaufprozess), Block et al. (2018, Digitalisierung), Gjeldum et al. (2018, RFID-Systeme in der Montage), Juraschek et al. (2018, Mixed Reality), Stavropoulos et al. (2022, Greifer für Roboterarm), Rantschl et al. (2023, Industrie 5.0) und Tropschuh et al. (2022, Soziale Nachhaltigkeit).

Kategorie 2 beinhaltet Artikel, die zwar keiner mit konkreten Schritten ausgestalteten Vorgehensweise für die Erweiterung bestehender Lernfabriken folgen, aber vor der Entwicklung konkrete Kompetenzen herleiten bzw. aufstellen. Statt dem Begriff der Kompetenzen werden teilweise auch die Begrifflichkeiten der Lernziele oder Lerninhalte gewählt, aber synonym verwendet (vgl. Abschnitt 2.1.1). Dieser Kategorie zugeordnet werden Prinz et al. (2016, Industrie 4.0), Thiede et al. (2016a, cyberphysische Produktionssysteme), Wank et al. (2016, Industrie 4.0), Prinz et al. (2017, Industrie 4.0 Assistenzsystem), Böhner et al. (2018, Digitalisierung für Ressourceneffizienz), Brüggemann et al. (2019, Materialeffizienz), Brüggemann et al. (2019, Digitalisierung für Ressourceneffizienz), Centea et al. (2020, Additive Fertigung), Lindner et al. (2021, digitale

² Der Artikel von Helm et al. ((2014)) wurde zwar nicht auf der CLF veröffentlicht, wird dort aber im Kontext Nachhaltigkeit häufig zitiert und behandelt explizit Lernfabriken, weswegen es hier dennoch als relevant erachtet und aufgeführt wird. Die vorliegende Arbeit behandelt den von Helm et al. als „Umwelteffizienz“ bezeichneten Teil von Nachhaltigkeit – vgl. Kapitel 1.

Transformation), Petrusch et al. (2021, Industrie 4.0), May et al. (2022, Machine Learning/Industrie 4.0), Rolinck et al. (2022, Blockchain), Hartmann et al. (2023, Industrie 5.0) und Miehe et al. (2023, biointelligente Produktion).

In **Kategorie 3** werden Artikel einsortiert, die die Einführung neuer Lernmodule in bestehenden Lernfabriken mit konkreten Vorgehensweisen beschreiben. Allerdings lassen die Vorgehensweisen dieser Artikel keine Berücksichtigung der bestehenden Lernfabrik-Infrastruktur vermuten und könnten somit auch für die initiale Entwicklung von Lerninhalten in neuen Lernfabriken Anwendung finden. Da der Fokus der Arbeit aber explizit auf der Erweiterung von Bestands-Lernfabriken liegt und sich zur Neugestaltung, wie dargelegt, das Vorgehen nach Tisch durchgesetzt zu haben scheint (Kreß et al., 2021), wird im Folgenden nicht näher auf diese Vorgehensweisen eingegangen. Allen ist jedoch gemein, dass sie die Aufstellung von intendierten Kompetenzen als Teilaspekt beinhalten, auch wenn hier teilweise die Begrifflichkeiten Lernziele oder Lerninhalte verwendet werden. Dieser Kategorie zugeordnet werden die Artikel von Helming et al. (2019, Leadership 4.0), Thim et al. (2020, Lernszenarien), Eusterwiemann et al. (2021, Künstliche Intelligenz), Hulla et al. (2022, Internet of Things), Seyfried et al. (2023b, Klimaneutrale Produktion), Sorko und Seybold (2023, Industrie 5.0) und Teichmann et al. (2023, Digitalisierung).

Eine Spezifizierung von Kategorie 3 wird mit der Einsortierung von Artikeln in **Kategorie 4** vorgenommen. Auch diese Artikel beschreiben die Einführung von Erweiterungen in Lernfabriken, folgen dabei aber konkret der Vorgehensweise von Tisch (2018). Dieser Kategorie zugeordnet werden die Artikel von Enke et al. (2018a, Industrie 4.0 für Lean Manufacturing), Eder et al. (2020, Energiezähler), Fahle et al. (2022, menschenzentrierte Künstliche Intelligenz), Schäfer et al. (2022, digitales Shopfloor Management), Ioshchikhes et al. (2023, Messtechnik für Energieeffizienz), Wolf et al. (2023a, Exoskelette) und Wolf et al. (2023b, produktspezifische CO₂-Bilanz)

In **Kategorie 5** werden Artikel eingeordnet, die Erweiterungen von Lernfabriken adressieren und dafür konkrete, mit Schritten ausgestaltete Vorgehensweisen nutzen, die die bestehenden Randbedingungen der Lernfabrik inkludieren. Zu dieser Kategorie zugeordnet werden die Artikel Plorin et al. (2015, Energieeffizienz in der Produktion), Karre et al. (2017, Industrie 4.0), Bauer et al. (2018, Industrie 4.0 in Lean Manufacturing) Adam et al. (2019, Digitalisierung für Lean Basic), Enke (2020, generisches Vorgehen)³ und Sullivan et al. (2022, Industrie 4.0).

³ Bei der Veröffentlichung von Enke handelt es sich nicht um einen CLF-Artikel, sondern um eine Dissertation. Da diese aber auf vorherigen CLF-Artikeln von ihr aufbaut (bspw. Enke et al. (2018b)) und explizit die Erweiterung von Lernfabriken adressiert, wird sie im Kontext der Arbeit dennoch als relevant erachtet und aufgeführt.

Tabelle 2-2 gibt einen Überblick über die Vorgehensweisen der relevanten Artikel dieser Kategorie. Nicht dort abgebildet sind die Vorgehensweise von Bauer et al. und Adam et al., da diese sehr spezifisch auf die Unterstützung von Lean Basic Workshops durch Digitalisierung/Industrie 4.0 zugeschnitten sind. Die anderen vier Vorgehensweisen adressieren die Erweiterung von Lernfabriken auf generische Weise, auch wenn diese teilweise auf konkrete Themen angewendet werden. Diese Generalisierung ist im Sinne der hier bearbeiteten Forschungsfrage notwendig, da keine Vorgehensweise spezifisch die Erweiterung um das Thema Ressourceneffizienz adressiert.

Tabelle 2-2: Übersicht der Vorgehensweisen zur Erweiterung von Lernfabriken, übergeordnete Schritte fett gedruckt

Plorin et al. 2015	Karre et al. 2017	Enke 2020	Sullivan et al. 2022
1. Profilierung der bestehenden Lernumgebung	1. Vorbereitung von Forschungsergebnissen und Anwendungserfahrung in Bezug zu neuem Thema	1. Sicherung von Standards inklusive Überprüfung der Hauptmerkmale einer Lernfabrik	1. Analyse der aktuellen Randbedingungen, inklusive Infrastruktur
2. Ableitung der Anwendungsfälle			2. Artikulierung der Anforderungen
3. Ableitung der Lernmodule	2. Analyse aktueller und zukünftiger Anforderungen	2. Ziel-Reifegradstufe und Entwicklungsrichtung	3. Priorisierung der konkreten Veränderungen
4. Abstimmung mit den Kompetenzen der Lernumgebung			4. Evaluierung Abgleich mit Anforderungen
5. Strukturierung der Kompetenzprofile der Zielgruppe(n)	3. Potentialerkennung hinsichtlich des Zielsystems und Industrie 4.0-Hebel	3. Analyse des Ist-Zustandes inklusive Durchführung des Audits	5. Enthüllung eines Prototypen und Einholung von Feedback
6. Konfiguration und Parametrisierung der Lernmodule	4. Evaluation vielversprechender Anwendungsfälle und Priorisierung	4. Ist-Ziel-Vergleich inklusive Identifikation eines Entwicklungspfades	6. Anpassung und Implementierung auf Basis des Feedbacks
7. Design/Gestaltung der Lernumgebung			7. Umsetzung der Veränderung
8. Integration in die bestehende Lernumgebung	5. Implementierung der Roadmap inklusive Zuweisung von Verantwortlichkeiten	5. Definition von Handlungsempfehlungen mit konkreten Maßnahmen und Priorisierung	

Grundsätzlich ist bei der Analyse der CLF-Artikel von 2019 bis 2023 zu erkennen, dass im Gegensatz zur von Enke durchgeführten Analyse der Jahre 2015 bis 2018 die Artikel zur Erweiterung von Lernfabriken nicht mehr lediglich das Themenfeld der Digitalisierung adressieren. Auch wenn nach wie vor viele Artikel diesem Themenfeld zugeordnet werden können (vgl. Themen in Klammern), sind bspw. mit der Erweiterung von Lernfabriken um Exoskelette (Wolf et al., 2023a), soziale Nachhaltigkeit (Tropschuh et al., 2022) oder Additive Fertigung (Centea et al., 2020) auch andere Themen vertreten.

Viele der betrachteten Artikel konzentrieren sich entweder auf die Darstellung der neuen Lernmodule oder auf die Erweiterung der technischen Infrastruktur. Ziel der

vorliegenden Forschungsarbeit ist es, beides parallel zu adressieren. Basierend auf den in Tabelle 2-2 dargestellten Vorgehensweisen wurde von der Autorin dieser Forschungsarbeit eine Vorgehensweise entwickelt und in Weyand et al. (2023b) veröffentlicht, die:

1. den Ist-Zustand und die gegebenen Randbedingungen der bestehenden Lernfabrik analysiert,
2. einen Fokus auf die Ermittlung intendierter Kompetenzen legt,
3. auf den Kompetenzen basierende Infrastrukturanforderungen ableitet
4. neben der technischen Erweiterung auch die Entwicklung der zugehörigen Lernmodule adressiert.

Die entwickelte Vorgehensweise ist in Abbildung 2-6 dargestellt und wird im Folgenden als Basis für die zu entwickelnde Methodik verwendet. Um diese Vorgehensweise allerdings für die Erweiterung von Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz zu nutzen, sind die Schritte noch zu generisch, insbesondere bezüglich der konkreten intendierten Kompetenzen und der darauf folgenden Ableitung der Infrastrukturanforderungen. Diese Aspekte werden in den nachfolgenden Abschnitten zu Ressourceneffizienz und in der Gesamtmethodik aufgegriffen.

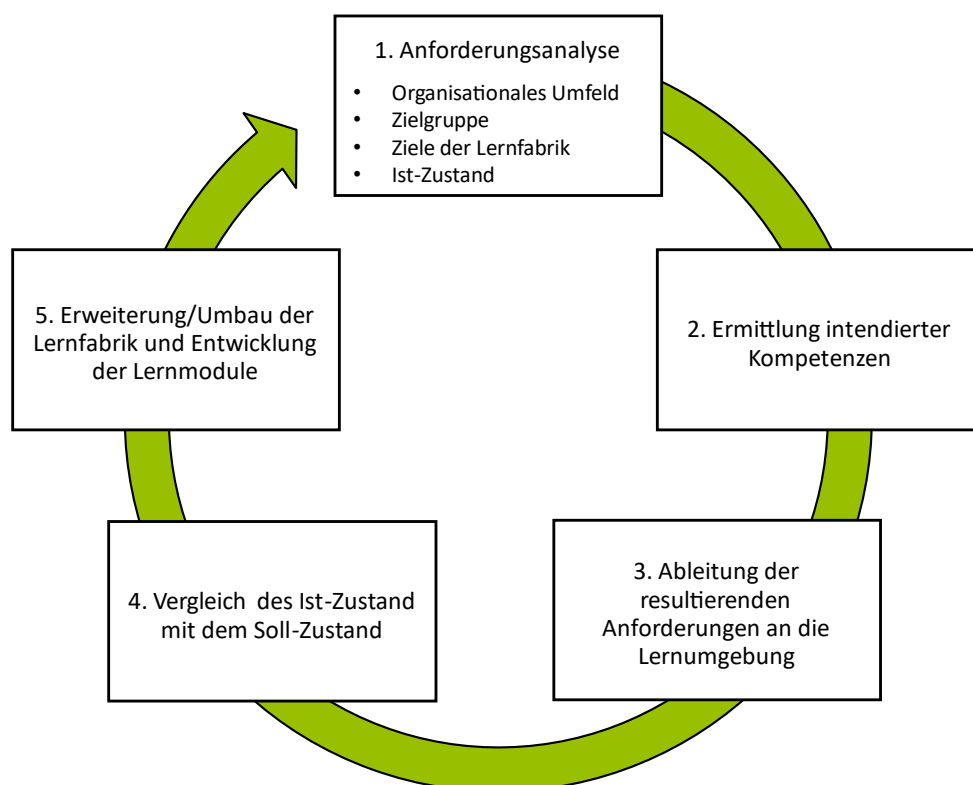


Abbildung 2-6: Generische Vorgehensweise zur Erweiterung bestehender Lernfabriken, eigene Darstellung in Anlehnung an Weyand et al. (2023b)

2.2 Ressourceneffizienz

Im Kontext der Ressourceneffizienz ist zunächst eine klare Definition bzw. Abgrenzung für die folgende Arbeit von Bedeutung, da unterschiedliche Auffassungen des Begriffes existieren. Auf Basis der begrifflichen Abgrenzung in Abschnitt 2.2.1 wird in Abschnitt 2.2.2 die bestehende Literatur zu Kompetenzen im Kontext von Ressourceneffizienz systematisch analysiert. Darauf aufbauend erfolgt eine Auseinandersetzung mit methodischen Grundlagen des Themas. Das umfasst zum einen die grundsätzliche Vorgehensweise, mit der Ressourceneffizienz in Unternehmen adressiert werden kann – ausgeführt in Abschnitt 2.2.3. Zum anderen spielen in diesem Zusammenhang sogenannte Hotspot-Analysemethoden eine wichtige Rolle, weswegen in Abschnitt 2.2.4 darauf genauer eingegangen wird. Nach den methodischen Grundlagen erfolgt in Abschnitt 2.2.5 anschließend eine Auseinandersetzung mit bestehenden Ressourceneffizienzmaßnahmen und Maßnahmenkatalogen.

2.2.1 Begriffsdefinition und -abgrenzung

Um den Begriff Ressourceneffizienz zu definieren, ist zunächst der Begriff der Ressource im Kontext der vorliegenden Arbeit abzugrenzen. Laut dem Umweltbundesamt (UBA) beschreibt eine Ressource ein „Mittel, das in einem Prozess genutzt wird oder genutzt werden kann. Eine Ressource kann materieller oder immaterieller Natur sein.“ (UBA, 2012, S. 21) Im Folgenden bezieht sich Ressource auf die Begrifflichkeit der natürlichen Ressource, die im umweltwissenschaftlichen Kontext gebräuchlich ist und in der VDI-Richtlinie 4800 – Ressourceneffizienz verwendet wird (VDI, 2016). Darunter fallen gemäß dem Glossar des UBA (2012, S. 22) in Anlehnung an die EU (Kommission der europäischen Gemeinschaften, 2005) neben Rohstoffen und Energie auch Luft, Wasser, Fläche/Boden, Biodiversität und Ökosystemleistungen. Um den Zusammenhang zum Einflussbereich von Unternehmen deutlich zu machen, wird von Schebek et al. (2017) die Begrifflichkeit der betrieblichen Ressource verwendet. Der Zusammenhang zwischen natürlichen und betrieblichen (materiellen) Ressourcen ist in Abbildung 2-7 grafisch dargestellt. Explizit ausgeschlossen vom Ressourcenbegriff im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind unter anderem die aus betriebswirtschaftlicher Sicht notwendigen Faktoren Kapital, Personal, Know-how und Zeit (Auflistung aus Schebek et al., 2016). Von Schebek et al. (2017) werden diese als betriebliche, immaterielle Ressourcen definiert.

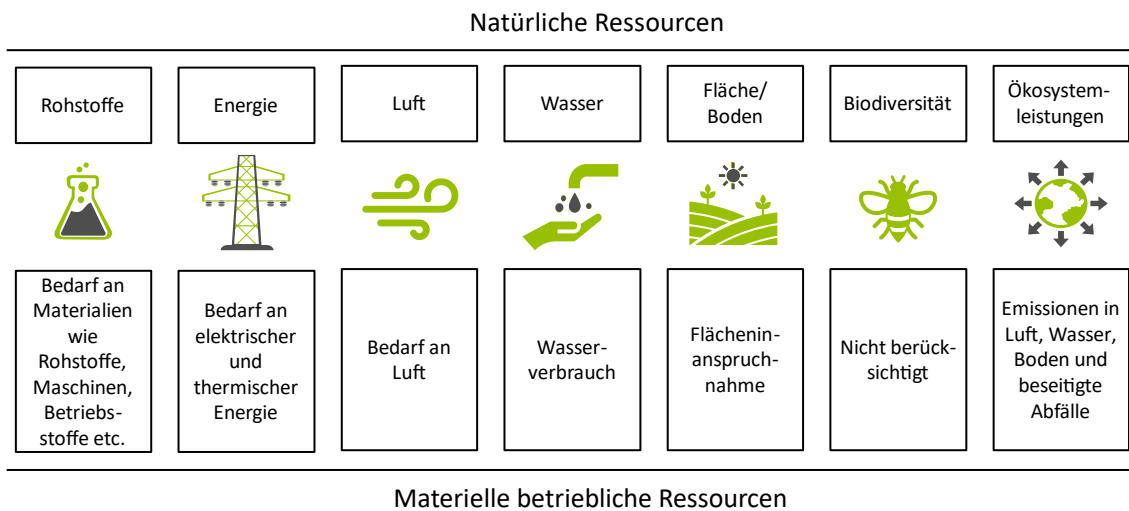


Abbildung 2-7: Darstellung des Zusammenhangs von natürlichen und materiellen, betrieblichen Ressourcen, eigene Darstellung in Anlehnung an Schebek et al. (2017) und Bausch et al. (2020)

Ressourceneffizienz ist in der VDI-Richtlinie 4800 (VDI, 2016), dem Wortlaut des Umweltbundesamts folgend, festgeschrieben als „Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen Ressourceneinsatz“. Im Folgenden wird gemäß der VDI-Richtlinie unter dem Begriff des Ressourceneinsatzes der Einsatz von natürlichen Ressourcen verstanden. Der Nutzen bzw. das resultierende Ergebnis kann sich dabei bspw. auf die Herstellung eines bestimmten Produktes, aber auch auf technische Prozesse oder Dienstleistungen beziehen. Der Nutzen kann sowohl eine physische als auch eine ökonomische Größe sein (Reinhardt, 2014, S. 33). Damit gleicht der Begriff des Nutzens oder Ergebnisses im Kontext der Ressourceneffizienz der Begrifflichkeit der funktionalen Einheit, der im Kontext der Ökobilanz als Vergleichseinheit Anwendung findet (DIN, 2021b, S. 12).

2.2.2 Kompetenzen für Ressourceneffizienz

Für die Erweiterung von Lernfabriken um Ressourceneffizienz-Inhalte muss zunächst definiert werden, welche Kompetenzen für das Thema Ressourceneffizienz in der Produktion benötigt werden (vgl. Abschnitt 2.1.2). Darauf basierend können anschließend mittels der Kompetenztransformation die Anforderungen an die technische Infrastruktur und die Lernmodule abgeleitet werden.

Um zu ermitteln, welche Kompetenzen für das Ziel der Steigerung der Ressourceneffizienz in Unternehmen notwendig sind, wird eine systematische Literaturanalyse durchgeführt. Dafür wird die Datenbank Web of Science (Clarivate, 2023) durchsucht, in der Einträge aus über 21.000 Journals, Büchern und Conference-Proceedings zu finden sind, darunter Zeitschriften der Verlagshäuser Elsevier, Springer oder IEEE. Neben Web of Science werden zudem die Datenbanken ScienceDirect und SSRN durchsucht, die beide zu

Elsevier gehören (Elsevier, 2023, 2024). Über diese Datenbanken wurden bzw. werden Artikel der Lernfabrikkonferenz (CLF) veröffentlicht, weswegen sie als relevant für die vorliegende Arbeit eingestuft werden. Zeitlich ist die Suche nicht eingeschränkt, da angenommen wird, dass Kompetenzen zum Thema Ressourceneffizienz Gültigkeit haben können, unabhängig davon, wann sie aufgestellt wurden. Als Publikationssprache wird Englisch als im wissenschaftlichen Kontext übliche Sprache festgelegt. Mit dem Suchstring werden lediglich der Titel, der Abstract und die aufgeführten Keywords untersucht. Bei der Suche nach Keywords in Web of Science sind automatisch auch sogenannte „KeyWords Plus“ inkludiert, die Begriffe umfassen, die häufig in den Titeln der zitierten Quellen, aber nicht im Artikel selbst auftauchen (Clarivate, 2022). Durch die Einschränkung auf Titel, Abstract und Keywords (Plus) werden Beiträge ausgeschlossen, die keinen Mehrwert zur Fragestellung nach relevanten Kompetenzen liefern, sondern das Wort „competencies“ lediglich am Rande im Text erwähnen und sich ansonsten auf Ressourceneffizienz und bspw. Maßnahmen fokussieren. Genauso gibt es auch Beiträge wie den von Siegert et al. (2020), die sich explizit auf Kompetenzen fokussieren, dafür aber das Thema Ressourceneffizienz nur am Rande erwähnen. Auch diese Beiträge werden für die Zielstellung der Literaturanalyse als nicht relevant eingestuft und durch die Suchbedingungen bestmöglich von den Suchergebnissen ausgeschlossen. Neben Ressourceneffizienz und Kompetenzen sowie entsprechenden Synonymen wird die Suche auch auf Publikationen für die (industrielle) Produktion beschränkt.

Insgesamt werden bei der Suche über Web of Science 175 Ergebnisse gefunden, in ScienceDirect 79 und keines bei SSRN (Stand Oktober 2023). Die Ergebnisse von Web of Science und ScienceDirect überschneiden sich zum Teil: so werden von den 79 gefundenen Resultaten bei ScienceDirect lediglich 32 noch nicht bei der Suche über Web of Science angezeigt, was eine Gesamtzahl von 207 Ergebnissen ergibt. Aufgrund dieser geringen Anzahl wird direkt bei allen gefundenen Ergebnissen sowohl Titel als auch Abstract auf Relevanz im Sinne der Zielstellung der Literaturanalyse geprüft. Nach dieser ersten Analyse wird bei 22 Ergebnissen der gesamte Beitrag gelesen und wiederum auf Relevanz geprüft. Daraufhin wurde nochmals knapp die Hälfte der Beiträge als „nicht relevant“ eingestuft, was zu 13 resultierenden relevanten Ergebnissen führt. Die Gründe für eine Einschätzung als „nicht relevant“ sind vor allem der Bezug zu anderen Industriezweigen als der industriellen Produktion, bspw. dem Gebäudesektor oder der Agrarindustrie, sowie der mangelnde Fokus auf der Ermittlung oder Auflistung von Kompetenzen. Bei als relevant identifizierten Beiträgen wurden zudem die zitierten Quellen gemäß der Schneeballsuche analysiert, wodurch vier weitere relevante Veröffentlichungen gefunden werden. Zusammenfassend ist die Suche in Abbildung 2-8 dargestellt. Die 17 als relevant identifizierten Ergebnisse werden im Folgenden kurz vorgestellt. Dabei wird auch darauf eingegangen, inwiefern sich die Artikel neben der Identifikation von

Kompetenzen auch mit der Vermittlung dieser, ggf. im Kontext von Lernfabriken, beschäftigen.

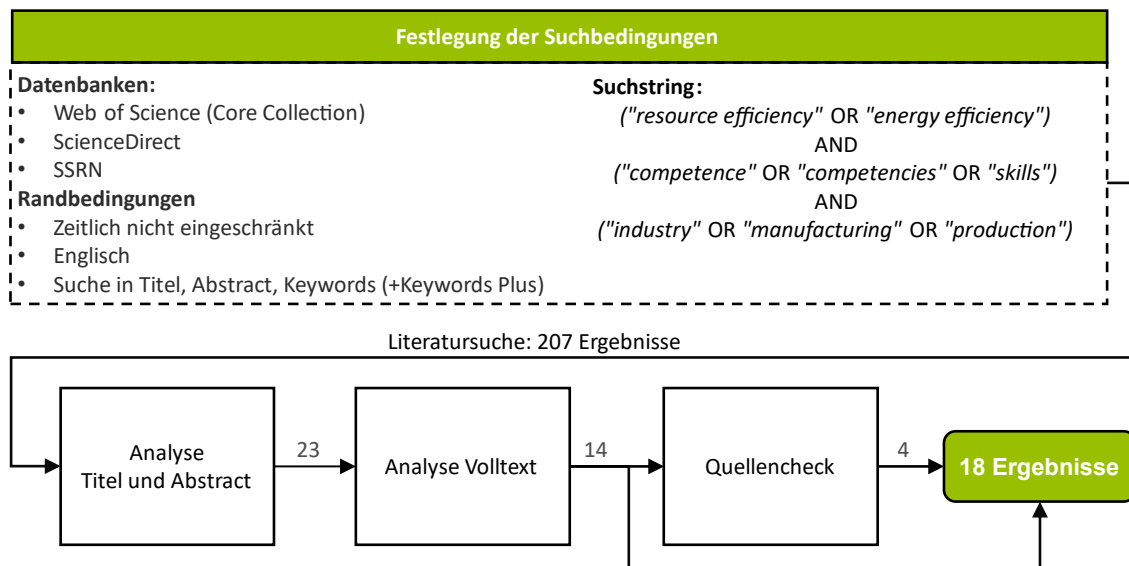


Abbildung 2-8: Zusammenfassung des Vorgehens der systematischen Literatursuche

Abele et al. (2016) beschreiben in ihrer Veröffentlichung den Aufbau der ETA-Lernfabrik – einer der wenigen Lernfabriken, die sich explizit mit dem Thema Energieeffizienz beschäftigen (vgl. Abschnitt 2.3). Die erwähnte Kompetenztafel ist, vermutlich aufgrund des limitierten Platzes, nicht direkt in der Veröffentlichung zu finden, dennoch lassen sich anhand der Skizze des didaktischen Konzeptes in der Veröffentlichung Kompetenzen erkennen. Dazu zählen unter anderem die Optimierung von Maschinen, wobei dafür in der ETA-Lernfabrik zwischen Wärmebehandlung, Reinigungsmaschinen und Werkzeugmaschinen unterschieden wird, sowie die Verknüpfung dieser Energiesysteme mit effizienten Gebäuden und der technischen Gebäudeausrüstung. Ziel der ETA-Lernfabrik sei es, die Lernenden zu ökologischen und ökonomischen Analysen und der Implementierung von Effizienzmaßnahmen zu befähigen, und dafür auch „unsichtbare“ Energieflüsse sichtbar zu machen. Die Autor*innen formulieren konkrete Zielgruppen der Industrie, so zum Beispiel die Fabrik- und Produktionsplaner*innen, Energiemanager*innen oder Maschinenentwickler*innen, die mit den Angeboten der Lernfabrik adressiert werden sollen, um der Interdisziplinarität des Themas Energieeffizienz gerecht zu werden. Ein systematisches Vorgehen zur Ableitung der Kompetenzen ist nicht ersichtlich, und auch auf die technischen Anforderungen zur Übertragung der Konzepte in andere Lernumgebungen wird nicht spezifisch eingegangen.

Die Beiträge von **Akyazi et al.** (2022), **Branca et al.** (2022) und **Akyazi et al.** (2023) beschreiben die Ergebnisse des selben Projektes und werden deswegen gemeinsam aufgeführt. In dem Projekt wurden Job-Profile im Bereich Energieeffizienz systematisch auf typische Anforderungen bzw. Fähigkeiten hin untersucht. Die resultierende Auflistung

ist unterteilt nach verschiedenen Kernfunktionen bzw. Jobprofilen in Unternehmen wie bspw. Instandhaltungsingenieur*innen, Energiemanager*innen oder Abfallwirtschaftsbeauftragte. Die Auflistung umfasst unter anderem das Verständnis darüber, wo Energie verwendet wird und welche Kosten damit verbunden sind sowie Prozessanalysen und Systemoptimierungen im Bezug zu Energieeffizienz. Im Rahmen der Veröffentlichungen sind diese Fähigkeiten nicht als Kompetenzen formuliert. Der Fokus der Arbeiten liegt auf der Ableitung von Handlungsempfehlungen an die Politik, so dass keine Ableitung technischer Anforderungen auf Basis der Kompetenzen erfolgt, außerdem wird demnach auch keine Umsetzung in einer Lernfabrik fokussiert.

Assad et al. analysieren in ihrem Beitrag den Aspekt der Nachhaltigkeit (mit Fokus auf Energie) in Lernfabriken. Dazu werden in einer systematischen Literaturrecherche verfügbare Veröffentlichung zu den Lerninhalten der bestehenden Lernfabriken identifiziert und anschließend untersucht. Resultat ist unter anderem eine Zusammenfassung von sogenannten Lernzielen und zugeordneten Hauptthemen. Bei den Lernzielen dominiert laut der Analyse der Autor*innen die Quantifizierung von Energie, was als Basis für die Optimierungsphase gesehen wird. Die Veröffentlichung stellt eine Übersicht über bestehende Umsetzungen in Lernfabriken sowie die adressierten Themen dar, verzichtet aber auf eine Auflistung bzw. Formulierung konkreter Kompetenzen sowie eine Ableitung der technischen Anforderungen.

Büth et al. (2018) entwickeln in ihrem Beitrag ein Workshopkonzept zum Thema Energieeffizienz und inkludieren, in wie fern Digitalisierung dabei einen Mehrwert bieten kann. Dafür wird zunächst herausgearbeitet, dass ein Großteil der Lernfabriken Digitalisierung selbst als Lerninhalt hat, jedoch nur ein geringer Anteil Digitalisierung als Hilfsmittel zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz adressiert. Das entwickelte Modul besteht deswegen vor allem aus Inhalten zur Energietransparenzschaffung, um Stellhebel zu finden und darauf basierend Verbesserungsmaßnahmen zu ermitteln. Als Basis der Lernziele stützen sich die Autor*innen auf einen Zyklus zur Steigerung der Energieeffizienz von Thiede et al. (2013), wobei vor allem die Phasen der Datenaufnahme und Analyse fokussiert werden. Als Analysemethode kommt im Modul die Energiewertstrommethode zum Einsatz (vgl. Abschnitt 2.2.4). Im Anschluss an die Konzeptvorstellung wird das Setup für die Workshopdurchführung in der Lernfabrik beschrieben, wobei kein direkter Zusammenhang zwischen den einzelnen Lerninhalten und den technischen Anforderungen ersichtlich ist.

Einen anderen Ansatz verfolgt **Despeisse** (2018) mit der Entwicklung eines Brettspiels, welches Kompetenzen im Bereich „Ökoeffizienz“ vermittelt. Ökoeffizienz beschreibt dabei die Umweltwirkungen bspw. von Produkten im Verhältnis zu deren Nutzen (WBCSD, 2006) und überschneidet sich somit mit Ressourceneffizienz. Bei dem Brettspiel werden fünf Aktivitäten adressiert, die in der vorangegangenen Veröffentlichung von **Despeisse**

und Evans (2015) näher beschrieben sind. Dabei handelt es sich um die Identifikation von Verschwendung und Ineffizienzen mittels Negativbeispielen, das Ermitteln von Lösungen, die Setzung von Zielen, die Evaluation der aktuellen Performance in Bezug auf diese Ziele und die systematische Entwicklung und Erfassung von Verbesserungen. Der Beitrag führt anschließend den Aufbau des Brettspiels genauer aus, geht aber nicht auf Umsetzungen in realen Produktionsumgebungen bzw. Lernfabriken ein.

Bei **Fareri et al.** (2023) geht es ebenfalls um die Verknüpfung von Ressourceneffizienz bzw. Nachhaltigkeit mit dem Thema Digitalisierung. Zunächst werden dabei Patente auf relevante Technologien im Bereich der nachhaltigen Produktion untersucht und diese Technologien anschließend mit Job-Profilen aus der ESCO-Datenbank (kurz für European Skills, Competences, Qualifications and Occupations (Europäische Kommission, 2022)) zugeordnet, um eine Auflistung von Fähigkeiten zu ermitteln. Die identifizierten Fähigkeiten sind Job-Bezeichnungen zugeordnet und umfassen unter anderem die Analyse von Energiebedarfen, die Auslegung von Lüftungsanlagen oder die Implementierung von Maschinellern. Letzteres Beispiel zeigt bereits, dass die identifizierten Fähigkeiten nicht ausschließlich Bezug zu Energie- oder Materialbedarfen haben. Die Zielgruppe der Veröffentlichung ist die Personalabteilung von Unternehmen. Es wird nicht adressiert, wie die Fähigkeiten geschult oder (in Lernfabriken) vermittelt werden können.

Gupta et al. beschreiben in ihrem Artikel die Erstellung eines Curriculums zum Thema „Grüne Technologien“ für einen ganzen Studiengang. Die darin enthaltenen Module sollen übertragbar für diverse Orten sein und es wird eine Liste mit Equipment im Anhang angefügt, welches für die Durchführung des Curriculums notwendig ist. Die Kompetenzen, die im Rahmen des Curriculums vermittelt werden soll, sind allerdings nur auf übergeordneter Ebene dargestellt. So wird unter anderem neben „Energieeffizienz und Management“ sowie „Nachhaltige und grüne Baukonstruktion“ lediglich „Nachhaltige und grüne Produktion“ als Fähigkeit aufgeführt, ohne genauer auszuführen, was darunter verstanden wird. Aus der Veröffentlichung geht zudem keine systematische Herleitung der aufgestellten Kompetenzen hervor.

In ihrer Veröffentlichung aus dem Jahr 2015 entwickeln **Kaluza et al.** einen Demonstrator für Energieeffizienz und leiten dafür zunächst systematisch her, welche Charakteristika diese Lernumgebung erfüllen muss. Die Ableitung basiert auf einem 5-schrittigen Vorgehen bestehend aus Datenaufnahme und Messungen, der Analyse dieser Daten, einer Evaluation, der Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen sowie deren Integration. Die Ableitung der technischen Anforderungen erfolgt anschließend direkt, ohne die Formulierung konkreter Kompetenzen. Um Energieeffizienz mit dem Demonstrator zu schulen, sind laut Kaluza et al. unter anderem die Installation von Messequipment, die Bereitstellung von Visualisierungs- und Analysetools sowie die Bereitstellung von Effizienzmaßnahmen in verschiedenen Bereichen von Energiebedarfen relevant. Die

Umsetzung beschreiben die Autor*innen am Beispiel eines Demonstrators, der das Modell einer Werkzeugmaschine darstellt.

Kreimeier et al. beschreiben in ihrer Veröffentlichung von 2014 den Aufbau und das didaktische Konzept der LPS-Lernfabrik in Bochum, wobei Ressourceneffizienz dort nur eines von drei betrachteten Themen ist. Neben dem grundsätzlichen Aufbau der Lernfabrik werden Aspekte wie bspw. die systematische Erfassung von Energiedaten und die Sankey-Analyse zur Ableitung von Hotspots und Optimierungsmaßnahmen genannt, die in der Lernfabrik für verschiedene Zielgruppen geschult werden. Woher die Aspekte abgeleitet sind und was für die Workshops konkret an technischer Infrastruktur notwendig ist, wird in der Veröffentlichung nicht näher erläutert.

Krückhans et al. (2015) entwickeln auf Basis des PDCA-Zyklus in DIN EN ISO 50001 (DIN, 2011a) ein Workshopkonzept, welches vier Kompetenzbereiche umfasst. Konkret sind dies technische Kompetenzen, die bspw. die Anbindung von Energiesensoren umfassen, Prozesskompetenzen, die Wissen über KPIs oder relevante Normen abdecken, Problemlösungskompetenzen, die unter anderem die frühzeitige Einbindung der Mitarbeitenden einschließen, und methodische Kompetenzen. Auf den letztgenannten Bereich der methodischen Kompetenzen wird in der Veröffentlichung genauer eingegangen. Es werden laut den Autor*innen verschiedene Methoden wie bspw. die Energiewertstrommethode oder die Portfolio-Matrix (vgl. Abschnitt 2.2.4) in der Prozesskette der Lernfabrik in Bochum geschult, die zuvor auf Basis einer Aufwand-Nutzen-Bewertung ausgewählt wurden. Welche technischen Anforderungen die Lernfabrik erfüllen muss, um dort die Schulung dieser Kompetenzen vornehmen zu können, wird nicht näher erläutert.

Plorin et al. (2015) haben in ihrer Veröffentlichung ein Vorgehen zur Erweiterung von Lernfabriken erarbeitet, auf das genauer in Abschnitt 2.1.2 vorgestellt wurde. Dieses Vorgehen wurde u. a. auf das Thema Energieeffizienz angewendet. Für die Erarbeitung der Lernmodule wird dabei systematisch auf Expert*innenwissen, Trendanalysen, Literatur und Evaluationsergebnisse von bestehenden Workshops zurückgegriffen. Zu den identifizierten Themenfeldern im Bereich Energieeffizienz zählen laut Plorin et al. die Einführung ins Thema, die Prozessoptimierung mittels der Energiewertstrommethode, Energiemanagement und dessen Nutzung auf Basis der DIN EN ISO 50001, energieeffiziente Fabrikplanung, Druckluft, Energiedatenerfassung, Beleuchtung, Eliminierung von Wärmeverlusten und erneuerbare Energien. Welche Kompetenzen mit diesen Themenfeldern konkret einhergehen und was das für die technische Infrastruktur der Lernfabrik heißt, wird nicht näher erläutert.

Sikora et al. (2023) beschreiben in ihrer Veröffentlichung die Ergebnisse des sogenannten EREMI-Projektes, in dem ein Curriculum für Bachelor- und Masterstudierende aus verschiedenen Ingenieurwissenschaften entwickelt wurde. Das Curriculum adressiert

zwar Ressourceneffizienz, legt aber auch einen Fokus auf Digitalisierung und entsprechende Technologien wie Big Data oder Informations- und Kommunikationstechnologien. Diese sollen genutzt werden, um bspw. Zustands- und Energieüberwachungen durchzuführen, mit deren Hilfe sich letztlich Ressourcenbedarfe reduzieren lassen. Als weiteres Thema des Curriculums werden Energieeinsparungen in der Pneumatik genannt. Eine Umsetzung in praktischen Übungen, bspw. in einer Lernfabrik, wird nicht beschrieben.

Sucic et al. (2017) erweitern in ihrem Beitrag das Curriculum des EUREM-Trainingsprogramms für europäische Energiemanager*innen (EUREM). Das Programm erstreckt sich üblicherweise über einen Zeitraum von sechs bis acht Monaten. Inhalte sind bspw. aktuelle Umweltstandards, Gebäude und Wärmebereitstellung sowie erneuerbare Energien. (EUREM International GmbH, o.J.) Die Autor*innen des Artikels erweitern das Angebot in Slowenien um Praxisbeispiele und Unternehmensbesuche, um möglichst früh in der Ausbildung eine konsequente Weitergabe von Wissen erfahrener Energiemanager*innen an die Auszubildenden zu ermöglichen. Übungen bzw. damit einhergehende technische Erweiterungen von Lernumgebungen sind in der Veröffentlichung kein Thema.

Im Projekt **ViREG** (Virtual Resource Efficiency Gateway), welches gefördert vom Lifelong Learning Programme durchgeführt wurde, haben die Projektpartner in interaktiven Workshops eine Liste an Kernkompetenzen erarbeitet, die für das Thema Ressourceneffizienz relevant sind (ViREG, 2016). Unterteilt werden diese Kompetenzen in mehrere Module wie bspw. „Einführung in Ressourceneffizienz“ oder „Entwicklung und Implementierung von Technologien für Ressourceneffizienz“. Die Kompetenzen sind allerdings teils generisch formuliert oder adressieren Aspekte außerhalb der Produktion wie die Behandlung von Abfall oder Tourismus. Eine Anwendung auf Lernfabriken findet ebenso wenig statt wie eine Ableitung von notwendiger technologischer Infrastruktur zur Schulung der Kernkompetenzen.

Neben den aufgeführten Ergebnissen wird auch eine Veröffentlichung von **Weyand et al.** (2023b) in der systematischen Literaturanalyse gefunden. Da es sich dabei aber um einen Artikel der Autorin der hier vorliegenden Forschungsarbeit handelt und die Inhalte im Folgenden an anderer Stelle aufgegriffen werden, wird auf eine Vorstellung an dieser Stelle verzichtet und stattdessen auf die Einordnung des Artikels in den Forschungskontext der vorliegenden Arbeit in Tabelle 2-6 verwiesen.

In Tabelle 2-3 werden die beschriebenen Ergebnisse zusammengefasst dargestellt. Dabei wird eine Einschätzung hinsichtlich vier Aspekten gegeben, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit als relevant angesehen werden.

Der erste Aspekt beschreibt, ob eine systematische Vorgehensweise zur Ermittlung der Kompetenzen verfolgt wurde. Das kann auf Basis von Literaturanalysen,

Expert*inneninterviews oder Workshops erfolgt sein. Wichtig ist, dass die Kompetenzen in der jeweiligen Veröffentlichung nicht einfach „auftauchen“. Der zweite Aspekt ist die Formulierung der Kompetenzen nach Taxonomiestufen (vgl. Abschnitt 2.1.1). Aus diesen Stufen ergibt sich die Ausgestaltung der praktischen Anteile und damit die Ausgestaltung der Infrastruktur (vgl. Abschnitt 2.1.1). Es fällt auf, dass dieser Aspekt bei keinem der betrachteten Artikel berücksichtigt ist. Viele der Artikel formulieren lediglich Schlagwörter oder integrieren die Kompetenzen in den Fließtext, stellen diese also nicht explizit heraus. Lediglich von zwei der betrachteten Veröffentlichungen wird der dritte Aspekt der Ableitung technischer Anforderungen an die Lernumgebung aufgegriffen. Damit ist gemeint, dass eine Liste an Technologien und Equipment zur Erweiterung der Infrastruktur präsentiert wird, sodass die jeweilige Lernumgebung zur Vermittlung der aufgestellten Kompetenzen genutzt werden kann. Mit dem vierten und letzten Aspekt wird bewertet, in welchem der betrachteten Veröffentlichungen es um die Anwendung des Themas Ressourceneffizienz in einer Lernfabrik bzw. übergreifend in Lernfabriken geht.

Tabelle 2-3: Zusammenfassung der analysierten Quellen nach für die Arbeit relevanten Aspekten

Autor*innen	Systematisches Vorgehen zur Herleitung der Kompetenzen	Formulierung als Kompetenzen nach Taxonomiestufen	Ableitung der technischen Anforderungen an die Lernumgebung	Anwendung auf (eine) Lernfabrik(en)
Abele et al. (2016)	nein	nein	nein	ja
Akyazi et al. (2022), Branca et al. (2022), Akyazi et al. (2023)	ja	nein	nein	nein
Assad et al.	ja	nein	nein	ja

Büth et al. (2018)	nein	nein	nein	ja
Despeisse und Evans (2015), Despeisse (2018)	nein	nein	nein	nein
Fareri et al. (2023)	ja	nein	nein	nein
Gupta et al.	nein	nein	ja	nein
Kaluza et al. (2015)	ja	nein	ja	nein
Kreimeier et al. (2014)	nein	nein	nein	ja
Sikora et al. (2023)	nein	nein	nein	nein
Sucic et al. (2017)	ja	nein	nein	nein
ViREG (2016)	ja	nein	nein	nein

Insgesamt lässt sich an der Zusammenfassung erkennen, dass keine Veröffentlichung gefunden werden konnte, welche alle Aspekte adressiert. Besonders fällt auf, dass in keinem der analysierten Artikel die aufgeführten Themen für Ressourceneffizienz als Kompetenzen nach entsprechenden Taxonomiestufen formuliert sind. Im Folgenden wird deswegen der Begriff der Themenbereiche statt Kompetenzen verwendet. Die Themenbereiche, die mehrfach in den Veröffentlichungen als relevant für das Thema Ressourceneffizienz genannt werden, können als Basis für die weitere Arbeit genutzt werden.

Die mehrfach genannten Themenbereiche sind:

- die **Einführung in das Thema Ressourceneffizienz** u. a. hinsichtlich relevanter Normen (analog formuliert bspw. in Krückhans et al., 2015, Plorin et al., 2015 und ViREG, 2016)
- die **Datenaufnahme**, in den Artikeln vor allem bezogen auf Energiebedarfe (analog formuliert bspw. Assad et al., Kaluza et al., 2015 und Plorin et al., 2015)
- die **Analyse der Daten zur Identifikation von Stellhebeln** (analog formuliert bspw. in Akyazi et al., 2023, Büth et al., 2018, Fareri et al., 2023 und Kreimeier et al., 2014)
- die **Nutzung von Methoden** wie der Energiewertstrommethode oder der Portfolio-Matrix zur Analyse und Optimierung der Produktion (analog formuliert bspw. in Büth et al., 2018 und Plorin et al., 2015)
- die **Identifikation und Implementierung von Verbesserungsmaßnahmen** (analog formuliert bspw. in Abele et al., 2016, Akyazi et al., 2023, Büth et al., 2018, Despeisse & Evans, 2015 und ViREG, 2016)

- das **Setzen von konkreten Zielen** und die systematische **Erfassung von Verbesserungen** (analog formuliert bspw. in Despeisse & Evans, 2015 und Sikora et al., 2023)

Um diese identifizierten Themenbereiche aus verschiedenen Artikeln in einen konsistenten Zusammenhang zu bringen, werden im folgenden Abschnitt Vorgehensweisen betrachtet, die zur Steigerung der Ressourceneffizienz in der Produktion zum Einsatz kommen (können). Die Vorgehensweisen werden anschließend mit den Themenbereichen abgeglichen. Zielstellung ist es, darauf basierend grundlegende Kompetenzen für das Thema Ressourceneffizienz zu formulieren und eine entsprechende Kompetenztafel aufzustellen. Diese kann wiederum für die Ableitung von Lernmodulen, technischen Anforderungen sowie die Umsetzung in Lernfabriken als Basis dienen.

2.2.3 Vorgehensweisen zur Steigerung der Ressourceneffizienz

Ein nach wie vor in vielen Lernfabriken adressiertes Thema ist die schlanke Produktion, auch im deutschen Sprachgebrauch mit Lean Production bezeichnet (Abele et al., 2019; Callupe et al., 2021). Zur Umsetzung dieses Themas gibt es etablierte Methoden und Tools, die in der VDI-Richtlinie 2870 zusammengestellt sind (VDI, 2013). Für Ressourceneffizienz ist eine solche Liste der Methoden und Tools, die das Thema ausmachen und folglich auch in der Vermittlung von entsprechenden Kompetenzen zu berücksichtigen sind, nicht bekannt. Im Folgenden werden deswegen grundsätzliche Vorgehensweisen zur Adressierung des Themas Ressourceneffizienz in der Produktion analysiert. Diese lassen sich dann mit den im vorherigen Abschnitt identifizierten Themenbereichen zur Vermittlung abgeglichen. Ziel ist die fundierte Ableitung der Kompetenzen, die im Rahmen der Arbeit für die Entwicklung der Methodik als Basis dienen. Daraufhin lassen sich mittels Kompetenztransformation technische Anforderungen und Auswirkungen auf die Lernmodule in Lernfabriken ermitteln (vgl. Abschnitt 2.1.1).

Die Vorgehensweisen zur Steigerung der Ressourceneffizienz fokussieren explizit die Produktion. Übergeordnete Vorgehensweisen oder auch Vorgehensweisen zu verwandten Themen wie zur Umsetzung einer klimaneutralen Produktion (vgl. bspw. DENEFF et al., 2021, Seyfried et al., 2023a) weisen zwar Überschneidungen auf, werden aber aufgrund des Rahmens der Arbeit nicht näher analysiert.

Die betrachteten Vorgehensweisen mit ihren Schritten sind in Abbildung 2-9 dargestellt. Die Schritte lassen sich im Vergleich der Vorgehensweisen nicht immer trennscharf voneinander abgrenzen – Inhalte des einen Schrittes können bspw. teilweise Überschneidungen mit dem Schritt eines anderen Vorgehens aufweisen. In der Abbildung untereinander angeordnete Schritte haben jeweils einen analogen, ähnlichen oder sich überschneidenden Inhalt.

Der Abgleich der Vorgehensweisen mit den identifizierten Themenbereichen zur Vermittlung von Ressourceneffizienz zeigt, dass sich fast alle Themenbereiche in einer oder mehrerer der Vorgehensweisen wiederfinden. Lediglich die Einführung in das Thema Ressourceneffizienz taucht in keiner der betrachteten Vorgehensweisen auf. Das erscheint logisch, da diese Vorgehensweisen zur Umsetzung von Ressourceneffizienz genutzt werden – hierfür also schon klar sein sollte, was Ressourceneffizienz ist. Anders gestaltet es sich in Lernfabriken: zur Vermittlung von Ressourceneffizienz ergibt es Sinn, eine Einführung ins Thema zu Beginn des Workshops aufzunehmen.

Die Datenaufnahme und Datenanalyse finden sich in allen Vorgehensweisen wieder. Teils werden diese als separate Schritte aufgeführt wie bei Herrmann et al. (2010), Herrmann et al. (2013) und Thiede et al. (2013), teils wird beides in einem Schritt kombiniert wie bei Majid Ansari (2019), Weber (2019) und Teiwes (2020). Die Nutzung von Methoden als vierter identifizierter Themenbereich wird bei Thiede et al. (2013) und Teiwes (2020) explizit genannt und in den Schritt der Datenanalyse integriert.

Bei allen Vorgehensweisen findet sich der Themenbereich der Identifikation und Implementierung von Maßnahmen. Die Vorgehensweisen von Herrmann et al. (2013), Thiede et al. (2013), Weber (2019) und Teiwes (2020) inkludieren zwischen Identifikation und Umsetzung zusätzlich einen Schritt zur Bewertung der Maßnahmen. Das Setzen von konkreten Zielen und die Erfassungen von Verbesserungen als weiterer Themenbereich findet sich in der Kombination lediglich bei Majid Ansari (2019). Die Autorin inkludiert in ihrem Vorgehen den ersten Teil des Themenbereichs im Schritt der Situations- und Strukturanalyse und den zweiten Teil im Schritt der Kontrolle. Die Kontrolle nach der Umsetzung von Ressourceneffizienzmaßnahmen wird auch von Weber (2019) als Schritt aufgeführt.

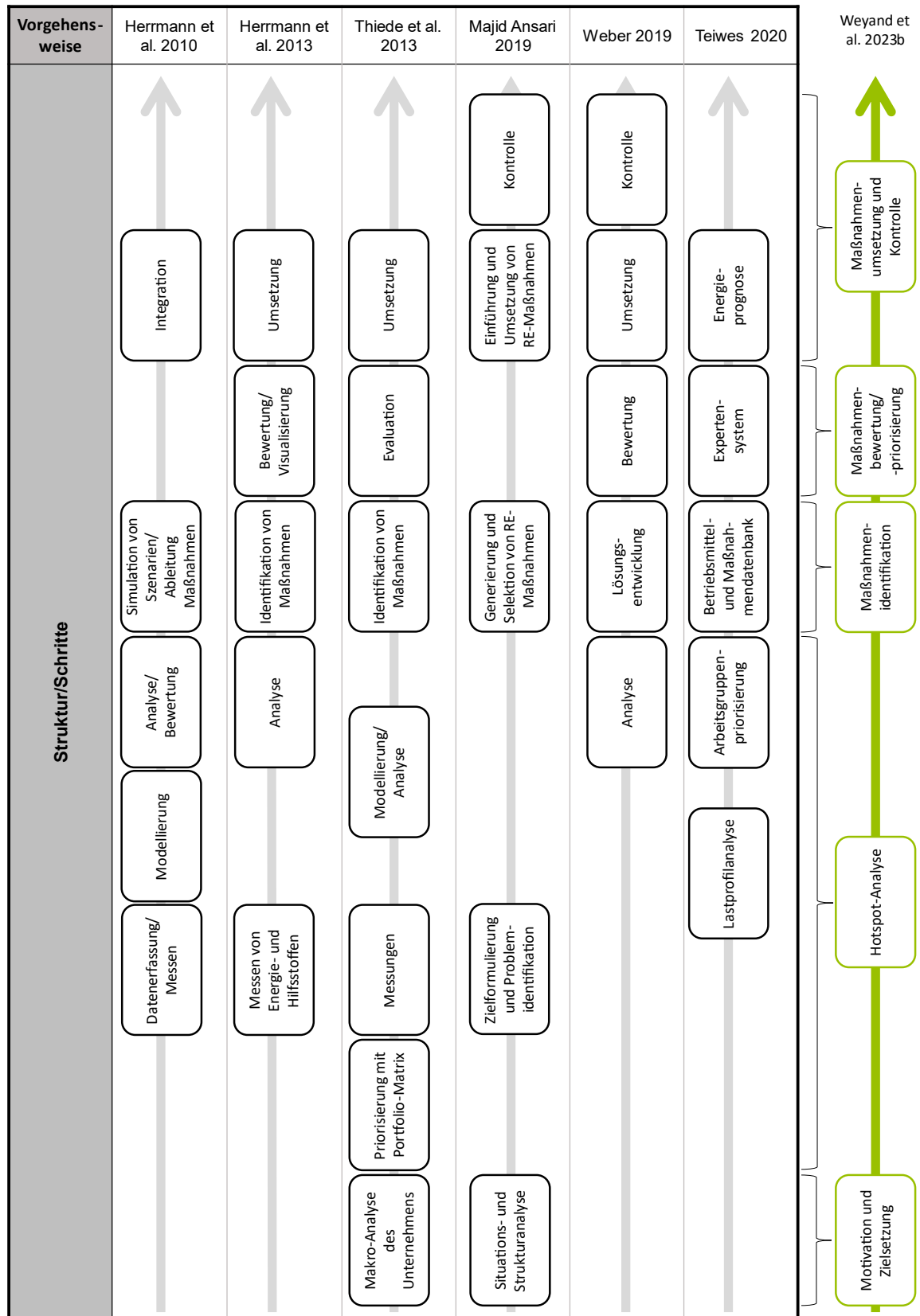


Abbildung 2-9: Vorgehensweisen zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Vergleich, RE=Ressourceneffizienz

Durch die Überschneidungen wird ersichtlich, dass die in der Literatur zur Vermittlung von Ressourceneffizienz identifizierten Themenbereiche dem entsprechen, wie für die Umsetzung von Ressourceneffizienz in der Produktion vorgegangen werden kann. Als Basis für die weitere Arbeit werden die betrachteten Vorgehensweisen zu einer Vorgehensweise kondensiert. Hintergrund sind die Unterschiede vor allem im Bereich der Analyse der Produktion. Dieser Schritt ist, wie dargelegt, in ähnlicher Formulierung in allen beschriebenen Vorgehensweisen zu finden (vgl. Abbildung 2-9). Es wird sich aber je nach Quelle unterschiedlicher Methoden bedient. Zielstellung ist bei allen Quellen die Identifikation von Hotspots in der Produktion, was für die vorliegende Arbeit wie folgt definiert wird:

Hotspots bezeichnen in der vorliegenden Arbeit kritische Stellen, an denen der Ressourcenbedarf besonders hoch im Vergleich zu den umliegenden Stellen (bspw. Prozessschritten) ausfällt. Als Vergleichseinheit können u. a. Kilogramm, Kilowattstunden oder CO₂-Äquivalente genutzt werden.

Für diese Hotspots werden im Anschluss Ressourceneffizienzmaßnahmen identifiziert. In Abbildung 2-9 ist die abgeleitete und dieser Arbeit zu Grunde liegende Vorgehensweise in grün dargestellt. Im Folgenden werden die Schritte der Vorgehensweise, in dieser Form veröffentlicht von Weyand et al. (2023b), näher beschrieben.

Der erste Schritt adressiert die **Motivation und Zielsetzung** eines Unternehmens gegenüber dem Thema Ressourceneffizienz. Dabei handelt es sich um einen häufig vernachlässigten Schritt, der aber mit allen Stakeholdern im Unternehmen zu besprechen ist, um am Ende des Prozesses auch evaluieren zu können, ob das Ziel tatsächlich erfüllt wird. Die Motivation kann bspw. sein, mit Hilfe von Ressourceneffizienz intern Betriebskosten einzusparen oder (kommende) externe Regularien zu erfüllen, wie z.B. die Einführung eines Energiemanagementsystems nach DIN EN ISO 50001 (DIN, 2011a) oder die Richtlinie zur Nachhaltigkeitsberichterstattung (Corporate Sustainability Reporting Directive, CSRD, EU, 2022). Diese grundlegende Zielsetzung beeinflusst die Durchführung der **Hotspot-Analyse**, die den zweiten Schritt des Vorgehens darstellt. Wie beschrieben ist dieser Schritt in diversen Formulierungen in allen dargestellten Vorgehensweisen vorhanden. Ziel des Schrittes ist es, systematisch Hotspots der Produktion zu identifizieren, die unterschiedliche Kategorien wie bspw. Energie oder CO₂-Emissionen betreffen können. Dafür stehen verschiedene Analysemethoden zur Verfügung, die unterschiedliche Vor- und Nachteile bei der Anwendung aufweisen. Die Auswahl der Hotspot-Analysemethode ist deswegen eng verknüpft mit der zuvor festgelegten Zielstellung. Genauer wird dies im folgenden Abschnitt 2.2.4 erläutert. Nach der Anwendung

der Hotspot-Analysemethode wird für die dadurch ermittelten Hotspots gezielt nach Maßnahmen gesucht. Dies erfolgt im dritten Schritt der **Maßnahmenidentifikation**. Im vierten Schritt erfolgt die **Maßnahmenbewertung und -priorisierung**. Anschließend muss im fünften Schritt noch die **Maßnahmenumsetzung** erfolgen, sowie die **Kontrolle**, ob die ursprünglich gesetzte Zielstellung erfüllt wurde. Grundsätzlich ist das Vorgehen als iterativer Prozess ausgelegt, der sich mehrfach wiederholen kann. Das beschriebene Vorgehen ist in Abbildung 2-10 grafisch dargestellt.

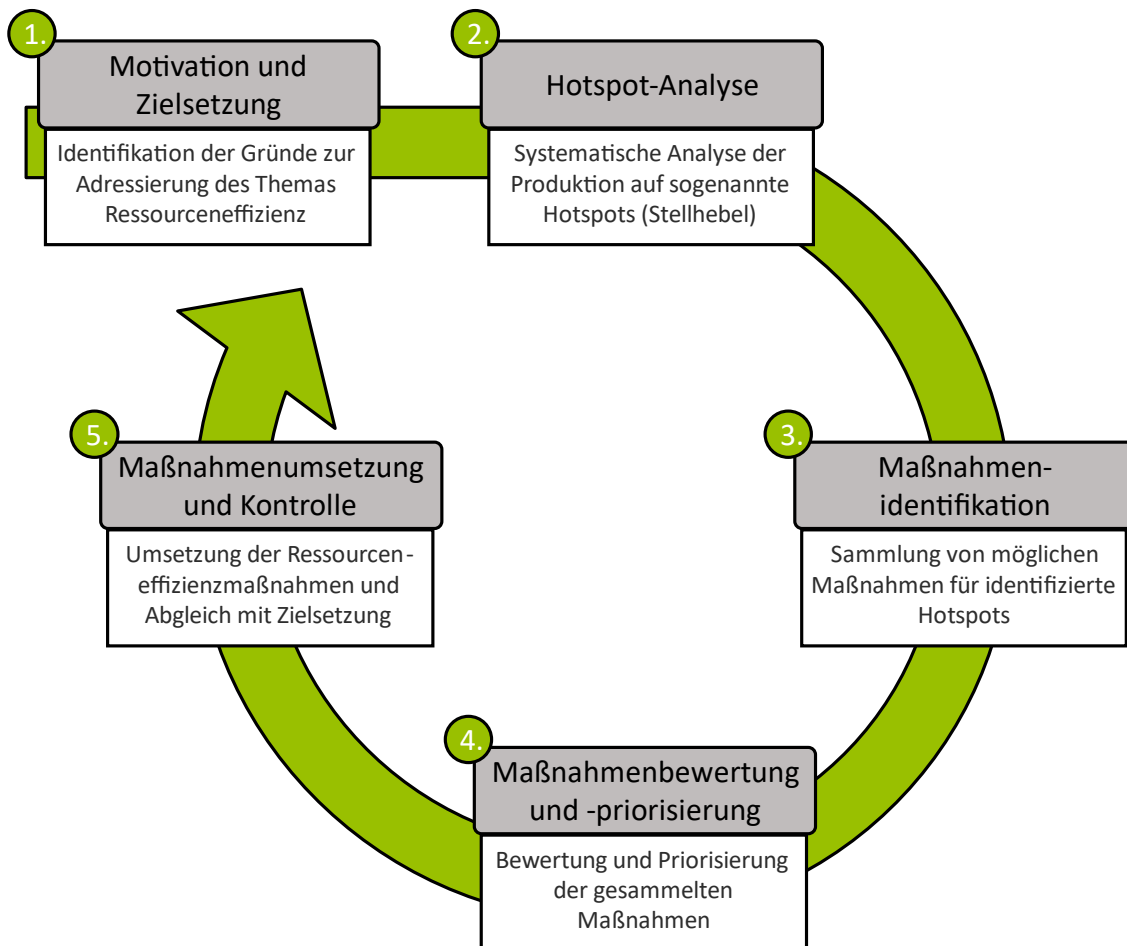


Abbildung 2-10: Abgeleitete Vorgehensweise zur Umsetzung von Ressourceneffizienz in der Produktion, eigene Darstellung in Anlehnung an Weyand et al. (2023b)

2.2.4 Hotspot-Analysemethoden

Wie im vorherigen Abschnitt geschildert, besteht ein wesentlicher Schritt zur systematischen Steigerung von Ressourceneffizienz im Unternehmen aus der sogenannten Hotspot-Analyse. Damit ist im Rahmen dieser Arbeit gemeint, dass kritische Stellen in der Produktion identifiziert werden, an denen der Ressourcenbedarf besonders hoch ist. Für diese Analysen stehen diverse Methoden zur Verfügung, die in der folgenden Arbeit als

Hotspot-Analysemethoden bezeichnet werden. Welche Ressourcen genau mit der jeweiligen Methode betrachtet werden ist bei der initialen Sammlung irrelevant, solange diese der verwendeten Definition des Begriffes Ressource entsprechen (vgl. Abschnitt 2.2.1). Die Sammlung stützt sich dabei auf die VDI-Richtlinie 4801 – Ressourceneffizienz in kleinen und mittleren Unternehmen (VDI, 2018b). Die darin genannten Instrumente sind online vom VDI Zentrum für Ressourceneffizienz (ZRE) in einem filterbaren Tool gesammelt (VDI ZRE, o.J.a). Insgesamt finden sich in dieser Sammlung 66 Instrumente, wobei auch Richtlinien oder Methoden enthalten sind, die im Sinne der Arbeit keine Hotspot-Analysemethode darstellen und/oder sich an die Produktentwicklung richten und damit im Rahmen der Zielstellung als nicht relevant bewertet werden. Aus der Sammlung des VDI ZRE konnten neun Methoden als relevant im Sinne der Zielstellung der Arbeit identifiziert werden. Die vollständige Auflistung inklusive der jeweiligen Bewertung und einer kurzen Begründung findet sich im Anhang A-1. Die neun als relevant identifizierten Methoden werden im Folgenden genauer beschrieben und in Tabelle 2-4 stichpunktartig zusammengefasst.

Ökobilanz/Life Cycle Assessment

Die Ökobilanz, auf Englisch Life Cycle Assessment genannt, ist eine Bilanzierungsmethode, die die Umweltauswirkungen eines Produktes oder einer Dienstleistung über den gesamten Lebensweg, sprich von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung und Verwendung bis zur Entsorgung berücksichtigt. Die Umweltauswirkungen können dabei in verschiedenen, sogenannten Wirkungskategorien quantifiziert werden. Das kann bspw. der Klimawandel sein, aber auch der stratosphärische Ozonabbau oder die toxische Schädigung von Menschen durch Feinstaub stellen mögliche Wirkungskategorien dar (ifeu, o.J.).

International genormt ist die Ökobilanz mit der DIN EN ISO 14040 sowie der DIN EN ISO 14044 (DIN, 2021a, 2021b), wobei in letzterer weiterführende Spezifikationen zu finden sind. In der DIN EN ISO 14040 beschrieben ist unter anderem das Vorgehen zur Erstellung einer Ökobilanz, bestehend aus vier Schritten, die in Abbildung 2-11 grafisch dargestellt sind.

Der erste Schritt umfasst die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens der jeweiligen Ökobilanz. Das beinhaltet die Festlegung der Systemgrenze sowie einer sogenannten funktionellen Einheit, die den Nutzen eines Produktsystems genau beschreibt und damit als Vergleichseinheit dient. Auch muss in diesem Schritt festgelegt werden, in welchem Kontext die Ökobilanz Anwendung findet. Die Ergebnisse können bspw. in die Verbesserung von Produkten einfließen oder für politische Entscheidungsprozesse genutzt werden. Im zweiten Schritt, der Sachbilanz, werden alle In- und Outputs des jeweiligen Produktes zusammengestellt. Das sind im Kontext der Arbeit bspw. alle

Betriebsmittel und Energiebedarfe, die in der Fertigung des Produktes anfallen, aber auch die Ressourcen, die in der Nutzungsphase benötigt werden. Im dritten Schritt, der Wirkungsabschätzung, werden diese In- und Outputs den jeweiligen Umweltwirkungskategorien zugeordnet und in entsprechende Indikatoren umgerechnet. Im Falle der Wirkungskategorie Klimawandel ist das bspw. der Treibhauseffekt (englisch Global Warming Potential, GWP), ausgedrückt in der Einheit kg CO₂-Äquivalente pro funktioneller Einheit (ifeu, o.J.). Für die Umrechnung der Ressourcenin- und -outputs können Ökobilanz-Datenbanken wie ecoinvent (kostenpflichtig, ecoinvent, o.J.) oder Probas (kostenlos, UBA, o.J.) verwendet werden. Im vierten Schritt der Ökobilanz erfolgt anschließend die Auswertung bzw. Interpretation der Ergebnisse. Dazu gehört unter anderem auch eine Sensitivitätsanalyse, mit der genauer untersucht werden soll, welchen Einfluss einzelne Werte oder Annahmen im Verlauf der Bilanzierung für das resultierende Ergebnis haben. Wie durch die grünen Pfeile angedeutet, ist die Ökobilanz eine iterative Methode. Die Ergebnisse bauen aufeinander auf und werden nach jedem Schritt ausgewertet und auf Plausibilität geprüft. (DIN, 2021b)

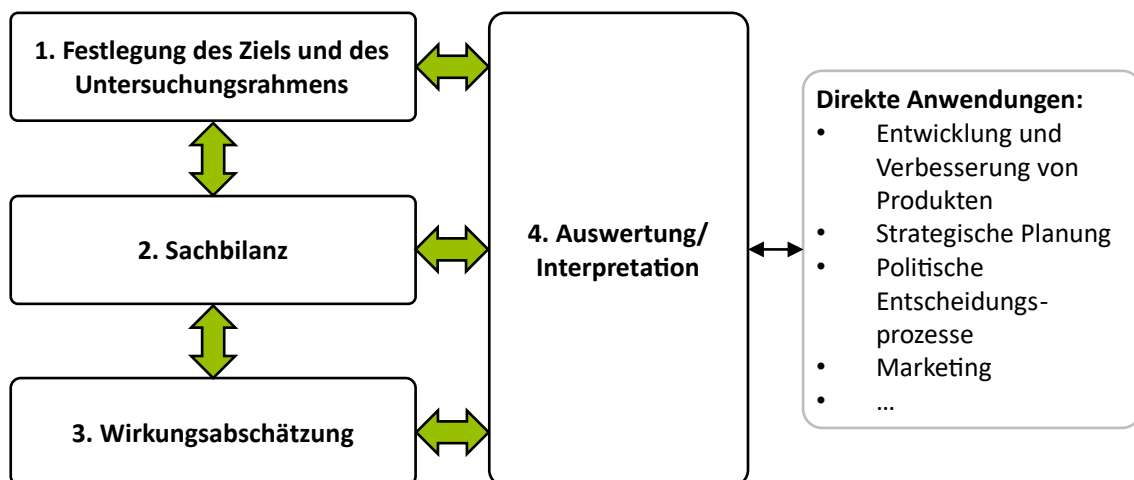


Abbildung 2-11: Vorgehen zur Durchführung einer Ökobilanz, eigene Darstellung angelehnt an DIN EN ISO 14040 (DIN, 2021b)

Die umfangliche Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus und diverser Wirkungskategorien in der Ökobilanz geht mit einem entsprechend hohen Zeit- und Kostenaufwand für die Ermittlung relevanter Daten einher. Bereits implementierte Sensorik und die Verknüpfung verschiedener Systeme können den Aufwand reduzieren. (Cerdas et al., 2017; Ortmeier et al., 2021)

CO₂-Bilanz/Carbon Footprint

Die CO₂-Bilanz, oder auch Carbon Footprint bzw. CO₂-Fußabdruck genannt, ist eine Methode, die starke Überschneidungen zur eingangs beschriebenen Ökobilanz aufweist. Der wesentliche Unterschied ist der, dass lediglich die Wirkungskategorie Klimawandel

und spezifischer der Wirkungsindikator des Treibhauseffektes betrachtet wird, der in der Regel in der Einheit kg CO₂-Äquivalente angegeben wird. Äquivalente deshalb, weil andere klimaschädliche Treibhausgase wie Methan oder Stickoxide mit Hilfe eines Faktors in die klimaschädliche Wirkung von CO₂ umgerechnet werden (DIN, 2019b, S. 16–17). Vor diesem Hintergrund ist der Begriff der CO₂-Bilanz nicht korrekt. Eigentlich müsste bei der Berechnung von CO₂-Äquivalenten von einer Treibhausgasbilanz die Rede sein, da andere Treibhausgase auch inbegriffen sind. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch der Begriff der CO₂-Bilanz verwendet, da dieser im allgemeinen Sprachgebrauch, und damit auch bei den Zielgruppen von Lernfabriken, synonym zum Begriff der Treibhausgasbilanz verwendet wird (Wiedmann & Minx, 2008). Bei der CO₂-Bilanz wird unterschieden zwischen Bilanzen für Organisationen oder Unternehmen, die bspw. in DIN EN ISO 14064 (DIN, 2019b) genormt sind und im Englischen als Corporate Carbon Footprint (CCF) bezeichnet werden, und Bilanzen, die sich auf Produkte beziehen. Letztere sind unter anderem in DIN EN ISO 14067 (DIN, 2019a) genormt und werden als Product Carbon Footprint (PCF) bezeichnet. Ein weiterer relevanter Standard im Kontext der CO₂-Bilanz ist das Greenhouse Gas Protocol (kurz GHG-Protocol), welches die resultierenden Emissionen je nach Herkunft in drei verschiedene Scopes einteilt (WRI & WBCSD, 2015). Trotz Unterschieden zwischen den Normen, die bspw. von Weyand et al. (2023a) systematisch untersucht wurden, ist die Vorgehensweise zur CO₂-Bilanz analog zur DIN EN ISO 14040 (vgl. Abbildung 2-11). Auch für die CO₂-Bilanz müssen zunächst alle Input- und Output-Ressourcen eines Produktes oder Prozesses erfasst werden. Das Resultat bietet die Möglichkeit, die Umweltwirkung verschiedener Ressourcen gegenüberzustellen und somit Maßnahmen (in der Einheit CO₂-Äquivalente) zu vergleichen. Damit kann bspw. fundiert entschieden werden, ob eine Maßnahme zur Einsparung von einer Kilowattstunde einer Maßnahme zur Einsparung von einem Kilogramm Aluminium vorgezogen werden sollte. Eine mögliche Darstellung der CO₂-Bilanz eines Produktes (in dem Fall ein Laufrad einer Pumpe) ist in Abbildung 2-12 zu sehen.

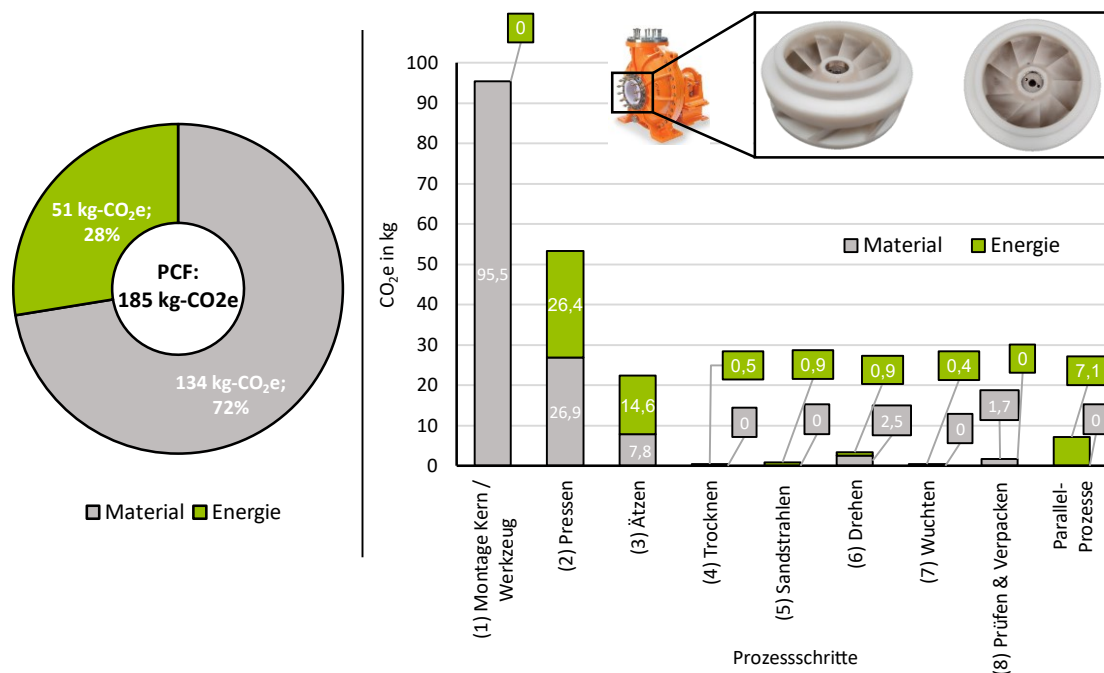


Abbildung 2-12: Beispielhafte Darstellung einer CO₂-Bilanz für ein Pumpenlaufrad, eigene Darstellung in Anlehnung an Weyand et al. (2023a)

Materialflusskostenrechnung

Die Materialflusskostenrechnung, Material Flow Cost Accounting auf Englisch, ist eine Analysemethode, die neben ökologischen Aspekten auch eine ökonomische Betrachtung inkludiert. Dies geschieht bspw. dadurch, dass eine Verknüpfung zwischen den physischen Ressourcenvariablen, z.B. den verwendeten Materialien in Kilogramm, und dem Einkaufspreis hergestellt wird. Somit wird dem Abfall, der in der Produktion anfällt und bei der Materialflusskostenrechnung als „negatives Produkt“ angesehen wird, entsprechend seines Gewichtes ein finanzieller Wert zugeordnet. Der Gedanke dahinter ist, dass auch für die „Produktion des Abfalls“ finanzielle Kapazitäten bspw. in Form der Personalkosten aufgewendet werden. Konkret bedeutet dieses Konzept, dass bei einem Prozessschritt, bei dem 20 % des Rohmaterials als Späne zurückbleibt und entsorgt werden muss, 20 % der Zeit der Mitarbeiter*innen und somit auch 20 % der Personalkosten dafür aufgewendet werden, Abfall zu erzeugen. Somit wird dem Abfall bzw. der Abfallvermeidung eine deutlich höhere (finanzielle) Bedeutung zugewiesen, als wenn lediglich die Entsorgungskosten für die Späne betrachtet werden, wodurch sich Ressourceneffizienzpotenziale heben lassen (M. Schmidt & Nakajima, 2013; Weyand et al., 2021a). Genormt ist das Vorgehen in DIN EN ISO 14051 (DIN, 2011b), maßgeblich entwickelt wurde die Methode an der Universität Augsburg (B. Wagner, 2015).

Die Ergebnisse der Methode werden in einem Materialflussmodell dargestellt, welches bspw. in Form eines Sankey-Diagramms visualisiert werden kann. Abbildung 2-13 stellt

beispielhaft das Ergebnis einer Materialflusskostenrechnung dar, die am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) im Rahmen eines Projektes durchgeführt und mit der Software Umberto Efficiency+ vom ifu (o.J.) visualisiert wurde. Die Grautöne repräsentieren unterschiedliche Ressourcen, die Dicke der Pfeile gibt die finanzielle Bedeutung der einzelnen Ressourcenströme an. Dadurch ist gut zu erkennen, dass die Hotspots für dieses Produktionssystem laut dem Ergebnis der Materialflusskostenrechnung die Fräsprozesse (WZM 1, WZM 2 und WZM 3.2) sowie das Härten sind.

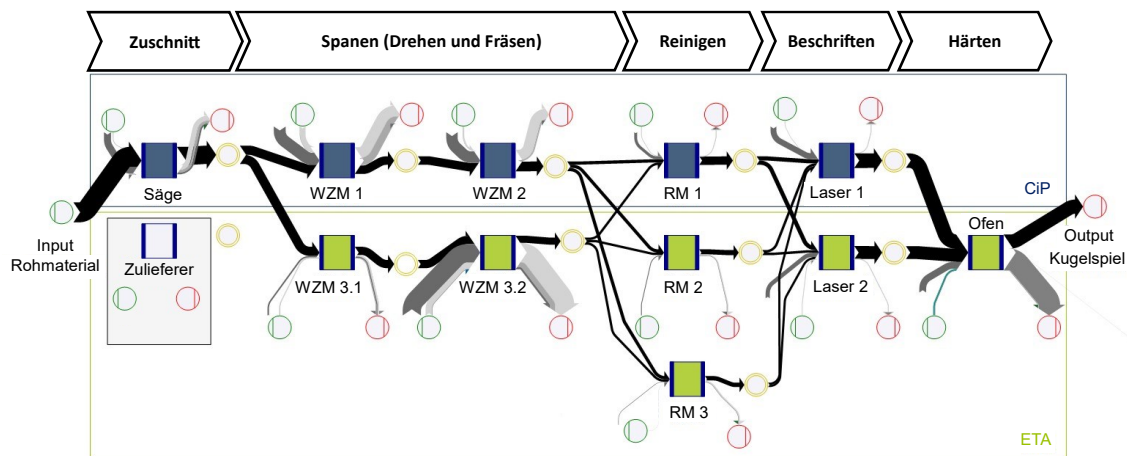


Abbildung 2-13: Beispielhafte Darstellung einer Materialflusskostenrechnung (Kostensicht), dargestellt als Sankey-Diagramm, WZM = Werkzeugmaschine, RM = Reinigungsmaschine, eigene Darstellung angelehnt an Weyand et al. (2021a)

Checkliste

In Checklisten, die in der Regel in tabellarischer Form vorliegen, werden Abfragepunkte sortiert nach Themengebieten aufgeführt (Bundesumweltministerium & Umweltbundesamt, 2001, S. 78). Mit Hilfe von Checklisten lassen sich damit auf einfache Weise unter anderem Prozessketten und deren Ist-Zustand analysieren. Durch Checklisten wird eine grobe Bestandsaufnahme ermöglicht, was die Kombination mit anderen Methoden nahelegt, um bspw. eine Quantifizierung von Verbesserungsmaßnahmen zu ermöglichen (Bundesumweltministerium & Umweltbundesamt, 2001, S. 77). Themenfeld und Detailgrad sind bei Checklisten flexibel anpassbar, die Optionen bei Checklisten reichen von Grobchecklisten, bei denen lediglich mit Ja oder Nein geantwortet werden muss (Sietz, 1994; Wirtschaftskammer Österreich, 2014), zu detaillierteren Checklisten, die entsprechend spezifischere Analysen ermöglichen (Kramer et al., 2003, S. 4). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf Umweltchecklisten. Hier gibt es bereits eine Vielzahl verfügbarer Listen, die teils auch als Tools aufbereitet sind. Als Beispiel seien hier die Ressourcenchecks des VDI ZRE (o.J.b) genannt, die für verschiedene Branchen und Fertigungsverfahren nach DIN 8580 (DIN, 2022) Online-Checklisten liefern, mit

denen auf Potenziale der Material- und Energieeffizienzmaßnahmen geschlossen werden kann. Auch die sogenannten Energie- und Ressourcenverschwendungsarten (Reinhart et al., 2010; Weyand et al., 2023d) können als Form der Checkliste angesehen werden. Weitere Beispiele für Checklisten finden sich in Blesl und Kessler (2017), Sietz (1994) und Wirtschaftskammer Österreich (2014).

Energiewertstrommethode

Die Energiewertstrommethode wurde 2009 vom Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) entwickelt. Sie basiert auf der klassischen Wertstrommethode (WSM), die im Bereich der Lean-Production-Methoden schon länger von Relevanz ist und angewendet wird (erstmalig detailliert beschrieben in Rother & Shook, 1999). Die Energiewertstrommethode erweitert diese um Kenngrößen zur Energieeffizienz, wie bspw. die Leistungsaufnahme oder den Energiebedarf pro Stück, was als Energieintensität, abgekürzt mit EI, bezeichnet wird (Erlach & Westkämper, 2009, S. 47). Die Anwendung der Energiewertstrommethode wird bspw. in Reinhart et al. (2010) und Schillig et al. (2013) beschrieben. Angewendet auf die ETA-Lernfabrik ist das Ergebnis der Energiewertstrommethode in Abbildung 2-14 zu sehen (Zettner, 2016).

Um „Energieverschwendung“ und damit mögliche Maßnahmen zur Verbesserung mit Hilfe der Energiewertstrommethode zu identifizieren, wird unterschieden zwischen dem Energiebedarf für wertschöpfende und nicht-wertschöpfende Tätigkeiten. Wie die klassische WSM ist auch die Energiewertstrommethode gegliedert in die initiale Analyse des Ist-Zustandes und dem Design eines energieeffizienteren Prozesses. Für diesen Design-Prozess kommen sogenannte Gestaltungsrichtlinien zum Einsatz, die typische Verbesserungsmaßnahmen wie die Minimierung des Energiebedarfs im Standby-Betrieb oder die Ausrichtung auf den optimalen Betriebspunkt umfassen. (Erlach & Westkämper, 2009)

In der Literatur finden sich weitere Ausprägungen der Wertstrommethode, die neben dem betriebswirtschaftlichen Fokus auch ökologische Aspekte berücksichtigen. Dazu zählt bspw. die CO₂-Wertstrommethode, die ebenfalls am Fraunhofer IPA entwickelt wurde und neben Energie auch Materialbedarfe aufgrund von Rohmaterial, Hilfs- und Betriebsstoffen mit einbezieht (Erlach & Sheehan, 2014). Die (knappe) Beschreibung der Ausführung lässt allerdings eine starke Überschneidung mit der Ökobilanz bzw. CO₂-Bilanz vermuten, weswegen die CO₂-Wertstrommethode im Folgenden nicht als separate Methode aufgeführt ist.

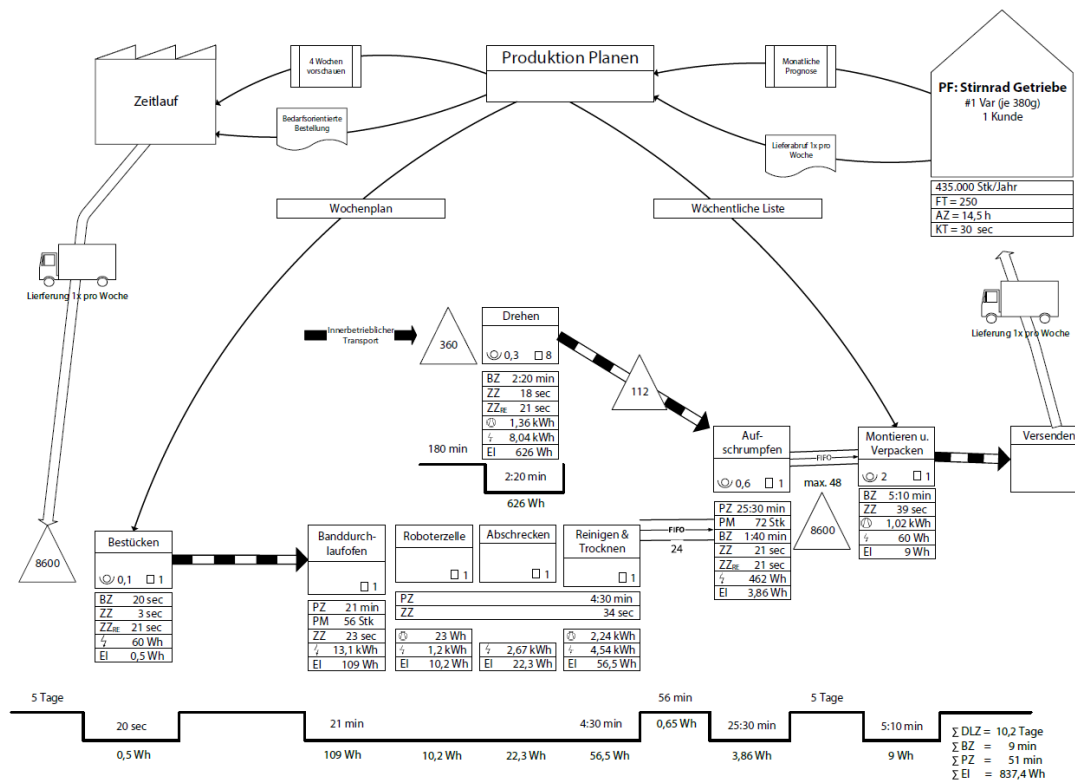


Abbildung 2-14: Beispielhafte Darstellung der Energiewertstrommethode, angewendet auf die ETA-Lernfabrik, übernommen aus Zettner (2016)

Faulkner und Badurdeen (2014) stellen in ihrem Artikel ein Review von Variationen der WSM vor, die diese um umweltbezogene Indikatoren erweitern. Indikatoren, die hierbei Anwendung finden, sind bspw. der Wasserbedarf, die Menge an Abwasser oder Restmüll (u. a. Norton & Fearne, 2009, Torres & Gati, 2009). Kritisiert wird in dem Review-Artikel allerdings, dass die Visualisierung von umweltbezogenen Kennzahlen neben den „klassischen“ Kennzahlen bei den analysierten vorherigen Arbeiten nicht mitgedacht wird, und soziale Faktoren außen vor gelassen werden. Aus diesem Grund entwickeln die Autor*innen ebenfalls eine Erweiterung der WSM, die sie als „Sustainable Value Stream Mapping“ (deutsch: „Nachhaltige Wertstrommethode“) bezeichnen. Darin enthalten sind Kennzahlen zum Wasser, Rohmaterial- und Energiebedarf, aber auch Kriterien zu sozialen Aspekten, die die Mitarbeitenden betreffen, wie ergonomische Belastungen oder Risiken im Arbeitsumfeld. (Faulkner & Badurdeen, 2014) Da diese Aspekte aber über das Thema der Ressourceneffizienz hinausgehen, findet auch diese Methode im Folgenden keine weitere Berücksichtigung.

ABC-Analyse

Die ABC-Analyse ist eine qualitative und vergleichende Methode, mit deren Hilfe die Untersuchungsgegenstände, bspw. Prozesse in einer Produktion, priorisiert werden können. Ursprünglich aus der Logistik stammend, wurde die Methode in Bezug zu

ökologischen Größen und deren Umweltwirkungen weiterentwickelt. Das kann bspw. die Anschlussleistung von Maschinen sein, die entsprechend bestimmter Grenzwerte in die drei Klassen A (sehr wichtig/problematisch), B (wichtig/problematisch) und C (unwichtig/unproblematisch) eingeteilt werden (Bundesumweltministerium & Umweltbundesamt, 2001; Schwarz, 2014). Nach Festlegung des Analysekriteriums werden bei der Durchführung der ABC-Analyse Daten zu den Analysegegenständen gesammelt, die tabellarisch und der Größe nach geordnet dokumentiert werden. Anschließend wird der prozentuale Anteil an der Gesamtsumme ermittelt und akkumuliert. (Schawel & Billing, 2018, S. 15–17) Die Untersuchungsgegenstände, die in Summe bspw. maximal 70 % ergeben, können der Klasse A zugeordnet werden, zwischen 70 % bis 90 % ergibt eine Zuordnung zu Klasse B und Gegenstände über 90 % werden der Klasse C zugeordnet. Im Rahmen der Arbeit wird die ABC-Analyse auf die Anschlussleistung von Maschinen bezogen, die sich bspw. auf den Typenschildern oder der technischen Dokumentation ebendieser findet. Grafisch dargestellt ist das Ergebnis einer ABC-Analyse beispielhaft in Abbildung 2-15.

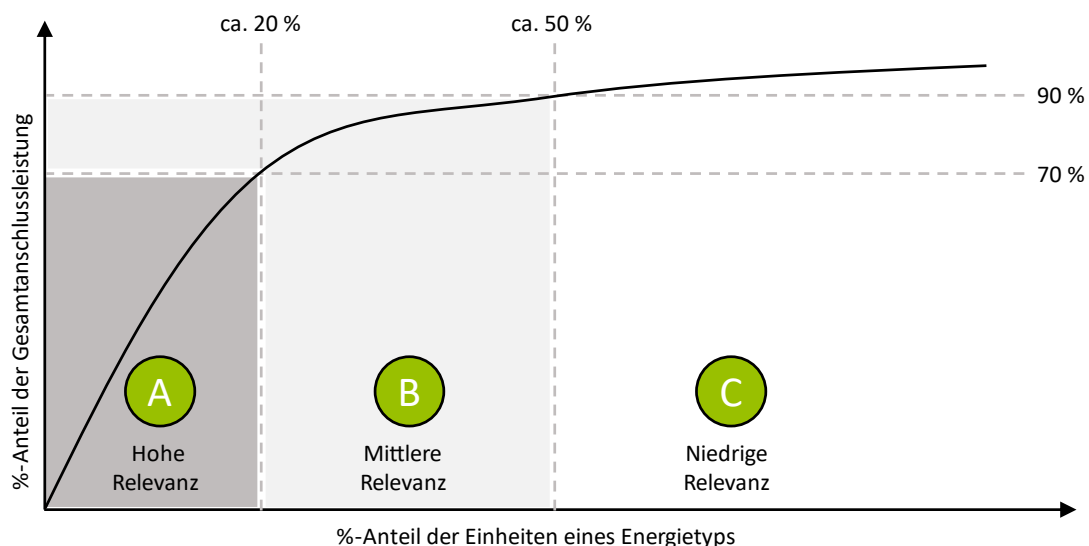


Abbildung 2-15: Beispielhafte Darstellung der ABC-Analyse bezogen auf die Anschlussleistung von Maschinen, eigene Darstellung in Anlehnung an Posselt (2016, S. 135) Posselt (2016)

Portfolio-Matrix

Für die Portfolio-Matrix wird die ABC-Analyse um eine zeitliche Dimension erweitert. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass Maschinen, die eine hohe Anschlussleistung haben, nicht zwangsläufig die Maschinen sein müssen, die auch in der Praxis den höchsten Energiebedarf aufweisen. Das ist nur der Fall, wenn diese Maschinen auch regelmäßig im Betrieb sind, also eine hohe Nutzungsdauer haben. Aus dem Grund wird bei der Portfolio-Matrix die Anschlussleistung über die Nutzungsdauer einer Maschine

aufgetragen, grafisch dargestellt in Abbildung 2-16. Wird eine Maschine in Quadrant I zugeordnet, hat sie also eine hohe Anschlussleistung und ist oft im Betrieb, kann dies als Hotspot in der Produktion angesehen werden. (Posselt, 2016) Die Nutzungsdauer kann in drei Bereiche (X, Y und Z) eingeteilt werden, weswegen ein alternativer Name für die Portfolio-Matrix ABC/XYZ-Analyse ist (BMU et al., 2007, S. 52).

Sowohl die ABC-Analyse als auch die Portfolio-Matrix fokussieren sich (in der hier vorgestellten Ausführung) auf den elektrischen Energiebedarf, vernachlässigen also den Einfluss anderer Ressourcen. Zudem ist es bei ausschließlicher Nutzung dieser Methoden nicht möglich, quantitativ abzuschätzen, welchen Einfluss Verbesserungsmaßnahmen haben, da die Anschlussleistung ein Vielfaches der tatsächlich abgerufenen Leistung sein kann, wie bspw. bei Petruschke et al. (2020) deutlich wird. Primäre Zielstellung beider Methoden ist deshalb die Priorisierung von Maschinen für weitere Messungen (Posselt, 2016, S. 144).

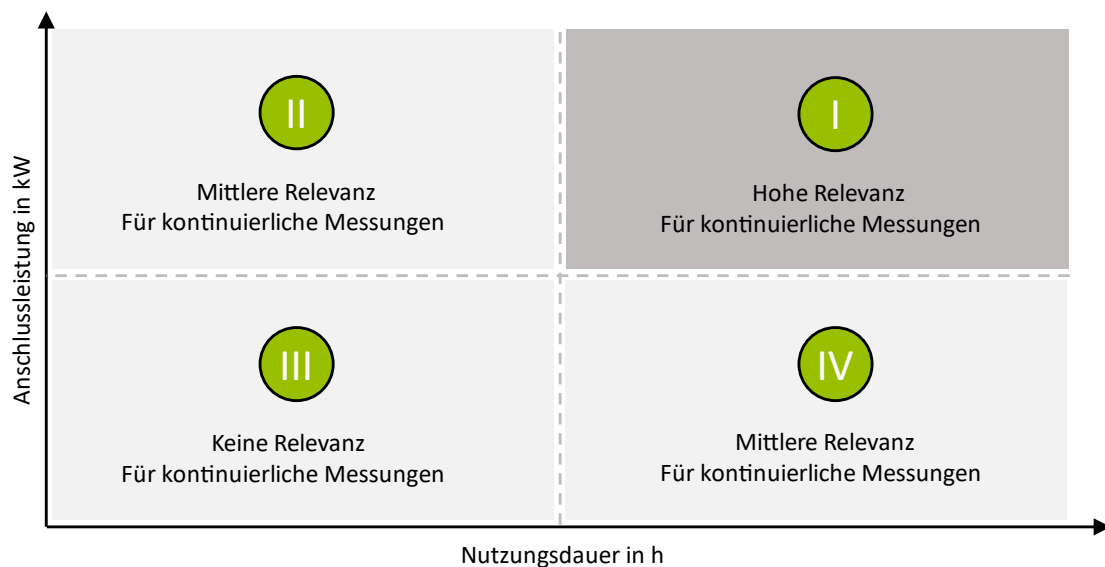


Abbildung 2-16: Beispielhafte Darstellung der Portfolio-Matrix, eigene Darstellung in Anlehnung an Thiede (2012, S. 137) und Posselt (2016, S. 144)

Kumulierter Energieaufwand

Der kumulierte Energieaufwand ist eine Methode, um die energetischen Ressourcenbedarfe von verschiedenen Prozessen oder Produkten ins Verhältnis zu setzen. Beschrieben ist die Methode in der VDI-Richtlinie 4600 (VDI, 2012). Auch hier kommt wie schon bei der Ökobilanz der Begriff der funktionellen Einheit zum Einsatz, der die betrachtete Einheit exakt abgrenzt und Vergleichbarkeit schafft. Ziel beim kumulierten Energieaufwand ist die Bilanzierung aller energetischen Ressourcen (also neben Strom auch weiterer Energieträger) über den kompletten Lebenszyklus der funktionellen Einheit. In

Abbildung 2-17 ist der kumulierte Energieaufwand für das Fallbeispiel eines additiv gefertigten Bauteils dargestellt, welches aus Bierdel et al. (2019) entnommen wurde.

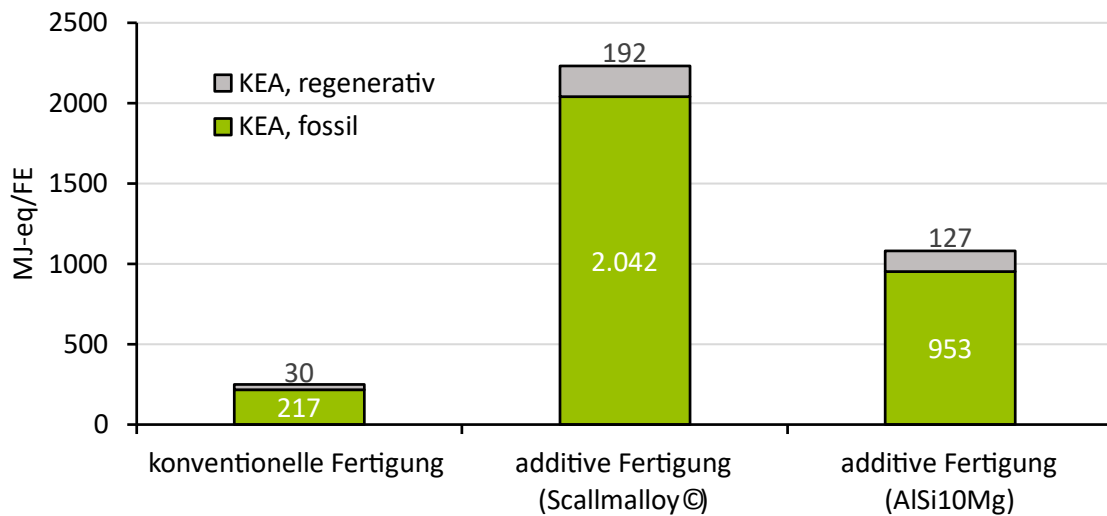


Abbildung 2-17: Beispielhafte Darstellung des kumulierten Energieaufwands (KEA), eigene Darstellung in Anlehnung an Bierdel et al. (2019, S. 77)

In dem Fallbeispiel wird der Energieaufwand des gesamten Lebenszyklus einer Dämpfergabel gegenübergestellt, die mit verschiedenen Fertigungsverfahren produziert wurde. Bei der Berechnung des kumulierten Energieaufwands wird sowohl die Herstellung der Rohmaterialien als auch die möglichen Einsparungen in der Nutzungsphase durch Leichtbau einberechnet. Im Fallbeispiel wird unterschieden zwischen Energieaufwand/-bedarf, der aus regenerativen Quellen bereitgestellt wird, und Energieaufwand/-bedarf aus fossilen Quellen.

Kumulierter Rohstoffaufwand

Die Methode des kumulierten Rohstoffaufwands ist vom Vorgehen analog zum kumulierten Energieaufwand, betrachtet aber die jeweiligen Rohstoffaufwände der funktionellen Einheit, ausgedrückt in der Gewichtseinheit Kilogramm. Standardisiert ist die Methode in der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 (VDI, 2018a). Darin wird unterschieden zwischen verschiedenen Rohstoffen, die laut Norm in die Kategorien nicht erneuerbare Energierohstoffe, mineralische Rohstoffe zur Metallerzeugung, andere mineralische Rohstoffe sowie biotische Rohstoffe unterteilt werden können. Der kumulierte Rohstoffaufwand für das Beispielprodukt der Dämpfergabel ist in Abbildung 2-18 dargestellt. Bei der Berechnung des kumulierten Rohstoffaufwands wird bspw. auch der Energiebedarf über Umrechnungsfaktoren der Primärenergieträger in eine Masse umgerechnet. Beim mineralisch-metallischen kumulierten Rohstoffaufwand werden die Aufwände summiert, die auf die Bewegungen von Erzgestein für die jeweiligen Ressourcenbedarfe zurückzuführen sind. Im biotischen kumulierten Rohstoffaufwand sind unter anderem

Holz mengen berücksichtigt, die ggf. als Holzbalken im Bergbau oder als Holz hackschnitzel für die Stromproduktion zum Einsatz kommen. (VDI, 2018a)

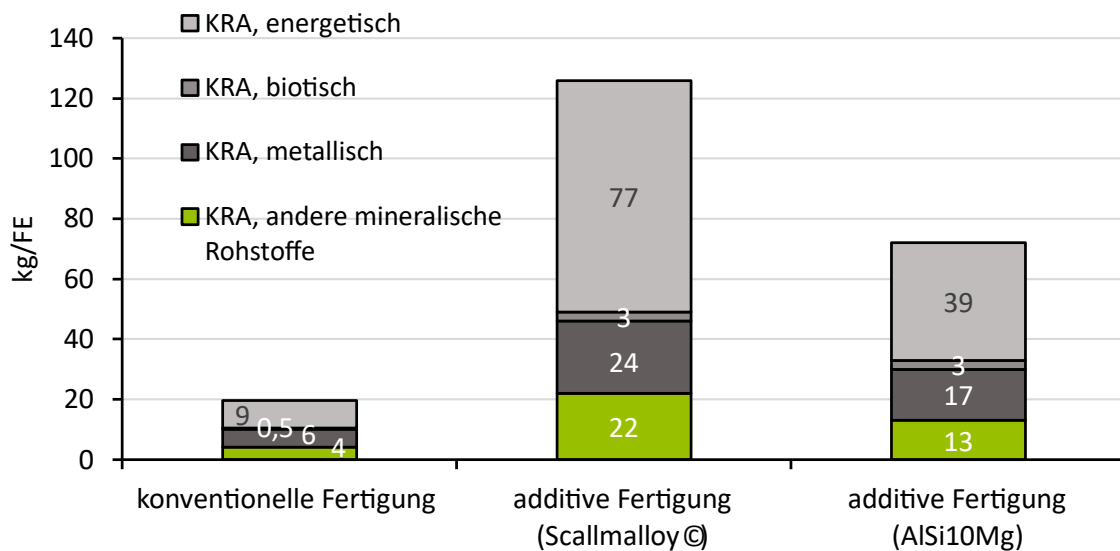


Abbildung 2-18: Beispielhafte Darstellung des kumulierten Rohstoffaufwands (KRA), eigene Darstellung in Anlehnung an Bierdel et al. (2019, S. 79)

Zusammenfassung

Wie bereits zu Beginn des Abschnittes erwähnt, sind in der folgenden Tabelle die in den vorangegangenen Abschnitten in Fließtext vorgestellten Methoden zur Übersicht stichpunktartig aufgeführt. Daraus lassen sich bereits Eigenschaften zum Vergleich der Methoden erkennen. Genauer wird darauf im folgenden Abschnitt eingegangen.

Tabelle 2-4: Zusammenfassung der Hotspot-Analysemethoden

Hotspot-Analyse-methode	Zusammenfassung
Ökobilanz	<ul style="list-style-type: none"> • Methode zur Ermittlung der Umweltwirkungen von Produkten oder Prozessen über den gesamten Lebensweg • Sowohl Energie als auch weitere Ressourcen werden betrachtet • Als Vergleichseinheit können diverse Wirkungsindikatoren gewählt werden • Ressourcenbedarfsbestimmung erfolgt nach Möglichkeit über Messungen
CO₂-Bilanz	<ul style="list-style-type: none"> • Methode zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen von Produkten oder Prozessen über den gesamten Lebensweg • Sowohl Energie als auch weitere Ressourcen werden betrachtet • Als Vergleichseinheit werden CO₂-Äquivalente (kg-CO₂e) verwendet • Ressourcenbedarfsbestimmung nach Möglichkeit über Messungen

Materialflusskostenrechnung	<ul style="list-style-type: none"> • Methode zur Ermittlung von Ressourcenströmen von Produkten oder Prozessen in Zusammenhang mit finanziellen Parametern in der Produktion • Sowohl Energie als auch weitere Ressourcen werden betrachtet • Als Vergleichseinheit werden die Kosten (in €) verwendet • Ressourcenbedarfsbestimmung erfolgt nach Möglichkeit über Messungen
Checkliste	<ul style="list-style-type: none"> • Methode zur Analyse von Produkten oder Prozessen, in der Arbeit mit Fokus auf Produktion • Sowohl Energie als auch weitere Ressourcen können betrachtet werden – je nach Ausgestaltung der Checkliste • Es kommt keine konkrete Vergleichseinheit zum Einsatz • Es werden keine Ressourcenbedarfe quantitativ bestimmt
Energiewertstrommethode	<ul style="list-style-type: none"> • Methode zur Analyse von Energiebedarfen in der Produktion • Lediglich energetische Ressourcen werden betrachtet • Als Vergleichseinheit werden energetische Kennzahlen verwendet • Energiebedarfsbestimmung erfolgt nach Möglichkeit über Messungen
ABC-Analyse	<ul style="list-style-type: none"> • Methode zum Vergleich verschiedener Prozesse in der Produktion • Lediglich elektrische Energie (Anschlussleistung) wird betrachtet • Als Vergleichseinheit werden energetische Kennzahlen verwendet • Energiebedarf wird über Anschlussleistungen abgeschätzt und verglichen
Portfolio-Matrix	<ul style="list-style-type: none"> • Methode zum Vergleich verschiedener Prozesse in der Produktion • Lediglich elektrische Energie (Anschlussleistung) in Bezug zur Nutzungsdauer wird betrachtet • Als Vergleichseinheit werden energetische Kennzahlen verwendet • Energiebedarf wird über Anschlussleistungen abgeschätzt und verglichen
Kumulierter Energieaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Methode zur Ermittlung der Energiebedarfe von Produkten oder Prozessen über den gesamten Lebensweg • Lediglich energetische Ressourcen werden betrachtet • Als Vergleichseinheit werden energetische Kennzahlen verwendet • Energiebedarfsbestimmung erfolgt nach Möglichkeit über Messungen
Kumulierter Rohstoffaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Methode zur Ermittlung der Rohstoffbedarfe von Produkten oder Prozessen über den gesamten Lebensweg • Sowohl Energie als auch weitere Ressourcen werden betrachtet • Als Vergleichseinheit werden massebezogene Kennzahlen verwendet • Ressourcenbedarfsbestimmung erfolgt nach Möglichkeit über Messungen

Vergleich von Hotspot-Methoden

Im Vorgehen zur Steigerung der Ressourceneffizienz, welches in Abschnitt 2.2.3 beschrieben wurde, besteht der zweite Schritt aus der Auswahl und Durchführung einer Hotspot-Methode. Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt Quellen vorgestellt, die Methoden im Zusammenhang mit Ressourceneffizienz vergleichen. Dabei werden die wesentlichen Kriterien der Literatur zur Auswahl einer geeigneten Hotspot-Analysemethodik herausgearbeitet.

Schlund et al. (2014, S. 118) stellt verschiedene Normen und Standards gegenüber, darunter auch die VDI-Richtlinie 4600 zur Ermittlung des kumulierten Energieaufwands und die DIN EN ISO 14040 zur Ökobilanz. Fokus liegt hierbei darauf, welche Kennzahlen (Energie, Material oder Sonstige wie Ökonomie und Umwelt) adressiert werden.

Ob Energie- und/oder Materialflüsse mit den Methoden analysiert werden, sind auch Kriterien im Vergleich, der von Li et al. (2017) veröffentlicht wurde. Weitere Kriterien sind dort außerdem, ob zeitliche Informationen inkludiert sind, ob eine Visualisierung mittels Sankey-Diagramm in der Methode vorgesehen ist, ob ein generisches Template zur Verfügung steht und ob eine kontinuierliche Analyse erfolgt. Betrachtet werden in der Veröffentlichung unter anderem die klassische Wertstrommethode und die Energiewertstrommethode.

Blume et al. (2018) stellt, basierend auf dem vorangegangenen Vergleich von Thiede et al. (2016b), die Methoden der Material- und Energieflussanalyse (die Ähnlichkeiten zur Materialflusskostenrechnung aufweist), der Ökobilanz, die Energiewertstrommethode und die Simulation gegenüber. Dabei wird u. a. analysiert, ob ein dynamisches Systemverhalten abgebildet wird, die ökonomische, ökologische und technische Performance in den jeweiligen Methoden von Relevanz ist und wie hoch der Zeitaufwand und das benötigte Expert*innenwissen sind. Während die Einschätzung der Kriterienerfüllung der Methoden in den vorgenannten Quellen über Symbole wie Harvey-Balls, Kreuze oder Plus- und Minus-Zeichen vorgenommen wird, verfolgt Krückhans et al. (2015) einen anderen Ansatz. Dort werden die betrachteten Methoden, unter anderem die klassische Wertstrommethode und die Portfolio-Matrix, in einem Diagramm mit den Achsen „Aufwand“ und „Nutzen“ eingeordnet. Eine These ist hier, dass Methoden im Verhältnis zu ihrem Nutzen nicht zu aufwändig sein dürfen, um eine wirtschaftliche Anwendung zu gewährleisten. (Krückhans et al., 2015) Wie der Aufwand und der Nutzen der einzelnen Methoden bewertet wird, findet in der Veröffentlichung keine Erwähnung.

Grundsätzlich ist anzumerken, dass die Methodenvergleiche in allen vorgestellten Veröffentlichungen lediglich als „Randthema“ behandelt werden, in dem sie bspw. eine Zusammenfassung des Grundlagenteils darstellen. In keiner der Veröffentlichungen ist der

Vergleich selbst der Fokus und die Einschätzungen des Erfüllungsgrades der Kriterien für die einzelnen Methoden sind im Detail nicht nachvollziehbar gestaltet. Diese Lücke wird durch Weyand et al. (2022a) bzw. Weyand et al. (2023b) adressiert. Die darin aufgeführten Inhalte werden in Abschnitt 4.3 aufgegriffen.

2.2.5 Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz

Basierend auf der Hotspotanalyse werden im dritten Schritt der Vorgehensweise (vgl. . Das beschriebene Vorgehen ist in Abbildung 2-10 grafisch dargestellt.

) geeignete Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz für die Hotspots identifiziert. Zu diesem Zweck können Maßnahmenkataloge zum Einsatz kommen, in denen potenzielle Ressourceneffizienzmaßnahmen, geordnet und bewertet nach diversen Kriterien, gesammelt sind.

Im Folgenden werden für diese Arbeit relevante Kataloge vorgestellt. In Tabelle 2-5 werden diese in Kürze zusammengefasst und angegeben, ob das Einsparpotenzial der Maßnahmen darin qualitativ oder quantitativ bewertet wird. Die Kataloge unterscheiden sich unter anderem im Detailgrad, zum einen, was die Aufteilung nach Branchen, zum anderen auch was die Granularität der Maßnahmen betrifft. Von Schebek et al. (2016) werden bspw. explizit Ressourceneffizienzmaßnahmen für Zerspanungsprozesse aufgeführt, Kühn et al. (2022) leisten dies in ihrem Leitfaden für die Kunststoffindustrie. Im Gegensatz dazu werden unter anderem in der VDI-Richtlinie 4800 übergeordnete Strategien für Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Industrie aufgelistet, zu denen spezifischere Maßnahmen als Beispiele genannt werden (VDI, 2016). Deren Einsparpotenziale werden allerdings nicht quantifiziert. Dafür finden sich dort für jede Maßnahme Informationen darüber, wer einflussnehmende Akteur*innen im Betrieb sind und in welcher Lebensphase bzw. in welchen -phasen Auswirkungen durch die Maßnahmen auftreten. Eine ausführlichere Beschreibung inklusive quantifizierten Fallbeispielen zu den in der VDI-Richtlinie genannten Strategien und Maßnahmen wird vom VDI ZRE online bereitgestellt (VDI ZRE, o.J.c).

Eine Kategorie, nach dem die Maßnahmen in bestehenden Maßnahmenkatalogen sortiert sein können, ist das Anwendungsgebiet. Hier variiert die Gruppierung allerdings. Trianni et al. (2014) sowie Hesselbach (2012) ordnen die Maßnahmen in ihrer Veröffentlichung nach Querschnittstechnologien und Infrastrukturbereichen, zu denen unter anderem elektrische Antriebe oder Druckluft gezählt werden. Münnich et al. (2022) und Blesl und Kessler (2017) fassen den Anwendungsbereich breiter und unterscheiden nach Basis- und Querschnittstechnologien, worunter auch Themen wie Industrieöfen oder Informationstechnologien fallen. Münnich et al. (2022) unterscheiden bei den Maßnahmen zusätzlich zwischen verschiedenen Systemleveln (Fabrik, Shopfloor, Maschine oder Bereich) sowie danach, ob die Maßnahme technischen oder organisatorischen Typs ist.

Tabelle 2-5: Übersicht über Maßnahmenkataloge zum Thema Ressourceneffizienz

Maßnahmenkatalog	Zusammenfassung	Angabe Einsparpotenzial
Abele et al., 2018	Auflistung und Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen aus einem konkreten Projekt zu den Themen Bauteilreinigung, Zerspanung, Wärmebehandlung und thermischer Interaktion	quantitativ (in Prozent)
Blesl & Kessler, 2017	Auflistung und Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen zu diversen Themen wie Pumpen, Industrieöfen oder auch zur Herstellung von Zement	(teilweise) quantitativ
Fraunhofer IPA, 2015	Auflistung von Ressourceneffizienzmaßnahmen aus Projektberichten, gruppiert u. a. nach Prozessschritt oder natürlicher Ressource	nein
Hesselbach, 2012	Auflistung und Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in den Querschnittstechnologien elektromechanische Antriebe, Druckluft, Beleuchtung, Klima- und Lüftungstechnik, Prozesskälte und -wärme, Abwärmenutzung sowie Kraft-Wärme-(Kälte-)Kopplung	quantitativ
Kühn et al., 2022	Auflistung und Bewertung von Ressourceneffizienzmaßnahmen unterteilt nach Prozesstechnologien, Abwärme und Querschnittstechnologien in der Kunststoffindustrie	quantitativ
Münnich et al., 2022	Auflistung von Energieeffizienz- und Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Fabrik	nein
Schebek et al., 2016	Auflistung von Ressourceneffizienzmaßnahmen in Zerspanungsprozessen	quantitativ
Trianni et al., 2014	Auflistung und Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in den Querschnittstechnologien elektrische Antriebe, Druckluft, Beleuchtung sowie Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik	qualitativ
VDI, 2016	Grundlegende Strategien zum Thema Ressourceneffizienz mit beispielhaften Maßnahmen zu diesen Strategien, unter anderem aufgeschlüsselt nach einflussnehmenden Akteur*innen	nein
VDI ZRE, o.J.c	Ausführung der Strategien und Maßnahmen aus der VDI-Richtlinie 4800 (VDI, 2016) unterteilt nach Produktentwicklung, Produktion und produkt- und prozessunabhängigen Themen in einem Online-Tool	quantitativ

Weitere Kategorien, nach denen Ressourceneffizienzmaßnahmen strukturiert werden, sind die jeweils eingesparten Ressourcen (bspw. in Fraunhofer IPA, 2015), die Amortisationszeit oder die Investitionskosten (bspw. in Trianni et al., 2014) der Maßnahmen.

Insbesondere für die letzten beiden Kategorien existieren wenige Kataloge, die hier konkrete, quantifizierte Werte angeben. Das hängt damit zusammen, dass die genauen Potenziale im Vergleich zu den Aufwänden, die für die Implementierung der Maßnahmen notwendig sind, abhängig sein können von Produktionsbedingungen wie bspw. Größe oder Stückzahl der produzierten Produkte. Abele et al. (2018) lösen dies bspw. über prozentuale Angaben. Alternativ wird anstelle von quantitativen Werten u. a. von Trianni et al. (2014) eine qualitative Abschätzung nach hoch/mittel/niedrig aufgeführt.

Eine vollständige Sammlung von Kategorien, nach denen die Ressourceneffizienzmaßnahmen in den jeweiligen Katalogen aufgeführt werden, ist im Anhang A-2 zu finden. Insgesamt sind dies 40 verschiedene Kategorien, nach denen bestehende Kataloge Maßnahmen einteilen. Diese Kategorien werden in Abschnitt 4.4 erneut aufgegriffen.

2.3 Zwischenfazit – Ressourceneffizienz in Lernfabriken

Bereits heute wird das Thema Ressourceneffizienz oder zumindest Aspekte davon in Lernfabriken adressiert. Lernfabriken sind aufgrund ihrer Gestaltungsdimensionen bewährte Konzepte, um Kompetenzen, insbesondere mit Bezug zur Produktion zu vermitteln (vgl. Abschnitt 2.1). Ressourceneffizienz als Schulungsthema ist in Lernfabriken jedoch nach wie vor von untergeordneter Relevanz (Callupe et al., 2021). Bestehende Lernfabriken, die bereits Ressourceneffizienz adressieren, können mit ihren veröffentlichten Use-Cases als Inspiration dienen. Dazu zählen die folgenden Lernfabriken, die erstens in der IALF-Arbeitsgruppe „Sustainability and Circular Economy“ engagiert sind und/oder zweitens durch regelmäßige Veröffentlichungen in dem Thema auffallen (vgl. u. a. Abschnitt 2.1.2):

- Die Lernfabrik am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) in Braunschweig (IWF, o.J.)
- die Niedersächsische Lernfabrik für Ressourceneffizienz e.V. (NiFaR) in Wolfenbüttel (NiFaR e.V., 2024)
- Die LEAD Factory am Institute of Innovation and Industrial Management (IIM) in Graz (IIM, o.J.)
- die Teaching Factory des Laboratory for Manufacturing Systems and Automation (LMS) in Patras (LMS, 2021)
- die ETA-Fabrik am PTW in Darmstadt (PTW, o.J.a)

In der genannten IALF-Arbeitsgruppe wurde 2022 eine Übersicht über bestehende Lernfabrik-Use-Cases im Bereich Nachhaltigkeit erstellt und von Weyand et al. (2022b) veröffentlicht. Die darin aufgeführten Use-Cases resultieren größtenteils aus den Lernfabriken, die in der Arbeitsgruppe repräsentiert sind, weswegen die Autor*innen des Artikels keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Zudem werden die Use-Cases im Artikel zur Inspiration vorgestellt – wie diese Use-Cases systematisch von anderen

Lernfabrik-Betreiber*innen ausgewählt und umgesetzt werden können, wird nicht erläutert. Insofern besteht trotzdem die Notwendigkeit, eine ganzheitliche, übertragbare Methodik zu formulieren, um das Thema der Ressourceneffizienz auch für andere, bisher nicht im Thema aktive Lernfabriken anwendbar zu machen.

Die Analyse von Lernfabrik-Erweiterungen in Abschnitt 2.1.2 zeigt bestehende Ansätze, keiner davon adressiert jedoch systematisch und ganzheitlich das Thema Ressourceneffizienz. Allen Ansätzen zur Erweiterung von Lernfabriken ist gemein, dass zur Adressierung von (neuen) Themen zunächst intendierte Kompetenzen zu definieren sind. Daraufhin wurde in einer systematischen Literaturanalyse in Abschnitt 2.2.2 nach bestehenden Kompetenzaufstellungen für Ressourceneffizienz gesucht. Keine der gefundenen Veröffentlichungen formuliert Kompetenzen entsprechend der Taxonomiestufen. Dennoch konnten Themenbereiche identifiziert werden, die zur Vermittlung von Ressourceneffizienz von mehreren Veröffentlichungen als relevant aufgeführt wurden. Diese Themenbereiche können den Schritten der Vorgehensweisen für Ressourceneffizienz zugeordnet werden, auf die in Abschnitt 2.2.3 eingegangen wurde. Aus den sechs betrachteten Vorgehensweisen wurde eine Vorgehensweise abgeleitet, die fünf Schritte umfasst. Der zweite Schritt der Vorgehensweise stellt die Durchführung einer Hotspot-Analyse dar, weswegen in Abschnitt 2.2.4 auf dafür anwendbare Methoden eingegangen wird. Auch die Identifikation geeigneter Ressourceneffizienzmaßnahmen für die jeweilige Produktion stellt einen der Schritte dar und wird in Abschnitt 2.2.5 beleuchtet.

Tabelle 2-6 gibt abschließend eine Einordnung bisheriger Veröffentlichungen der Autorin der vorliegenden Arbeit im Kontext der Forschungsfrage. Die Vorarbeiten werden in der vorliegenden Arbeit zu einer Gesamtmethodik zusammengeführt, mit der Lernfabriken systematisch um das Thema Ressourceneffizienz erweitert werden können.

Tabelle 2-6: Einordnung der Vorarbeiten der Autorin sowie der vorliegenden Arbeit in relevante Teilaspekte der Forschungsfrage

Teilaspekt	Veröffentlichungen der Autorin					
	Weyand et al. 2021a	Weyand et al. 2021c	Weyand et al. 2022a	Weyand et al. 2023b	Weyand et al. 2023c	Vorliegende Arbeit
Vorgehensweisen/Methoden zur Erweiterung von Lernfabriken	○	◐	○	◐	○	●
Vorgehensweisen zur Steigerung der Ressourceneffizienz	◐	○	○	◐	○	●
Vergleich von Hotspot-Analysemethoden	○	○	●	●	○	●
Identifikation von Ressourceneffizienzmaßnahmen	○	○	○	○	●	●
Gesamtmethodik zur Erweiterung von Lernfabriken um Ressourceneffizienz	○	○	○	○	○	●

Legende: ● ≙ Fokus des Artikels/der Arbeit, systematisch untersucht ◐ ≙ teilw. im Artikel adressiert, aber kein Fokus ○ ≙ nicht adressiert

3 ZIELKONKRETISIERUNG UND FORSCHUNGSKONZEPTION

Bereits in Abschnitt 1.2 wurde das Forschungsziel der Arbeit definiert: die Entwicklung einer Methodik zur Erweiterung von Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz. Um dieses Ziel zu erreichen, werden im folgenden Abschnitt 3.1 Anforderungen festgelegt. Anschließend wird in Abschnitt 3.2 der Untersuchungsrahmen abgegrenzt. Darauf basierend wird, unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus Kapitel 2, der Lösungsansatz zur Erreichung des Forschungsziels skizziert.

3.1 Anforderungen an die Methodik

Aus den identifizierten Lücken sowie der Formulierung des Forschungsziels werden im Folgenden Anforderungen abgeleitet, die die Zielstellung für die Entwicklung der Methodik konkretisieren. Konkret handelt es sich um:

Validität: Mit Validität wird beschrieben, inwiefern das gewünschte Ergebnis tatsächlich erzielt wird (Döring & Bortz, 2016). Auf die vorliegende Zielstellung übertragen heißt das, dass es nach Anwendung der Methodik in der erweiterten Lernfabrik tatsächlich möglich sein sollte, Workshops zum Thema Ressourceneffizienz durchzuführen. Dazu ist es notwendig, dass die resultierenden Handlungsempfehlungen, die sich für die Erweiterung ergeben, inhaltlich das Thema Ressourceneffizienz abbilden.

Systematisierung: Das Thema Ressourceneffizienz sollte systematisch adressiert werden. Konkret heißt dies, dass in der Methodik aufgegriffen werden sollte, wie Ressourceneffizienz in der Produktion systematisch zu adressieren ist.

Relevanz: Um für die mit der Arbeit adressierte Zielgruppe relevant zu sein, sollte die entwickelte Methodik von dieser Zielgruppe als geeignet und hilfreich für die Zielstellung der Erweiterung von Lernfabriken um Ressourceneffizienz erachtet werden.

Strukturierter Aufbau: Die Methodik sollte einem strukturierten Ablauf folgen und nachvollziehbar aufgebaut sein.

Geeigneter Detaillierungsgrad: Die Methodik sollte ausreichend genau beschrieben sein, um die wesentlichen Schritte verständlich auszugestalten. Resultierende Handlungsempfehlungen sollten ausreichend konkret sein, um praktisch umgesetzt werden zu können. Dabei sollte die Methodik jedoch auf die wesentlichen Elemente fokussiert sein, so dass der Umfang als angemessen empfunden wird.

Adaptierbarkeit: Die Methodik sollte auf diverse Lernfabriken mit unterschiedlichen Randbedingungen im definierten Bereich (vgl. Abschnitt 3.2) angepasst werden können.

Geeignete Unterstützung: Die Methodik selbst bzw. die darin enthaltenen Werkzeuge sollten von der Zielgruppe als Unterstützung in der Anwendung empfunden werden.

Anwendbarkeit: Die Anwendung der Methodik sollte für die Zielstellung der Arbeit als empfehlenswert erachtet werden. Das erfordert auch, dass der zeitliche Aufwand zur Anwendung der Methodik angemessen ist.

3.2 Abgrenzung des Untersuchungsrahmens

Die Themen der Arbeit, Ressourceneffizienz und Lernfabriken, sind beide für sich genommen umfangreich und bieten diverse Ansatzpunkte für Forschungsfragestellungen. Mit der Herleitung der Zielstellung in Abschnitt 1.1 wurde der Kern der Arbeit bereits dargelegt, im Folgenden werden die einzelnen Aspekte im Sinne einer stringenten Abgrenzung des Forschungsthemas konkretisiert, um eine Lösung entsprechend der Anforderungen erarbeiten zu können.

Als **Zielgruppe** der vorliegenden Arbeit werden Lernfabrikbetreiber*innen festgelegt. Zwar lassen sich einzelne Elemente und Werkzeuge der Methodik auch direkt in Unternehmen anwenden, um die Ressourceneffizienz zu steigern. Fokus der Arbeit liegt aber darauf, Betreiber*innen von Lernfabriken zu befähigen, ihre vorhandene Infrastruktur sowie das Curriculum zu erweitern, um Kompetenzen zum Thema Ressourceneffizienz erfolgreich vermitteln zu können. Der **Begriff Ressource** wird dabei in der vorliegenden Arbeit auf die Definition von materiell betrieblichen Ressourcen bezogen (vgl. Abbildung 2-7). Die Methodik bezieht sich zudem auf produzierende Industrieunternehmen, sprich die Phase der Produktion, da diese definitionsgemäß dem Fokus und der Zielgruppe von Lernfabriken entsprechen. Innerhalb des Produktionssystems wird die **Ebene des Produktionsbereichs** adressiert entsprechend der Unterteilung von Nyhuis et al., 2008, S. 23). Auch wenn in Lernfabriken theoretisch Mitarbeiter*innen aller Ebenen eines Unternehmens geschult werden können, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit vor allem das Produktionsmanagement sowie ein ggf. vorhandenes Energie- oder Umweltmanagement in den Blick genommen, die diese Produktionsbereiche verantworten. Diese Eingrenzung deckt sich mit den identifizierten Hotspot-Analysemethoden, mit deren Hilfe Prozessketten analysiert werden (vgl. Abschnitt 2.2.4).

Adressiert werden **Lernfabriken im engeren Sinne** gemäß der Definition der IALF (vgl. Abschnitt 2.1.1). Das heißt insbesondere, dass die adressierten Lernfabriken eine reale Prozesskette aufweisen, die mehrere zusammenhängende Produktionsschritte umfasst, so dass die Anwendung der Hotspot-Analysemethoden möglich und zielführend ist. Zwar lassen sich Schritte der Methodik auch auf Lernfabriken im weiteren Sinne, bspw. im virtuellen Raum, übertragen. Die genauen Besonderheiten für diese Fälle werden im Folgenden allerdings nicht weiter betrachtet. Die Beschaffung neuer Anlagen oder gar die Neuerrichtung von Lernfabriken ist in der Regel mit hohen personellen und finanziellen Aufwänden verbunden. Ziel der Methodik ist deswegen explizit die **Erweiterung** bestehender Lernfabriken. Damit ist in der vorliegenden Arbeit gemeint, dass sowohl die Produkte als auch die vorhandenen Anlagen und Prozessschritte zur Produktion des

Produktes in der jeweiligen Lernfabrik als gesetzt angesehen werden. Die Beschaffung neuer Anlagen, wie es bspw. für die Adressierung neuer Zielgruppen aus anderen Branchen in einer Lernfabrik notwendig wäre, ist nicht Gegenstand der hier entwickelten Methodik. Tabelle 3-1 fasst die aufgeführten Abgrenzungen zusammen.

Tabelle 3-1: Übersicht über die Abgrenzungsdimensionen der Methodik

Dimension	Abgrenzung
Zielgruppe	Betreiber*innen von Lernfabriken
Definition Ressource	Materiell betriebliche Ressourcen (u. a. Material, Energie und Emissionen)
Ebene der Produktion	Produktionsbereich (entspricht Blickwinkel des Produktionsmanagements, ggf. Energie- und Umweltmanagement)
Definition Lernfabrik	Lernfabriken im engeren Sinne (insb. Zusammenhängende Prozesskette mit mehreren Schritten)
Erweiterung	Bestehende Lernfabriken (Produkt sowie Anlagen und Prozessschritte werden als gegeben erachtet)

3.3 Lösungsansatz

Wie im Stand der Forschung in Kapitel 2 der vorliegenden Arbeit dargestellt, ist zur systematischen Erweiterung von Lernfabriken zunächst die Definition von intendierten Kompetenzen notwendig. Diesen Kompetenzen werden in der sogenannten Kompetenztransformation zugehörige Handlungen und die notwendige Wissensbasis zugeordnet (vgl. Abschnitt 2.1.1). Um abzuleiten, welche Anforderungen die Kompetenzen an die Infrastruktur der Lernfabrik bedingen, wird die etablierte Kompetenztafel um eine Spalte für die notwendige Infrastruktur erweitert. Die Einträge in dieser Spalte ergeben sich insbesondere aus den Handlungen, die den (Teil-)Kompetenzen zugeordnet werden (Weyand et al., 2021c).

Die Literaturanalyse nach Kompetenzen für Ressourceneffizienz in Abschnitt 2.2.2 ergab eine gesammelte Liste von sieben Themenbereichen. Diese werden in den untersuchten Quellen mehrfach genannt und können als Basis für Kompetenzen genutzt werden. Dazu zählen die Einführung in das Thema Ressourceneffizienz, Datenaufnahme und Datenanalyse zur Identifikation von Stellhebeln, ggf. der Einsatz von entsprechenden Methoden zur Analyse, die Identifikation und Implementierung von Verbesserungsmaßnahmen, das Setzen von konkreten Zielen und die systematische Erfassung von Verbesserungen. Diese Themenbereiche decken sich mit Schritten der

Vorgehensweisen für Ressourceneffizienz, die in Abschnitt 2.2.3 betrachtet wurden. Die sechs betrachteten Vorgehensweisen wurden dort zu einer Vorgehensweise zusammengeführt. Diese Vorgehensweise enthält fünf Schritte: Motivation und Zielstellung, Hotspot-Analyse, Maßnahmenidentifikation, Maßnahmenbewertung und Priorisierung sowie die Maßnahmenumsetzung und Kontrolle. Durch einen Abgleich der Themenbereiche mit den Vorgehensweisen für Ressourceneffizienz können Hauptkompetenzen sowie entsprechende Teilkompetenzen abgeleitet werden, die zur Adressierung von Ressourceneffizienz in der Produktion benötigt werden. Das Vorgehen ist in Abbildung 3-1 grafisch dargestellt.

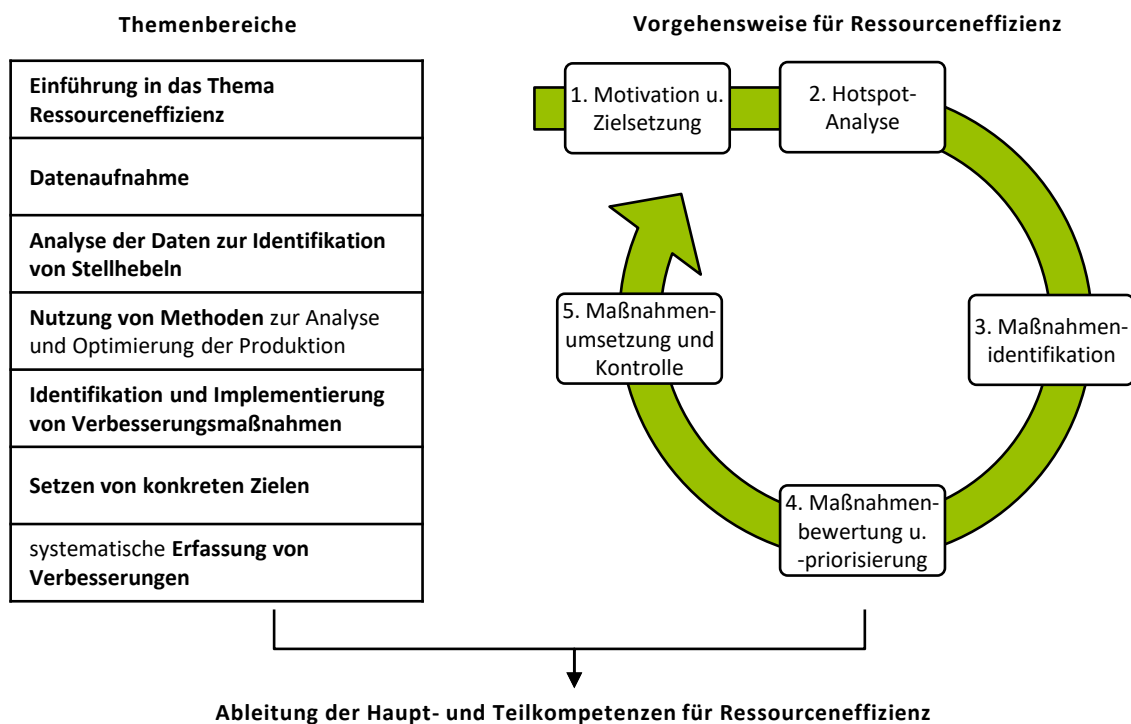


Abbildung 3-1: Vorgehen zur Ableitung der Haupt- und Teilkompetenzen zur Steigerung der Ressourceneffizienz

Die resultierenden Hauptkompetenzen finden sich in Tabelle 3-2. Auf Basis der untersuchten Literatur in Abschnitt 2.2.2 und Abschnitt 2.2.3 werden diese Hauptkompetenzen in Teilkompetenzen aufgeteilt, die zugehörigen Handlungen, die Wissensbasis und die notwendige technische Infrastruktur in der Kompetenztransformation ermittelt. Die notwendige Infrastruktur zu den jeweiligen Hauptkompetenzen ist ebenfalls in Abbildung 3-2 dargestellt. Die gesamte Kompetenztabelle mit Teilkompetenzen, Wissensbasis und Handlungen für das Thema Ressourceneffizienz findet sich im Anhang A-3.

Tabelle 3-2: Hauptkompetenzen und notwendigen Infrastruktur zur Steigerung der Ressourceneffizienz

Hauptkompetenz Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz,...	Notwendige Infrastruktur in Lernfabriken
1. ...die Gründe für das Thema Ressourceneffizienz zu verstehen und diese für ihr eigenes Unternehmen zu ermitteln.	Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum)
2. ...Hotspots bzgl. Ressourceneffizienz in ihrer Produktion zu identifizieren.	Abhängig von gewählter Hotspot-Analysemethode
3. ...Ressourceneffizienzmaßnahmen für die identifizierten Hotspots zu ermitteln.	Implementierte Ressourceneffizienzmaßnahmen – genaue Infrastruktur abhängig von gewählten Ressourceneffizienzmaßnahmen
4. ...die ermittelten Ressourceneffizienzmaßnahmen systematisch zu priorisieren und auszuwählen.	Implementierte Ressourceneffizienzmaßnahmen – genaue Infrastruktur abhängig von gewählten Ressourceneffizienzmaßnahmen
5. ...die ausgewählten Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Produktion umzusetzen und die Einsparungen zu quantifizieren.	Abhängig von gewählten Ressourceneffizienzmaßnahmen

Abbildung 3-2: Ableitung der Hauptkompetenzen und notwendigen Infrastruktur aus dem Vorgehen zur Steigerung der Ressourceneffizienz

Bei der Aufstellung der Kompetenztable mit notwendiger Infrastruktur ergeben sich zwei Herausforderungen. **Herausforderung 1** betrifft die zweite Hauptkompetenz, die sich aus dem Schritt der Hotspot-Analyse ableitet. Um ihre jeweilige Produktion hinsichtlich Ressourceneffizienz verbessern zu können, sollten Teilnehmer*innen in Lernfabrik-Workshops die Kompetenz erwerben, Hotspots in ihrer Produktion zu identifizieren. Die Unterteilung dieser Hauptkompetenz in Teilkompetenzen ist nicht möglich, ohne zuvor zu definieren, welche Hotspot-Analysemethode zum Einsatz kommt. Wie in Abschnitt 2.2.4 ausgeführt, unterscheiden sich die Methoden zum einen darin, welche Aspekte betrachtet werden, sprich was den Nutzen angeht. Zum anderen ist auch der resultierende Aufwand bei den Methoden unterschiedlich. Um also zu ermitteln, um welche Infrastruktur die Betreiber*innen ihre Lernfabrik erweitern müssen, um die Kompetenz der Analyse von Hotspots zu schulen, müssen die Betreiber*innen zunächst definieren, welche Hotspot-Analysemethode genau geschult werden soll.

Herausforderung 2 betrifft die dritte, vierte und fünfte Hauptkompetenz im Zusammenhang mit den Ressourceneffizienzmaßnahmen. Teilnehmer*innen sollten in Ressourceneffizienz-Workshops in Lernfabriken die Kompetenz erwerben, Ressourceneffizienzmaßnahmen für die identifizierten Hotspots zu ermitteln und systematisch auszuwählen. Mögliche Ressourceneffizienzmaßnahmen sollten dabei nicht nur theoretisch vermittelt, sondern die Vorteile einer Lernfabrik mit realer Prozesskette genutzt und die Maßnahmen auch tatsächlich in implementierter Form gezeigt werden (Helm et

al., 2014, S. 520). Welche Anforderungen das aber konkret für die jeweilige Lernfabrik bedeutet, hängt von den entsprechenden Ressourceneffizienzmaßnahmen ab.

Um diese beiden Herausforderungen zu adressieren, liegt der Fokus bei der Entwicklung der Methodik auf den folgenden Punkten:

- Unterstützung von Lernfabrikbetreiber*innen bei der Auswahl einer oder mehrerer passender Hotspot-Analysemethoden für die Randbedingungen ihrer Lernfabrik
- Unterstützung von Lernfabrikbetreiber*innen bei der Auswahl implementierbarer Ressourceneffizienzmaßnahmen unter Berücksichtigung Lernfabrik-spezifischer Kriterien
- Zusammenführung der Teilaspekte in einem ganzheitlichen Gesamtverfahren zur Erweiterung von Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz

Im folgenden Kapitel werden Lösungen zu diesen Punkten erarbeitet und in Zusammenhang mit umschließenden Aspekten ausgeführt.

4 METHODIK ZUR ERWEITERUNG VON LERNFABRIKEN UM RESSOURCENEFFIZIENZ

Der Fokus der Methodik zur Erweiterung von Lernfabriken um Ressourceneffizienz liegt, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, auf der Auswahl geeigneter Hotspot-Analysemethoden und Ressourceneffizienzmaßnahmen. Insgesamt besteht die Methodik aus fünf Schritten. Diese werden im Überblick in Abschnitt 4.1 vorgestellt. In den danach folgenden Abschnitten 4.2 bis 4.6 wird die Entwicklung der einzelnen Schritte ausgeführt. In Abschnitt 4.7 wird das Kapitel zusammengefasst.

4.1 Struktur der Methodik

Die Methodik umfasst, basierend auf den Ergebnissen der vorherigen Kapitel, aus fünf Schritten. Zunächst werden in Schritt 1 die Rahmenbedingungen mit Hilfe eines Fragebogens genauer definiert. Diese Randbedingungen beeinflussen sowohl den zweiten Schritt der Auswahl der Hotspot-Analysemethode(n), als auch den dritten Schritt zur Auswahl der Ressourceneffizienzmaßnahmen, die in der Lernfabrik gezeigt werden sollen. Auf Basis der Hotspot-Analysemethoden werden die intendierten Kompetenzen ausformuliert und Kompetenztabellen für jede Hotspot-Analysemethode aufgestellt, die neben Teilkompetenzen auch die Wissensbasis, zugehörige Handlungen und die sich daraus ergebende notwendige Infrastruktur beinhalten. Zusätzliche Anforderungen an die Infrastruktur ergeben sich aus den ausgewählten Ressourceneffizienzmaßnahmen, wobei im Auswahlprozess Lernfabrik-spezifische Kriterien berücksichtigt werden.

Im Anschluss erfolgt mit Hilfe der Kompetenztabellen die Entwicklung eines Lernmoduls sowie nach Abgleich mit dem Ist-Zustand die technische Erweiterung der Lernfabrik. In nachgelagerten Schritten muss das Lernmodul durchgeführt, evaluiert und kontinuierlich verbessert werden. Abbildung 4-1 stellt das Vorgehen der Methodik zusammenfassend dar. In den grünen Boxen sind dabei jeweils die Ergebnisse der einzelnen Schritte enthalten. Weiß werden die Aspekte gekennzeichnet, die nicht im Fokus dieser Arbeit stehen. Im Folgenden wird genauer auf die Entwicklung des Vorgehens, der einzelnen Schritte und unterstützende Werkzeuge eingegangen. Resultat der Methodik ist ein detailliertes Konzept für ein Ressourceneffizienz-Lernmodul sowie eine konkrete Auflistung von technischen Anforderungen, die zur Durchführung des Lernmoduls in der Lernfabrik implementiert werden müssen.

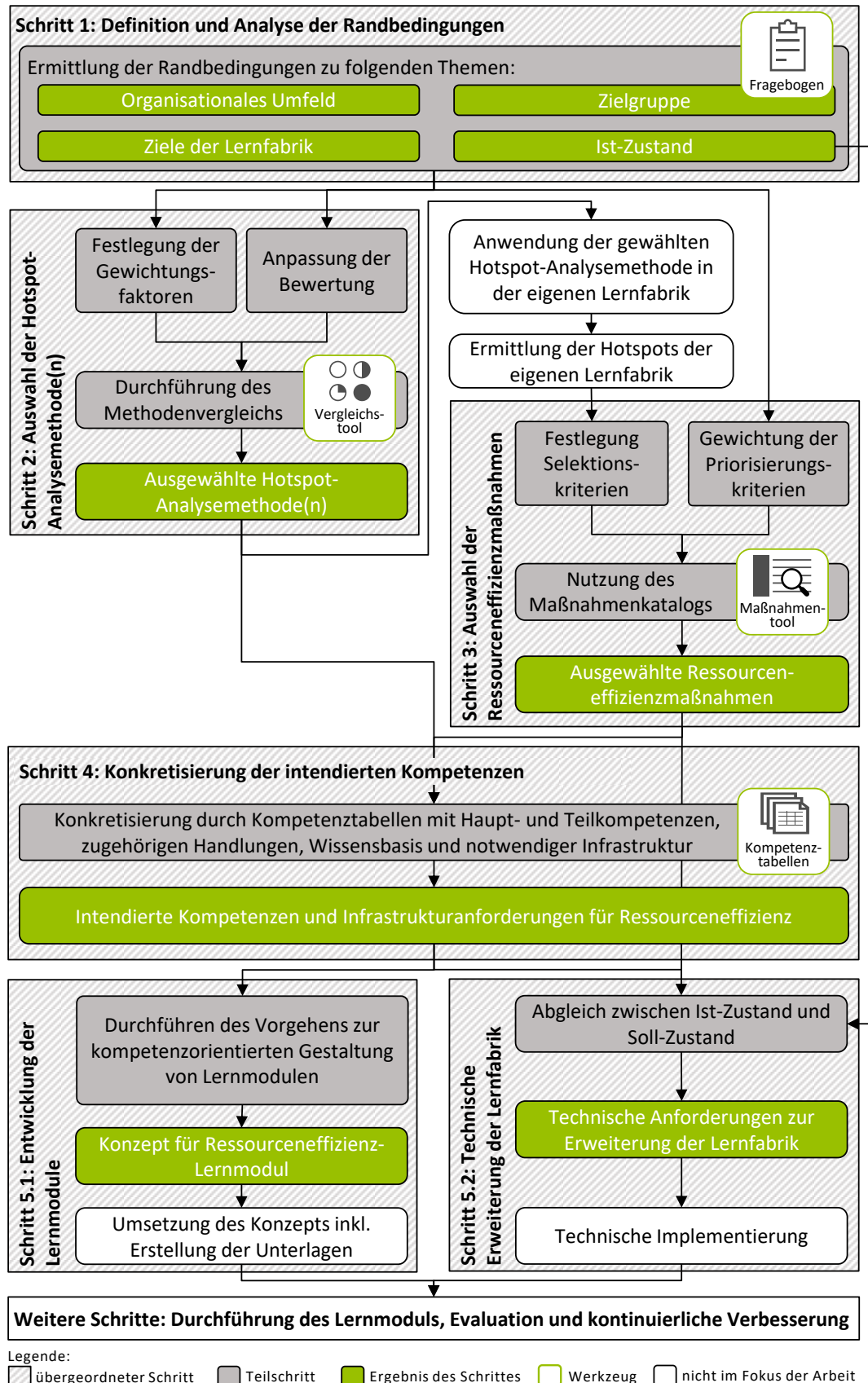


Abbildung 4-1: Grafische Darstellung des Gesamtverfahrens zur Erweiterung von Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz

4.2 Schritt 1: Definition und Analyse der Randbedingungen

Im ersten Schritt der Methodik zur Erweiterung von Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz werden die Randbedingungen für die Erweiterung analysiert. Die Aspekte, die dabei betrachtet werden, orientieren sich an der ersten didaktischen Transformation nach Tisch (2018). Das beinhaltet das organisationale Umfeld, womit u. a. das Betreibermodell, das Budget für die Erweiterung oder die Umgebung gemeint ist, in der die Lernfabrik angesiedelt ist, also bspw. ob an einer Universität oder in einem Unternehmen. Dieses Umfeld hat Einfluss auf den zweiten Aspekt, die Zielgruppe. Hier sollte nicht nur erfasst werden, welche Zielgruppe aktuell mit den Angeboten der Lernfabrik adressiert wird, sondern auch, ob mit der Erweiterung neue Zielgruppen angesprochen werden sollen, und wenn ja welche. Entsprechend des Untersuchungsrahmens liegt der Fokus der entwickelten Methodik allerdings darauf, bestehende Lernfabriken mit möglichst geringem Aufwand zur Durchführung von Ressourceneffizienz-Workshops zu befähigen. Die Anschaffung neuer Anlagen, wie es ggf. für die Adressierung von Zielgruppen aus anderen Branchen notwendig wäre, geht über diese Zielstellung hinaus. Dafür müsste zunächst bspw. auf Basis von Analysen wie von Thiede (2021) ermittelt werden, welche Anlagen in den jeweiligen Branchen aus Ressourcensicht die relevantesten Stellhebel darstellen. Diese könnten dann gezielt angeschafft werden, um an diesen Stellhebeln Ressourceneffizienzmaßnahmen zu zeigen und Kompetenzen zugeschnitten auf die neue Branche zu vermitteln. Für die hier vorliegende Arbeit wird aber davon ausgegangen, dass die adressierte Branche dieselbe bleibt und damit bereits alle relevanten Anlagen vorhanden sind. Eine neue Zielgruppe innerhalb der Branche könnte bspw. das Energiemanagement darstellen. Für die nachfolgenden Phasen ist beim Aspekt der Zielgruppe besonders relevant, von welchen Kompetenzen und welchen Randbedingungen, bspw. in Bezug zu finanziellen Möglichkeiten, bei der Zielgruppe ausgegangen werden kann. Mit der Definition der Zielgruppe einher geht auch die Definition der Ziele der Lernfabrik, die durch die Erweiterung verfolgt werden, also bspw. in Bezug zum zeitlichen Umfang des gewünschten Lernmoduls. Als Ergänzung zu diesen drei Aspekten, die auch schon bei Tisch für die initiale Gestaltung von Lernfabriken aufgeführt sind, ist bei der Erweiterung von Bestands-Lernfabriken auch der aktuelle Ist-Zustand zu analysieren. Hierzu zählt unter anderem, was bezüglich der Infrastruktur bereits verfügbar ist, welche Ressourcen zum Einsatz kommen und welche Lernmodule aktuell bereits in der Lernfabrik geschult werden.

Die vier Aspekte der Randbedingungen, die es im ersten Schritt der Methodik zu definieren und zu analysieren gilt, stehen in Abhängigkeit zueinander. Das wird z. B. deutlich, wenn sich die Lernfabrik im Umfeld einer Universität befindet und damit als (potenzielle) Zielgruppe Student*innen naheliegend sind. In Abbildung 4-2 sind diese Abhängigkeiten zwischen den vier Aspekten durch Pfeile grafisch dargestellt.

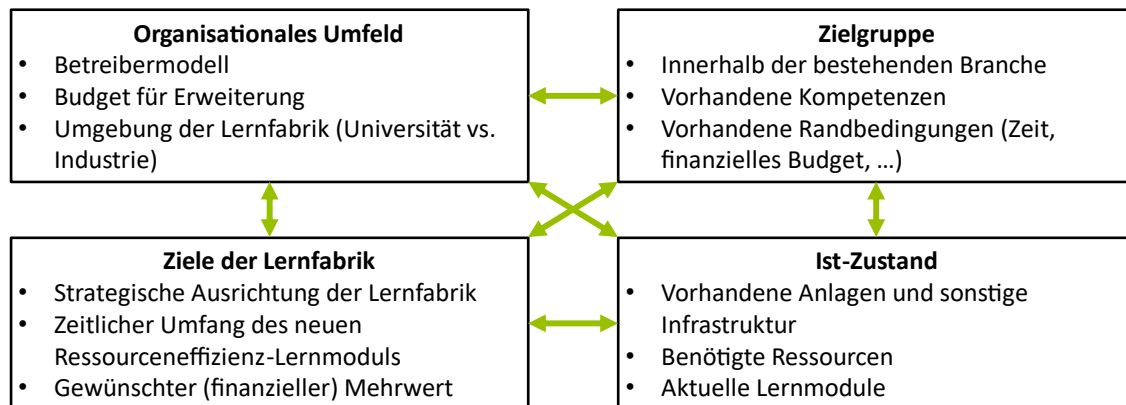


Abbildung 4-2: Übersicht über die vier Aspekte der Randbedingungen von bestehenden Lernfabriken, eigene Darstellung z. T. in Anlehnung an Tisch (2018)

Zur strukturierten Durchführung des ersten Schrittes der Methodik wird ein Fragebogen bereitgestellt, der sich in Anhang A-5 befindet. Die Fragen dort sind basierend auf den Parametern der nachfolgenden beiden Schritte erstellt, auf die die Antworten an diversen Stellen Einfluss haben. Auf diese Stellen wird in den nachfolgenden Kapiteln näher eingegangen.

4.3 Schritt 2: Auswahl der Hotspot-Analysemethoden

Wie in Abschnitt 2.2.3 und 3.3 dargelegt, können und sollten Lernfabriken beim Thema Ressourceneffizienz die Kompetenz vermitteln, Hotspots in der Produktion zu identifizieren. In Abschnitt 2.2.4 wurden verschiedene Methoden vorgestellt, die für diese Hotspot-Analyse eingesetzt werden können. Diese Methoden variieren sowohl im Aufwand, was bspw. die Anzahl notwendiger Messungen angeht, als auch im Nutzen, bspw. im Bezug zu den betrachteten Ressourcen. Welche Hotspot-Analysemethode in der Lernfabrik geschult werden soll, beeinflusst deswegen maßgeblich die resultierenden Teilkompetenzen, die zur Anwendung der Methoden notwendig sind, und damit auch die resultierenden Anforderungen an die Lernumgebung. Aus diesem Grund wird im Folgenden ein Vergleichstool entwickelt, welches Lernfabrik-Betreiber*innen in der Auswahl einer oder mehrere Hotspot-Analysemethoden für ihre jeweilige Lernfabrik unterstützt.

4.3.1 Aufbau und Grundprinzipien der Bewertung

In dem Tool werden die Hotspot-Analysemethoden, vorgestellt in Abschnitt 2.2.4, systematisch miteinander verglichen. Das Vorgehen für die Entwicklung und Anwendung des Vergleichstools ist in Abbildung 4-3 dargestellt. Für die Entwicklung werden zunächst grundlegende Prinzipien für die Bewertung der Methoden festgelegt. Das beinhaltet die Erkenntnis, dass die Methoden nicht nur anhand eines Kriteriums verglichen werden können. Stattdessen wird für die Bewertung ein multikriterielles Bewertungssystem gewählt. Zudem wird eine normierte Skala, die Visualisierung über Harvey Balls

und die Einführung von Gewichtungsfaktoren gewählt, um die Bewertung auf diverse Produktionsumgebungen übertragbar zu machen.

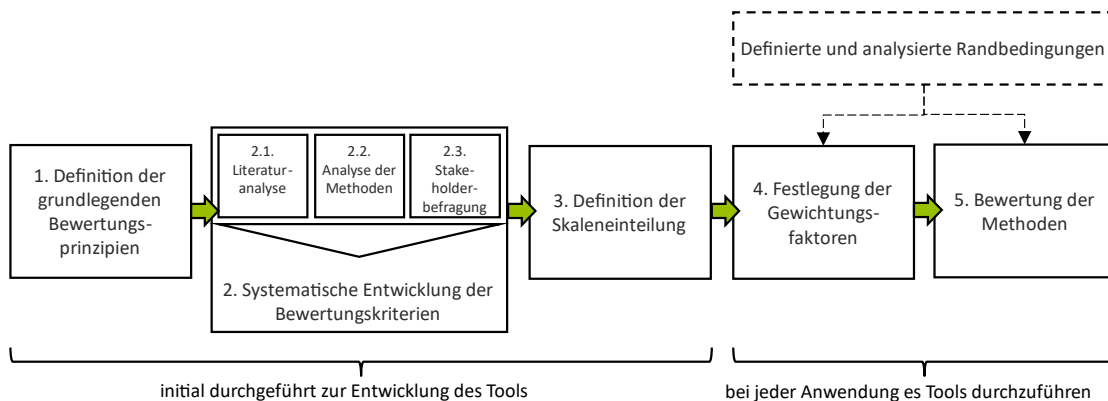


Abbildung 4-3: Vorgehen bei der Durchführung des Methodenvergleichs, eigene Darstellung in Anlehnung an Weyand et al. (2023b)

4.3.2 Entwicklung der Bewertungskriterien

Die Bewertungskriterien werden in drei Teilschritten systematisch entwickelt. Zunächst wird eine Literaturliteraturanalyse durchgeführt, um Bewertungskriterien zu identifizieren, die in ähnlichen Vergleichen Anwendung gefunden haben. Bisherige Veröffentlichungen zum Vergleich von ressourcenbezogenen Methoden fokussieren sich auf Methoden zum Thema Energie (bspw. in Li et al., 2017) oder adressieren grundlegendere Konzepte anstelle spezifischer Methoden (bspw. in C. Schmidt et al., 2015). Außerdem werden Methodenvergleiche in der Regel zur Identifikation von Forschungslücken zu Beginn von Veröffentlichungen genutzt und dort nur oberflächlich beschrieben (bspw. in Weyand et al., 2021a). Woher die Bewertungskriterien stammen oder wie die Bewertung in diesen Kriterien konkret zu Stande kommt wird nicht ausgeführt. Dennoch sind die in der Literatur gefundenen Vergleiche hilfreich, um mögliche Kriterien zu identifizieren, die sich auch für die Bewertung von Hotspot-Analysemethoden mit Bezug zu Ressourceneffizienz eignen. Darunter fällt bspw. das Kriterium, welche Ressourcen von der Analysemethode betrachtet werden, oder der Aufwand, wobei hier keine Aufschlüsselung vorliegt, wie sich dieser zusammensetzt.

Der zweite Teilschritt zur Ermittlung von Bewertungskriterien ist die detaillierte Analyse der Methoden hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile. Auch hierzu kommen Quellen aus der Literatur zum Einsatz, in Bezug zur Ökobilanz bspw. Cerdas et al. (2017) und Ortmeier et al. (2021). Hauptsächlich ergeben sich die Vor- und Nachteile aber aus den Beschreibungen der Methoden, die entsprechenden Quellen sind in Abschnitt 2.2.4 aufgeführt. Die Hotspot-Analysemethoden betrachten bspw. unterschiedliche Lebenszyklusphasen. Während die Ökobilanz, wenn nicht weiter eingeschränkt, den kompletten Lebenszyklus eines Produktes analysiert, wird mit der ABC-Analyse für Anschlussleistungen lediglich die Phase der Produktion bewertet. Aus diesem Grund wird

unter anderem die betrachtete Lebenszyklusphase als Kriterium für die Bewertung aufgenommen.

Im letzten Teilschritt wird ein initial aufgestelltes Kriterien-Set mit Expert*innen besprochen. Diese Expert*innen-Befragung fand im Rahmen des Forschungsprojektes Reopify (PTW, 2021) statt. Als Expert*innen werden Mitarbeiter*innen aus der Industrie, Ressourceneffizienz-Expert*innen, aber auch Lernfabrik-Betreiber*innen befragt. Die meisten der Kriterien wurden bestätigt, kleinere Anmerkungen wurden eingearbeitet. Die Lernfabrik-Betreiber*innen bspw. schlugen vor, die Zeit zum Erlernen der Methoden als Kriterium mit aufzunehmen, da dies bei der Erstellung des Lernfabrik-Curriculums von Relevanz sein kann.

Grundsätzlich werden die Kriterien unterteilt nach Aufwand-bezogenen und Nutzen-bezogenen Kriterien. Der Aufwand wird unterteilt in den Aufwand bezüglich Zeit und den Aufwand bezüglich Kosten. Zeit ist einerseits notwendig für die Durchführung der Methode im Unternehmen, andererseits wie gerade erwähnt zum initialen Erlernen der Methode in der Lernfabrik. Hier zeigt sich auch die Relevanz der zuvor ermittelten Randbedingungen: der Zeitaufwand zum Erlernen der Methoden kann variieren, wenn bei der adressierten Zielgruppe initiale Kompetenzen vorausgesetzt werden können. Das ist bspw. bei der Energiewertstrommethode der Fall, die auf der klassischen Wertstrommethode basiert. Sind die Workshopteilnehmer*innen bereits mit der klassischen Wertstrommethode vertraut, reduziert sich der Zeitaufwand zum Erlernen der Energiewertstrommethode. Gleiches gilt bei Methoden, bei denen für die Durchführung Ressourcenmessungen notwendig sind. Ist die adressierte Zielgruppe damit nicht vertraut, sollte zusätzliche Zeit eingeplant werden, um Kompetenzen zu Ressourcenmessungen zu vermitteln.

Das Kriterium der Kosten wird unterteilt in Kosten für die Datenaufnahme, was bspw. Sensorik beinhaltet, und Kosten für Berechnung und Validierung. Letzteres tritt bspw. auf, wenn Umweltwirkungen in Methoden wie der Ökobilanz oder der CO₂-Bilanz in kg CO₂-Äquivalenten quantifiziert werden sollen. Dafür können kostenpflichtige Datenbanken genutzt werden, in denen für diverse Rohmaterialien die entsprechenden Umweltwirkungen zu finden sind. Ein anderer Fall, in dem Kosten für die Berechnung und Visualisierung entstehen, ist bspw. bei der Materialflusskostenrechnung, bei der die Ergebnisse üblicherweise mit entsprechender Software als Sankey-Diagramm dargestellt werden. Auch bei der Bewertung der Kosten-bezogenen Kriterien ist von Relevanz, welche Voraussetzungen in der jeweiligen Lernfabrik bzw. den adressierten Zielgruppen vorhanden sind. Besteht bspw. schon Zugang zu einer Ökobilanz-Datenbank, kann dieser Kostenpunkt vernachlässigt werden. Grundlegende Berechnungssoftware wie MS Excel© wird als vorhanden angenommen und nicht für die Bewertung berücksichtigt.

Die Nutzen-bezogenen Kriterien werden in fünf übergeordnete Themen eingeteilt. Zunächst können die Methoden dahingehend verglichen werden, welche Lebenszyklusphasen eines Produktes (vgl. Cao & Folan, 2012) damit betrachtet werden. Entsprechend dem Fokus von Lernfabriken und der darauf basierenden Auswahl von Hotspot-Analysemethoden aus dem Methodenkatalog adressieren alle betrachteten Methoden die Lebenszyklusphase der Produktion. Einige Methoden beziehen darüber hinaus allerdings auch Phasen wie die Produktentwicklung, die Nutzungsphase oder das Recycling mit ein. Da die Produktentwicklung maßgeblich die Menge des verwendeten Rohmaterials beeinflusst, adressiert in der folgenden Bewertung eine Analysemethode dann die Phase der Produktentwicklung, wenn dabei die Menge des eingesetzten Rohmaterials betrachtet wird.

Eine weitere, Nutzen-bezogene Kategorie ist die der betrachteten Ressourcen, wobei hierfür zwischen elektrischer Energie, thermischer Energie und dem Materialbedarf unterschieden wird. Ob und in welcher Einheit eine Quantifizierung der Analyseergebnisse bei den jeweiligen Methoden inbegriffen ist, wird in der dritten Kategorie bewertet. Neben Energie- und Massebezogenen Einheiten stehen hierfür auch kg CO₂-Äquivalente und andere Umweltwirkungsindikatoren zur Auswahl (vgl. Abschnitt 2.2.4). Grundsätzlich kann die Quantifizierung ein entscheidendes Kriterium beim Vergleich von Hotspot-Analysemethoden darstellen, da aufbauend auf den Hotspots Ressourceneffizienzmaßnahmen identifiziert und priorisiert werden. Wenn für die Priorisierung schon Vergleichswerte durch Messungen vorliegen, weil diese bereits bei der Hotspot-Analyse erhoben werden, stellt das einen Vorteil dar. Es ist aber auch denkbar, dass Hotspots ohne Quantifizierung identifiziert werden und im Anschluss nur für diese Hotspots Messungen für die Priorisierung von Ressourceneffizienzmaßnahmen stattfinden.

Ein weiteres Kriterium stellt die Berücksichtigung der Nutzungsdauer der Maschinen in der Prozesskette dar. Damit wird insbesondere bei den Methoden, die ohne Messungen Hotspots analysieren, nochmal eine Abstufung hinsichtlich der potenziellen Genauigkeit ermöglicht. Abschließend wird bewertet, ob finanzielle Aspekte berücksichtigt werden, also ob mit der jeweiligen Hotspot-Analysemethode auch direkt Kosten mit analysiert werden. Tabelle 4-1 stellt die beschriebenen Kriterien in einer Übersicht, unterteilt nach Aufwand-bezogenen und Nutzen-bezogenen Kriterien dar.

Tabelle 4-1: Übersicht über die aufgestellten Bewertungskategorien, übergeordnete Kategorien fett gedruckt

Aufwand-bezogene Kriterien	Nutzen-bezogene Kriterien
<p>Zeitaufwand</p> <ul style="list-style-type: none"> • für die Durchführung • für das initiale Erlernen 	<p>Betrachtete Lebenszyklusphasen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produktion • Produktentwicklung • weitere Lebenszyklusphasen
<p>Kosten</p> <ul style="list-style-type: none"> • für die Datenaufnahme • für Berechnung und Visualisierung 	<p>Betrachtete Ressourcen</p> <ul style="list-style-type: none"> • elektrische Energie • thermische Energie • Materialbedarf
	<p>Quantifizierung</p> <ul style="list-style-type: none"> • in kWh • in kg • in kg CO₂-Äquivalenten • in anderen Wirkungsindikatoren
	<p>Berücksichtigung der Nutzungsdauer der Maschinen</p>
	<p>Berücksichtigung finanzieller Aspekte</p>

4.3.3 Definition der Skaleneinteilung

Nachdem die Bewertungskriterien definiert sind, gilt es im nächsten Schritt, die Skaleneinteilung festzulegen und zu ermitteln, welche Bewertung die Methoden erhalten. Um das zu ermöglichen, wurden alle Methoden einmal in der Lernfabrik für Energieproduktivität (LEP) angewendet, die Teil der ETA-Fabrik an der TU Darmstadt ist (Abele et al., 2016). In dieser Produktionslinie wird in fünf Produktionsschritten ein Getriebegehäuse hergestellt, wobei unter anderem eine Drehmaschine, ein Banddurchlaufofen und Roboter zum Transport eingesetzt werden. Zudem wird die Versorgung der Anlagen mit Druckluft, zentral erzeugt durch Druckluftkompressoren, mit betrachtet. Während die Bewertung in den Nutzen-bezogenen Kriterien lediglich von den Methoden selbst abhängig ist, kann der Aufwand je nach Produktionslinie variieren. Die Variationen werden durch diverse Voraussetzungen bedingt, die in anderen Produktionslinien bzw. Lernfabriken vorhanden sein könnten. Im Folgenden wird das für die LEP berücksichtigte Basissetting beschrieben und jeweils erläutert, wo Variationen auftreten können und welchen Einfluss das auf die Ergebnisse innerhalb der Kriterien für die Methoden hat. Die Ergebnisse, die sich bei der Anwendung in der LEP ergeben haben, sind in abgebildet. Das Basissetting ist bei alternativen Werten jeweils fett markiert.

Zeitaufwand für Durchführung

Im Basissetting wird davon ausgegangen, dass die Sensoren, die bei einigen Methoden für Messungen benötigt werden, nicht installiert sind. Dadurch ergibt sich eine Variation im Zeitaufwand, der für die Durchführung der Methoden benötigt wird. Für die LEP bedeutet dies in der Durchführung einen zusätzlichen Zeitaufwand von ca. 4–5 Tagen, je nach Anzahl der zu implementierenden Sensoren (nur Strom oder zusätzlich auch Sensoren für Druckluft). Sind die Sensoren bereits implementiert, reduziert sich der Zeitaufwand für die Durchführung entsprechend für die Methoden, bei denen Messungen erforderlich sind. Damit ergeben sich konkret alternative Werte für die Ökobilanz, CO₂-Bilanz, Materialflusskostenrechnung und den kumulierten Rohstoffaufwand (jeweils –5 Tage) sowie für die Energiewertstrommethode und den kumulierten Energieaufwand (jeweils –4 Tage, weil hier nur Strommessungen notwendig sind).

Zeitaufwand für das initiale Erlernen

Bezüglich des Zeitaufwandes, der für das initiale Erlernen der jeweiligen Methoden notwendig ist, können die vorhandenen Kompetenzen der Zielgruppe einen großen Einfluss auf die Bewertungsergebnisse haben. Für das Basissetting in der LEP wurde die Zielgruppe als Mitarbeiter*innen aus der Industrie festgelegt, die mit der Produktion, aber nicht mit dem Thema Ressourceneffizienz vertraut sind. Wie in Absatz 2.2.4 erwähnt, basiert die Energiewertstrommethode auf der konventionellen WSM. Es wird deswegen angenommen, dass Teilnehmer*innen, die bereits mit der WSM vertraut sind, weniger Zeit benötigen, um die Kompetenzen zu erlernen, die zur Anwendung der Energiewertstrommethode erforderlich sind. Im Basissetting der LEP ist die Zielgruppe nicht mit der WSM vertraut und benötigt daher etwa 2 Tage, um die Energiewertstrommethode zu erlernen. Ein weiterer Punkt bei diesem Kriterium sind die Kompetenzen, die zur Durchführung von Ressourcenmessungen erforderlich sind. Wenn die Zielgruppe nicht über diese Kompetenzen verfügt, aber im Unternehmen selbst für die Messungen verantwortlich wäre (und bspw. nicht Personal aus dem Energiemanagement zu Rate ziehen kann), wird ein zusätzlicher Tag für die Schulung messtechnischer Kompetenzen angenommen.

Alternativen ergeben sich damit für die Ökobilanz, CO₂-Bilanz, Materialflusskostenrechnung, Energiewertstrommethode, den kumulierten Energieaufwand und den kumulierten Rohstoffaufwand (jeweils +1 Tag), um Kompetenzen in Bezug auf Ressourcenmessungen zu vermitteln, und für die Energiewertstrommethode (–1 Tag), wenn die klassische WSM bereits bekannt ist.

Kosten für die Datenaufnahme

Analog zum Zeitaufwand für die Durchführung wird auch bei den Kosten für die Datenerfassung das Basissetting der LEP zu Grunde gelegt, bei dem noch keine Sensoren installiert sind. Die Kosten für die Implementierung von Sensoren variiert je nach Anbieter und Anzahl der benötigten Sensoren. Neben den Sensoren selbst werden unter Umständen zusätzliche Geräte wie Buskoppler und Messkarten benötigt, um die Sensordaten bspw. in einem Energiemonitoringsystem auszulesen. Die Aufschlüsselung der Kostenpunkte in der LEP befindet sich im Anhang A-6, die Zahlen basieren auf Angeboten, die im Rahmen vergangener Projekte der ETA-Forschungsgruppe eingeholt wurden. Die Personalkosten für Mitarbeiter*innen, die die Sensoren installieren, sind in der Berechnung nicht berücksichtigt. Neben dem Basisszenario ohne installierte Sensoren werden zwei alternative Szenarien in das Bewertungssystem aufgenommen. Im ersten Szenario sind bereits Energiemessgeräte installiert, aber noch keine Sensorik für andere Ressourcen. Im zweiten alternativen Szenario sind alle benötigten Sensoren bereits installiert und eine Feinwaage u. a. zur Messung der Rohmaterialien ist vorhanden, so dass keine zusätzlichen Kosten anfallen, um die teils benötigten Daten zu erhalten. Alternative Werte ergeben sich damit für die Ökobilanz, CO₂-Bilanz, Materialflusskostenrechnung, Energiewertstrommethode, den kumulierten Energieaufwand und kumulierten Rohstoffaufwand (die Kosten werden entsprechend reduziert oder auf null gesetzt), wenn Equipment für die Messungen bereits installiert bzw. vorhanden ist.

Kosten für Berechnung und Visualisierung

Auch für die Berechnungen und die Visualisierungen können, je nach Methode Kosten für Software entstehen. Im Falle des LEP-Basissettings betrifft dies die Methoden der Ökobilanz und CO₂-Bilanz, da für diese eine Lizenz der Ökobilanz-Datenbank ecoinvent angeschafft wird. Der Hersteller bietet eine vergünstigte Version der Datenbank, wenn lediglich GWP-Faktoren benötigt werden – was auf die CO₂-Bilanz zutrifft. Für die Materialflusskostenrechnung wird in der LEP die Software Umberto Efficiency+ (ifu, o.J.) eingesetzt und entsprechend in den Kosten berücksichtigt. Die Zahlen basieren dabei auf Angeboten aus dem Jahr 2021. Sowohl für die Berechnung als auch für die Ökobilanz stehen bspw. mit openLCA (GreenDelta, 2024), Probas (UBA, o.J.) oder für Unternehmen in Baden-Württemberg mit bw!MFCA (Umwelttechnik BW, o.J.) auch kostenlose Tools zur Verfügung, die ggf. komplexer zu bedienen sind oder nicht den gleichen Funktionsumfang aufweisen. Sollte Software zur Berechnung bzw. Visualisierung bereits in der Lernfabrik bzw. bei der Zielgruppe zugänglich sein, reduzieren sich bei den Methoden der Ökobilanz, CO₂-Bilanz, Materialflusskostenrechnung und dem kumulierten Rohstoffaufwand die Kosten dafür auf null.

Weitere Anmerkung zur Bewertung

Beim Nutzen-bezogenen Kriterium der Quantifizierung wurde nicht nur die jeweilige „Zieleinheit“ gewertet, was bei der CO₂-Bilanz bspw. kg CO₂-Äquivalente oder beim kumulierten Rohstoffaufwand Kilogramm sind. Es wurde auch berücksichtigt, dass für die Quantifizierung der kg CO₂-Äquivalente eine vorherige Erfassung der benötigten Ressourcenbedarfe in kg und kWh notwendig ist – also entsprechend die Ressourceneffizienz auch in diesen Einheiten quantifiziert wird.

Die in Tabelle 4-2 aufgelisteten Werte, die sich für die LEP in Darmstadt ergeben, werden als Ansatzpunkt genommen, um die Beziehungen zwischen den Methoden zu beschreiben. Auch wenn die genauen Werte in den Aufwand-bezogenen Kriterien von Randbedingungen wie der Anzahl der vorhandenen Produktionsmaschinen abhängen, wird angenommen, dass das Verhältnis zwischen den Aufwänden der verschiedenen Methoden auch auf andere Produktionsstätten zutrifft. Unabhängig davon, ob die untersuchten Produktionsstätten mehr oder weniger Anlagen als die LEP umfassen, wird bspw. die Ökobilanz aufgrund der erforderlichen Messungen immer einen proportional höheren Zeitaufwand für die Durchführung benötigen als die ABC-Analyse, bei der die Anschlussleistungen für die Hotspot-Analyse genutzt werden. Um diese Verhältnisse abzubilden, wird, wie bereits in Abschnitt 4.2 beschrieben, auf eine Bewertung mit Harvey-Balls zurückgegriffen. In den Aufwand-bezogenen Kriterien wird ein geringer Wert als positiv angesehen und entsprechend mit null Punkten bzw. einem leeren Kreis (○) bis zu einem Punkt bzw. einem vollen Kreis (●) bewertet. Bei den Nutzen-bezogenen Kriterien werden umgekehrt hohe Werte bzw. die Erfüllung eines Kriteriums als positiv gewertet und entsprechend eingestuft.

In Tabelle 4-3 ist die Skaleneinteilung für die Bewertung in Bezug zu den LEP-Werten dargestellt. Die Verteilung wird aus Konsistenz- und Plausibilitätsgründen linear vorgenommen, wäre aber bspw. auch logarithmisch denkbar.

Tabelle 4-2: Aufwände und Nutzen der einzelnen Methoden, angewendet in der Lernfabrik der

Kriterium	Methoden									
	LCA	CF	MFCA	Checkliste	EWSM	ABC	PM	KEA	KRA	
Zeitwand										
für die Durchführung	13/8 Tage	12/7 Tage	10/5 Tage	0,5 Tage	8/4 Tage	1 Stunde	0,5 Tage	8/4 Tage	12/7 Tage	
für das initiale Erlernen	2 Tage/ 3 Tage	1 Tag/ 2 Tage	1 Tag/ 2 Tage	1 Stunde	2 Tage/ 1 Tag/ 3 Tage	1 Stunde	1 Stunde	1 Tag/ 2 Tage	1 Tag/ 2 Tage	
Kosten										
für die Datenaufnahme	~4.235 €/810 €/0 €	~4.235 €/810 €/0 €	~4.235 €/810 €/0 €	0 €	~3.425 €/0 €	0 €	0 €	~3.425 €/0 €	~4.235 €/810 €/0 €	
für die Berechnung und Visualisierung	~4.500 €/0 €	~1.300 €/0 €	~4.500 €/0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	~4.500 €/0 €	
Betrachtete Lebenszyklusphasen										
Produktion	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Produktentwicklung	ja	ja	ja	ja	nein	nein	nein	ja	ja	ja
Weitere Lebenszyklusphasen	ja	ja	nein	ja	nein	nein	nein	ja	ja	ja
Betrachtete Ressourcen										
elektrische Energie	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
thermische Energie	ja	ja	ja	ja	nein	nein	nein	ja	ja	ja
Materialbedarf	ja	ja	ja	ja	nein	nein	nein	nein	nein	ja
Quantifizierung										
in kWh	ja	ja	ja	nein	ja	nein	nein	ja	ja	ja
in kg	ja	ja	ja	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja
in kg CO ₂ -Äquivalenten	ja	ja	ja	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
in anderen Wirkungsindikatoren	ja	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Berücksichtigung der Nutzungsdauer der Maschinen	ja	ja	ja	nein	ja	nein	ja	ja	ja	ja
Berücksichtigung finanzieller Aspekte	nein	nein	ja	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein

LCA=Ökobilanz, CF=CO₂-Bilanz, MFCA= Materialflusskostenrechnung, EWSM=Energiewertstrommethode, ABC=ABC-Analyse, PM=Portfolio-Matrix, KEA=kumulierter Energieaufwand, KRA=kumulierter Rohstoffaufwand

TU Darmstadt

Tabelle 4-3: Resultierende Skaleneinteilung für jedes Kriterium

	0 (○)	0,25 (◐)	0,5 (◑)	0,75 (◒)	1 (●)
Zeitaufwand für die Durchführung	> 12 Tage	> 9–12 Tage	> 6–9 Tage	> 6–3 Tage	0–3 Tage
Zeitaufwand für das initiale Erlernen	≥ 2 Tage	1,5– < 2 Tage	1– < 1,5 Tage	0,5 – < 1 Tag	< 0,5 Tage
Kosten für die Datenaufnahme	> 3.500 €	> 2.500–3.500 €	> 1.500–2.500 €	> 500–1.500 €	0–500 €
Kosten für die Berechnung und Visualisierung	> 4.000 €	> 3.000–4.000 €	> 2.000–3.000 €	> 1.000–2.000 €	0–1.000 €
Betrachtete Lebenszyklusphasen					
• Produktion	nein	-	-	-	ja
• Produktentwicklung	nein	-	-	-	ja
• Weitere Lebenszyklusphasen	nein	-	-	-	ja
Betrachtete Ressourcen					
• Elektrische Energie	nein	-	-	-	ja
• Thermische Energie	nein	-	-	-	ja
• Material	nein	-	-	-	ja
Quantifizierung					
• in kWh	nein	-	-	-	Ja
• in kg	nein	-	-	-	ja
• in kg CO ₂ -Äquivalenten	nein	-	-	-	ja
• in anderen Wirkungsindikatoren	nein	-	-	-	ja
Berücksichtigung der Nutzungsdauer der Maschinen	nein	-	-	-	ja
Berücksichtigung finanzieller Aspekte	nein	-	-	-	ja

4.3.4 Ermittlung der Gewichtungsfaktoren

Die Bedeutung der in Abschnitt 4.3.2 entwickelten Bewertungskriterien kann je nach Randbedingungen für die jeweilige Lernfabrik variieren. Aus diesem Grund wird eine manuell anpassbare Gewichtung in das Bewertungssystem aufgenommen. Die Gewichtungsfaktoren sollten mit den Stakeholdern der Lernfabrik diskutiert werden, um Klarheit über die Zielstellung und ggf. widersprüchliche Anforderungen an die Hotspot-

Analysemethoden zu erlangen. Eine Möglichkeit, die Gewichtung zu ermitteln, ist der Paarvergleich (David, 1963). Dabei werden alle Kriterien jeweils miteinander verglichen und bewertet, welches Kriterium wichtiger (gezählt mit 2), gleich wichtig (gezählt mit 1) oder weniger wichtig (gezählt mit 0) ist. Die Zahlen werden anschließend für jedes Kriterium aufsummiert und mit der Gesamtsumme normiert, um die Gewichtungsfaktoren für den Methodenvergleich zu bekommen. In Tabelle 4-4 ist ein Paarvergleich beispielhaft dargestellt, in dem die Stakeholder u. a. niedrige Kosten für die Datenerfassung als wichtiger erachtet haben, als andere Lebenszyklusphasen neben der Produktion zu betrachten – siehe markierte Zelle. Die Gewichtung kann alternativ auch direkt mit Zahlen, bspw. von null (nicht relevant) bis 9 (sehr relevant) eingetragen werden, was beispielhaft in Tabelle 4-5 dargestellt ist.

Tabelle 4-4: Beispielhafter Paarvergleich zur Ermittlung der Gewichtungsfaktoren, rot umrandet ist das Beispiel aus dem Text

	Zeitaufwand für die Durchführung	Zeitaufwand für das initiale Erlernen	Kosten für die Datenaufnahme	Kosten für die Berechnung und Visualisierung	Lebenszyklusphase Produktion	Lebenszyklusphase Produktentwicklung	weitere Lebenszyklusphasen	betrachtete Ressource: elektrische Energie	betrachtete Ressource: thermische Energie	betrachtete Ressource: Materialbedarf	Quantifizierung in kWh	Quantifizierung in kg	Quantifizierung in kg CO ₂ -Äquivalenten	Quantifizierung in anderen Wirkungsindikatoren	Berücksichtigung der Nutzungsdauer	Berücksichtigung finanzieller Aspekte	Summe (resultierende Gewichtung)
Zeitaufwand für die Durchführung	x	1	0	0	0	2	2	0	2	2	0	2	2	2	2	2	19
Zeitaufwand für das initiale Erlernen	1	x	0	0	0	2	2	0	2	2	0	2	2	2	2	2	19
Kosten für die Datenaufnahme	2	2	x	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	27
Kosten für Berechnung und Visualisierung	2	2	0	x	1	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	25
Lebenszyklusphase Produktion	2	2	1	1	x	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	26
Lebenszyklusphase Produktentwicklung	0	0	0	0	0	x	2	0	0	0	0	0	0	1	2	0	5
weitere Lebenszyklusphasen	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
...																	

Tabelle 4-5: Beispielhafte Gewichtung direkt mit Zahlen

Kriterium	Relevanz	Resultierende Gewichtung
Zeitaufwand für die Durchführung	hoch	6
Zeitaufwand für das initiale Erlernen	hoch	6
Kosten für die Datenaufnahme	sehr hoch	9
Kosten für die Berechnung und Visualisierung	sehr hoch	9

Lebenszyklusphase Produktion	sehr hoch	9
Lebenszyklusphase Produktentwicklung	gering	3
weitere Lebenszyklusphasen	nicht relevant	0
...

4.3.5 Ergebnis der Bewertung

Aufbauend auf der definierten Skaleneinteilung und den Ergebnissen aus der LEP lässt sich die Bewertung der Hotspot-Analysemethoden vornehmen. Dafür werden die jeweiligen Punkte für die einzelnen Kriterien (vgl. Tabelle 4-3) aufsummiert und normiert. Da der Aufwand mit vier Kriterien und der Nutzen mit 12 Kriterien eingeht, wird zunächst für Aufwand und Nutzen einzeln aufsummiert und normiert. Das Ergebnis unter der Annahme, dass alle Kriterien gleich wichtig sind, ist in Tabelle 4-6 abgebildet. Die Gewichtung lässt sich aber, wie beschrieben, leicht anpassen und verändern. Die entwickelte Bewertung, umgesetzt in einem Excel-basierten Vergleichstool, sensibilisiert für vorhandene Hotspot-Analysemethoden und zeigt deren Vor- und Nachteile auf. Auch wenn die Kriterien der Lebenszyklusphase Produktion und der betrachteten Ressource Energie von allen Methoden erfüllt wird, werden diese Kriterien dennoch im Vergleichstool belassen. Auf diese Weise können perspektivisch auch weitere Methoden in die Bewertung aufgenommen und ganzheitlich eingeordnet werden, die diese Kriterien ggf. nicht erfüllen, aber dennoch Ressourceneffizienz adressieren. Grundsätzlich ist die Punktzahl, die sich am Ende für die einzelnen Methoden ergibt, als Grundlage für weitere Diskussionen zu verstehen, nicht als finale Vorgabe. Dabei hilft, dass die Bewertung für jede Methode transparent einsehbar ist und wie erläutert je nach Randbedingungen auch Änderungen an dieser Bewertung möglich sind.

Tabelle 4-6: Bewertung der Hotspot-Analysemethoden bei gleicher Gewichtung der Kriterien, grau: Felder in denen Gewichtungen einzutragen oder Randbedingungen zu berücksichtigen sind, grün: (Zwischen-)Ergebnisse

Kriterium	Gewichtung	Methoden									
		LCA	CF	MFCA	Checkliste	EWSM	ABC	PM	KEA	KRA	
Aufwand	Zeitlicher Aufwand für die Durchführung	○	◐	◐	●	◐	●	●	◐	◐	
	Zeitlicher Aufwand für das initiale Erlernen	○	◐	◐	●	○	●	●	◐	◐	
	Kosten für die Datenaufnahme	○	○	○	●	◐	●	●	◐	○	
	Kosten für die Berechnung und Visualisierung	○	◐	○	●	●	●	●	●	○	
Bewertung Aufwand (50%)	4	0,00	0,38	0,19	1,00	0,44	1,00	0,94	0,56	0,19	
Nutzen	Betrachtete Lebenszyklusphase(n) Produktion	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	Betrachtete Lebenszyklusphase(n) Produktentwicklung	●	●	●	●	○	○	○	●	●	
	Betrachtete Lebenszyklusphase(n) andere Lebenszyklusphasen	●	●	●	●	○	○	○	●	●	
	Betrachtete Umweltwirkung(en) elektrische Energie	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	Betrachtete Umweltwirkung(en) thermische Energie	●	●	●	●	○	○	○	●	●	
	Betrachtete Umweltwirkung(en) Material	●	●	●	●	○	○	○	○	●	
	Quantifizierung in kWh	●	●	●	○	●	○	○	●	●	
	Quantifizierung in kg	●	●	●	○	○	○	○	○	●	
	Quantifizierung in kg CO ₂ -Äquivalenten	●	●	○	○	○	○	○	○	○	
	Quantifizierung in anderen Wirkungsindikatoren	●	○	○	○	○	○	○	○	○	
	Berücksichtigung der Nutzungsdauer	○	●	●	○	●	○	●	●	●	
	Berücksichtigung finanzieller Aspekte	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Bewertung Nutzen (50%)	12	0,83	0,75	0,75	0,42	0,33	0,17	0,25	0,50	0,67	
Gesamtbewertung (100%)		0,42	0,56	0,47	0,71	0,39	0,58	0,59	0,53	0,43	

LCA=Ökobilanz, CF=CO₂-Bilanz, MFCA= Materialflusskostenrechnung, EWSM=Energiewertstrommethode, ABC=ABC-Analyse, PM=Portfolio-Matrix, KEA=kumulierter Energieaufwand, KRA=kumulierter Rohstoffaufwand

4.4 Schritt 3: Auswahl der Ressourceneffizienzmaßnahmen

Nachdem mit Hilfe des Vergleichstools eine passende Hotspot-Analysemethode für die jeweilige Lernfabrik gefunden wurde, kann diese auf die jeweilige Prozesskette angewendet und die entsprechenden Hotspots identifiziert werden. Neben der Schulung von Kompetenzen zur Anwendung von Hotspot-Analysemethoden können Lernfabriken bei der Sensibilisierung hinsichtlich möglicher Ressourceneffizienzmaßnahmen einen Mehrwert bieten. Dabei müssen in Lernfabriken nicht nur für die Hotspots Maßnahmen gezeigt werden – wie es in der Industrie ein logisches Vorgehen ist (vgl. . Das beschriebene Vorgehen ist in Abbildung 2-10 grafisch dargestellt.

). Auch Maßnahmen, die nicht zwingend die Hotspots adressieren, können für Workshopteilnehmer*innen bzw. deren jeweilige Produktionsumgebung Potenzial zur Steigerung der Ressourceneffizienz haben.

Im dritten Schritt der Methodik zur Erweiterung von Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz gilt es deshalb, Ressourceneffizienzmaßnahmen auszuwählen, die in der Lernfabrik gezeigt werden sollen. Wie in Abschnitt 2.2.5 ausgeführt, existieren für die Auswahl von Ressourceneffizienzmaßnahmen bereits diverse Maßnahmenkataloge. Dabei werden die darin enthaltenen Ressourceneffizienzmaßnahmen nach verschiedenen Kategorien aufgeführt. Tabelle 4-7 stellt einen beispielhaften Auszug vorhandener Kategorien dar, die in Maßnahmenkatalogen zum Einsatz kommen. Insgesamt werden auf Basis der Literatur 40 verschiedenen Kategorien identifiziert, die in Anhang A-2 aufgeführt sind. Unter diesen Kategorien ist bspw. der Anwendungsbereich, die einflussnehmenden Akteur*innen oder die Implementierungskosten der Maßnahmen.

Tabelle 4-7: Übersicht über bestehende Kategorien zur Einteilung von Ressourceneffizienzmaßnahmen und Fabrikelementen

	Fraunhofer IPA 2015	Trianni et al. 2014	VDI ZRE o. J.c	Kreß und Metternich 2021
Kategorien	Fertigungsverfahren (bspw. Umformen, Zerspanen, Beschichten)	Eingesparte Energiemenge	Einflussnehmende Akteur*innen	Integrierbarkeit von Verschwendung
		Emissionseinsparung		Realitätsnähe
	Stellhebel (bspw. Emissionen, Energie, Material)	Einfachheit der Implementierung	Lebenszyklusphase, in der die Einsparung auftritt	Veränderbarkeit
		Amortisationszeit		Vorbereitungsaufwand
	Prozess(schritt)	Implementierungskosten	Basis (Produkt oder Produktion)	Aktualität
	

Neben diesen Kategorien bestehender Maßnahmenkataloge sind bei der Auswahl von Ressourceneffizienzmaßnahmen für Lernfabriken zusätzliche Kategorien zu berücksichtigen. Kreß und Metternich (2021) stellen in ihrer Veröffentlichung 13 Kategorien zur Auswahl von Fabrikelementen für Lernfabriken vor, zu denen bspw. Mobilität oder Aktualität zählt. Tabelle 4-7 führt beispielhafte Kategorien in der rechten Spalte auf. Die vollständige Liste dieser Lernfabrik-spezifischen Kategorien ist ebenfalls in Anhang A-2 zu finden.

Um den Auswahlprozess von passenden Ressourceneffizienzmaßnahmen für Lernfabrikbetreiber*innen so einfach wie möglich zu halten und dennoch eine geeignete Unterscheidung zwischen den Maßnahmen aufzuzeigen, werden die insgesamt 53 Kategorien reduziert. Die Anforderungen an diesen Reduktionsprozess sowie das Ergebnis sind in Abbildung 4-4 grafisch dargestellt.

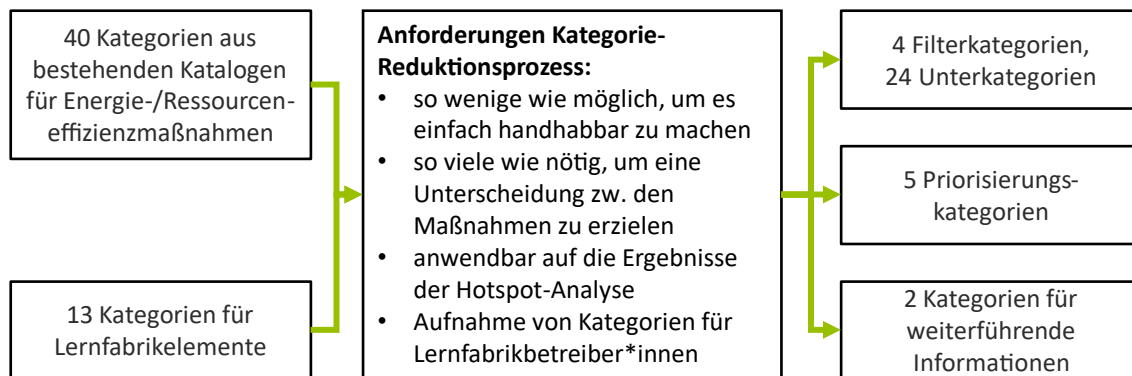


Abbildung 4-4: Prozess zur Auswahl der Kategorien für Ressourceneffizienzmaßnahmen, eigene Darstellung in Anlehnung an Weyand et al. (2023c)

Filterkategorien

Die ausgewählten vier Kriterien, die zur Filterung der Ressourceneffizienzmaßnahmen genutzt werden, werden auf Basis der Ergebnisse der Hotspot-Analyse ausgewählt. Als Hotspots ergeben sich bei den betrachteten Hotspot-Analysemethoden entweder bestimmte Ressourcen oder Prozessschritte bzw. Anlagen. Aus diesem Grund werden „Eingesparte Ressourcen“ und „Bereich/Maschine/Anlage“ als Kategorien aufgenommen. Unterteilt wird die Kategorie der eingesparten Ressourcen nach elektrischer und thermischer Energie, Druckluft, Rohmaterial sowie Hilfs- und Betriebsstoffe. Je nach Systemgrenze wird Druckluft und thermische Energie auch zu elektrischer Energie als „Basisressource“ gezählt, da bspw. Strom im Kompressor eingesetzt wird, um Druckluft zu erzeugen. Bei der Betrachtung einer Produktionslinie mit externem Kompressor und/oder Wärmeerzeugung werden die Ressourcen allerdings separat als Input erfasst, weswegen sie hier dennoch als Unterkategorien aufgeführt werden.

Eine weitere Filterkategorie ist die Verantwortlichkeit, also wer in Unternehmen für die Umsetzung der jeweiligen Ressourceneffizienzmaßnahme verantwortlich ist. Dies kann in Unternehmen unterschiedlich geregelt sein, die initiale Einteilung gibt aber dennoch eine Orientierung für Lernfabrikbetreiber*innen, um Maßnahmen auszuwählen, für die die jeweilige Zielgruppe auch tatsächlich zuständig ist. Andernfalls könnten die Workshop-Teilnehmer*innen demotiviert sein, wenn lediglich Maßnahmen gezeigt werden, die sie selbst gar nicht umsetzen könnten. Da der Schwerpunkt in Lernfabriken auf der Produktion liegt, wird die Verantwortlichkeit der Produktion weiter unterteilt in Produktionsmanagement, Fachvorgesetzte und Facharbeitende.

Auch die vierte Filterkategorie adressiert verschiedene Zielgruppen in Unternehmen bzw. Lernfabriken, in dem die Ressourceneffizienzmaßnahmen dahingehend eingeordnet werden, welche Lebenszyklusphase adressiert wird.

Grundsätzlich können bei der Nutzung des Maßnahmenkatalogs mehrere Unterkategorien ausgewählt werden. Tabelle 4-8 stellt einen Auszug aus dem Maßnahmenkatalog mit Fokus auf den Filterkategorien dar.

Tabelle 4-8: Auszug aus dem Katalog für Ressourceneffizienzmaßnahmen (Filterkategorien)

Kategorie	Eingesparte Ressource				Bereich/Maschine/Anlage								Verantwortlichkeit				Lebensphase der Einsparung				
	Elektrische Energie	Thermische Energie	Druckluft	Rohmaterial	Hilfs- und Betriebsstoffe	Werkzeugmaschine	Reinigungsmaschine	Montage	Wärmebehandlung	Handling/Transport/Logistik	TGA		Produktentwicklung	Einkauf	Produktion		Materialgewinnung	Produktion	Vertrieb	Nutzung	Entsorgung und Recycling
Maßnahme																					
Reduktion der Reinigungsmittelkonzentration					x	x										x	x		x		
Nutzung der Abwärme für Prozesse, die Wärme benötigen		x				x	x		x						x	x			x		
Einsatz von Antrieben hoher Effizienzklassen	x					x	x	x				x				x			x		
Isolierung von Wärmequellen, Leitungen und Wärme-verbrauchern		x					x		x							x			x		
Vermeidung von nicht benötigten Aufbereitungs-einheiten im Druckluftsystem			x									x			x	x			x		
...																					

Priorisierungskategorien

Neben den vier Filterkategorien, mit denen die Ressourceneffizienzmaßnahmen gefiltert werden können, enthält der Maßnahmenkatalog zudem fünf Priorisierungskategorien. Die ersten beiden sind das Einsparpotenzial sowie der Implementierungsaufwand der jeweiligen Maßnahme. Diese beiden Kategorien werden in bestehenden Katalogen auch als Amortisationszeit zusammengefasst. Die getrennte Aufführung ermöglicht für Lernfabrik-Betreiber*innen allerdings eine bessere Transparenz hinsichtlich benötigtem Budget bzw. Zeitaufwand (zusammengefasst im Implementierungsaufwand) im Verhältnis zum Nutzen (angegeben als Einsparpotenzial). Sind keine genauen Randbedingungen der Zielgruppe hinsichtlich bspw. finanziellen Mitteln zur Umsetzung von Ressourceneffizienzmaßnahmen bekannt oder variieren diese, empfiehlt sich die Implementierung von Maßnahmen mit unterschiedlichem Aufwand in der Lernfabrik, um hier für die Vielfalt zu sensibilisieren. Genaue Werte für die Priorisierungskategorien des Implementierungsaufwandes und des Einsparpotenzials sind entweder in der Literatur häufig nicht verfügbar oder beziehen sich auf konkrete Anwendungsfälle (wie bspw. in Abele et al., 2018) und sind daher nicht allgemein übertragbar. Aus diesem Grund erfolgt die Bewertung in allen Kategorien lediglich qualitativ durch Schätzungen von Expert*innen. Die verfügbaren Informationen, wo vorhanden, werden allerdings in den beiden Informationskategorien des Maßnahmenkatalogs aufgeführt.

Abgesehen von diesen beiden ersten Priorisierungskategorien, die auch für die Industrie von Relevanz sind, werden drei weitere Priorisierungskategorien aufgenommen, die speziell die Anforderungen von Lernfabriken berücksichtigen. Die erste Kategorie ist zusätzlicher Platzbedarf. Ob für die Veranschaulichung einer Maßnahme zusätzlicher Platz benötigt wird, ist für Lernfabriken von besonderer Relevanz. Zwar kann auch im industriellen Umfeld Platzmangel ein Hindernis bspw. bei der Anschaffung neuer, größerer Aggregate darstellen. Im Lernfabrik-Umfeld entsteht der zusätzliche Platzbedarf aber ggf. überhaupt erst dadurch, dass für die Veranschaulichung einer Maßnahme redundante Elemente (einmal effizient, einmal ineffizient) notwendig sind. Unterschieden wird dabei zwischen Maßnahmen, die einen hohen Platzbedarf für die Veranschaulichung haben, Maßnahmen, die wenig zusätzlichen Platz benötigen und Maßnahmen, die keinen weiteren Platz beanspruchen. Anzumerken ist hierbei, dass die Bewertung der Maßnahmen insbesondere in dieser Kategorie von den initialen Gegebenheiten in der jeweiligen Lernfabrik abhängig ist. Je nach Ausgangssituation in der Lernfabrik kann es bspw. notwendig sein, bewusst ineffizientere Elemente zur Veranschaulichung der Maßnahme zu installieren oder vorzuhalten. So ist es möglich, dass eine Maßnahme im Lernfabrikumfeld Platz benötigt, obwohl im industriellen Umfeld bei der Umsetzung sogar Platzbedarf reduziert werden könnte. Als Beispiel sei hier der Einsatz eines zentralen, effizienten Kompressors im Vergleich zu ineffizienten, dezentralen Kompressoren genannt. Bei der Bewertung dieser Kategorie kann nicht berücksichtigt werden, ob der Platzbedarf tatsächlich zusätzlich notwendig wird, da dies von der Ausgangssituation in der jeweiligen Lernfabrik abhängig ist. Hier ist die Bewertung deswegen als Orientierung zu sehen, die es individuell zu prüfen gilt. Dem wird im Katalog dadurch Rechnung getragen, dass die Kategorie als Priorisierungskategorie auftaucht – nicht als Filterkategorie. Somit werden die entsprechenden Maßnahmen dennoch aufgeführt, nur ggf. niedriger priorisiert und damit weiter hinten in der Auflistung zu finden.

Die vierte Priorisierungskategorie ist die Sichtbarkeit in Lernfabriken, das heißt ob eine Maßnahme von außen für Workshopteilnehmer*innen sichtbar ist. Die Maßnahme des Einsatzes von effizienten Motoren ist zwar hinsichtlich Einsparpotenzial und Umsetzungsaufwand für die Industrie relevant, in einer Lernfabrik jedoch nicht sichtbar, da die Motoren in den Anlagen verbaut sind, und dadurch weniger gut zur Inspiration der Teilnehmer*innen geeignet. Maßnahmen, die nicht von außen sichtbar sind, können zwar trotzdem mit Modellen oder Demonstratoren gezeigt werden, büßen dadurch aber an Realitätsnähe ein, was den Transfer der Maßnahme beeinträchtigen kann (U. Wagner et al., 2014). Die letzte Priorisierungskategorie ist der Umbauaufwand, der bei der entsprechenden Maßnahme notwendig ist, um den effizienten im Vergleich zum ineffizienten Zustand darzustellen.

Den Bewertungen der Priorisierungskategorien werden jeweils Punktzahlen zugeordnet. Tabelle 4-9 stellt einen Auszug aus dem Maßnahmenkatalog für die

Priorisierungskategorien dar. In der Spalte rechts ist die resultierende Gesamtbewertung als Punktzahl angegeben. Tabelle 4-10 gibt einen Überblick, wie die Lernfabrik-spezifischen Priorisierungskategorien bewertet werden.

Tabelle 4-9: Auszug aus dem Katalog für Ressourceneffizienzmaßnahmen (Priorisierungskategorien)

Kategorie Maßnahme	Einsparpotenzial	Implementierungsaufwand	Zusätzlicher Platzbedarf	Sichtbarkeit in der Lernfabrik	Umbauaufwand in der Lernfabrik	Priorisierung
Reduktion der Reinigungsmittelkonzentration	niedrig	niedrig	keiner	ja	nicht möglich	6
Nutzung der Abwärme für Prozesse, die Wärme benötigen	hoch	hoch	viel	ja	nicht möglich	4
Einsatz von Antrieben hoher Effizienzklassen	mittel	mittel	viel	mit Modell	nicht möglich	2
Isolierung von Wärmequellen, Leitungen und Wärmeverbrauchern	mittel	niedrig	wenig	ja	gering	8
Vermeidung von nicht benötigten Aufbereitungseinheiten im Druckluftsystem	mittel	mittel	wenig	ja	nicht möglich	5
...						

Tabelle 4-10: Unterteilung der Bewertung für die einzelnen Priorisierungskategorien des Maßnahmenkatalogs

Bewertung (entsprechende Punktzahl)	Diese Bewertung wird vergeben, ...
Einsparpotenzial	
Niedrig (0)	...mit einer qualitativen Abschätzung auf Basis von Erfahrungswerten
Mittel (1)	
Hoch (2)	
Implementierungsaufwand	
Niedrig (0)	...mit einer qualitativen Abschätzung auf Basis von Erfahrungswerten
Mittel (1)	
Hoch (2)	

Zusätzlicher Platzbedarf in der Lernfabrik	
Hoch (0)	...wenn redundante Teile wie bspw. Produkte, Verpackungsmaterialien oder Betriebsmittel vorgehalten werden müssen. Der tatsächlich notwendige Platz für diese Teile hängt von den Gegebenheiten in der jeweiligen Lernfabrik ab.
Gering (1)	...wenn an bestehenden Anlagen oder vorhandener Infrastruktur lediglich kleinere „Anbauten“ gemacht werden müssen, wie bspw. Sensorik oder Dämmmaterial.
Keiner (2)	...wenn gar kein Platz zur Veranschaulichung der Maßnahme notwendig ist.
Sichtbarkeit in der Lernfabrik	
Sichtbar von außen (2)	...wenn die Maßnahme von außen für die Teilnehmer*innen ersichtlich ist
Sichtbar nur mit Modell (0)	...wenn die Maßnahme von außen für die Teilnehmer*innen nicht ersichtlich ist, mit Hilfe eines Modells können dann Teile innerhalb einer Maschine oder Anlage abgebildet werden
Umbauaufwand	
Nicht möglich (0)	...wenn sich die Maßnahme ohne permanente, sichtbare Redundanz nicht veranschaulichen lässt.
Hoch (1)	...wenn zur Veranschaulichung der Maßnahme Anlagen umgeschoben/umgestellt werden müssen oder wenn größere Anlagen oder Prozessschritte hinzugefügt/entfernt werden müssen.
Gering (2)	...wenn nur kleine Zusätze an bestehenden Anlagen oder Elementen hinzugefügt/entfernt werden müssen, die sich, wenn nicht in Gebrauch, gut außerhalb des Sichtfeldes der Teilnehmer*innen verbergen lassen. Oder wenn zur Veranschaulichung der Maßnahme einfache Einstellungen an den Anlagen geändert werden müssen.

Weiterführende Informationen und Maßnahmentool

Neben Filter- und Priorisierungskategorien werden für jede Ressourceneffizienzmaßnahme auch zwei Kategorien befüllt, die detailliertere Informationen zu den Maßnahmen adressieren. Diese beinhalten zum einen eine Beschreibung für jede Maßnahme und führen zum anderen Quellen auf, in denen sich weiterführende Informationen bspw. zum Einsparpotenzial in bestimmten Anwendungsfällen finden lassen.

Zur vereinfachten Nutzung des Maßnahmenkatalogs wurde ein Tool programmiert, in welches der Excel-basierte Maßnahmenkatalog eingelesen und über ein anschauliches Interface genutzt werden kann. Abbildung 4-5 zeigt einen Screenshot des Maßnahmentools. Dort ist auch die Möglichkeit umgesetzt, die Priorisierungskategorien auszuwählen und zu gewichten. Die Gewichtung wirkt jeweils als Faktor, mit dem die Bewertung der jeweiligen Maßnahme in der jeweiligen Kategorie multipliziert wird. Insgesamt sind knapp 120 Ressourceneffizienzmaßnahmen im Katalog aufgeführt (Stand Januar 2024).

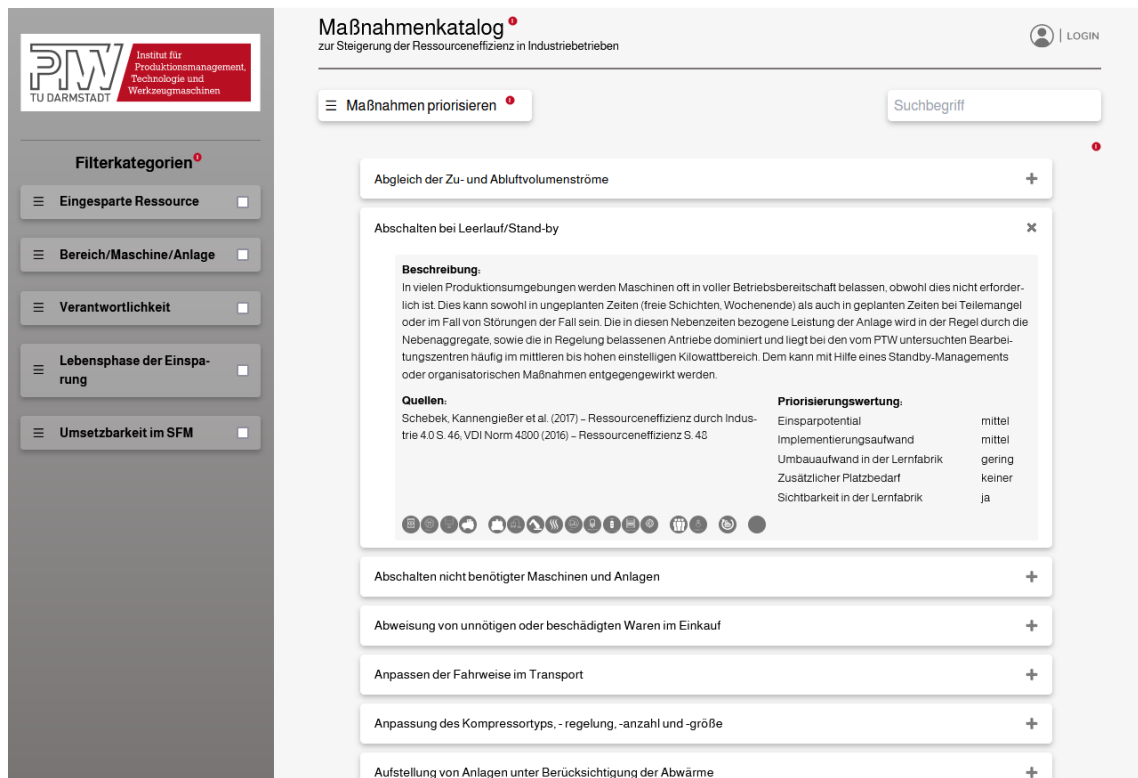


Abbildung 4-5: Screenshot des Maßmentools zur vereinfachten Nutzung des Ressourceneffizienz-Maßnahmenkatalogs

4.5 Schritt 4: Konkretisierung der intendierten Kompetenzen

Wie im Kapitel der Forschungskonzeption auf Basis des Stands der Technik dargelegt, sind die Kompetenzen zur Vermittlung von Ressourceneffizienz abhängig davon, welche Hotspot-Analysemethode geschult und welche Ressourceneffizienzmaßnahmen gezeigt werden sollen. Basierend auf den intendierten Kompetenzen können entsprechend der Kompetenztransformation nach Tisch et al. (2013) das notwendige Wissen sowie die zugehörigen Handlungen abgeleitet werden. Aus den Handlungen ergibt sich, welche Infrastruktur in Lernfabriken notwendig ist, um diese zu ermöglichen, während das Wissen in der Kompetenztafel in den Theorieeinheiten der Lernmodule vermittelt werden sollte (Tisch et al., 2013). Für die betrachteten Hotspot-Analysemethoden werden folglich auf Basis der Beschreibung Teilkompetenzen gemäß der Taxonomie nach Anderson et al. (2001) formuliert, das notwendige Wissen und die zugehörigen Handlungen abgeleitet sowie die zur Vermittlung notwendige Infrastruktur aufgeführt. Tabelle 4-11 und Tabelle 4-12 zeigt Auszüge aus den Kompetenztabellen der CO₂-Bilanz und der ABC-Analyse. Die vollständigen Tabellen zu allen betrachteten Hotspot-Analysemethoden sind in Anhang A-4 zu finden.

Tabelle 4-11: Auszug aus den erweiterten Kompetenztabellen für die CO₂-Bilanz

CO ₂ -Bilanz				
Hauptkompetenz	Subkompetenz	Zugehörige Handlungen	Wissensbasis (was, wie, warum)	Notwendige Infrastruktur in der Lernfabrik
Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, eine CO ₂ -Bilanz durchzuführen und damit Ressourceneffizienz-Hotspots zu ermitteln.	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die genutzten und relevanten Ressourcen zu identifizieren	Auflistung der genutzten Ressourcen der betrachteten Maschinen	Kenntnis über verschiedene Arten von Ressourcen, Verständnis des betrachteten Produktionsprozesses	<ul style="list-style-type: none"> Maschinen mit unterschiedlichen Ressourcen
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenzen, notwendige Ressourcenverbräuche für die CO ₂ -Bilanz zu ermitteln	Extraktion von erforderlichen Ressourcenverbrauchsdaten aus verschiedenen Quellen, beispielsweise aus dem Energiemonitoring-Tool	Wissen über notwendige Daten, Wissen über verschiedene Möglichkeiten, um diese Daten zu bekommen	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) Messstellenkonzept zur Aufnahme von Ressourcenverbrauchsdaten Implementierte Sensorik inklusive Verknüpfung zu Energiemonitoring-Tool oder vergleichbar

Tabelle 4-12: Auszug aus den erweiterten Kompetenztabellen für die ABC-Analyse

ABC-Analyse				
Hauptkompetenz	Subkompetenz	Zugehörige Handlungen	Wissensbasis (was, wie, warum)	Notwendige Infrastruktur in der Lernfabrik
Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, eine ABC-Analyse durchzuführen und damit Ressourceneffizienz-Hotspots zu ermitteln.	Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die Anschlussleistungen der Maschinen zu ermitteln	Extraktion von Anschlussleistungen bspw. von Typenschildern oder aus Datenblättern	Wissen über die Ermittlung der Anschlussleistung aus Typenschildangaben (bspw. synonyme Wörter), Verständnis des Produktionsprozesses	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) Einsehbarkeit von Typenschildern und/oder Datenblättern, alternativ Anbringung von Schildern mit der Anschlussleistung
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die Anschlussleistungen der Maschinen	Kategorisierung der Maschinen nach A, B und C	Kenntnis über ABC-Kategorisierung	<ul style="list-style-type: none"> Klemmbretter zum Schreiben und Rechnen für die Teilnehmer*innen

	miteinander ins Verhältnis zu setzen, in A, B und C Kategorien einzuteilen und darauf basierend Hotspots abzuleiten			<ul style="list-style-type: none"> Ggf. Taschenrechner für alle Teilnehmer*innen

4.6 Schritt 5: Lernmodulkonzept und technische Erweiterung

Basierend auf den konkretisierten Kompetenztabellen, die aus Schritt 4 als Ergebnis hervorgehen können zeitlich parallel zwei Schritte erfolgen: zum einen können dadurch systematisch Lernmodule entwickelt und zum anderen die Infrastruktur systematisch erweitert werden. Im Folgenden werden die beiden parallelen Schritte ausgeführt.

4.6.1 Schritt 5.1: Lernmodulkonzept

Wie bereits in Abschnitt 4.5 angedeutet, können die Kompetenztabellen als Basis dienen, um darauf basierend Lernmodule zu entwickeln. Enke et al. (2015) beschreiben in ihrer Veröffentlichung ein entsprechendes Vorgehen, in dem Teilkompetenzen ausgewählt und umgesetzt werden, um ein bestehendes Lernmodul weiterzuentwickeln. Glass (2021) formuliert auf Basis der Kompetenztransformation, die für Ressourceneffizienz in Schritt 4 erfolgt ist, die Ausgestaltung der Aktivitäten sowie die Erstellung von Praxis- und Theorieteil. Plorin et al. (2015) legen in ihrem Vorgehen zur Unterstützung der Kompetenzvermittlung besonderen Wert auf interaktive, praxisnahe Elemente in der physischen Lernfabrikumgebung, gekoppelt mit entsprechenden Reflexionen.

Zur Übertragung dieser sich stark ähnelnden Vorgehensweisen für die Lernmodulgestaltung auf das Thema Ressourceneffizienz wird der grundsätzliche empfohlene Ablauf eines jeden Lernmoduls konzipiert, der sich am Vorgehen für Ressourceneffizienz (vgl. . Das beschriebene Vorgehen ist in Abbildung 2-10 grafisch dargestellt.

und Ausführungen in Abschnitt 3.3) orientiert. Dieses Grundkonzept ist in Tabelle 4-13 dargestellt. Um den Praxisteil für jede Hotspot-Analysemethode leichter ausgestalten zu können, wird zudem für jede Methode das Grundkonzept einer Übung skizziert und mit einer Abschätzung zum zeitlichen Umfang versehen. Außerdem werden Reflexionsfragen für jede Methode formuliert, um den Teilnehmer*innen der Workshops die Vor- und Nachteile der jeweiligen Methode besser vermitteln zu können. Diese Ausführungen zu den einzelnen Hotspot-Analysemethoden befinden sich im Anhang A-7.

Tabelle 4-13: Grundkonzept für ein Lernmodul zum Thema Ressourceneffizienz

<p>Motivation und Einleitung zum Thema Ressourceneffizienz</p> <ul style="list-style-type: none"> Notwendigkeit und unterschiedliche Gründe für das Thema aufführen

Theorie- und Praxisteil Hotspotanalyse <ul style="list-style-type: none">• inklusive Vorstellung der Lernfabrik/Produktionsumgebung• inklusive kritischer Reflexion der Methode• ggf. mehrfach, wenn mehrere Methoden geschult werden sollen
Sensibilisierung für Ressourceneffizienzmaßnahmen <ul style="list-style-type: none">• Theorie und praktische Veranschaulichung• Teilnehmer*innen ggf sammeln lassen• Vorher-Nachher-Zustand zeigen
Optional: Übung zur Priorisierung und Umsetzung von Maßnahmen <ul style="list-style-type: none">• bspw. mittels Amortisationszeitrechnung• bspw. aufzeigen von Herausforderungen bei Umsetzung einzelner Maßnahmen
Abschluss der Veranstaltung <ul style="list-style-type: none">• Platz für Rückfragen und Feedback• ggf. Evaluationsbogen zur kontinuierlichen Verbesserung ausfüllen lassen

4.6.2 Schritt 5.2: Technische Erweiterung

Parallel zur Entwicklung des Lernmoduls sollte die Umsetzung der technischen Erweiterung angegangen werden. Als Basis dienen die in Schritt 4 notwendigen Infrastrukturanforderungen und die in Schritt 3 ausgewählten Maßnahmen. Diese werden mit dem Ist-Zustand abgeglichen und eine Liste abgeleitet, welche technischen Erweiterungen es zu implementieren gilt. Zur Implementierung der Ressourceneffizienzmaßnahmen ist ggf. Kreativität gefragt, insbesondere wenn die Maßnahme nicht einfach zu implementieren oder nicht von außen sichtbar ist. Hier kann auf Modelle oder redundante Elemente zurückgegriffen werden. Abbildung 4-6 gibt Beispiele von Implementierungen, die in der ETA-Fabrik der TU Darmstadt umgesetzt wurden.

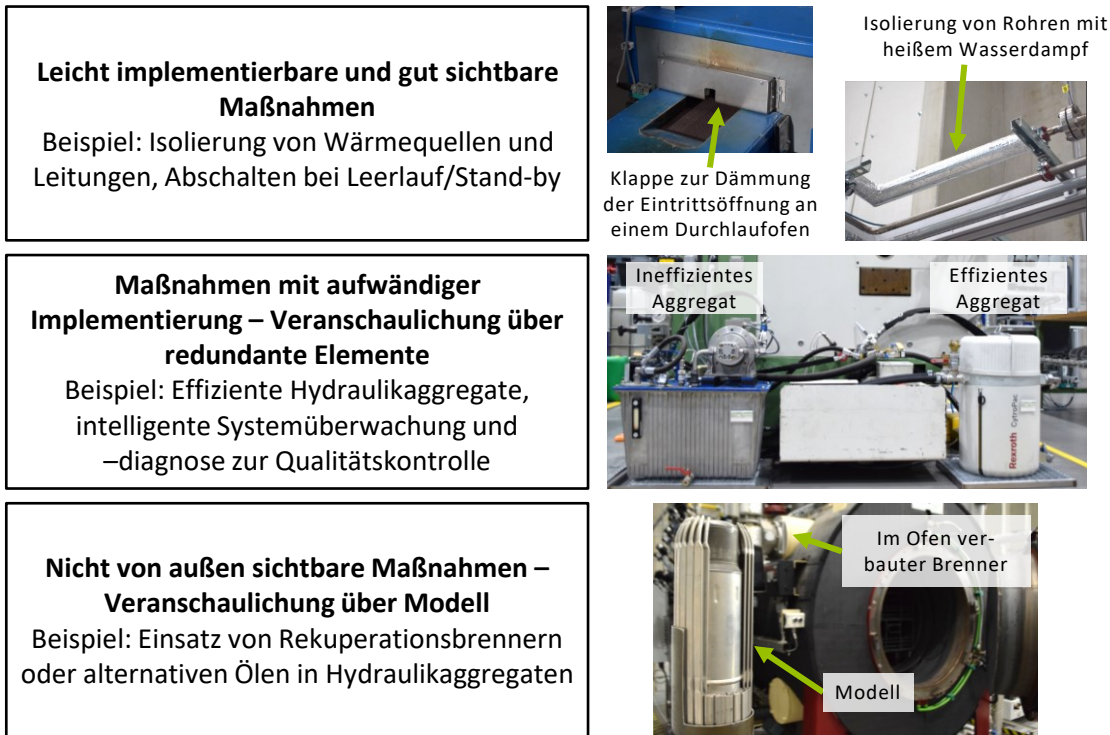


Abbildung 4-6: Beispiele implementierter Ressourceneffizienzmaßnahmen in der ETA-Fabrik

4.7 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde eine Methodik entwickelt, um Lernfabriken bei der Erweiterung um das Thema Ressourceneffizienz zu unterstützen. Die Methodik baut auf den abgeleiteten Hauptkompetenzen aus Abschnitt 3.3 auf und besteht aus 5 Schritten.

In Schritt 1 der Methodik werden mit Hilfe eines Fragebogens die Randbedingungen der Lernfabrik, die erweitert werden soll, ermittelt. Dazu zählt u.a. das organisationale Umfeld, also bspw. welches Budget für die Erweiterung zur Verfügung steht. Außerdem wird der Ist-Zustand analysiert. Darunter fällt, welche Anlagen und Infrastruktur vorhanden ist, welche Ressourcen dort zum Einsatz kommen und welche Lernmodule geschult werden.

Diese Randbedingungen beeinflussen dann das Ergebnis des Methodenvergleichs im zweiten Schritt der Methodik. Dabei werden verschiedene Hotspot-Analysemethoden gegenüber gestellt mit dem Ziel, eine oder mehrere Methoden auszuwählen, die in der Lernfabrik geschult werden sollen. Für diesen Vergleich wurde ein entsprechendes Vergleichstool entwickelt, bei dem die Gewichtung einzelner Kriterien sowie ggf. die Bewertung auf Basis der Randbedingungen angepasst werden kann.

Im dritten Schritt folgt anschließend die Auswahl von Ressourceneffizienzmaßnahmen, die in der erweiterten Lernfabrik zur Veranschaulichung der Vorteile von

Ressourceneffizienz dienen können. Zur Unterstützung des Auswahlprozesses wurde ein Maßnahmenkatalog mit Filter- und Priorisierungskategorien entwickelt. Selektiert werden können die Maßnahmen beispielsweise anhand der Anlagen, die in der Lernfabrik vorhanden sind oder anhand der Hotspots, die sich mit den ausgewählten Hotspot-Analysemethoden ermitteln lassen. Bei der Priorisierung wurden im Katalog neben dem Einsparpotenzial und dem Implementierungsaufwand der einzelnen Maßnahmen auch Lernfabrik-spezifische Kategorien berücksichtigt. So wird bspw. eine Einschätzung gegeben, wie gut die Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Lernfabrik für die Teilnehmer*innen sichtbar sind.

Je nach ausgewählter Hotspot-Analysemethode und ausgewählten Ressourceneffizienzmaßnahmen ergeben sich in Schritt 4 konkrete Infrastrukturanforderungen und Kompetenzen, die es in Lernmodulen für Ressourceneffizienz zu vermitteln gilt. Dabei können entwickelte Kompetenztabellen für jede der untersuchten Hotspot-Analysemethoden als Unterstützung dienen. In diesen Tabellen finden sich entsprechende Teilkompetenzen, zugehörige Handlungen, bei denen sich diese Kompetenzen zeigen, die zu Grunde liegende Wissensbasis sowie die zur Vermittlung notwendige Infrastruktur.

Nachdem damit in Schritt 4 die intendierten Kompetenzen und die Infrastrukturanforderungen für Ressourceneffizienz konkretisiert sind, werden in Schritt 5.1 entsprechende Lernmodule entwickelt und in Schritt 5.2 parallel die technische Erweiterung der Lernfabrik umgesetzt. Für die Entwicklung der Lernmodule wurde ein entsprechendes Grundkonzept präsentiert. Ergebnis der Methodik ist ein Konzept für ein Ressourceneffizienz-Lernmodul sowie eine Liste mit technischen Anforderungen, beides adaptiert an die Randbedingungen der jeweiligen Lernfabrik.

Nach der Umsetzung des Lernmodul-Konzeptes und der Implementierung der technischen Anforderungen können die entsprechenden Workshops in der Lernfabrik durchgeführt werden. Nach der Durchführung sollte eine Evaluation unter den Teilnehmer*innen erfolgen sowie ggf. notwendige Verbesserungsvorschläge adressiert werden. Diese weiteren Schritte werden in der vorliegenden Arbeit nicht weiter fokussiert.

5 ANWENDUNG UND EVALUATION DER METHODIK

Um zu überprüfen, inwiefern die zuvor aufgestellten Anforderungen an die Methodik erfüllt werden, kommt die Methodik in drei Anwendungsfällen zum Einsatz. Im Anschluss werden die Ergebnisse durch Befragungen von Expert*innen evaluiert.

5.1 Anwendung der Methodik

Die Methodik wird in drei Lernfabriken angewendet. Der erste Anwendungsfall ist das Center für industrielle Produktivität (CiP) in Darmstadt, der zweite ist das Innovation and Learning Center (ILC) in Aachen und als drittes wird die Methodik in der LEP in Darmstadt angewendet. Das Vorgehen und die Ergebnisse dieser Anwendungsfälle werden im Folgenden beschrieben.

5.1.1 Erweiterung der CiP

In Schritt 1 der Methodik werden zunächst die Randbedingungen der Prozesslernfabrik CiP mit Hilfe des Fragebogens ermittelt. Die CiP ist Teil des PTW an der Technischen Universität Darmstadt und adressiert vorrangig Themen in Bezug zu Lean Production und Digitalisierung. Im Zuge eines neuen Workshopprogramms soll auch ein zweitägiger Workshop aufgenommen werden, der Ressourceneffizienz adressiert. Die CiP soll dafür entsprechend erweitert werden. Die Anlagen der CiP umfassen u. a. zerspanende Maschinen (Säge, Dreh- und Fräsmaschinen), Reinigungs- und Montageprozesse zur Herstellung von Pneumatikzylindern in acht verschiedenen Varianten. Eine Übersicht der Ausstattung ist in Abbildung 5-1 zu sehen.

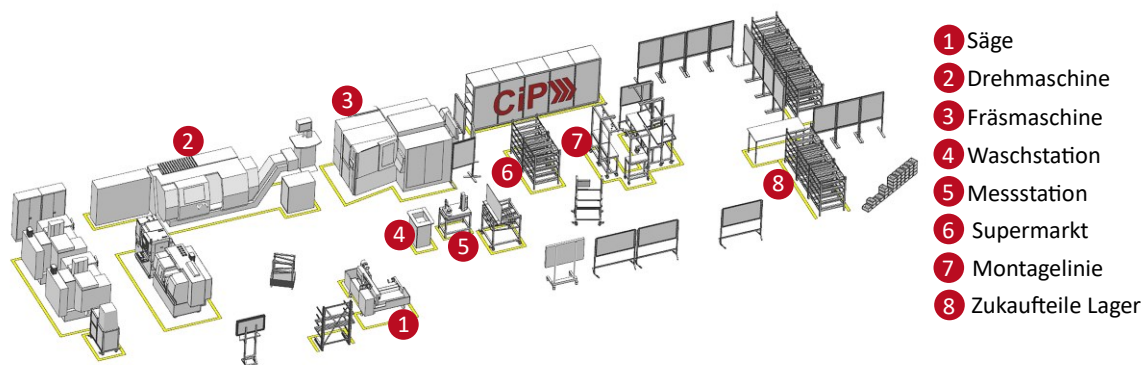


Abbildung 5-1: Aufbau der Prozesslernfabrik CiP, eigene Darstellung in Anlehnung an Kreß und Metternich (2022)

Auf Basis der Zielstellung wird in Schritt 2 der Methodik das Vergleichstool zur Auswahl einer Hotspot-Analysemethode eingesetzt. Fokus soll auf der Ressource Energie und der Lebenszyklusphase der Produktion liegen. Zudem kann in der CiP aufgrund des

bisherigen Workshopprogramms davon ausgegangen werden, dass alle Teilnehmer*innen des neuen Workshops mit der klassischen Wertstrommethode vertraut sind – was die entsprechenden Verbesserungen in der Bewertung der Energiewertstrommethode zur Folge hat (vgl. Abschnitt 4.3.3). Die Gewichtungsfaktoren werden im Anwendungsfall der CiP direkt über Zahlen von 0 bis 9 vergeben (vgl. Tabelle 4-5). Das für die Randbedingungen der CiP ausgefüllte Vergleichstool ist in Tabelle 5-4 dargestellt.

Tabelle 5-1: Vergleich der Hotspot-Analysenmethoden für die Randbedingungen der Erweiterung der CiP, hellrot markiert: vom Basissetting abweichende Bewertung

Kriterium	Gewichtung	Methoden									
		LCA	CF	MFCA	Checkliste	EWSM	ABC	PM	KEA	KRA	
Aufwand	Zeitlicher Aufwand für die Durchführung	3	○	◐	◐	●	◐	●	◐	◐	◐
	Zeitlicher Aufwand für das initiale Erlernen	3	○	◐	◐	●	◐	●	◐	◐	◐
	Kosten für die Datenaufnahme	3	○	○	○	●	◐	●	●	◐	○
	Kosten für die Berechnung und Visualisierung	3	○	◐	○	●	●	●	●	●	○
Bewertung Aufwand (50%)	12	0,00	0,38	0,19	1,00	0,56	1,00	0,94	0,56	0,19	
Nutzen	Betrachtete Lebenszyklusphase(n)										
	Produktion	9	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Produktentwicklung	0	●	●	●	●	○	○	○	●	●
	andere Lebenszyklusphasen	0	●	●	●	●	○	○	○	●	●
	Betrachtete Umweltwirkung(en)										
	elektrische Energie	9	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	thermische Energie	0	●	●	●	●	○	○	○	●	●
	Material	0	●	●	●	●	○	○	○	○	●
	Quantifizierung										
	in kWh	9	●	●	●	○	●	○	○	●	●
	in kg	0	●	●	●	○	○	○	○	○	●
	in kg CO ₂ -Äquivalenten	0	●	●	●	○	○	○	○	○	○
	in anderen Wirkungsindikatoren	0	●	○	○	○	○	○	○	○	○
	Berücksichtigung der Nutzungsdauer	3	●	●	●	○	●	○	●	●	●
	Berücksichtigung finanzieller Aspekte	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Bewertung Nutzen (50%)	30	1,00	1,00	1,00	0,60	1,00	0,6	0,7	1,00	1,00	
Gesamtbewertung (100%)			0,50	0,69	0,59	0,80	0,78	0,80	0,82	0,78	0,59

LCA=Ökobilanz, CF=CO₂-Bilanz, MFCA= Materialflusskostenrechnung, EWSM=Energiewertstrommethode, ABC=ABC-Analyse, PM=Portfolio-Matrix, KEA=kumulierter Energieaufwand, KRA=kumulierter Rohstoffaufwand

Das Ergebnis wird unter den Lernfabrikbetreiber*innen diskutiert und entschieden, dass die Energiewertstrommethode geschult werden soll. Zwar schneidet diese Methode hinter der Portfolio-Matrix nur am zweitbesten ab. Die Lernfabrikbetreiber*innen entschieden aber, dass eine Quantifizierung zwingend möglich sein sollte, weswegen die Portfolio-Matrix ausgeschlossen wird. Hier zeigt sich, was in Kapitel 4.3.5 zum Ergebnis der Bewertung formuliert wurde: die Hotspot-Analysenmethode mit der höchsten Gesamtpunktzahl im Vergleichstool muss nicht zwangsläufig ausgewählt werden. Vielmehr stellt das Ergebnis eine Diskussionsgrundlage für die Lernfabrikbetreiber*innen dar, auf dessen Basis die Auswahl erfolgen kann.

Für die Anwendung der Energiewertstrommethode vorgelagert zum dritten Schritt der Methodik kann in der CiP auf die schon bestehende Wertstromanalyse des ineffizienten, verschwundungsreichen Werkstatt-Zustands zurückgegriffen werden. Die elektrischen Energiebedarfe in diesem Zustand werden einmalig mit temporärem Messequipment erfasst. Das gilt auch für den Energiebedarf des zentralen Druckluftkompressors. Um die benötigte elektrische Energie vom Druckluftkompressor auf die einzelnen Prozessschritte umzulegen, kommt eine Allokation zum Einsatz. Die Anteile, nach denen

allokiert wird, werden basierend auf Erfahrungswerten geschätzt. Das Ergebnis ist in Abbildung 5-2 zu sehen.

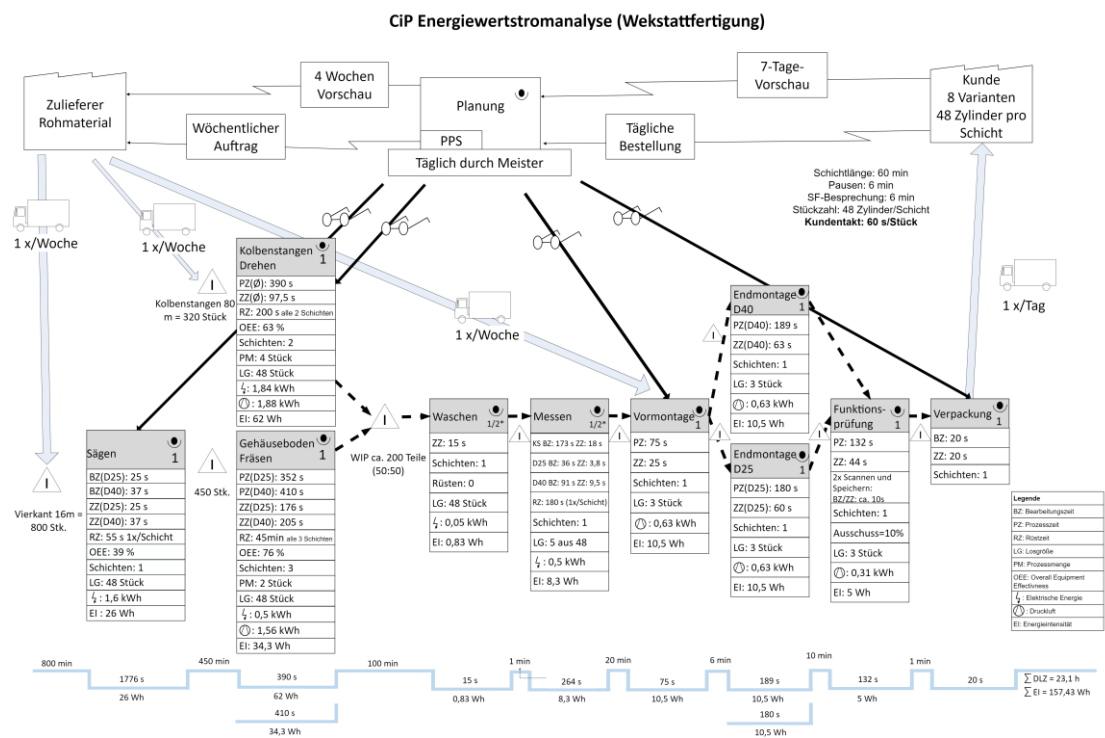


Abbildung 5-2: Energiewertstrom der CiP-Lernfabrik

Zur Durchführung von Schritt 3 der Methodik, der Auswahl von Ressourceneffizienzmaßnahmen, die in der CiP gezeigt werden sollen, wird das Maßnahmentool genutzt. Bei den Filterkategorien werden die Anlagen ausgewählt, die in der CiP vorhanden sind. Zudem wird der Fokus auf die Ressource Energie gelegt. Damit verblieben 45 Maßnahmen in der Liste des Tools. Wird basierend auf dem Ergebnis der Energiewertstrommethode zusätzlich nach den Hotspots Werkzeugmaschine (Sägen, Drehen, Fräsen) und Montage (Vor- und Endmontage) gefiltert, ergeben sich 33 Maßnahmen. Die Maßnahmen werden von den Lernfabrikbetreiber*innen diskutiert und eine Auswahl getroffen. Dabei wird auch der Zusammenhang der Ressourceneffizienzmaßnahmen mit Prinzipien der Lean Production (vgl. VDI-Richtlinie 2870, VDI, 2013) bedacht. Eine gewählte Ressourceneffizienzmaßnahme ist bspw. das Vermeiden der Energiebedarfe im Leerlauf an den Werkzeugmaschinen. Das deckt sich mit den Maßnahmen, die in den bisherigen CiP-Workshops zu Lean Production gezeigt werden: dort gilt es, gezielt Wartezeiten zu eliminieren, was ebenfalls zu verkürzten Leerlaufzeiten führt. Um zu zeigen, dass Ressourceneffizienzmaßnahmen auch zu Lasten der Lean-Prinzipien gehen können, wird außerdem die Maßnahme zur Wahl der Zykluszeit unter Berücksichtigung von Ressourceneffizienz gewählt. An Werkzeugmaschinen kann u. a. eine Verringerung der Vorschubgeschwindigkeit dazu führen, dass weniger Energie für die Zerspanung des gleichen Bauteils benötigt wird (Jiang et al., 2021). Dies würde aber die Zykluszeit pro

Bauteil verlängern. Anhand dieses Beispiels kann im Workshop mit den Teilnehmer*innen diskutiert werden, inwiefern Kompromisse zwischen Zykluszeit und Ressourceneffizienz sinnvoll sein können.

Zur Schulung der Energiewertstrommethode in der CiP wird in Schritt 4 auf die erarbeiteten Kompetenztabellen und die resultierenden Anforderungen an die Infrastruktur zurückgegriffen (vgl. Anhang A-4). Im Abgleich mit der vorhandenen Ausstattung werden in Schritt 5 Handlungsempfehlungen für die CiP abgeleitet. Diese umfassen unter anderem die Implementierung von stationärer Sensorik zur kontinuierlichen Messung der Energiebedarfe. Die erfassten Werte können im Workshop bspw. über ein Dashboard visualisiert und den Teilnehmer*innen so für die Durchführung der Energiewertstrommethode zugänglich gemacht werden. In der CiP bietet sich dafür das Programm Grafana an, weil dies für andere Zwecke bereits installiert ist und eingesetzt wird. Über das Dashboard könnte zudem für die Teilnehmer*innen visualisiert werden, wie viel die implementierten Ressourceneffizienzmaßnahmen in der CiP einsparen können. Die vollständigen Handlungsempfehlungen inklusive eines Agendavorschlags für den zweitägigen Workshop sind im Anhang A-8 zu finden.

5.1.2 Erweiterung des ILC

Im zweiten Anwendungsfall wird die Lernfabrik des Innovation and Learning Centers (ILC) in Aachen mit Hilfe der entwickelten Methodik erweitert. Diese Lernfabrik adressiert in den aktuellen Workshops vorrangig Themen der Digitalisierung und Textiltechnik (ITA Academy GmbH, 2023). In der Prozesskette kommen Maschinen für die Herstellung und Verarbeitung von Textilien zum Einsatz, um ein individualisierbares Armband mit eingebautem RFID-Chip herzustellen (vgl. Abbildung 5-3).

Gemäß Schritt 1 der Methodik wird in einem Online-Meeting mit den Stakeholdern der Lernfabrik der Fragebogen für die Randbedingungen ausgefüllt und die Gewichtungsfaktoren für das Vergleichstool in Schritt 2 ermittelt. Von besonderer Relevanz ist auch beim ILC die Lebenszyklusphase der Produktion. Neben elektrischer Energie sollen auch die Umweltwirkungen der thermischen Energie, die im Prozessschritt des Thermofixierens zum Einsatz kommt, sowie die des Materials betrachtet werden. Die Lernfabrikbetreiber*innen beobachten in der Textilbranche ein zunehmendes Interesse an der Quantifizierung der Umweltwirkungen von Produkten in CO₂-Äquivalenten, weswegen dieses Kriterium als sehr relevant gewichtet wird.

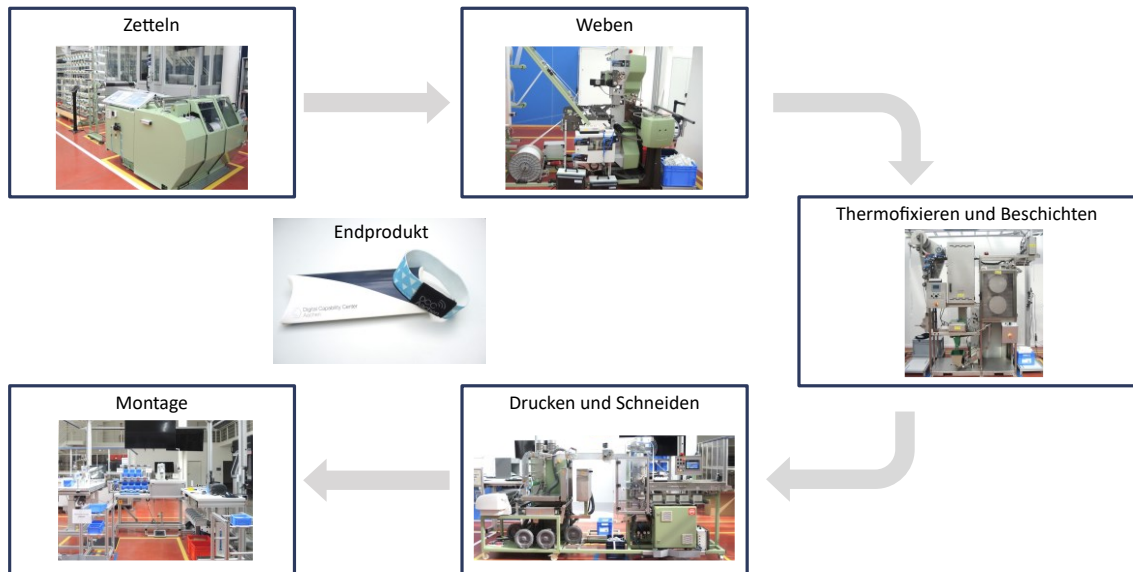


Abbildung 5-3: Prozesskette des ILC

Analog zur Anwendung in der CiP wird auch beim ILC die Gewichtung mit Zahlen von 0 bis 9 angegeben. Die Bewertung der Methoden in den einzelnen Kriterien entspricht dem Basisszenario (vgl. Abschnitt 4.3.3). Damit ergibt sich die resultierende Bewertung der Hotspot-Analysemethoden wie in Tabelle 5-2 zu sehen.

Tabelle 5-2: Vergleich der Hotspot-Analysemethoden für die Randbedingungen der Erweiterung des ILC

Kriterium	Gewichtung	Methoden									
		LCA	CF	MFCA	Checkliste	EWSM	ABC	PM	KEA	KRA	
Aufwand	Zeitlicher Aufwand für die Durchführung	3	○	◐	◑	●	◐	●	●	◐	◐
	Zeitlicher Aufwand für das initiale Erlernen	3	○	◐	◑	●	○	●	●	◐	◐
	Kosten für die Datenaufnahme	3	○	○	○	●	◐	●	●	◐	○
	Kosten für die Berechnung und Visualisierung	3	○	◐	○	●	●	●	●	●	○
Bewertung Aufwand (50%)	12	0,00	0,38	0,19	1,00	0,44	1,00	0,94	0,56	0,19	
Nutzen	Betrachtete Lebenszyklusphase(n) Produktion	9	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Betrachtete Lebenszyklusphase(n) Produktentwicklung	0	●	●	●	●	○	○	○	●	●
	Betrachtete Lebenszyklusphase(n) andere Lebenszyklusphasen	0	●	●	●	●	○	○	○	●	●
	Betrachtete Umweltwirkung(en) elektrische Energie	6	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Betrachtete Umweltwirkung(en) thermische Energie	6	●	●	●	●	○	○	○	●	●
	Betrachtete Umweltwirkung(en) Material	6	●	●	●	●	○	○	○	○	●
	Quantifizierung in kWh	3	●	●	●	○	●	○	○	●	●
	Quantifizierung in kg	3	●	●	●	○	○	○	○	○	○
	Quantifizierung in kg CO ₂ -Äquivalenten	9	●	●	○	○	○	○	○	○	○
	Quantifizierung in anderen Wirkungsindikatoren	0	●	○	○	○	○	○	○	○	○
	Berücksichtigung der Nutzungsdauer	3	●	●	●	○	●	○	●	●	●
	Berücksichtigung finanzieller Aspekte	0	○	○	●	○	○	○	○	○	○
	Bewertung Nutzen (50%)	45	1,00	1,00	0,80	0,60	0,47	0,33	0,40	0,60	0,80
Gesamtbewertung (100%)		0,50	0,69	0,49	0,80	0,45	0,67	0,67	0,58	0,49	

LCA=Ökobilanz, CF=CO₂-Bilanz, MFCA= Materialflusskostenrechnung, EWSM=Energiewertstrommethode, ABC=ABC-Analyse, PM=Portfolio-Matrix, KEA=kumulierter Energieaufwand, KRA=kumulierter Rohstoffaufwand

Auch in diesem Anwendungsfall ergibt sich nach der Bewertung Diskussionsbedarf. Zwar schneidet die Checkliste als Methode am besten ab. Da nach eingehender Recherche allerdings keine vorhandene Checkliste für Ressourceneffizienz in der Textilindustrie gefunden werden kann und der Aufwand für die initiale Erstellung als zu hoch bewertet wird, schließen die Stakeholder des ILC diese Methode aus. Nach Betrachtung der

verbleibenden Ergebnisse werden die CO₂-Bilanz und die ABC-Analyse als zu schulende Methoden ausgewählt. Zwar erzielt letztere die gleiche Gesamtbewertung wie die Portfolio-Matrix, schneidet aber beim zeitlichen Aufwand etwas besser ab. Da die CO₂-Bilanz die Nutzungsdauer der Maschinen bereits mitberücksichtigt, fällt der Vorteil der Portfolio-Matrix gegenüber der ABC-Analyse für die Stakeholder weg. Damit ergibt sich für das ILC die Möglichkeit, mit der ABC-Analyse im Workshop das „Kennenlernen“ der Produktionslinie für die Teilnehmer*innen zu ermöglichen, erste Hotspots zu identifizieren und diese mit der detaillierteren CO₂-Bilanz zu überprüfen.

Im Anschluss an die Auswahl der Hotspot-Analysemethoden, was Schritt 2 der Methodik entspricht, werden beide Methoden einmal auf die Prozesskette des ILC angewendet, um Hotspots für Schritt 3 zu identifizieren. Für die CO₂-Bilanz wird dafür auf Messwerte aus temporären Messungen zurückgegriffen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-4 zu sehen.

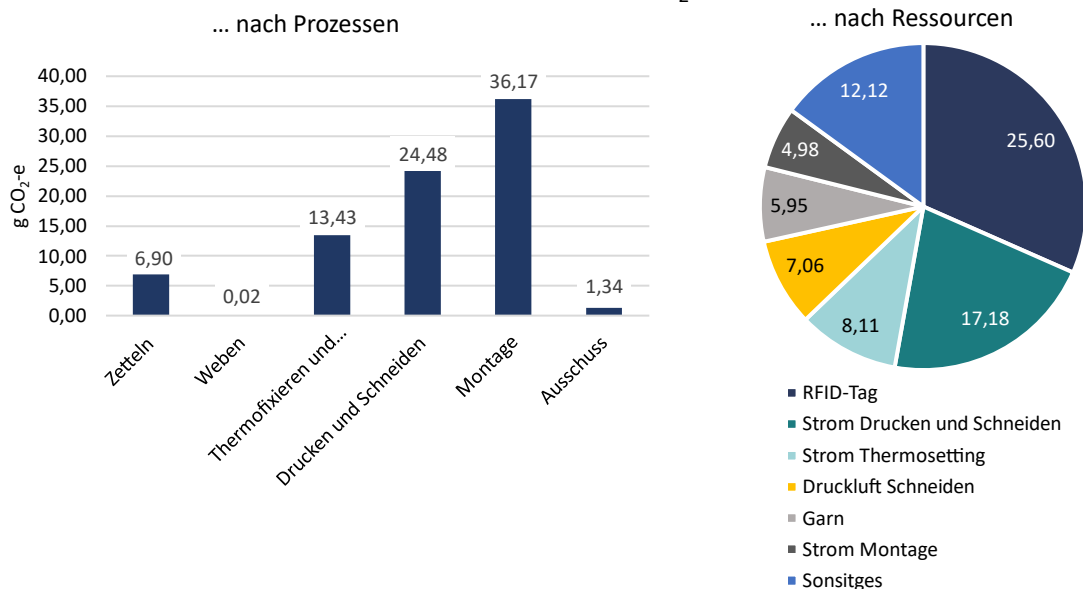
Interessant ist, dass durch die ABC-Analyse das Thermofixieren und Beschichten als Hotspot ermittelt wird. Bei der CO₂-Bilanz ergeben sich hingegen die Hotspots in der Montage, gefolgt vom Prozess des Druckens und Schneidens. Dies ist zum einen der Berücksichtigung weiterer Ressourcen bei der CO₂-Bilanz geschuldet, was sich vor allem in der Montage durch die Zukaufteile bemerkbar macht. Zum anderen bezieht sich die CO₂-Bilanz im Anwendungsfall des ILC auf ein Produkt, berücksichtigt also die jeweils notwendige Nutzungsdauer der Maschinen. Da der Prozess des Beschichtens und Thermofixierens deutlich schneller abläuft als der Prozess des Druckens, ergibt sich eine geringere Umweltauswirkung bezogen auf ein Produkt. Durch diese Diskrepanzen zwischen den Ergebnissen der beiden Methoden lassen sich für den Anwendungsfall des ILC anschaulich die Vor- und Nachteile der beiden Hotspot-Analysemethoden und deren potenzielle Auswirkungen aufzeigen (vgl. auch Reflexionsfragen in Anhang A-7).

Im Anschluss an die Durchführung der Hotspot-Analyse werden in Schritt 3 Ressourceneffizienzmaßnahmen zur Implementierung im ILC aus dem Maßnahmentool ausgewählt. Zwar ist der zu Grunde liegende Katalog initial für die zerspanende Industrie entwickelt und beinhaltet deswegen (noch) keine spezifischen Maßnahmen für die Textilproduktion. Dennoch lassen sich Maßnahmen bspw. für die Wärmebehandlung finden, die auch im ILC zum Einsatz kommen können. Dazu gehört die Dämmung der aktuell offen gehaltenen Thermofixiermaschine, die durch die ABC-Analyse als Hotspot im ILC identifiziert wurde. Eine weitere Maßnahme, die sich aus dem Maßnahmentool ergibt und von den Lernfabrikbetreiber*innen ausgewählt wird, ist die Optimierung der Prozessparameter. Diese Maßnahme ist zur Optimierung der Bauteilqualität bereits implementiert. Zur Veranschaulichung der Maßnahme in einem Ressourceneffizienz-Workshop empfiehlt sich die Quantifizierung des Nutzens der Maßnahme in Bezug zur Energieeinsparung. Perspektivisch kann der Maßnahmenkatalog durch ein Hinzufügen

von Spalten zu entsprechenden Maschinen, Rohmaterialien sowie Hilfs- und Betriebsstoffe um explizite Maßnahmen der Textilbranche erweitert werden.

ABC-Analyse ILC

Prozessschritt	Anschlussleistung in kW	Anteil in Prozent	Kumulierter Anteil	Kategorie
Thermofixieren und Beschichten	33,6	49,60	49,60	A
Vorverstrecker	11	16,24	65,84	A
Zettelmaschine	11	16,24	82,07	B
Drucken und Schneiden	8,5	12,55	94,62	C
Webmaschine	2,4	3,54	98,17	C
Montage	1,243	1,83	100,00	C
Gesamt	67,743			

CO₂-Bilanz ILC in gCO₂-e...Abbildung 5-4: ABC-Analyse und CO₂-Bilanz des ILC

Durch die Auswahl der Hotspot-Analysemethoden ABC-Analyse und CO₂-Bilanz sowie geeigneter Ressourceneffizienzmaßnahmen ergeben sich in Schritt 4 und 5 der Methodik konkrete Handlungsempfehlungen zur Erweiterung des ILC. Als Basis der Handlungsempfehlungen werden dabei die entsprechenden Kompetenztabellen in Anhang A-4 genutzt. Für die Schulung der ABC-Analyse ist es beispielsweise nötig, die Anschlussleistungen der Maschinen für die Teilnehmer*innen einsehbar zu gestalten. Bei Maschinen, wo das aktuell nicht der Fall ist, lässt es sich aufwandsarm durch Schilder auf der Vorderseite ermöglichen. Um die CO₂-Bilanz zu schulen, sollte im ILC zusätzliches Equipment wie bspw. eine Waage bereitgestellt werden. Damit können die Teilnehmer*innen während des Workshops die Gewichte der Einzelkomponenten des Armbandes bestimmen und in der CO₂-Bilanz verrechnen. Für diese Verrechnung sollten während des Workshops Geräte mit entsprechenden Programmen im ILC bereitgestellt

werden. Alternativ besteht auch die Möglichkeit, die Teilnehmer*innen vorab zu bitten, eigene Laptops mitzubringen. Die vollständige Liste der Handlungsempfehlungen zur Erweiterung des ILC sowie ein Agendavorschlag für einen Tagesworkshop sind in Anhang A-9 zu finden.

5.1.3 Erweiterung der LEP

Der dritte Anwendungsfall, in dem die entwickelte Methodik angewendet wird, ist die Erweiterung der LEP an der TU Darmstadt. Die LEP ist die Lernumgebung innerhalb der ETA-Fabrik, in der Workshops für Studierende und Unternehmensvertreter*innen stattfinden. Der Anwendungsfall der LEP unterscheidet sich von den vorangegangenen Erweiterungen insofern, dass in der LEP bereits vor der Erweiterung das Thema Energieeffizienz in Workshops adressiert wurde. Ziel der Lernfabrikbetreiber*innen ist es aber, mit der Erweiterung neben Energie auch weitere Ressourcen wie Rohmaterial und Betriebsmittel in Workshops zu adressieren. Wie in Schritt 1 der Methodik vorgesehen, werden auch in diesem Fall die Randbedingungen systematisch mit dem entwickelten Fragebogen erfasst. Die Prozesskette der LEP beinhaltet neun Anlagen und ist in Abbildung 5-5 grafisch dargestellt. Hergestellt wird ein Getriebe, wobei u. a. zerspanende Prozesse, Wärmebehandlung und Montageprozesse zum Einsatz kommen.

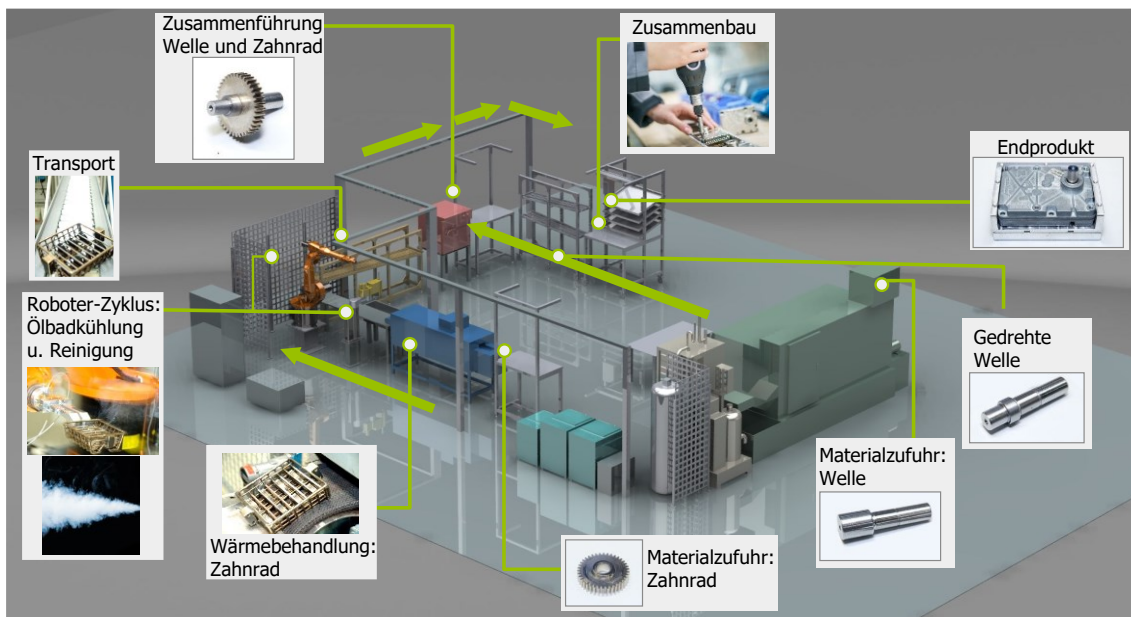


Abbildung 5-5: Prozesskette der LEP, Quelle: PTW

In Schritt 2 der Methodik wird der Vergleich der Hotspot-Analysenmethoden mit dem entwickelten Vergleichstool durchgeführt. Besonderheit in der LEP ist, dass bereits Sensorik für die Erfassung von Energiebedarfen vorhanden ist – entsprechend verbessern sich die Punkte im Kriterium der Kosten für die Datenaufnahme bei den Methoden, die Messungen beinhalten. Das Resultat des Vergleichs ist in Tabelle 5-3 zu sehen. Die vom

Basissetting abweichenden Bewertungen durch die vorhandene Sensorik sind grün hinterlegt. Auch vor der Erweiterung der LEP werden dort schon die Methoden der ABC-Analyse und der Checkliste geschult, so dass diese ausgeschlossen werden. Als Methode mit der höchsten Gesamtpunktzahl ergibt sich für die LEP die CO₂-Bilanz. Diese wird produktspezifisch durchgeführt, um die entsprechenden Hotspots der Lernfabrik als Grundlage für Schritt 3 zu ermitteln.

Tabelle 5-3: Vergleich der Hotspot-Analysenmethoden für die Randbedingungen der Erweiterung der LEP, hellgrün markiert: vom Basissetting abweichende Bewertung

Kriterium	Gewichtung	Methoden									
		LCA	CF	MFCA	Checkliste	EWSM	ABC	PM	KEA	KRA	
Aufwand	Zeitlicher Aufwand für die Durchführung	3	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	für das initiale Erlernen	3	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Kosten für die Datenaufnahme	3	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	für die Berechnung und Visualisierung	3	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Bewertung Aufwand (50%)	12	0,31	0,63	0,50	1,00	0,69	1,00	0,94	0,81	0,44	
Nutzen	Betrachtete Lebenszyklusphase(n)										
	Produktion	9	●	●	●	●	●	●	●	●	
	Produktentwicklung	0	○	○	○	○	○	○	○	○	
	andere Lebenszyklusphasen	0	○	○	○	○	○	○	○	○	
	Betrachtete Umweltwirkung(en)										
	elektrische Energie	3	●	●	●	●	●	●	●	●	
	thermische Energie	3	○	○	○	○	○	○	○	○	
	Material	9	○	○	○	○	○	○	○	○	
	Quantifizierung										
	in kWh	3	○	○	○	○	○	○	○	○	
	in kg	3	○	○	○	○	○	○	○	○	
	in kg CO ₂ -Äquivalenten	9	○	○	○	○	○	○	○	○	
	in anderen Wirkungsindikatoren	0	○	○	○	○	○	○	○	○	
	Berücksichtigung der Nutzungsdauer	3	○	○	○	○	○	○	○	○	
Berücksichtigung finanzieller Aspekte	0	○	○	○	○	○	○	○	○		
Bewertung Nutzen (50%)	42	1,00	1,00	0,79	0,57	0,43	0,29	0,36	0,50	0,79	
Gesamtbewertung (100%)		0,66	0,81	0,64	0,79	0,56	0,64	0,65	0,66	0,61	

LCA=Ökobilanz, CF=CO₂-Bilanz, MFCA= Materialflusskostenrechnung, EWSM=Energiewertstrommethode, ABC=ABC-Analyse, PM=Portfolio-Matrix, KEA=kumulierter Energieaufwand, KRA=kumulierter Rohstoffaufwand

Bei der Durchführung der produktspezifischen CO₂-Bilanz in der LEP zeigt sich eine Besonderheit der ETA-Fabrik: sowohl die Maschinen untereinander als auch das Gebäude sind durch thermische Netze verbunden. Um diese Maßnahme auch in den Workshops der LEP verdeutlichen zu können, wird in die CO₂-Bilanz die Versorgungstechnik aufgenommen und auf die Produkte allokiert. Da nicht eindeutig definiert ist, welche Allokationsmethode genutzt werden muss, bietet dies zudem eine gute Möglichkeit, den Teilnehmer*innen die Auswirkungen unterschiedlicher Allokationsmethoden zu vermitteln (bspw. nachzulesen in WRI & WBCSD, 2006). In Abbildung 5-6 ist die CO₂-Bilanz der LEP aufgeteilt nach Ressourcen und nach Prozessschritten dargestellt. Hierbei handelt es sich um den ineffizienten Zustand – es wird also bspw. für die Heizung die Bereitstellung von Wärme über eine Gastherme eingerechnet.

Basierend auf dem Ergebnis der CO₂-Bilanz, welches die Drehmaschine als Hotspot identifiziert, würden in Schritt 3 der Methodik eigentlich Ressourceneffizienzmaßnahmen ausgewählt werden. Da aber, wie beschrieben, in der LEP bereits Energieeffizienzworkshops durchgeführt werden, sind auch bereits Maßnahmen implementiert. Deswegen ergibt sich die Empfehlung, keine neuen Maßnahmen zu implementieren, sondern

die bestehenden Energieeffizienzmaßnahmen hinsichtlich der Einsparung materieller Ressourcen zu quantifizieren.

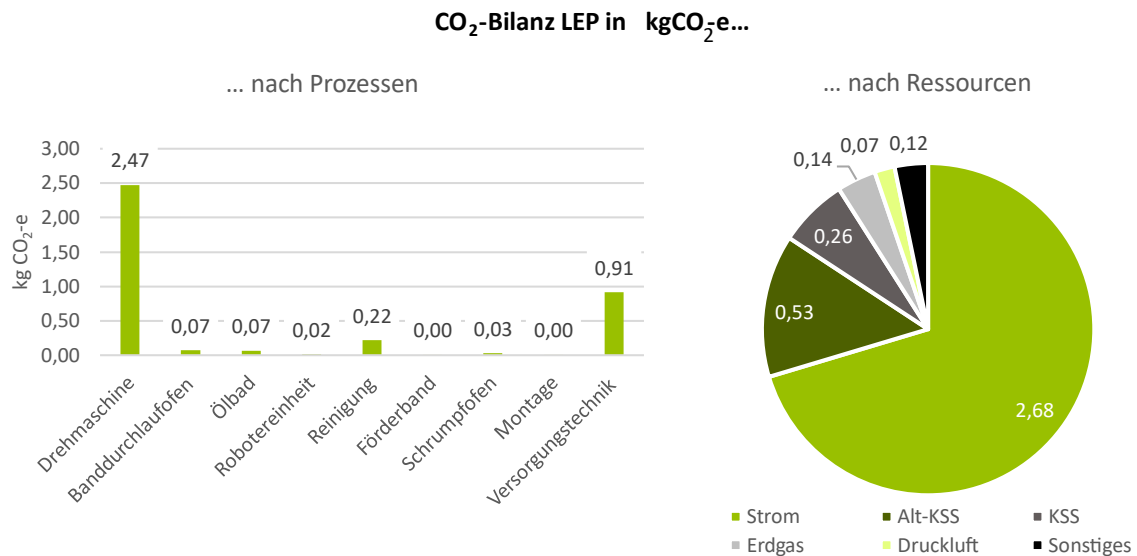


Abbildung 5-6: CO₂-Bilanz der LEP für den ineffizienten Zustand

In Schritt 4 der Methodik ergeben sich die Teilkompetenzen und Infrastrukturanforderungen basierend auf der entsprechenden Kompetenztable für die CO₂-Bilanz (Anhang A-4). Daraus leiten sich, nach Abgleich mit dem Ist-Zustand der LEP, Handlungsempfehlungen und ein Konzept für das Lernmodul ab. Da die produktspezifische CO₂-Bilanz geschult werden soll, ist der Aspekt der produktspezifischen Erfassung der Ressourcenbedarfe von Relevanz in der LEP. Mit Hilfe von Traceability-Equipment wie bspw. Handscannern kann automatisiert ermittelt und verrechnet werden, wie viel elektrische Energie und Druckluft den jeweiligen Produkten pro Prozessschritt zugewiesen wird. Außerdem sollte, wie schon im Anwendungsfall des ILC, eine Waage für die Erfassung der Zukaufteile im Workshop zur Verfügung gestellt werden. Die vollständige Liste mit Handlungsempfehlungen und der Agenda für einen Tagesworkshop ist in Anhang A-10 zu finden.

Im Anwendungsfall der LEP kann die Umsetzung der Erweiterung während der Laufzeit der vorliegenden Dissertation erfolgen. Dafür wird Sensorik zur Erfassung der Druckluft stationär implementiert und in der verwendeten Energiemonitoringsoftware eingebunden. Für die produktspezifische Erfassung der Ressourcenbedarfe wird ein Traceability-Konzept mit Handscannern und Lichtschranken entwickelt und umgesetzt. Die CO₂-Bilanz sowie die Visualisierung der Einsparpotenziale der implementierten Maßnahmen im effizienten Zustand wird über ein eigens entwickeltes Dashboard visualisiert. Das Konzept für das Dashboard und die zu Grunde liegende IT-Struktur wurde in Weyand et al. (2021c) veröffentlicht und ist in Abbildung 5-7 zu sehen. Das Dashboard sowie das Traceability-Konzept wurden in der LEP implementiert, Fotos dieser Umsetzung sind in

Abbildung 5-8 zu sehen. Neben der Umsetzung der technischen Infrastruktur wurde auch das Lernmodul mit entsprechender Übung für die CO₂-Bilanz entwickelt und umgesetzt. Das Lernmodul „Produktspezifische CO₂-Bilanz“ wird seit 2022 über das Mittelstand-Digitalzentrum Darmstadt als Tagesworkshop angeboten (MDZ, 2024).

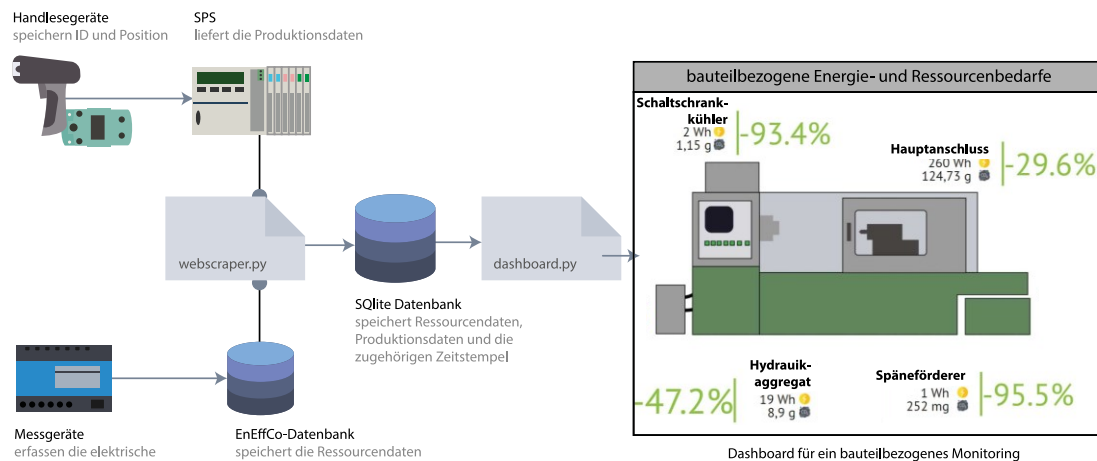


Abbildung 5-7: Konzept für das CO₂-Dashboards in der LEP, entnommen aus Weyand et al. (2021b, S. 53)

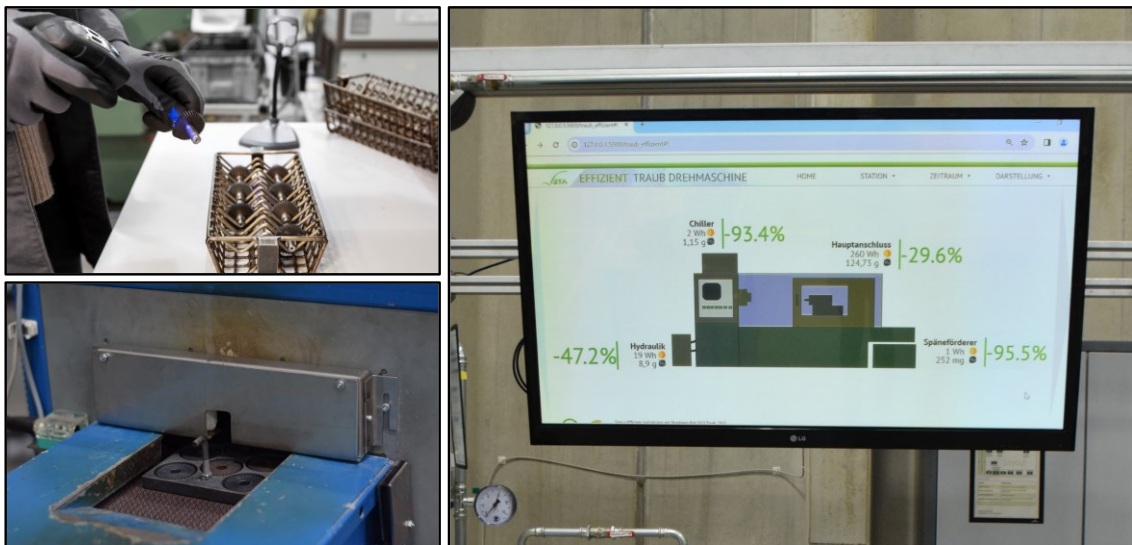


Abbildung 5-8: Fotos der Umsetzung in der LEP mit Handscannern (links oben), einer Lichtschranke am Durchlaufband (links unten) und der Visualisierung der Einsparpotenziale über das CO₂-Dashboard (rechts)

5.2 Evaluationskonzept und Diskussion der Ergebnisse

Die in Abschnitt 3.1 formulierten Anforderungen werden im Folgenden auf ihren Erfüllungsgrad hin evaluiert. Dies geschieht durch Befragungen, bei denen die Zustimmung zu einzelnen Evaluationsthemen ermittelt wird. Die Thesen sind in Tabelle 5-4 aufgeführt, zugeordnet zu den jeweiligen Anforderungen, die damit evaluiert werden.

Tabelle 5-4: Anforderungen an die Methodik und zugeordnete Evaluationsthese

Anforderung	Evaluationsthese
Validität	T1: In der erweiterten Lernfabrik lassen sich (nach Umsetzung der Handlungsempfehlungen) Ressourceneffizienzworkshops durchführen.
	T2: Die aus der Methodik resultierenden Handlungsempfehlungen sind inhaltlich passend.
Strukturierte Adressierung des Themas Ressourceneffizienz	T3: Die Methodik adressiert das Vorgehen zur Steigerung von Ressourceneffizienz in Unternehmen in geeigneter Weise.
Relevanz	T4: Die Methodik ist zur Erweiterung von Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz geeignet.
	T5: Die Methodik ist hilfreich bei der Erweiterung von Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz.
Strukturierter Aufbau	T6: Die Methodik ist strukturiert und nachvollziehbar aufgebaut.
Geeigneter Detailgrad	T7: Die Methodik hat einen angemessenen Umfang.
	T8: Die Methodik fokussiert sich auf wesentliche Elemente.
	T9: Die aus der Methodik resultierenden Handlungsempfehlungen sind in geeignetem Umfang konkretisiert.
Adaptierbarkeit	T10: Die Methodik lässt sich auf unterschiedliche Randbedingungen anpassen.
Geeignete Unterstützung	T11: Die mit der Methodik bereitgestellten Werkzeuge bieten eine geeignete Unterstützung für die Anwendung.
Anwendbarkeit	T12: Der zeitliche Aufwand für die Anwendung der Methodik ist angemessen.
	T13: Die Anwendung der Methodik ist empfehlenswert.

Zusätzlich zu den Evaluationsthese, zu denen die Zustimmung mittels fester Optionen abgefragt wird, werden auch drei Fragen mit Freitextantworten aufgenommen:

1. Wo sehen Sie den Mehrwert der Methodik zur Erweiterung von Lernfabriken?
2. Was würden Sie an der Methodik zur Erweiterung von Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz verbessern?
3. Haben Sie weitere Anmerkungen oder Kommentare zur Methodik?

Damit wird den Befragten die Möglichkeit gegeben, ihre Bewertung zu erläutern und Rückmeldungen zur Methodik zu geben, die sich nicht mittels der Kreuze bei den Evaluationsthese abbilden lassen.

Teilnehmer*innen der Befragung sind die Lernfabrikbetreiber*innen der drei Anwendungsszenarien (in Summe 7 Personen), sowie fachliche Expert*innen (in Summe 9 Personen), die sich im Thema der Ressourceneffizienz und/oder der Lernfabrikforschung

auskennen. Den Lernfabrikbetreiber*innen ist die Methodik durch die Anwendung in den in Abschnitt 5.1 beschriebenen Lernfabriken vertraut. Den Expert*innen wird die Methodik in einstündigen Terminen erklärt, in denen jeweils auch auf einen der Anwendungsfälle eingegangen wird. Da diese Expert*innen die Methodik aber nicht selbst angewendet haben, wird bei der Befragung die Auswahloption „kann ich nicht beurteilen“ aufgenommen. Die regulären Optionen reichen von „stimme gar nicht zu“ über „stimme eher zu“, „teils - teils“, „stimme eher zu“ bis „stimme voll zu“. Den Optionen werden anschließend Punktzahlen von 0 bis 4 zugeordnet, wobei 0 der Option „stimme gar nicht zu“ und 4 der Option „stimme voll zu“ entspricht. Die Evaluationsthese wird jeweils als bestätigt angesehen, wenn im Durchschnitt über die 16 Teilnehmer*innen der Befragung eine Punktzahl größer 3 erzielt wird. In Tabelle 5-5 sind die durchschnittlichen Punktzahlen sowie die Standardabweichung abgebildet, in Anhang A-11 findet sich eine detailliertere Aufschlüsselung der Antworten.

Wie zu erkennen, werden alle Thesen durch die Befragung mit einer durchschnittlichen Punktzahl größer als 3 bestätigt. Auch die Standardabweichungen kleiner 1 lassen keine gravierenden Ausreißer erkennen. Eine Einschränkung der Aussagekraft des Ergebnisses ergibt sich durch die Zahl von lediglich 16 Teilnehmer*innen bei der Befragung. Dennoch werden damit werden alle aufgestellten Anforderungen als erfüllt angesehen. Wie beabsichtigt finden sich in den Freitextfeldern aber Begründungen und Verbesserungsvorschläge, die teils zur von der vollen Punktzahl abweichenden Bewertung geführt hat. Aus diesem Grund wird im Folgenden auf Antworten der Freitextfelder eingegangen und potenzielle Verbesserungen an der Methodik diskutiert. Die vollständige Sammlung der Antworten der Freitextfelder befindet sich im Anhang A-11.

Die Antworten auf die erste Frage nach dem Mehrwert der Erweiterung wiederholen in weiten Teilen die Aspekte, die in den Thesen formuliert und dort bereits positiv bewertet wurden. Es wird mehrfach der strukturierte Ansatz zur Aufbereitung von Vorwissen und die Adressierung eines wichtigen Themas aufgeführt. Auch wird mehrfach als Mehrwert genannt, dass die Methodik die Entscheidungen durch quantitative und qualitative Kriterien nachvollziehbar macht.

Tabelle 5-5: Durchschnittliche Punktzahl und Standardabweichung der Befragung für jede Evaluationsthese (Teilnehmer*innen-Zahl n = 16)

Evaluationsthese	Durchschnittliche Punktzahl 4 $\hat{=}$ „stimme voll zu“ 3 $\hat{=}$ „stimme eher zu“	Standardabweichung σ
------------------	---	-----------------------------

	2 ≙ „teils - teils“ 1 ≙ „stimme eher nicht zu“ 0 ≙ „stimme nicht zu“	
T1: In der erweiterten Lernfabrik lassen sich (nach Umsetzung der Handlungsempfehlungen) Ressourceneffizienzworkshops durchführen.	3,8	0,4
T2: Die aus der Methodik resultierenden Handlungsempfehlungen sind inhaltlich passend.	3,7	0,5
T3: Die Methodik adressiert das Vorgehen zur Steigerung von Ressourceneffizienz in Unternehmen in geeigneter Weise.	3,4	0,6
T4: Die Methodik ist zur Erweiterung von Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz geeignet.	4,0	0,0
T5: Die Methodik ist hilfreich bei der Erweiterung von Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz.	3,8	0,4
T6: Die Methodik ist strukturiert und nachvollziehbar aufgebaut.	3,8	0,6
T7: Die Methodik hat einen angemessenen Umfang.	3,8	0,4
T8: Die Methodik fokussiert sich auf wesentliche Elemente.	3,8	0,4
T9: Die aus der Methodik resultierenden Handlungsempfehlungen sind in geeignetem Umfang konkretisiert.	3,8	0,4
T10: Die Methodik lässt sich auf unterschiedliche Randbedingungen anpassen.	3,8	0,4
T11: Die mit der Methodik bereitgestellten Werkzeuge bieten eine geeignete Unterstützung für die Anwendung.	3,7	0,4
T12: Der zeitliche Aufwand für die Anwendung der Methodik ist angemessen.	3,4	0,8
T13: Die Anwendung der Methodik ist empfehlenswert.	3,6	0,5

Mit der zweiten Frage wurden Verbesserungsvorschläge der Befragten an der Methodik gesammelt. Auch bei der dritten Frage nach weiteren Anmerkungen und Kommentaren wurden noch Punkte genannt, die sich mit Verbesserungsvorschlägen bzw. Antworten auf Frage 2 überschneiden. Deswegen werden die Rückmeldungen beider Fragen, geclustert nach Themenbereichen, gemeinsam diskutiert.

Randbedingungen und Voraussetzungen

Eine*r der Teilnehmer*innen wirft die Frage auf, inwiefern die Kompetenzen der Lehrenden im ersten Schritt der Methodik bei der Analyse der Randbedingungen Berücksichtigung finden, da auch dies für die Vermittlung von Ressourceneffizienz notwendig sei. Dem wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit zugestimmt, tatsächlich wird aber lediglich die Bereitschaft, sich als Lehrende mit dem Thema Ressourceneffizienz

auseinanderzusetzen, als Grundvoraussetzung für die Erweiterung gesehen. Die Kenntnis der Hotspot-Analysemethoden wird als vorteilhaft, aber nicht zwingend notwendig erachtet. Ist keine oder nur eine teilweise Kenntnis über die Methoden bei den Lehrenden vorhanden, steht für die Einarbeitung Literatur bspw. in den Methodenbeschreibungen von Abschnitt 2.2.4 zur Verfügung. Außerdem kann der Methodenvergleich mit dem entwickelten Vergleichstool auch zunächst vollkommen ohne Vorkenntnis ausgefüllt werden, um so eine Auswahl bspw. der drei Methoden mit der höchsten Punktzahl zu erhalten, für die dann ein tiefergehendes Verständnis bei den Lehrenden aufgebaut wird. Auf diese Weise kann das Vergleichstool den Lehrenden dabei helfen, sich zielgerichtet auf die Schulung von tatsächlich für die jeweilige Lernfabrik relevanten Hotspot-Analysemethoden vorzubereiten, statt Kenntnisse für alle Analysemethoden aufzubauen. Analog sieht es bei den Ressourceneffizienzmaßnahmen aus. Auch hier ist Vorwissen bei den Lehrenden natürlich von Vorteil, aber nicht zwingend notwendig. Ist kein Vorwissen vorhanden, sollte Zeit eingeplant werden, sich mit den möglichen Maßnahmen, die mit dem Maßnahmentool identifiziert werden, vertraut zu machen, um diese kompetent an die Workshopteilnehmer*innen vermitteln zu können. Alternativ besteht auch die Möglichkeit, die Lehrenden selbst an einem Workshop zum Thema Ressourceneffizienz teilnehmen zu lassen, um Kompetenzen insbesondere hinsichtlich möglicher Hotspot-Analysemethoden und Ressourceneffizienzmaßnahmen aufzubauen. Das könnte bspw. in einer der Lernfabriken erfolgen, die das Thema bereits adressieren. Eine weitere Möglichkeit ist die Einstellung von neuen Mitarbeiter*innen mit entsprechenden Vorkenntnissen, wenn in der jeweiligen Lernfabrik selbst keine Bereitschaft oder keine Kapazitäten für die Erweiterung vorhanden sind.

Auswahlprozess Hotspot-Analysemethoden

Diverse Rückmeldungen der Befragten adressieren die Auswahl der Hotspot-Analysemethoden bzw. das unterstützende Vergleichstool, welches in Schritt 2 der Methodik zum Einsatz kommt. Zunächst wird angemerkt, dass die Akronyme der Hotspot-Analysemethoden zum besseren Verständnis im Tool ausgeschrieben werden sollten und eine Beschreibung der Methoden hilfreich wäre. Beides wurde im Vergleichstool entsprechend ergänzt. Auch würde es helfen, die Felder visuell hervorzuheben, bei denen sich ggf. durch Randbedingungen Werte ändern oder die Gewichtung einzutragen ist. Auch dies wurde, wie bspw. in Tabelle 4-6 zu erkennen, bereits im Vergleichstool adressiert.

Eine weitere Anmerkung baut auf den Ergebnissen des Anwendungsfalls in Aachen auf, wo zwei Hotspot-Analysemethoden in der Lernfabrik angewendet wurden, aber zu unterschiedlichen Ergebnissen kamen. Die Erklärung für den Anwendungsfall ist in Abschnitt 5.1.2 ausgeführt, grundsätzlich wird aber eine Einordnung der Ergebnisse der Methoden gefordert. Dieser Anmerkung wird Rechnung getragen, in dem für jede der

Hotspot-Analysemethoden Reflexionsfragen bereitgestellt werden – zu finden in Anhang A-7. Schließlich adressiert eine Anmerkung die Möglichkeit der Erweiterbarkeit des Vergleichstools um neue Methoden. Grundsätzlich ist es durch das transparente Vorgehen zur Bewertung der Methoden sowie die Nutzung von Excel als Programm möglich, dem Vergleichstool weitere Methoden hinzuzufügen. Die neuen Methoden müssten für die Ermittlung der Bewertung entweder in der LEP in Darmstadt oder in einer anderen Prozesskette angewendet werden. Bei der Anwendung der neuen Methoden in anderen Prozessketten mit einer abweichenden Anzahl an Anlagen bzw. Prozessschritten müsste auch die Skaleneinteilung in Tabelle 4-3 angepasst werden, da bspw. andere Kosten für die Sensorik zu erwarten sind. Alternativ bestünde die Möglichkeit, die neuen Methoden von Expert*innen bewerten zu lassen, die diese im Verhältnis zu den anderen Methoden einschätzen und die entsprechende Bewertung mit Harvey-Balls vergeben können.

In einer weiteren Rückmeldung wird angemerkt, dass das Kriterium, ob alle Informationen/Tools zur Verfügung stehen, in den Vergleich der Hotspot-Analysemethoden aufgenommen werden könnte. Konkret zielt die Anmerkung auf die Methode der Checkliste ab. Im ILC in Aachen hatte die Checkliste zwar die meisten Punkte erzielt, war aber ausgeschlossen worden, weil keine vorgefertigte Checkliste für Ressourceneffizienz in der Textilindustrie gefunden wurde. Es wäre möglich, den Zeitaufwand für die Erstellung einer passenden Checkliste in die Bewertung mit einzubeziehen. Dann müsste allerdings bereits vor der Durchführung des Methodenvergleichs recherchiert werden, ob eine Checkliste existiert, was der einfachen Abfrage von bekannten Randbedingungen in Schritt 1 der Methodik widerspricht. Der Umstand, die Methode der Checkliste ggf. zu verwerfen, falls sie die höchste Punktzahl im Vergleich erzielt, aber keine Checkliste gefunden werden kann, wird zudem als gering bewertet. Wie im Fall des ILCs würde dann auf die Methode mit der zweithöchsten Punktzahl zurückgegriffen.

Maßnahmentool

Eine*r der Befragten merkte an, dass ein Video-Tutorial zur Nutzung des Maßnahmentools die Einarbeitung erleichtern könnte, weil die zahlreichen Optionen auf den ersten Blick ansonsten schwer zu verstehen seien. Die Umsetzung eines solchen Video-Tutorials wird zur vereinfachten Anwendung der Methodik im Nachgang der vorliegenden Arbeit als sinnvoll erachtet und im Ausblick aufgegriffen.

Lernmodulentwicklung

Von drei der Befragten wird angemerkt, dass Unterstützung bei der Entwicklung der Lernmodule wünschenswert wäre. Hier sei auf das Grundkonzept eines Ressourceneffizienz-Lernmoduls, dargestellt in Tabelle 4-13, sowie auf die Agenda-Vorschläge aus den drei Anwendungsfällen (Anhang A-8 bis Anhang A-10) verwiesen, welche zum Zeitpunkt

der Befragung noch nicht vollständig ausgearbeitet waren und somit von den Befragten nicht berücksichtigt werden konnte. In Abschnitt 4.6.1 wird zudem, wie auch in der Befragung angemerkt, auf weiterführende Literatur verwiesen, die bei der Erstellung eines Lernmoduls hilfreich sein kann. Dennoch wird die Erstellung eines Lernmoduls immer mit Aufwand, Kreativität und individuellen Anpassungen verbunden sein. Ein Austausch mit anderen Lernfabriken, die bereits Lernmodule im selben oder in ähnlichen Themen haben, ist deswegen zu empfehlen. Dieser Punkt wird im Ausblick nochmal aufgegriffen.

Struktureller Aufbau

Ebenfalls mehrfach werden von den Befragten Anmerkungen zum strukturellen Aufbau gemacht. Das Fließschema, welches die Teilschritte der Methodik grafisch zusammenfasst und in Abbildung 4-3 dargestellt ist, scheint nicht vollständig selbsterklärend zu sein. Es sei angemerkt, dass der in dieser Arbeit formulierte Text zur Beschreibung der einzelnen Teilschritte lediglich mündlich in den Vorstellungsterminen wiedergegeben wurde, die Befragten also im Nachgang nicht noch einmal darauf zurückgreifen konnten. Die vorliegende Arbeit fokussiert sich allerdings auch auf eine Beschreibung des Vorgehens bei der Entwicklung der Methodik, weswegen ein separater Handlungsleitfaden verfasst wurde, der in reduzierter Form die Anwendung der Methodik beschreibt und in Anhang A-12 zu finden ist.

Übertragung und Weiterentwicklung des Vorgehens

Im Rahmen der Befragung betreffen zwei der Rückmeldungen Aspekte, die über das aktuelle Vorgehen hinausgehen. Zum einen wird gefragt, inwiefern der Einfluss der Prozesse bzw. Maschinen selbst auf das Thema Ressourceneffizienz berücksichtigt wird. Tatsächlich berücksichtigt die hier vorgestellte Methodik die bestehende Lernfabrik und nimmt die bestehenden Maschinen als gegeben an. Der Einsatz anderer, ggf. ressourceneffizienterer Fertigungsverfahren ist durch die dafür notwendige Anschaffung neuer Anlagen in der Regel mit höheren Kosten verbunden. Aus dem Grund ist dies nicht der Fokus der entwickelten Methodik (vgl. Abschnitt 3.2). Der Aspekt wird im Ausblick aber nochmals aufgegriffen.

Die zweite Rückmeldung betrifft die Anwendung der Methodik im Unternehmen. Auch wenn dies ebenfalls nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit liegt, lassen sich zumindest einzelne Teile der Methodik auch in Unternehmen einsetzen, da diese auf einem allgemeinen Vorgehen zur Steigerung der Ressourceneffizienz in Unternehmen aufbaut (vgl. Abschnitt 2.2.3). Das Tool zum Vergleich der Hotspot-Analysemethoden kann bspw. ohne Anpassungen in Unternehmen Anwendung finden und das Maßnahmentool ist so konzipiert, dass die Lernfabrik-spezifischen Priorisierungskategorien ausgeblendet werden können. Es gibt in Unternehmen allerdings keine Zielgruppe in dem Sinne, wie es

bei Lernfabriken der Fall ist. Deswegen kann der Fragebogen in Schritt 1 nicht ohne Anpassungen verwendet werden, um die Randbedingungen zu ermitteln, die die Gewichtung in Schritt 2 und Schritt 3 der Methodik beeinflussen. Für die Auswahl einer Hotspot-Analysemethode oder für die Ressourceneffizienzmaßnahmen sind ggf. weitere oder andere Aspekte in Unternehmen relevant, die aber durch die Erweiterbarkeit der Tools einfach integrierbar wären. Beispielsweise könnte es für Unternehmen sinnvoll sein, die Förderfähigkeit von Ressourceneffizienzmaßnahmen als Kategorie im Maßnahmenkatalog aufzunehmen. Entfallen würde in Unternehmen die Konkretisierung der intendierten Kompetenzen in Schritt 4 und die Entwicklung des Lernmoduls in Schritt 5.1.

5.3 Zwischenfazit

Die entwickelte Methodik zur Erweiterung von Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz konnte in drei Lernfabriken – der CiP, dem ILC und der LEP – angewendet werden. Ergebnis waren jeweils konkrete Handlungsempfehlungen zur technischen Erweiterung der Lernfabriken sowie Vorschläge für Lernmodule. In der LEP konnten diese Handlungsempfehlungen während der Laufzeit der vorliegenden Arbeit bereits umgesetzt werden. Entsprechende Workshops in der erweiterten Umgebung werden dort seit 2022 durchgeführt.

Durch die Befragung der bei diesen Anwendungsfällen involvierten Lernfabrikbetreiber*innen sowie weiterer Expert*innen der Forschungsfelder Ressourceneffizienz und Lernfabriken konnte die Zustimmung zu aufgestellten Evaluationsthesen abgefragt werden. Die Evaluationsthesen leiteten sich aus den zuvor aufgestellten Anforderungen an die Methodik ab (vgl. Abschnitt 3.1). In der Befragung erhielten alle Thesen eine eindeutige Zustimmung. Unter der Einschränkung, dass lediglich 16 Personen befragt wurden, können die aufgestellten Anforderungen durch die Ergebnisse somit als bestätigt angesehen werden.

Neben den Rückmeldungen zu den einzelnen Evaluationsthesen wurden auch Anmerkungen der Lernfabrikbetreiber*innen und Expert*innen in Freitextfeldern abgefragt. Diese Anmerkungen wurden zugeordnet zu verschiedenen Clustern diskutiert. Darunter waren Verbesserungsvorschläge, die das Vergleichstool für die Hotspot-Analysemethoden oder das Maßnahmentool für die Auswahl der Ressourceneffizienzmaßnahmen betreffen. Die identifizierten Verbesserungsvorschläge wurden teils bereits in der Methodik, beschrieben in Kapitel 4, umgesetzt, teils werden sie im Ausblick nochmal aufgegriffen und ausgeführt.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Folgenden werden die zentralen Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst (Abschnitt 6.1). Darauf aufbauend wird ein Ausblick gegeben, welche Ansätze für zukünftige Forschungsarbeiten sich auf dieser Basis ergeben (Abschnitt 6.2).

6.1 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur Erweiterung bestehender Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz. Diese Methodik soll Lernfabrikbetreiber*innen dazu befähigen, Ressourceneffizienzworkshops an den jeweiligen Prozessketten durchführen zu können, ohne dafür neue Anlagen zu beschaffen oder gar neue Gebäude errichten zu müssen – was mit erheblichen Kosten-, Zeit- und Ressourcenaufwänden verbunden wäre.

Um die Methodik systematisch zu erarbeiten, wurden in Abschnitt 2.1 zunächst relevante Begriffe hinsichtlich Lernfabriken als Medium zur Kompetenzentwicklung vorgestellt. Anschließend wurde untersucht, inwiefern die Erweiterung von Lernfabriken in der Literatur adressiert wird. Dabei zeigt sich, dass zwar bereits Vorgehensweisen zur Erweiterung existieren, diese aber nicht auf das Thema Ressourceneffizienz fokussiert sind. Im Zentrum aller Vorgehensweisen zur Erweiterung von Lernfabriken stehen die intendierten Kompetenzen, die in der erweiterten Lernfabrik adressiert werden sollen. Aus diesem Grund wird im nächsten Abschnitt 2.2, nach der Abgrenzung des Begriffs Ressource, systematisch bestehende Literatur hinsichtlich Kompetenzen für Ressourceneffizienz analysiert. Obwohl diverse Quellen in diesem Kontext gefunden werden können, erfüllt keine Quelle alle der vier für die Arbeit als relevant abgeleiteten Kriterien: erstens systematisch hergeleitete Kompetenzen, zweitens mit entsprechenden Taxonomiestufen formulierte Kompetenzen, drittens die Ableitung technischer Anforderungen aus den Kompetenzen und viertens die Anwendung der Kompetenzen in einer Lernfabrik. Aus der Literaturanalyse lassen sich jedoch Themenbereiche zusammentragen, die von mehreren Quellen als relevant für das Thema Ressourceneffizienz aufgeführt werden. Diese Themenbereiche decken sich mit Vorgehensweisen, mit denen Ressourceneffizienz in der Produktion systematisch adressiert werden kann. Um den Abgleich mit den Themenbereichen durchzuführen, wurden sechs solcher Vorgehensweisen in Abschnitt 2.2.3 vorgestellt. Die sechs Vorgehensweisen wurden anschließend zu einer zusammengeführt. Diese resultierende Vorgehensweise umfasst die Schritte Motivation und Zielsetzung, Hotspot-Analyse, Maßnahmenidentifikation, Maßnahmenbewertung und -priorisierung sowie Maßnahmenumsetzung und Kontrolle. Für den Schritt der Hotspot-Analyse können sogenannte Hotspot-Analysenmethoden eingesetzt werden, auf die in Abschnitt 2.2.4 näher eingegangen wurde. In Abschnitt 2.2.5 folgte

dann eine Auseinandersetzung mit Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz, was in Schritt 3 der Vorgehensweise von Relevanz ist.

Basierend auf den Erkenntnissen in Kapitel 2 wurde in Kapitel 3 zunächst das Ziel der Arbeit u. a. hinsichtlich der Zielgruppe konkretisiert. Aus der abgeleiteten Vorgehensweise bzw. den darin enthaltenen fünf Schritten konnten Hauptkompetenzen für das Thema Ressourceneffizienz aufgestellt werden. Welche Infrastruktur zur Vermittlung dieser Hauptkompetenzen in den Lernfabriken notwendig ist und wie entsprechende Teilkompetenzen und Lernmodule aussehen können, ist maßgeblich davon abhängig, welche Methode für den zweiten Schritt der Hotspot-Analyse geschult werden soll und welche Maßnahmen veranschaulicht werden. Fokus der zu entwickelnden Methodik ist es deshalb, Lernfabrikbetreiber*innen Unterstützung in diesen beiden Aspekten zu bieten und alles zu einem Gesamtvorgehen zu verknüpfen.

Kapitel 4 adressiert die Entwicklung der Methodik. Dafür wurde systematisch ein Tool zum Vergleich von Hotspot-Analysemethoden sowie für die Auswahl von Ressourceneffizienzmaßnahmen inklusive Lernfabrik-spezifischer Kategorien erarbeitet. Die Randbedingungen in den Lernfabriken, also bspw. welche Maschinen überhaupt vorhanden sind oder welche Zielgruppe mit den Workshops in der erweiterten Lernfabrik angesprochen werden soll, beeinflusst dabei das Resultat sowohl des Methodenvergleichs als auch des Auswahlprozesses für Ressourceneffizienzmaßnahmen. Aus diesem Grund wurde ein Fragebogen zur systematischen Ermittlung dieser Randbedingungen konzipiert. In der Anwendung der Methodik wird zuerst der Fragebogen ausgefüllt, der die Randbedingungen ergibt. Diese wirken sich dann wiederum auf das Ergebnis des Vergleichstools und des Maßnahmentools aus. Sind die Hotspot-Methoden und die zu implementierenden Ressourceneffizienzmaßnahmen ausgewählt, gilt es zu ermitteln, welche Auswirkungen das auf die Teilkompetenzen und die notwendige Infrastruktur in der Lernfabrik hat. Dazu wurden für jede der betrachteten Hotspot-Analysemethoden Kompetenztabellen erarbeitet, die jeweils notwendige Teilkompetenzen zur Durchführung der Methode, das notwendige Wissen, zugehörige Handlungen sowie dafür notwendige technische Infrastruktur auflisten. Diese dienen als Basis, um zum einen ein entsprechendes Lernmodulkonzept für zuvor ausgewählte Hotspot-Analysemethoden auszugestalten. Zum anderen kann damit in Kombination mit den ausgewählten Ressourceneffizienzmaßnahmen die notwendige technische Infrastruktur definiert werden. Wird dies mit der bereits vorhandenen Infrastruktur in der jeweiligen Lernfabrik abgeglichen, ergeben sich konkrete und individuelle Handlungsempfehlungen, nach deren Umsetzung Ressourceneffizienzworkshops in den Lernfabriken möglich sind.

Bei der Anwendung der Methodik auf drei reale Lernfabriken zeigte sich, dass die resultierenden Handlungsempfehlungen zur Erweiterung lediglich einen begrenzten Umfang von jeweils drei DIN-A4-Seiten haben. Die zur Implementierung notwendigen Zeit- und

Kostenaufwände sind dabei voraussichtlich erheblich geringer als Um- oder Neubauten mit neuen Anlagen. Mit Hilfe der systematischen Vorgehensweise der Methodik können Erweiterungsbedarfe strukturiert und auf die jeweilige Lernfabrik zugeschnitten ermittelt werden.

Die Evaluation der Methodik und der Ergebnisse der Anwendungsfälle durch Expert*innen und Lernfabrikbetreiber*innen zeigt unter anderem, dass die Befragten

- die Methodik als strukturiert und empfehlenswert für die Erweiterung von Lernfabriken einschätzen,
- die entwickelten Werkzeuge als hilfreich empfinden und
- bestätigen, dass sich nach Umsetzung der Handlungsempfehlungen tatsächlich Workshops zu Ressourceneffizienz in den Lernfabriken durchführen lassen.

Trotz der geringen Teilnahme von 16 Personen an der Befragung können alle im Entwicklungsprozess aufgestellten Anforderungen an die Methodik, wie bspw. ein strukturierter Aufbau, Adaptierbarkeit und Anwendbarkeit, als erfüllt betrachtet werden.

6.2 Ausblick

Wie im vorangegangenen Abschnitt dargelegt, konnte das Forschungsziel mit der entwickelten Methodik erfüllt werden. Für Forschung und Praxis ergeben sich dennoch weitere Ansatzpunkte:

- Das Ergebnis der Methodik ist eine Liste an zu implementierender Infrastruktur und ein Lernmodulkonzept. Die Umsetzung des Konzeptes, insbesondere die Erstellung entsprechender Workshopfolien, geht allerdings mit einem erheblichen Aufwand einher. Dieser Aufwand könnte ggf. durch einen Austausch von bestehenden Unterlagen zwischen den Lernfabriken reduziert werden. Die bestehende Struktur der IALF mit den entsprechenden Arbeitsgruppen könnte als Ausgangspunkt genutzt und darauf basierend eine Austauschplattform entwickelt werden.
- Die Methodik konnte auf drei Lernfabriken angewendet und entsprechende Handlungsempfehlungen ermittelt werden (vgl. Abschnitt 5.1). Diese Handlungsempfehlungen wurden während der Erarbeitungszeit der vorliegenden Arbeit nur in einem der Fälle umgesetzt. Grundsätzlich können und sollten nach der Umsetzung der Handlungsempfehlungen und nach der Durchführung entsprechender Workshops in den Lernfabriken Kompetenzmessungen durchgeführt werden, um zu ermitteln, inwiefern die Teilnehmer*innen nach den Workshops tatsächlich Ressourceneffizienz im Unternehmen adressieren können. Dafür müssten zunächst bestehende Vorgehen zur Kompetenzmessung, wie bspw. von Glass (2021) oder Ketenci et al. (2022) beschrieben, auf das Thema Ressourceneffizienz adaptiert werden.

Die mit der Methodik bereitgestellten Werkzeuge des Fragebogens, des Vergleichstools zur Auswahl der Hotspot-Analysemethoden, des Maßnahmentools für Ressourceneffizienzmaßnahmen sowie die Kompetenztabellen wurden alle in der Befragung als sehr hilfreich bestätigt (vgl. Abschnitt 5.2). Dennoch bestehen Ansatzpunkte, diese Werkzeuge zu erweitern:

- In das Vergleichstool könnten weitere Hotspotmethoden für Ressourceneffizienz aufgenommen werden. Dies ist durch die Verwendung von Excel als Softwarebasis technisch einfach umsetzbar. Inhaltlich müsste die Bewertung entweder analog zum hier vorgestellten Vorgehen mittels Anwendung in der LEP erfolgen. Alternativ kann auch eine Anwendung in vergleichbaren Produktionslinien oder eine Abschätzung durch Expert*innen mit Erfahrung hinsichtlich der hier betrachteten Hotspot-Analysemethoden erfolgen (vgl. Abschnitt 5.2). Für die Einbindung von weiteren Methoden über Ressourceneffizienz hinaus, bspw. zum Thema Energieflexibilität wie in Feder et al. (2015) beschrieben, müssten die Bewertungskriterien des Vergleichstools hinterfragt und ggf. angepasst werden.
- Die automatisierte Verknüpfung des Fragebogens in Schritt 1 mit dem Vergleichstool wird als weiterer Ansatzpunkt für weiterführende Arbeiten erachtet. Je nach angegebenen Randbedingungen würde sich dann bspw. automatisch die Bewertung der einzelnen Methoden und ggf. auch die Gewichtung anpassen. Dies wäre mit Excel wiederum nur bedingt möglich, weswegen sich dafür vermutlich die Umsetzung des Methodenvergleichs in einer anderen Software, analog dem Maßnahmentool, empfehlen würde.
- Für den Maßnahmenkatalog bzw. das Maßnahmentool wären, neben dem in der Befragung vorgeschlagenen Tutorial-Video zur verbesserten Nutzbarkeit, die Einführung weiterer Kategorien denkbar. Auch das ließe sich technisch einfach durch die Verwendung der Excel-basierten Tabelle als Grundlage für den Inhalt des Tools umsetzen. Auf diese Weise könnten, wie in Abschnitt 5.1.2 beschrieben, Maßnahmen anderer Branchen, die ggf. andere Maschinen, Rohmaterialien, Hilfs- und Betriebsstoffe adressieren, integriert werden. Als hilfreich für Lernfabrikbetreiber*innen wird zudem bspw. die Kategorie erachtet, ob die jeweilige Ressourceneffizienzmaßnahme bereits in einer anderen Lernfabrik umgesetzt wurde. Insbesondere für die Maßnahmen, die sich lediglich als Modell oder Demonstrator für Workshop Teilnehmer*innen veranschaulichen lassen, könnte dies als Inspiration dienen und die Umsetzung erleichtern. Die Kategorie konnte in der hier vorliegenden Arbeit aufgrund der mangelhaften Datengrundlage über die Maßnahmen in anderen Lernfabriken nicht berücksichtigt werden. Auch hierfür könnte das Netzwerk der IALF jedoch eine geeignete Plattform bieten, um diese Datengrundlage zu ermitteln.

Wie in der Analyse publizierter CLF-Artikel (vgl. Abschnitt 2.1.2) festgestellt, adressieren viele Lernfabriken das Themenfeld der Digitalisierung, teilweise bereits in Kombination mit Ressourceneffizienz wie bei Büth et al. (2018). Die Verknüpfung von Ressourceneffizienz und dem in dieser Arbeit präsentierten Vorgehen mit ggf. bestehenden Digitalisierungsinhalten stellt ein eigenes, weiterführendes Forschungsfeld dar. Die digitalen Technologien der Augmented und Virtual Reality (AR und VR) werden außerdem als Ansatzpunkte gesehen, um die Erweiterung von Lernfabriken um Ressourceneffizienz zu unterstützen:

- Ressourceneffizienzmaßnahmen, die von außen für Teilnehmer*innen in Workshops nicht sichtbar sind, werden im entwickelten Maßnahmenkatalog niedriger priorisiert. Durch AR könnten diese Maßnahmen aber ggf. auf die bestehenden Anlagen projiziert und so kostengünstig und schnell „implementiert“ werden. Den resultierenden Unterschied in der Kompetenzentwicklung gälte es zu erfassen, er wird aber als gering im Verhältnis zu den zeitlichen und finanziellen Einsparpotenzialen vermutet.
- Die Methodik fokussiert sich auf die Erweiterung bestehender Lernfabriken, die Anschaffung neuer Anlagen wird aufgrund der damit einhergehenden Kosten nicht berücksichtigt (vgl. Abschnitt 3.2). AR und VR könnten hier Möglichkeiten eröffnen, um neue, ressourcen(in)effiziente Anlagen oder Prozessschritte kostengünstig in der Lernfabrik abzubilden. Beispiele dafür finden sich bereits in der Literatur, unter anderem von Büth et al. (2020), Faller und Schimanski (2021) oder Meesublak et al. (2022).

Die Methodik wurde für die Anwendung in Lernfabriken entwickelt und befasst sich explizit mit dem Thema Ressourceneffizienz. Darüber hinaus wären Übertragungen denkbar:

- In der Evaluation in Abschnitt 5.2 wurde auf Basis einer der Rückmeldungen bereits die Anwendung von Teilschritten der Methodik außerhalb von Lernfabriken erörtert. So ließe sich bspw. das Tool zum Vergleich der Hotspot-Analysemethoden auch für die Identifikation geeigneter Methoden in Unternehmen einsetzen. Durch die Möglichkeit zur Aus- und Abwahl von Priorisierungskategorien im Maßnahmenkatalog bzw. im Maßnahmentool ist dies ebenfalls direkt in Unternehmen einsetzbar. Schritt 4 und Schritt 5.1 zur Konkretisierung der intendierten Kompetenzen bzw. zur Gestaltung des Lernmoduls wären hingegen nicht relevant im Unternehmen. Eine Methode zur Umsetzung von Ressourceneffizienz in Unternehmen könnte somit zwar auf den hier gewonnen Erkenntnissen aufbauen, es müssten darin aber sicher noch weitere Aspekte wie bspw. organisationale Strukturen innerhalb der Unternehmen berücksichtigt werden (Kohn et al., 2021).

- Letztlich kann die entwickelte Vorgehensweise zur Erweiterung von Lernfabriken auch auf andere, relevante Themen wie bspw. Energieflexibilität oder Kreislaufwirtschaft übertragen und damit verknüpft werden. Dabei müssen ggf. weitere Gestaltungsdimensionen von Lernfabriken wie die Produkte hinterfragt und angepasst werden. Bemühungen und Ideen in dieser Richtung sind in der Lernfabrik-Community bereits erkennbar (Barth et al., 2024).

Weitere Forschung zur Erweiterung von Lernfabriken wird als vielversprechend erachtet, um bestehende Lernfabriken – auch im Sinne der Ressourceneffizienz – möglichst lange effektiv zu nutzen und Wissenstransfer in diversen Themenfeldern maßgeblich zu unterstützen. Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik bietet hierfür eine geeignete Basis.

7 Literaturverzeichnis

- Abele, E., Bauerdick, C. J., Strobel, N. & Panten, N. (2016). ETA Learning Factory: A Holistic Concept for Teaching Energy Efficiency in Production. *Procedia CIRP*, 54, 83–88. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.051>
- Abele, E., Chryssolouris, G., Sihn, W., Metternich, J., ElMaraghy, H., Seliger, G., Sivarud, G., ElMaraghy, W., Hummel, V., Tisch, M. & Seifermann, S. (2017). Learning factories for future oriented research and education in manufacturing. *CIRP Annals*, 66(2), 803–826. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.005>
- Abele, E., Metternich, J. & Tisch, M. (2019). *Learning Factories: Concepts, Guidelines, Best-Practice Examples*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92261-4>
- Abele, E., Metternich, J., Tisch, M., Chryssolouris, G., Sihn, W., ElMaraghy, H., Hummel, V. & Ranz, F. (2015). Learning Factories for Research, Education, and Training. *Procedia CIRP*, 32, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.187>
- Abele, E. & Reinhart, G. (2011). *Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. Hanser Verlag.
- Abele, E., Schneider, J., Beck, M. & Maier, A. (Hrsg.). (2018). *ETA - die Modell-Fabrik: Energieeffizienz weiter gedacht*. https://www.ptw.tu-darmstadt.de/media/fachgebietptw/dokumente_3/wissenssammlung_ptw/buecher_und_broschueren_1/ETA_Broschuere_de.pdf, zuletzt geprüft am 03.12.2023.
- Adam, M., Hofbauer, M. & Mandl, B. (2019). Integration of IT Into a Lean Basic Training: Target Group-Specific Insights and Recommendations. *Procedia Manufacturing*, 31, 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.009>
- Adolph, S., Tisch, M. & Metternich, J. (2014). Challenges and approaches to competency development for future production. *Journal of International Scientific Publications: Educational Alternatives*, 12, 1001–1010.
- Akyazi, T., del Val, P., Goti, A. & Oyarbide, A. (2022). Identifying Future Skill Requirements of the Job Profiles for a Sustainable European Manufacturing Industry 4.0. *Recycling*, 7(3), 32. <https://doi.org/10.3390/recycling7030032>
- Akyazi, T., Goti, A., Bayón, F., Kohlgrüber, M. & Schröder, A. (2023). Identifying the skills requirements related to industrial symbiosis and energy efficiency for the European process industry. *Environmental Sciences Europe*, 35(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00762-z>
- Alayón, C. L., Säfsten, K. & Johansson, G. (2022). Barriers and Enablers for the Adoption of Sustainable Manufacturing by Manufacturing SMEs. *Sustainability*, 14, 2364. <https://doi.org/10.3390/su14042364>

- Anderson, L. W., Krathwohl, D. R., Airasian, P. W. & Bloom, B. S. (Hrsg.). (2001). A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives. Longman.
- Assad, F., Konstantinov, S., Rushforth, E. J., Vera, D. A. & Harrison, R. A Literature Survey of Energy Sustainability in Learning Factories. IEEE 18th International Conference on Industrial Informatics (INDIN 2020), 361–366. <https://doi.org/10.1109/INDIN45582.2020.9442119>
- Barth, J., Ruzicic, N., Mennenga, M., Panagiotopoulou, V. C., Wolf, M., Vega Ayora, R., Sattari, M., Köppe, G., Weyand, A., Seyfried, S., Mangers, J., Thiede, S., Niemeyer, J. F., Ghazanfarpour Khoulenjani, Z., Petrusch, N., Herrmann, C., Stavropoulos, P., Hummel, V., Braun, A., . . . Weigold, M. (2024). Development of an IALF overarching learning module for Circular Economy. SSRN Electronic Journal (in print).
- Bauer, H., Brandl, F., Lock, C. & Reinhart, G. (2018). Integration of Industrie 4.0 in Lean Manufacturing Learning Factories. *Procedia Manufacturing*, 23, 147–152. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.008>
- Bausch, P., Czwick, C., Geyer, C., Hartmann, L., Kugler, S., Schreiber, M., Sossenheimer, J., Urnauer, C., Weyand, A. & Zeulner, J. (2020). Abschlussbericht: ArePron Agiles ressourceneffizientes Produktionsnetzwerk. TU Darmstadt.
- Bender, B., Kreimeier, D., Herzog, M. & Wienbruch, T. (2015). Learning Factory 2.0 – Integrated View of Product Development and Production. *Procedia CIRP*, 32, 98–103. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.226>
- Bierdel, M., Pfaff, A., Kilchert, S., Köhler, A., Baron, Y. & Bulach, W. (2019). Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands: Additive Fertigungsverfahren in der industriellen Produktion. https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/1_Themen/h_Publikationen/Studien/VDI_ZRE_Studie_Additive_Fertigungsverfahren_bf_1_.pdf, zuletzt geprüft am 15.04.2024.
- Blesl, M. & Kessler, A. (2017). *Energieeffizienz in der Industrie* (2. Auflage). Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55999-4>
- Blessing, L. T. & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a Design Research Methodology*. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-587-1>
- Blöchl, S. J. & Schneider, M. (2016). Simulation Game for Intelligent Production Logistics – The PuLL® Learning Factory. *Procedia CIRP*, 54, 130–135. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.100>
- Block, C., Kreimeier, D. & Kuhlenkötter, B. (2018). Holistic approach for teaching IT skills in a production environment. *Procedia Manufacturing*, 23, 57–62. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.161>
- Bloom, B. S. (Hrsg.). (1976). *Taxonomie von Lernzielen im kognitiven Bereich* (5. Auflage). Beltz.

- Blume, S., Kurle, D., Herrmann, C. & Thiede, S. (2018). Toolbox zur Steigerung der Ressourceneffizienz im metallverarbeitenden Gewerbe. In H.-K. Arndt, J. Marx Gómez, V. Wohlgemuth, S. Lehmann & R. Pleshkanovska (Hrsg.), *Nachhaltige Betriebliche Umweltinformationssysteme* (S. 235–251). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-20380-1_21
- BMU (Hrsg.). (2020). Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III - 2020 bis 2023: Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/ressourceneffizienz_programm_2020_2023.pdf, zuletzt geprüft am 28.12.2023.
- BMU, econsense & Centre for Sustainability Management (Hrsg.). (2007). *Nachhaltigkeitsmanagement in Unternehmen: Von der Idee zur Praxis: Managementansätze zur Umsetzung von Corporate Social Responsibility und Corporate Sustainability*. http://pure.leuphana.de/ws/files/1174686/BMU_Nachhaltigkeitsmanagement_in_Unternehmen.pdf, zuletzt geprüft am 15.04.2024.
- Böhner, J., Scholz, M., Franke, J. & Sauer, A. (2018). Integrating digitization technologies into resource efficiency driven industrial learning environments. *Procedia Manufacturing*, 23, 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.158>
- Branca, T. A., Fornai, B., Colla, V., Pistelli, M. I., Faraci, E. L., Cirilli, F. & Schröder, A. J. (2022). Skills Demand in Energy Intensive Industries Targeting Industrial Symbiosis and Energy Efficiency. *Sustainability*, 14(23), 15615. <https://doi.org/10.3390/su142315615>
- Brüggemann, H., Meier, J.-M. & Stempin, S. (2019). Consideration of material efficiency in a learning factory. *Procedia Manufacturing*, 31, 411–417. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.064>
- Bundesumweltministerium & Umweltbundesamt (Hrsg.). (2001). *Handbuch Umweltcontrolling* (2. Auflage). Verlag Franz Vahlen GmbH.
- Büth, L., Blume, S., Posselt, G. & Herrmann, C. (2018). Training concept for and with digitalization in learning factories: An energy efficiency training case. *Procedia Manufacturing*, 23, 171–176. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.012>
- Büth, L., Juraschek, M., Sangwan, K. S., Herrmann, C. & Thiede, S. (2020). Integrating virtual and physical production processes in learning factories. *Procedia Manufacturing*, 45, 121–127. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.082>
- Cachay, J., Wennemer, J., Abele, E. & Tenberg, R. (2012). Study on Action-Oriented Learning with a Learning Factory Approach. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 55, 1144–1153. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.608>
- Callupe, M., Negri, E. & Fumagalli, L. (2021). An Inclusive Overview of Learning Factories Around the Globe. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3863491>

- Cao, H. & Folan, P. (2012). Product life cycle: the evolution of a paradigm and literature review from 1950–2009. *Production Planning & Control*, 23(8), 641–662. <https://doi.org/10.1080/09537287.2011.577460>
- Carlowitz, H. C. von. (1713). *Sylvicultura Oeconomica: Oder Haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur Wilden Baum-Zucht*. Braun.
- Centea, D., Singh, I., Yakout, M., Boer, J. & Elbestawi, M. (2020). Opportunities and Challenges in Integrating Additive Manufacturing in the SEPT Learning Factory. *Procedia Manufacturing*, 45, 108–113. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.080>
- Cerdas, F., Thiede, S., Juraschek, M., Turetskyy, A. & Herrmann, C. (2017). Shop-floor Life Cycle Assessment. *Procedia CIRP*, 61, 393–398. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.178>
- Chryssolouris, G., Mavrikios, D. & Mourtzis, D. (2013). Manufacturing Systems: Skills & Competencies for the Future. *Procedia CIRP*, 7, 17–24. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.004>
- Clarivate. (2022). KeyWords Plus generation, creation, and changes. https://support.clarivate.com/ScientificandAcademicResearch/s/article/KeyWords-Plus-generation-creation-and-changes?language=en_US, zuletzt geprüft am 01.11.2023.
- Clarivate. (2023). Web of Science Core Collection. <https://clarivate.com/products/scientific-and-academic-research/research-discovery-and-workflow-solutions/webofscience-platform/web-of-science-core-collection/>, zuletzt geprüft am 01.11.2023.
- David, H. A. (1963). *The method of paired comparisons* (2. Auflage). Griffin's statistical monographs and courses: Bd. 41. Oxford University Press; Griffin.
- DENEFF, GUTcert & ÖKOTEC Energiemanagement GmbH (Hrsg.). (2021). Leitfaden: Vom Energiemanagement zum Klimamanagement: Über 5 Stufen - In 14 Schritten.
- Despeisse, M. (2018). Teaching Sustainability Leadership in Manufacturing: A Reflection on the Educational Benefits of the Board Game Factory Heroes. *Procedia CIRP*, 69, 621–626. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.130>
- Despeisse, M. & Evans, S. (2015). Improving Factory Resource and Energy Efficiency: The FREE Toolkit. In S. Umeda, M. Nakano, H. Mizuyama, N. Hibino, D. Kiritsis & G. von Cieminski (Hrsg.), *IFIP Advances in Information and Communication Technology. Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth* (Bd. 459, S. 640–646). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22756-6_78
- DIN (2011a). *Energiemanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung (DIN EN ISO 50001)*. Beuth Verlag GmbH.
- DIN (2011b). *Environmental management – Material flow cost accounting – General framework (DIN EN ISO 14051)*. Beuth Verlag GmbH.

- DIN (2019a). Treibhausgase - Carbon Footprint von Produkten - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung (DIN EN ISO 14067). Beuth Verlag GmbH.
- DIN (2019b). Treibhausgase - Teil 1: Spezifikation mit Anleitung zur quantitativen Bestimmung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen und Entzug von Treibhausgasen auf Organisationsebene (DIN EN ISO 14064-1). Beuth Verlag GmbH.
- DIN (2021a). Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (DIN EN ISO 14044). Beuth Verlag.
- DIN (2021b). Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (DIN EN ISO 14040). Beuth Verlag.
- DIN (2022). Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilung (DIN 8580). Beuth Verlag.
- Döring, N. & Bortz, J. (2016). Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-41089-5>
- ecoinvent. (o.J.). ecoinvent Database. <https://ecoinvent.org/database/>, zuletzt geprüft am 06.02.2024.
- Eder, M., Ketenci, A., Auberger, E., Gotthard, M. & Ramsauer, C. (2020). Integration of low-cost digital energy meters in learning factory assembly lines. *Procedia Manufacturing*, 45, 202–207. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.095>
- Elsevier. (2023). Home: SSRN: Tomorrow's Research Today. <https://www.ssrn.com>, zuletzt geprüft am 22.02.2024.
- Elsevier. (2024). ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books. <https://www.sciencedirect.com/>, zuletzt geprüft am 22.02.2024.
- Enke, J. (2020). Methodik zur multidimensionalen, reifegradbasierten Entwicklung von Lernfabriken für die Produktion. Zugl.: Dissertation. Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik". Shaker.
- Enke, J., Glass, R., Kreß, A., Hambach, J., Tisch, M. & Metternich, J. (2018a). Industrie 4.0 – Competencies for a modern production system. *Procedia Manufacturing*, 23, 267–272. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.028>
- Enke, J., Kraft, K. & Metternich, J. (2015). Competency-oriented Design of Learning Modules. *Procedia CIRP*, 32, 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.211>
- Enke, J., Metternich, J., Bentz, D. & Klaes, P.-J. (2018b). Systematic learning factory improvement based on maturity level assessment. *Procedia Manufacturing*, 23, 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.160>
- Erlach, K. & Sheehan, E. (2014). Die CO₂-Wertstrom-Methode zur Steigerung von Energie- und Materialeffizienz in der Produktion. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 109(9), 655–658. <https://doi.org/10.3139/104.111207>
- Erlach, K. & Westkämper, E. (Hrsg.). (2009). Energiewertstrom: Der Weg zur energieeffizienten Fabrik. Fraunhofer Verlag.

- Erpenbeck, J., Rosenstiel, L., Grote, S. & Sauter, W. (2017). Handbuch Kompetenzmessung: Erkennen, verstehen und bewerten von Kompetenzen in der betrieblichen, pädagogischen und psychologischen Praxis (3. Auflage). Schäffer-Poeschel Verlag für Wirtschaft Steuern Recht GmbH.
- Erpenbeck, J. & Sauter, W. (2015). Vom Wissen zur Kompetenz. In J. Erpenbeck & W. Sauter (Hrsg.), *essentials. Wissen, Werte und Kompetenzen in der Mitarbeiterentwicklung* (S. 1–18). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-09954-1_1
- EU. (2022). Änderung der Verordnung (EU) Nr. 537/2014 und der Richtlinien 2004/109/EG, 2006/43/EG und 2013/34/EU hinsichtlich der Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2464/oj>, zuletzt geprüft am 26.02.2024.
- EUREM International GmbH. (o.J.). Startseite | EUREM Training: European EnergyManager Training. <https://training.eurem.net/>, zuletzt geprüft am 22.02.2024.
- Europäische Kommission. (2022). Über ESCO - European Skills, Competences, Qualifications and Occupations. <https://esco.ec.europa.eu/de/about-esco>, zuletzt geprüft am 19.11.2023.
- Eusterwiemann, T., Eiling, F., Gauger, I. & Bildstein, A. (2021). An Integration Approach of Educational Artificial Intelligence (AI) Use Cases Into a Demonstration Factory. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3862399>
- Fahle, S., Kuhlenkötter, B., Bülow, F., Thewes, F., Prinz, C. & Meske, C. (2022). Conceptual Design and Implementation of Training Scenarios for Human-Centered Artificial Intelligence in Learning Factories. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4072322>
- Faller, C. & Schimanski, M. (2021). Virtual Expansion of a Physical Production Facility for Flexible Learning and Training Environments. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3857912>
- Fareri, S., Apreda, R., Mulas, V. & Alonso, R. (2023). The worker profiler: Assessing the digital skill gaps for enhancing energy efficiency in manufacturing. *Technological Forecasting and Social Change*, 196, 122844. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122844>
- Faulkner, W. & Badurdeen, F. (2014). Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance. *Journal of Cleaner Production*, 85, 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.042>
- Feder, F., Erlach, K., Hosak, F. & Lepple, H. (2015). Der energieflexible und effiziente Energiewertstrom. *wt Werkstattstechnik online*, 105(05), 313–318. <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2015-05-65>

- Fichter, K. (2005). *Interpreneurship: Nachhaltigkeitsinnovationen in interaktiven Perspektiven eines vernetzenden Unternehmertums*. Theorie der Unternehmung: Bd. 33. Metropolis-Verlag.
- Fleiter, T., Hirzel, S. & Worrell, E. (2012). The characteristics of energy-efficiency measures – a neglected dimension. *Energy Policy*, 51, 502–513. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.08.054>
- Fraunhofer IPA. (2015). Analytische Untersuchung zur Ressourceneffizienz im verarbeitenden Gewerbe. https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Publikationen/Studien/Studie_Ressourceneffizienz_web.pdf, zuletzt geprüft am 15.04.2024.
- Generalversammlung Vereinte Nationen. (2015). Transformation unserer Welt: die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung: Deutsche Fassung. <https://www.un.org/Depts/german/gv-70/band1/ar70001.pdf>, zuletzt geprüft am 15.04.2024.
- Gjeldum, N., Mladineo, M., Crnjac, M., Veza, I. & Aljinovic, A. (2018). Performance analysis of the RFID system for optimal design of the intelligent assembly line in the learning factory. *Procedia Manufacturing*, 23, 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.162>
- Glass, R. (2021). Methodik zur multivariaten Messung fachlich-methodischer Kompetenzen für die Produktion. Zugl.: Dissertation. Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik". Shaker.
- Global Footprint Network. (2022). How many Earths? How many countries? - Earth Overshoot Day. <https://overshoot.footprintnetwork.org/how-many-earths-or-countries-do-we-need/>, zuletzt geprüft am 28.12.2023.
- Gräßler, I., Pöhler, A. & Pottebaum, J. (2016). Creation of a Learning Factory for Cyber Physical Production Systems. *Procedia CIRP*, 54, 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.063>
- GreenDelta. (2024). openLCA: The world's leading, high performance, open source Life Cycle Assessment software. <https://www.openlca.org/>, zuletzt geprüft am 26.02.2024.
- Grömling, M. & Haß, H.-J. (2009). Globale Megatrends und Perspektiven der deutschen Industrie. *IW-Analysen: Nr. 47*. Deutscher Instituts-Verlag.
- Gupta, D., Athinarayanan, R. & Deken, B. Development of Green Technology Curriculum. *ASEE Annual Conference & Exposition Proceedings*, 22.494.1-22.494.19. <https://doi.org/10.18260/1-2--17775>
- Hartmann, D., Köhler, C., Petry, M. & Schwinn, A. (2023). How to train Industry 5.0 skills in a learning factory using existing technologies? *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4458045>

- Heinze, R. G., Schrape, J.-F. & Wannöffel, M. (Hrsg.). (2021). Lernfabriken an Hochschulen: neue Lernorte auf dem Vormarsch? Bestandsaufnahmen, curriculare Ausrichtungen, Transferkanäle. Hans-Böckler-Stiftung.
- Helm, R., Reise, C. & Rößle, D. (2014). Learning Factories for Sustainable Manufacturing - A Generic Design Approach. *Advanced Materials Research*, 1018, 517–524. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.517>
- Helming, S., Ungermann, F., Hierath, N., Stricker, N. & Lanza, G. (2019). Development of a training concept for leadership 4.0 in production environments. *Procedia Manufacturing*, 31, 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.007>
- Herrmann, C. (2010). *Ganzheitliches Life Cycle Management*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01421-5>
- Herrmann, C., Posselt, G. & Thiede, S. (Hrsg.). (2013). *Energie- und hilfsstoffoptimierte Produktion*. Springer Vieweg.
- Herrmann, C., Thiede, S. & Heinemann. (2010). Ganzheitliche Ansätze zur Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz in der Produktion. In R. Ruprecht (Hrsg.), 10. *Karlsruher Arbeitsgespräche Produktionsforschung 2010*. Kongresszentrum Karlsruhe. (S. 94–101).
- Hesselbach, J. (2012). *Energie- und klimaeffiziente Produktion: Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele*. Springer Vieweg.
- Heyse, V. & Erpenbeck, J. (2009). *Kompetenztraining: Informations- und Trainingsprogramme (2. Auflage)*. Schäffer-Poeschel Verlag für Wirtschaft Steuern Recht.
- Hulla, M., Rüdele, K., Herstätter, P. & Ramsauer, C. (2022). How to implement IoT in an assembly line – A training module to support the digital transformation in SMEs. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4075810>
- ifeu. (o.J.). *Wirkungsabschätzung*. <https://www.ifeu.de/methoden-tools/wirkungsabschaetzung/>, zuletzt geprüft am 26.11.2023.
- ifu. (o.J.). *Umberto: Die Ressourceneffizienz-Software Umberto Efficiency+*. <https://www.ifu.com/de/umberto/oekobilanz-software/>, zuletzt geprüft am 26.11.2023.
- IIM. (o.J.). *LEAD Factory*. <https://www.tugraz.at/institute/iim/infrastruktur/lead-factory>, zuletzt geprüft am 13.02.2024.
- International Association of Learning Factories. (2021). Definition of "learning factory". <https://ialf-online.net/>, zuletzt geprüft am 19.12.2023.
- Ioshchikhes, B., Seyfried, S. & Weigold, M. (2023). Teaching measurement techniques for energy efficiency in learning factories. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4458204>
- IRP. (2019). *Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want*. United Nations Environment Programme. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/27517>, zuletzt geprüft am 15.04.2024.

- IRP. (2020). Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future. United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3542680>
- ITA Academy GmbH. (2023). Digitalisierung und Weiterbildung für produzierende Unternehmen. <https://ita-academy.de/>, zuletzt geprüft am 31.01.2024.
- IWF. (o.J.). Die Lernfabrik. <https://www.tu-braunschweig.de/iwf/die-lernfabrik>, zuletzt geprüft am 13.02.2024.
- Jiang, Z., Gao, D., Lu, Y., Kong, L. & Shang, Z. (2021). Quantitative Analysis of Carbon Emissions in Precision Turning Processes and Industrial Case Study. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8(1), 205–216. <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00155-9>
- Jung, E. (2010). Kompetenzwerb: Grundlagen, Didaktik, Überprüfbarkeit. Oldenbourg Wissenschaftsverlag. <https://doi.org/10.1524/9783486710120>
- Juraschek, M., Büth, L., Posselt, G. & Herrmann, C. (2018). Mixed Reality in Learning Factories. *Procedia Manufacturing*, 23, 153–158. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.009>
- Juraschek, M., Cerdas, F., Posselt, G. & Herrmann, C. (2017). Experiencing Closed Loop Manufacturing in a Learning Environment. *Procedia Manufacturing*, 9, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.046>
- Kaluza, A., Juraschek, M., Neef, B., Pittschellis, R., Posselt, G., Thiede, S. & Herrmann, C. (2015). Designing Learning Environments for Energy Efficiency through Model Scale Production Processes. *Procedia CIRP*, 32, 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.114>
- Karre, H., Hammer, M., Kleindienst, M. & Ramsauer, C. (2017). Transition towards an Industry 4.0 State of the LeanLab at Graz University of Technology. *Procedia Manufacturing*, 9, 206–213. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.006>
- Ketenci, A., Wolf, M., Rüdele, K. & Ramsauer, C. (2022). Impact analysis of a teaching module in a learning factory environment regarding energy efficiency potentials. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4071800>
- Kohn, K., Seyfried, S., Weyand, A. & Weigold, M. (2021). Energieeffizienz als ein Ausdruck der Nachhaltigkeit produzierender Betriebe: Wie Unternehmensstrukturen Nachhaltigkeitsentscheidungen und damit die Energieeffizienz beeinflussen. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 116(1-2), 34–38. <https://doi.org/10.1515/zwf-2021-0007>
- Kommission der europäischen Gemeinschaften. (2005). Thematische Strategie für eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen: KOM(2005) 670.
- Kramer, M., Brauweiler, J. & Helling, K. (2003). Internationales Umweltmanagement. Gabler Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-87004-9>
- Kreimeier, D., Morlock, F., Prinz, C., Krückhans, B., Bakir, D. C. & Meier, H. (2014). Holistic Learning Factories – A Concept to Train Lean Management, Resource

- Efficiency as Well as Management and Organization Improvement Skills. *Procedia CIRP*, 17, 184–188. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.040>
- Kreß, A. (2022). Methodik zur Konfiguration von Lernfabriken für die schlanke Produktion. Zugl.: Dissertation. Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik". Shaker.
- Kreß, A. & Metternich, J. (2021). Evaluation of Factory Elements for the Configuration of Learning Factories. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3857893>
- Kreß, A. & Metternich, J. (2022). Einsatz von digitalen Technologien in Lernfabriken – Use Cases der Prozesslernfabrik „Center für industrielle Produktivität“. *Factory Innovation*.
- Kreß, A., Wuchterl, S. & Metternich, J. (2021). Design Approaches for Learning Factories – Review and Evaluation. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3857880>
- Krückhans, B., Wienbruch, T., Freith, S., Oberc, H., Kreimeier, D. & Kuhlenkötter, B. (2015). Learning Factories and their Enhancements - A Comprehensive Training Concept to Increase Resource Efficiency. *Procedia CIRP*, 32, 47–52. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.224>
- Kühn, A., Su, J., Ernst, C., Grabowski, K. & Kubin, K. (2022). Systematisch Energieeffizienz steigern und CO2-Emissionen senken in der Kunststoffindustrie: Branchenspezifische Lösungen. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/Leitfaden_Kunststoffindustrie.pdf, zuletzt geprüft am 29.11.2023.
- Li, W., Thiede, S., Kara, S. & Herrmann, C. (2017). A Generic Sankey Tool for Evaluating Energy Value Stream in Manufacturing Systems. *Procedia CIRP*, 61, 475–480. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.174>
- Lindner, F., Winkler, D., Mühlau, K., Wendt, U. & Keil, S. (2021). Learn to Shape the Digital Transformation: The Design Approach of a Learning Factory for Industrial Engineers. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3858409>
- LMS. (2021). Teaching Factory Competence Center. <https://www.teachingfactory-cc.eu/en/home/>, zuletzt geprüft am 13.02.2024.
- Majid Ansari, S. (2019). Auswahl und Umsetzung von Ressourceneffizienzmaßnahmen. Zugl.: Dissertation. TEWISS - Technik und Wissen GmbH, Leibniz Universität Hannover.
- May, M. C., Frenzer, M. & Lanza, G. (2022). Teaching Machine Learning in Learning Factories with Industry 4.0 Use-Cases. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4071757>
- MDZ. (2024). Mittelstand-Digital Zentrum Darmstadt. IHK Darmstadt Service GmbH. <https://digitalzentrum-darmstadt.de/>, zuletzt geprüft am 19.02.2024.

- Meesublak, K., Tansangworn, N., Sopitpan, S., Tansakul, N. & Ateetanan, P. (2022). Development of a Virtual Learning Factory for Energy Efficiency Improvement. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4074266>
- Miehe, R., Gross, E., Ackermann, T., Gamero, E. & Baumgarten, Y. (2023). Learning factories for biointelligent production – design aspects and required competencies. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4458036>
- Münnich, M., Rein, D., Reinhardt, H. & Ihlenfeldt, S. (2022). Identifying efficiency and flexibility measures for energy-oriented factory management. *Procedia CIRP*, 105, 302–307. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.050>
- NiFaR e.V. (2024). Startseite. <https://nifar.de/>, zuletzt geprüft am 13.02.2024.
- Norton, A. & Fearne, A. (2009). Sustainable value stream mapping in the food industry. In K. Waldron (Hrsg.), *Handbook of Waste Management and Co-Product Recovery in Food Processing* (S. 3–22). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781845697051.1.3>
- Nyhuis, P., Reinhart, G. & Abele, E. (Hrsg.). (2008). *Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten*. PZH, Produktionstechnisches Zentrum.
- Ortmeier, C., Henningsen, N., Langer, A., Reisch, A., Karl, A. & Herrmann, C. (2021). Framework for the integration of Process Mining into Life Cycle Assessment. *Procedia CIRP*, 98, 163–168. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.024>
- Petrusch, N., Schumacher, B., Schwiethal, A. & Kohl, H. (2021). Evaluation of a Level-Based Industry 4.0 Competency Model by the Example of an Internationally Distributed Learning Factory. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3864147>
- Petruschke, L., Burkhardt, M., Kohne, T., Schraml, P., Helfert, M. & Abele, E. (2020). Method to identify energy efficiency potentials of metal cutting machine tools in industry. *Procedia CIRP*, 90, 522–527. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.066>
- Plorin, D., Jentsch, D., Hopf, H. & Müller, E. (2015). Advanced Learning Factory (aLF) – Method, Implementation and Evaluation. *Procedia CIRP*, 32, 13–18. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.115>
- Posselt, G. (2016). *Towards Energy Transparent Factories*. Zugl.: Dissertation. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20869-5>
- Prinz, C., Kreimeier, D. & Kuhlenkötter, B. (2017). Implementation of a Learning Environment for an Industrie 4.0 Assistance System to Improve the Overall Equipment Effectiveness. *Procedia Manufacturing*, 9, 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.004>
- Prinz, C., Morlock, F., Freith, S., Kreggenfeld, N., Kreimeier, D. & Kuhlenkötter, B. (2016). Learning Factory Modules for Smart Factories in Industrie 4.0. *Procedia CIRP*, 54, 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.105>

- Probst, G., Raub, S. & Romhardt, K. (2012). Wissen managen: Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen (7. Auflage). Gabler Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-8349-4563-1>
- PTW. (o.J.a). ETA-Fabrik | Das Kompetenzzentrum für Energietechnologien und Anwendungen in der Produktion. www.eta-fabrik.de, zuletzt geprüft am 13.02.2024.
- PTW. (o. J.b). Lernapp ETA-Fabrik: Energieeffizienzmaßnahmen. https://lernapp.eta-fabrik.de/#energy_efficiency_massnahmen, zuletzt geprüft am 25.04.2024.
- PTW. (2021). ReOptify | Resource Optimization along the Product Lifecycle: Transferprojekt zum Thema Ressourceneffizienz entlang des Produktlebenszyklus. www.reoptify.de, zuletzt geprüft am 12.02.2024.
- Rantschl, M., Miskovic, M., Rüdele, K., Hulla, M. & Ramsauer, C. (2023). Extension of the Lead Factory to Address Industry 5.0. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4458054>
- Reinhardt, S. (2014). Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung. Zugl.: Dissertation. Forschungsberichte IWB München: Band 278. Herbert Utz Verlag.
- Reinhart, G., Karl, F., Krebs, P. & Reinhardt, S. (2010). Energiewertstrom: Eine Methode zur ganzheitlichen Erhöhung der Energieproduktivität. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 105(10), 870–875. <https://doi.org/10.3139/104.110401>
- Riemann, T., Kreß, A., Roth, L., Metternich, J. & Grell, P. (2021). Approach for Conceptualization and Implementation of Virtual Reality in Learning Factories. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3861474>
- Rolinck, M., Rüscher, S., Mennenga, M., Jehl, L. & Herrmann, C. (2022). Deployment Settings for the Integration of Blockchain Networks in Learning Factories. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4075122>
- Rother, M. & Shook, J. (1999). Learning to See: Value-stream mapping to create value and eliminate muda (1. Auflage). Lean Enterprise Institute.
- Schäfer, L., Ströhlein, K., Kandler, M., Hulla, M., Ast, J., Lanza, G., Nieken, P., Ramsauer, C. & Nyhuis, P. (2022). New Competences in a Digitalized Shopfloor – A Modular Training Concept for Learning Factories. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4071822>
- Schawel, C. & Billing, F. (2018). Top 100 Management Tools. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-18917-4>
- Schebek, L., Abele, E., Campitelli, A., Becker, B. & Joshi, M. (2016). Praxisleitfaden: Ressourceneffizienz in der Produktion - Zerspanungsprozesse. Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, und Landesentwicklung. https://www.technologieland-hessen.de/mm/mm001/Brosch_Ressourceneffizienz_Zerspanungsprozesse_final_screen.pdf, zuletzt geprüft am 15.04.2024.
- Schebek, L., Kannengießer, J., Campitelli, A., Fischer, J., Abele, E., Bauerdick, C., Anderl, R., Haag, S., Sauer, A., Mandel, J., Lucke, D., Bogdanov, I., Nuffer, A.-K., Steinhilper, R., Böhner, J., Lothes, G., Schock, C., Zühlke, D., Plociennik, C. &

- Bergweiler, S. (2017). Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes. VDI ZRE.
- Schillig, R., Stock, T. & Müller, E. (2013). Energiewertstromanalyse: Eine Methode zur Optimierung von Wertströmen in Bezug auf den Zeit- und den Energieeinsatz. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 108(1-2), 20–26. <https://doi.org/10.3139/104.110885>
- Schlund, S., Schnabel, F. & Rist, M. (2014). Umsetzung der Ressourceneffizienz im Unternehmen. In R. Neugebauer (Hrsg.), *Handbuch Ressourcenorientierte Produktion* (S. 91–123). Carl Hanser Verlag. <https://doi.org/10.3139/9783446436237.005>
- Schmidt, C., Li, W., Thiede, S., Kara, S. & Herrmann, C. (2015). A methodology for customized prediction of energy consumption in manufacturing industries. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2(2), 163–172. <https://doi.org/10.1007/s40684-015-0021-z>
- Schmidt, M. & Nakajima, M. (2013). Material Flow Cost Accounting as an Approach to Improve Resource Efficiency in Manufacturing Companies. *Resources*, 2(3), 358–369. <https://doi.org/10.3390/resources2030358>
- Schuhmacher, J. & Hummel, V. (2016). Decentralized Control of Logistic Processes in Cyber-physical Production Systems at the Example of ESB Logistics Learning Factory. *Procedia CIRP*, 54, 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.095>
- Schwarz, T. (2014). Qualitative Umweltbewertung von komplexen Produkten. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 66(11-12), 392–397. <https://doi.org/10.1007/s00506-014-0190-y>
- Seyfried, S., Weyand, A., Kohne, T. & Weigold, M. (2023a). Process for Climate Strategy Development in Industrial Companies. *publish-Ing. Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2023)*, 384–394. <https://doi.org/10.15488/13457>
- Seyfried, S., Weyand, A., Webersinn, J. & Weigold, M. (2023b). Development of a competence-oriented training on climateneutral production for learning factories. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4469517>
- Siegert, J., Schlegel, T. & Bauernhansl, T. (2020). Verifiable Competencies for Production Technology. *Procedia Manufacturing*, 45, 466–472. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.054>
- Sietz, M. (Hrsg.). (1994). *Umweltbewusstes Management: Umwelt-Checklisten, Umweltqualitätsziele und Risikoanalysen, Organisationsentwicklung, Umwelt-Auditing, Umweltrecht, Umwelthaftung, UVP, Abfallmanagement, Umwelt-Marketing* (2. Auflage). Blottner.
- Sikora, A., Titova-Kosturkova, T., Janevska, G., Kostov, M., Halunga, S., Suci, G. & Georgiev, G. (2023). EREMI: An Innovative Interdisciplinary Approach for Higher

- Education in Resource Efficient Manufacturing Environments. *Sustainability*, 15(13), 10244. <https://doi.org/10.3390/su151310244>
- Sorko, S. R. & Seybold, K. (2023). Human-centric workplace optimization - an applied Industry 5.0 training concept for industrial learning factories. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4427857>
- Statistisches Bundesamt. (2019). Produzierendes Gewerbe: Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden 2017. Fachserie 4 Reihe 4.3. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/Publikationen/Downloads-Struktur/kostenstruktur-2040430177004.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 29.12.2023.
- Stavropoulos, P., Papacharalampopoulos, A., Kampouris, K., Papaioannou, C., Bekiaris, T. & Porevopoulos, N. (2022). A Teaching Factory on Context-aware Design of Automation for Sustainable Manufacturing Processes. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4072720>
- Sucic, B., Lah, P. & Visocnik, B. P. (2017). An education and training program for energy managers in Slovenia – Current status, lessons learned and future challenges. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3360–3369. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.133>
- Sullivan, P., Yazdi, P. G. & Thiede, S. (2022). Extending Learning Factory Value for Specialized Knowledge Development. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4088918>
- Tagesschau. (2022). Weltweiter Klimastreik: Zehntausende demonstrieren (23.09.2022). <https://www.tagesschau.de/inland/gesellschaft/klimastreik-fridaysforfuture-demonstration-101.html>, zuletzt geprüft am 19.02.2024.
- Teichmann, M., Vladova, G. & Gronau, N. (2023). Conception of Subject-Oriented Learning - A meso-didactic design framework for learning scenarios for manufacturing. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4457995>
- Teiwes, H. (2020). Systematische Steigerung der Energieeffizienz im Karosseriebau (Bd. 150). Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-32441-4>
- Tenberg, R. (2011). Vermittlung fachlicher und überfachlicher Kompetenzen in technischen Berufen: Theorie und Praxis der Technikdidaktik. Franz Steiner Verlag Wiesbaden.
- Thiede, S. (2012). Energy efficiency in manufacturing systems. Zugl.: Dissertation. Sustainable production, life cycle engineering and management. Springer.
- Thiede, S. (2021). Digital technologies, methods and tools towards sustainable manufacturing: does Industry 4.0 support to reach environmental targets? *Procedia CIRP*, 98, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.02.001>

- Thiede, S., Juraschek, M. & Herrmann, C. (2016a). Implementing Cyber-physical Production Systems in Learning Factories. *Procedia CIRP*, 54, 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.098>
- Thiede, S., Li, W., Kara, S. & Herrmann, C. (2016b). Integrated Analysis of Energy, Material and Time Flows in Manufacturing Systems. *Procedia CIRP*, 48, 200–205. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.248>
- Thiede, S., Posselt, G. & Herrmann, C. (2013). SME appropriate concept for continuously improving the energy and resource efficiency in manufacturing companies. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 6(3), 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2013.02.006>
- Thim, C., Ullrich, A. & Gronau, N. (2020). Process model driven learning scenario implementation. *Procedia Manufacturing*, 45, 522–527. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.071>
- Tisch, M. (2018). Modellbasierte Methodik zur kompetenzorientierten Gestaltung von Lernfabriken für die schlanke Produktion. Zugl.: Dissertation. Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik".
- Tisch, M., Adolph, S., Metternich, J., Bauernhansl, T. & Reinhart, G. (2014). Innovative Ansätze zur Kompetenzentwicklung für die Produktion der Zukunft. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 109(9), 587–590. <https://doi.org/10.3139/104.111192>
- Tisch, M., Hertle, C., Abele, E., Metternich, J. & Tenberg, R. (2015). Learning factory design: a competency-oriented approach integrating three design levels. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(12), 1355–1375. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1033017>
- Tisch, M., Hertle, C., Cachay, J., Abele, E., Metternich, J. & Tenberg, R. (2013). A Systematic Approach on Developing Action-oriented, Competency-based Learning Factories. *Procedia CIRP*, 7, 580–585. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.036>
- Tisch, M. & Metternich, J. (2017). Potentials and Limits of Learning Factories in Research, Innovation Transfer, Education, and Training. *Procedia Manufacturing*, 9, 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.027>
- Torres, A. S. & Gati, A. M. (2009). Environmental Value Stream Mapping (EVSM) as sustainability management tool. In *PICMET '09 - 2009 Portland International Conference on Management of Engineering & Technology* (S. 1689–1698). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PICMET.2009.5261967>
- Trianni, A., Cagno, E. & Donatis, A. de (2014). A framework to characterize energy efficiency measures. *Applied Energy*, 118, 207–220. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2013.12.042>
- Tropschuh, B., Maiera, M., Dillingera, F. & Kordera, S. (2022). Manufacturing-Related Social Sustainability in Learning Factories. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4071814>

- UBA. (o.J.). Über ProBas. <https://www.probas.umweltbundesamt.de/>, zuletzt geprüft am 26.11.2023.
- UBA. (2012). Glossar zum Ressourcenschutz. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4242.pdf>, zuletzt geprüft am 15.04.2024.
- Umwelttechnik BW. (o.J.). bw!MFCA: Materialströme bewerten - CO2 bilanzieren. <https://www.umwelttechnik-bw.de/de/bwmfca>, zuletzt geprüft am 26.02.2024.
- UNEP. (2023). Human Migration and Natural Resources: Global assessment of an adaptive complex system. UNESCO.
- United Nations. (1987). Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>, zuletzt geprüft am 29.12.2023.
- VDI (2012). Kumulierter Energieaufwand (KEA): Begriffe, Berechnungsmethoden (VDI-Richtlinie 4600). Beuth Verlag GmbH.
- VDI (2013). Ganzheitliche Produktionssysteme: Methodenkatalog (VDI-Richtlinie 2870 Blatt 2).
- VDI (2016). Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien (VDI-Richtlinie 4800 Blatt 1).
- VDI (2018a). Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands (VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2). Beuth Verlag GmbH.
- VDI (2018b). Ressourceneffizienz in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) - Strategien und Vorgehensweisen zum effizienten Einsatz natürlicher Ressourcen: Strategien und Vorgehensweisen zum effizienten Einsatz natürlicher Ressourcen (VDI-Richtlinie 4801).
- VDI ZRE. (o.J.a). Instrumente VDI 4801. <https://www.ressource-deutschland.de/werkzeuge/basis-werkzeuge/instrumente-vdi-4801/>, zuletzt geprüft am 24.11.2023.
- VDI ZRE (Hrsg.). (o.J.b). Ressourcenchecks. <https://www.ressource-deutschland.de/werkzeuge/analyse-werkzeuge/ressourcenchecks/>, zuletzt geprüft am 24.11.2023.
- VDI ZRE. (o.J.c). Strategien & Maßnahmen: Wege, die Ressourceneffizienz im Unternehmen zu steigern. <https://www.ressource-deutschland.de/werkzeuge/loesungsentwicklung/strategien-massnahmen/>, zuletzt geprüft am 29.11.2023.
- ViREG. (2016). Annex 5. Key Competences. <https://vireg.webs.ull.es/wp-content/uploads/2016/05/ANNEX-5-KEY-COMPETENCES-PUBLIC.pdf>, zuletzt geprüft am 31.10.2023.
- Wagner, B. (2015). A report on the origins of Material Flow Cost Accounting (MFCA) research activities. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1255–1261. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.020>

- Wagner, U., AlGeddawy, T., ElMaraghy, H. & Müller, E. (2014). Product Family Design for Changeable Learning Factories. *Procedia CIRP*, 17, 195–200. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.119>
- Wank, A., Adolph, S., Anokhin, O., Arndt, A., Anderl, R. & Metternich, J. (2016). Using a Learning Factory Approach to Transfer Industrie 4.0 Approaches to Small- and Medium-sized Enterprises. *Procedia CIRP*, 54, 89–94. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.068>
- The Washington Post. (2023). Massive climate change protests in New York aim to turn up heat on Biden (18.09.2023). <https://www.washingtonpost.com/climate-environment/2023/09/18/climate-week-protests-un-biden/>, zuletzt geprüft am 23.02.2024.
- WBCSD (Hrsg.). (2006). Eco-efficiency Learning module. <http://docs.wbcsd.org/2006/08/EfficiencyLearningModule.pdf>, zuletzt geprüft am 07.02.2024.
- Weber, M. (2019). Leitfaden Ressourceneffizienz: Ressourcen schonen - Effizienz steigern. <https://www.ressource-deutschland.de/leitfaden-re/>, zuletzt geprüft am 31.07.2023.
- Weyand, A. (2024). Tool zum Vergleich von Hotspotanalysemethoden für Ressourceneffizienz in der Produktion. <https://tudatalib.ulb.tu-darmstadt.de/handle/tudatalib/4217>, zuletzt geprüft am 27.04.2024.
- Weyand, A., Bardy, S., Seyfried, S., Arzbach, M., Ott, M., Spitzer, M., Stemler, R. & Zimmermann, H. (2024). Katalog und Tool zur Auswahl von Ressourceneffizienzmaßnahmen mit Fokus Produktion - Version 1.0. <https://tudatalib.ulb.tu-darmstadt.de/handle/tudatalib/4216>, zuletzt geprüft am 27.04.2024.
- Weyand, A., Bausch, P., Engel, B., Metternich, J. & Weigold, M. (2023a). Analysis of Uncertainty Factors in Part-Specific Greenhouse Gas Accounting. *Sustainability*, 15(24), 16871. <https://doi.org/10.3390/su152416871>
- Weyand, A., Lehnert, S., Alish, V. & Weigold, M. (2022a). Systematic Comparison of Analysis Methods to Identify Resource Efficiency Hotspots in Production Sites. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4079206>
- Weyand, A., Lehnert, S., Alish, V. & Weigold, M. (2023b). Approach for the implementation of resource analysis methods in learning factories. *Production & Manufacturing Research*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/21693277.2023.2209152>
- Weyand, A., Rommel, C., Zeulner, J., Sossenheimer, J., Weigold, M. & Abele, E. (2021a). Method to increase resource efficiency in production with the use of MFCA. *Procedia CIRP*, 98, 264–269. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.101>
- Weyand, A., Schmitt, S., Elserafi, G., Petruschke, L. & Weigold, M. (2021b). Produktspezifische CO₂-Bilanzierung in Lernfabriken: Entwicklung eines Vorgehens zur systematischen Erweiterung von Lernfabriken. *WINGBusiness*(3), 51–55.

- Weyand, A., Schmitt, S., Petruschke, L., Elserafi, G. & Weigold, M. (2021c). Approach for Implementing New Topics in Learning Factories – Application of Product-specific Carbon Footprint Analysis. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3863447>
- Weyand, A., Seyfried, S., Bardy, S., Laghai, B., Metternich, J. & Weigold, M. (2023c). Teaching Resource Efficiency in Learning Factories – Systematic Approach for Choosing Measures. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4469318>
- Weyand, A., Seyfried, S., Schraml, P., Beck, M. & Weigold, M. (2023d). Arten der Ressourcenverschwendung in der Produktion. *wt Werkstattstechnik online*, 113(01-02), 2–6. <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-01-02-6>
- Weyand, A., Thiede, S., Mangers, J., Plapper, P., Ketenci, A., Wolf, M., Panagiotopoulou, V. C., Stavropoulos, P., Köppe, G., Gries, T. & Weigold, M. (2022b). Sustainability and Circular Economy in Learning Factories – Case Studies. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4080162>
- Wiedmann, T. & Minx, J. C. (2008). A Definition of 'Carbon Footprint'. C. C. Pertsova, *Ecological Economics Research Trends*, Nova Science Publishers, 1–11.
- Wirtschaftskammer Österreich (Hrsg.). (2014). *Energieeffizienz: Tipps für Unternehmen*. <https://www.wko.at/oe/energie/ee-2014-screen-2.pdf>, zuletzt geprüft am 27.11.2023.
- Wolf, M., Mitterlehner, L. & Ramsauer, C. (2023a). Training Module on the Implementation and Human-Centered Evaluation of Industrial Exoskeletons. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4491759>
- Wolf, M., Rüdele, K., Ketenci, A. & Ramsauer, C. (2023b). Design of a Teaching Module for the Determination of Carbon Footprints at Learning Factory Assembly Lines. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4470034>
- WRI & WBCSD. (2006). Allocation of GHG Emissions from a Combined Heat and Power (CHP) Plant: Guide to calculation worksheets. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/CHP_guidance_v1.0.pdf, zuletzt geprüft am 31.01.2024.
- WRI & WBCSD. (2015). *Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>, zuletzt geprüft am 26.11.2023.
- Zettner, K. (2016). *Entwicklung eines zweitägigen Workshops zur Energiewertstrommethode am Beispiel des LEP-Versuchsstands*. Bachelorarbeit Technische Universität Darmstadt, betreut von Bauerdick, Christoph und Flum, Dominik.

ANHANG**Anhangsverzeichnis**

Anhang A-1 Bewertungstabelle Methodensammlung.....	127
Anhang A-2 Kategorien von Maßnahmenkatalogen	130
Anhang A-3 Kompetenztablelle für Ressourceneffizienz	132
Anhang A-4 Kompetenztabellen für die verschiedenen Hotspot-Analysemethoden...	134
Anhang A-5 Fragebogen zur systematischen Ermittlung der Randbedingungen von Lernfabriken.....	142
Anhang A-6 Aufschlüsselung der Kostenpunkte zur Bewertung der Hotspot- Analysemethoden.....	145
Anhang A-7 Reflexionsfragen für die einzelnen Hotspot-Analysemethoden	146
Anhang A-8 Handlungsempfehlungen für die Erweiterung der CiP.....	151
Anhang A-9 Handlungsempfehlungen für die Erweiterung des ILC.....	154
Anhang A-10 Handlungsempfehlungen für die Erweiterung der LEP	157
Anhang A-11 Zusammenfassung der Rückmeldungen der Befragung.....	160
Anhang A-12 Handlungsleitfaden zur Anwendung der Methodik	163

Anhang A-1 Bewertungstabelle Methodensammlung

Die folgenden Methoden stammen aus der Instrumentensammlung des VDI ZRE, basierend auf der VDI-Norm 4801. Die Bewertung wurde von der Autorin selbst vorgenommen. RE steht für Ressourceneffizienz, H-Methode wird als Kurzform für Hotspot-Analyse verwendet.

Nr.	Name	Einstufung	Begründung
1	ABC-Analyse	relevant	gut für RE anwendbar
2	ABC/XYZ-Analyse bzw. Portfolio-Matrix	relevant	gut für RE anwendbar
3	Checklisten	relevant	gut für RE anwendbar
4	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)	nicht relevant	kein Fokus auf RE
5	Nachhaltiges Wirtschaften in kleinen und mittelständischen Unternehmen		Richtlinie, keine H-Methode
6	Öko-Kompass	nicht relevant	Visualisierungsform, keine H-Methode
7	Bauteilanalyse	nicht relevant	bezieht sich auf Produktentwicklung
8	Benchmarking	nicht relevant	Datenverfügbarkeit bzgl RE über das eigene Unternehmen hinaus notwendig
9	Betriebliche Umweltinformationssysteme (BUIS)	nicht relevant	Datensammlung, keine H-Methode
10	Betrieblicher Umweltschutz – Aufwendungen für Maßnahmen	nicht relevant	Richtlinie, keine H-Methode
11	Black Box Analyse	nicht relevant	Systemmodell, keine H-Methode
12	Cross-Impact-Analyse (CIA)	nicht relevant	Prognoseinstrument, keine H-Methode
13	EDIT-Value-Tool	nicht relevant	beinhaltet Kombination aus Methoden
14	Fehler-Ursachen-Analyse	nicht relevant	kein Fokus auf RE
15	Inverstitionsrechnung	nicht relevant	bezieht sich auf Projekte, keine H-Methode
16	Kostenrechner VDI	nicht relevant	Datensammlung, keine H-Methode
17	Materialflussanalyse	nicht relevant	Visualisierungsform, keine H-Methode
18	Materilflusskostenrechnung (MFCA)	relevant	gut für RE anwendbar
19	Materialinput pro Serviceeinheit (MIPS)	nicht relevant	Datensammlung, keine H-Methode
20	MET-Matrix	nicht relevant	Visualisierungsform, keine H-Methode
21	Mitarbeitendenbefragung	nicht relevant	Datenerhebungsform, keine H-Methode
22	Null-Fehler-Programm	nicht relevant	kein Fokus auf RE
23	Ökoeffizienz-Analyse	nicht relevant	Kennzahl, keine H-Methode
24	Pareto-Analyse	nicht relevant	Bewertungsform, keine H-Methode
25	Product Sustainability Assessment (PROSA)	nicht relevant	bezieht sich auf Produktentwicklung

26	Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS), verfügbar für verschiedene Branchen	nicht relevant	Richtlinie, keine H-Methode
27	Produktlinienanalyse	nicht relevant	Analogie zur Ökobilanz
28	Prozesanalyse	nicht relevant	kein Fokus auf RE
29	Ressourcenchecks	nicht relevant	Analogie zur Checkliste
30	Rüstanalyse (SMED)	nicht relevant	kein Fokus auf RE
31	Sankey-Darstellung	nicht relevant	Visualisierungsform, keine H-Methode
32	Stoffstromanalyse	nicht relevant	Analogie zur Ökobilanz
33	Supply-Chain-Management	nicht relevant	kein Fokus auf RE
34	SWOT-Analyse	nicht relevant	Datenerhebungsform, keine H-Methode
35	Umweltmanagementsysteme	nicht relevant	Datenerhebungsform, keine H-Methode
36	Wertstromanalyse/-design	relevant	als Energiewertstromanalyse, erweitert um das Thema Energie
37	Zero Loss Management	nicht relevant	kein Fokus auf RE
38	Anreizsysteme	nicht relevant	Vergütungsform, keine H-Methode
39	Betriebliche Kennzahlen für das Umweltmanagement	nicht relevant	Richtlinie, keine H-Methode
40	Betriebliches Vorschlagswesen	nicht relevant	Maßnahmengenerierungsform, keine H-Methode
41	Budgetierung	nicht relevant	Zielvorgabeform, keine H-Methode
42	Ecodesign	nicht relevant	bezieht sich auf Produktentwicklung
43	Jump-Tool	nicht relevant	bezieht sich auf Produktentwicklung
44	Kaizen	nicht relevant	kein Fokus auf RE
45	Produktentwicklung (diverse Richtlinien)	nicht relevant	bezieht sich auf Produktentwicklung
46	Berechnung von Rohstoff- Energieaufwand und CO ₂ -Reduzierung	nicht relevant	Datenerhebungsform, keine H-Methode
47	Bewertung des Energieaufwands (Kumulierter Energieaufwand, KEA)	relevant	gut für RE anwendbar
48	Bewertung des Ressourcenaufwands (Kumulierter Ressourcenaufwand, KRA)	relevant	gut für RE anwendbar
49	Bewertung des Rohstoffaufwands	nicht relevant	Analogie zu Kumulierter Ressourcenaufwand (KRA)
50	CO ₂ -Fußabdruck	relevant	gut für RE anwendbar
51	Kennzahlen	nicht relevant	Bewertungsform, keine H-Methode
52	Lebenszyklusanalyse (LCA)/ Ökobilanz	relevant	gut für RE anwendbar
53	Methodology for the Ecodesign of Energy-related Products (MEErP)	nicht relevant	bezieht sich auf Produktentwicklung
54	Öko-Label	nicht relevant	Bewertungsform, keine H-Methode
55	Wasser-Fußabdruck (Water Footprint)	nicht relevant	außerhalb des Scopes der Dissertation
56	Informationsdatenbank	nicht relevant	Datensammlung, keine H-Methode

57	Netzwerke der Länder und des Bundes	nicht relevant	Maßnahmengenerierungsform, keine H-Methode
58	Prozessketten (Systematisierung)	nicht relevant	Datenerhebungsform, keine H-Methode
59	Qualifizierung Ressourceneffizienz	nicht relevant	Maßnahmengenerierungsform, keine H-Methode
60	Video-Magazin	nicht relevant	Maßnahmengenerierungsform, keine H-Methode
61	Weiterbildung	nicht relevant	Maßnahmengenerierungsform, keine H-Methode
62	Betriebliches Umweltkostenmanagement	nicht relevant	Leitfaden, keine H-Methode
63	Enterprise-Level Indicators for Resource Productivity and Pollution Intensity (Resource Efficient and Cleaner Production (RECP))	nicht relevant	beinhaltet Kombination aus Methoden
64	Methoden-Matrix	nicht relevant	beinhaltet Kombination aus Methoden
65	Nachhaltigkeitsmanagement in Unternehmen	nicht relevant	Datenerhebungsform, keine H-Methode
66	Promoting Resource Efficiency in small & medium sized Enterprises (PRE-SME)	nicht relevant	Analogie zur Checkliste

Anhang A-2 Kategorien von Maßnahmenkatalogen

Die nachfolgende Tabelle werden die 40 verschiedenen Kategorien aufgelistet, nach denen in analysierten Maßnahmenkatalogen die **Ressourceneffizienzmaßnahmen** sortiert, aufgeführt oder bewertet werden. Zugeordnet ist jeweils die Quelle, aus der die Kategorie stammt.

Kategorie	Quelle	Kategorie	Quelle
Abfallreduktion	Trianni et al., 2014	Kern- oder Querschnittstechnologie (u. a. Beleuchtung, Pumpen, Prozesswärme)	Münnich et al., 2022
Aktivitätstyp (u. a. Optimierung, Retrofit, Neuinstallation)	Trianni et al., 2014	Lebensdauer	Fleiter et al., 2012
Amortisationszeit	Trianni et al., 2014, Fleiter et al., 2012	Indirekte Effekte	Trianni et al., 2014, Fleiter et al., 2012
Anwendungsbereich	Blesl & Kessler, 2017, Hesselbach, 2012, Fleiter et al., 2012, Abele et al., 2018	Lebensphasen mit relevanten Auswirkungen	VDI, 2016, VDI ZRE, o.J.c
Ausmaß der Auswirkungen (Systemweit/auf Komponente bezogen)	Fleiter et al., 2012	Lebensweganalyse (notwendig/nicht notwendig)	VDI, 2016, VDI ZRE, o.J.c
Bezug (Produkt oder Produktion)	VDI, 2016, VDI ZRE, o.J.c	Maschine/Anlage	PTW, o. J.b
Einfachheit der Umsetzung	Trianni et al., 2014	Prozess (-schritt)	Fraunhofer IPA, 2015
Einflussnehmende Akteur*innen im Betrieb	VDI, 2016, VDI ZRE, o.J.c	Produktivität (wird gesteigert/gesenkt)	Trianni et al., 2014
Eingesparte Energiemenge	Trianni et al., 2014	Querschnittstechnologie (u. a. Druckluft, Beleuchtung)	Trianni et al., 2014
Eingesparte Ressource (u. a. Emissionen, Material, Energie)	Fraunhofer IPA, 2015	Systemlevel (Fabrik, Shopfloor, Maschine, Bereich)	Münnich et al., 2022
Einsparpotenzial	Abele et al., 2018, PTW, o. J.b	Transaktionskosten	Fleiter et al., 2012
Einsparstrategie (Effizienz/Erhaltung)	Trianni et al., 2014	Typ (Investiv/nicht-investiv)	PTW, o. J.b
Eintrittswahrscheinlichkeit von Erfolg/Akzeptanz	Trianni et al., 2014	Typ (Technisch/Organisatorisch)	Münnich et al., 2022

Emissionsreduktion	Trianni et al., 2014	Typ (Technologie ersetzen, Technologie hinzufügen, Organisatorische Maßnahme)	Fleiter et al., 2012
Energietyp (Strom, Brennstoff, Gekoppelt)	Blesl & Kessler, 2017	Unternehmensbeteiligung	Trianni et al., 2014
Energietyp (thermisch/elektrisch)	Trianni et al., 2014	Veränderung in der Arbeitsumgebung	Trianni et al., 2014
Entfernung zum Kernprozess	Trianni et al., 2014	Verbreitungsgrad (u. a. Anstieg, Sättigung)	Fleiter et al., 2012
Fördermöglichkeiten	PTW, o. J.b	Wartungsfrequenz	Trianni et al., 2014
Implementierungskosten	Trianni et al., 2014, Fleiter et al., 2012	Wartungskosten	Trianni et al., 2014
Indirekte Effekte	Trianni et al., 2014, Fleiter et al., 2012	Wissen für Planung und Umsetzung (Technologieexpert*in, technisches Personal, Instandhaltung)	Fleiter et al., 2012

Kriterien für die **Auswahl von Fabrikelementen**, entnommen aus Kreß und Metternich (2021) und Kreß (2022, S. 93)

#	Evaluationskriterien	Variable/Beschreibung
C1	Interaktionsfähigkeit	Anzahl der kompetenzbasierten Interaktionen mit der Konfigurationsalternative (gewichtet nach Relevanz)
C2	Umsetzung von Gestaltungsprinzipien	Anzahl der implementierten Gestaltungsprinzipien schlanker Produktionssysteme in der Konfigurationsalternative
C3	Integrierbarkeit von Fehlern und Verschwendung	Anzahl der integrierbaren Fehler und Verschwendungsarten in der Konfigurationsalternative
C4	Realitätsnähe	Häufigkeit des Einsatzes der Konfigurationsalternative in der betrieblichen Praxis
C5	Einsatz digitaler Technologien	Anzahl der eingesetzten digitalen Technologien in der Konfigurationsalternative
C6	Aktualität	Durchschnittliches Jahr der Markteinführung der in der Konfigurationsalternative enthaltenen Fabrikelemente
C7	Universalität	Anpassungsfähigkeit im Hinblick auf unterschiedliche Anforderungen, die in der Konfigurationsalternative berücksichtigt werden
C8	Modularität	Anzahl der standardisierten und funktionalen Elemente in der Konfigurationsalternative
C9	Mobilität	Grad der Mobilität der in der Konfigurationsalternative enthaltenen Fabrikelemente
C10	Kompatibilität	Anzahl der Anschluss- und Vernetzungsmöglichkeiten der in der Konfigurationsalternative enthaltenen Fabrikelemente
C11	Skalierbarkeit	Anzahl der Möglichkeiten zur Erweiter- und Reproduzierbarkeit der in der Konfigurationsalternative enthaltenen Fabrikelemente
C12	Nachhaltigkeit	Durchschnittlicher Verbrauch verschiedener Ressourcen der Konfigurationsalternative
C13	Vorbereitungsaufwand	Geschätzter Zeitaufwand für die Vorbereitung und Wartung der Konfigurationsalternative

Anhang A-3 Kompetenztabelle für Ressourceneffizienz

Ressourceneffizienz in der Produktion				
Hauptkompetenz	Subkompetenz	zugehörige Handlungen	Wissensbasis (was, wie, warum)	Notwendige Infrastruktur in der Lernfabrik
Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die Gründe für das Thema Ressourceneffizienz zu verstehen und diese für ihr eigenes Unternehmen zu ermitteln.	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, Ressourceneffizienz zu definieren (Verständnis von Ressourcen, Systemgrenze, Verständnis des Nutzens etc.).	Definition Ressourceneffizienz wiedergeben	Kenntnis über unterschiedliche Definitionen des Begriffs Ressource, Systemgrenze, Nutzens im Kontext von Ressourceneffizienz	Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum)
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, verschiedene Bedarfe im Unternehmen zu analysieren und Gründe für Ressourceneffizienz im eigenen Unternehmen zu ermitteln und aufzuzeigen.	Ermittlung der Gründe für Ressourceneffizienz im eigenen Unternehmen	Kenntnis über verschiedene Gründe für das Thema Ressourceneffizienz	Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum)
Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, Hotspots bezüglich Ressourceneffizienz in ihrer Produktion zu identifizieren.	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, eine geeignete Hotspot-Methode für ihre Produktion auszuwählen.	Auswahl einer Hotspot-Analyse-methode	Kenntnis über verschiedene Hotspot-Methoden sowie deren Vor- und Nachteilen	Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum), ggf. Vergleichstool
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die gewählte Hotspot-Methode anzuwenden. Teilkompetenzen sind abhängig von der verwendeten Methode	Anwendung einer Hotspot-Methode und Identifikation von Hotspots	Kenntnisse zur Anwendung der jeweiligen Hotspot-Methode	Abhängig von der gewählten Hotspot-methode
Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, Ressourceneffizienzmaßnahmen für die ermittelten Hotspots zu identifizieren.	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, geeignete Quellen für Ressourceneffizienzmaßnahmen aufzuzählen.	Aufzählung möglicher Quellen für Ressourcen-effizienzmaßnahmen (in der Produktion)	Kenntnis über mögliche Quellen für Ressourceneffizienzmaßnahmen (in der Produktion)	Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum)
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die möglichen Quellen nach passenden Ressourceneffizienzmaßnahmen für ihre Hotspots zu durchsuchen.	Auswahl von passenden Ressourcen-effizienzmaßnahmen.	Kenntnis über mögliche Ressourceneffizienzmaßnahmen für die identifizierten Hotspots	implementierte Ressourcen-effizienzmaßnahmen → genaue Infrastruktur abhängig von gewählten Ressourceneffizienzmaßnahmen
...				

Ressourceneffizienz in der Produktion				
Hauptkompetenz	Subkompetenz	zugehörige Handlungen	Wissensbasis (was, wie, warum)	Notwendige Infrastruktur in der Lernfabrik
...				
Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die ermittelten Ressourceneffizienzmaßnahmen systematisch zu priorisieren und auszuwählen.	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, Kriterien zu benennen, nach denen man Maßnahmen priorisieren kann.	Aufzählung möglicher Kriterien zur Maßnahmenpriorisierung	Kenntnis über mögliche Priorisierungskriterien	Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum)
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, eine Amortisationsrechnung oder weitere Möglichkeiten der Kostenrechnung zu kennen und durchzuführen.	Priorisierung beispielhafter Maßnahmen	Kenntnis über Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen, Kenntnis über Möglichkeiten zur Berechnung des Einsparpotentials von Maßnahmen, bspw. Amortisationsrechnung, in €/Jahr	implementierte Ressourceneffizienzmaßnahmen → genaue Infrastruktur abhängig von gewählten Ressourceneffizienzmaßnahmen ggf. Taschenrechner/ Berechnungssoftware
Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die ausgewählten Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Produktion umzusetzen.	Teilkompetenzen abhängig von implementierter Maßnahme	Umsetzung der ausgewählten Maßnahmen	Abhängig von ausgewählten Ressourceneffizienzmaßnahmen	Abhängig von gewählten Ressourceneffizienzmaßnahmen
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, den Erfolg der umgesetzten Maßnahmen zu kontrollieren.	Implementierung eines Kontrollsystems	Möglichkeiten der Kontrolle und Validierung von Ressourceneffizienzmaßnahmen	Genauere Ausführung abhängig von gewählten Ressourceneffizienzmaßnahmen , aber bspw. Energiemonitoring-Tool

Anhang A-4 Kompetenztabellen für die verschiedenen Hotspot-Analysemethoden

Ökobilanz				
Hauptkompetenz	Subkompetenz	Zugehörige Handlungen	Wissensbasis (was, wie, warum)	Notwendige Infrastruktur in der Lernfabrik
Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, eine Ökobilanz durchzuführen und damit Ressourceneffizienz-Hotspots zu ermitteln.	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, das Vorgehen der Ökobilanz-Norm zu verstehen und anzuwenden.	Strategische Durchführung der 4 Schritte einer Ökobilanz	Kenntnis über Normen der Ökobilanz und darin enthaltene Vorgehensweise	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum), entsprechende Präsentationsfolien
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die Bedeutung verschiedener Wirkungskategorien im Zusammenhang mit den Umweltwirkungen von Produkten oder Prozessen zu verstehen und die für ihren Anwendungsfall passenden Wirkungskategorien und -indikatoren auszuwählen.	Auswahl von Wirkungskategorien und zugehörigen -indikatoren	Kenntnis über Umweltwirkungen und wie diese von Wirkungskategorien und -indikatoren abgebildet werden	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) entsprechende Präsentationsfolien ggf. Praxisbeispiele für verschiedene Wirkungskategorien in der Lernfabrik
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die genutzten und relevanten Ressourcen zu identifizieren.	Auflistung der genutzten Ressourcen der betrachteten Maschinen	Kenntnis über verschiedene Arten von Ressourcen, Verständnis des betrachteten Produktionsprozesses	<ul style="list-style-type: none"> Maschinen mit unterschiedlichen Ressourcen
	Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, notwendige Ressourcenbedarfe für die Ökobilanz zu ermitteln.	Extraktion von erforderlichen Ressourcenverbrauchsdaten aus verschiedenen Quellen, beispielsweise aus dem Energiemonitoring-Tool	Wissen über notwendige Daten, Wissen über verschiedene Möglichkeiten, um diese Daten zu bekommen, Verständnis des Produktionsprozesses	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) Messstellenkonzept zur Aufnahme von Ressourcenverbrauchsdaten Implementierte Sensorik inklusive Verknüpfung zu Energiemonitoring-Tool oder vergleichbar
	Nur bei produktspezifischer Ökobilanz: die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, passende Tracking & Tracing Technologien für die produktspezifische Zuordnung von Ressourcenbedarfen auszuwählen.	Auswahl einer Tracking & Tracing Technologie	Kenntnis über verschiedene Tracking & Tracing Technologien sowie deren Vor- und Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> Implementierte Tracking & Tracing Technologien
	Nur bei produktspezifischer Ökobilanz: die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die erfassten Ressourcenbedarfe produktspezifisch umzulegen, beispielsweise mit Allokationsmethoden.	Anwendung von Allokationsmethoden, Ermittlung produktspezifischer Verbräuche	Kenntnis über Allokationsmethoden	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) reale Prozesskette mit versch. Produktvarianten für die Anwendung von versch. Allokationsmethoden
	...			

Ökobilanz				
Hauptkompetenz	Subkompetenz	Zugehörige Handlungen	Wissensbasis (was, wie, warum)	Notwendige Infrastruktur in der Lernfabrik
Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, eine Ökobilanz durchzuführen und damit Ressourceneffizienz-Hotspots zu ermitteln.		...		
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, für die aufgenommen Ressourcenbedarfe die zugehörigen Wirkungsindikatoren zu ermitteln.	Nutzung einer Ökobilanz-Datenbank.	Verständnis über Einstellungen und Suchmöglichkeiten in Ökobilanz-Datenbanken.	<ul style="list-style-type: none"> Ökobilanz-Datenbank (verfügbar während des Workshops)
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die Ressourcenbedarfe bzw. deren zugehörigen Indikatorwerte miteinander ins Verhältnis zu setzen und Hotspots abzuleiten.	Visualisierung der ermittelten Treibhausgas-Emissionen, Ableitung von Ressourceneffizienz-Hotspots	Kenntnis über verschiedene Visualisierungsmöglichkeiten.	<ul style="list-style-type: none"> Visualisierungssoftware (verfügbar während des Workshops)
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, zu erläutern, warum und wie Umrechnungsfaktoren für die ausgewählten Wirkungskategorien eingesetzt werden.	Auflistung von Umrechnungsfaktoren	Verständnis über ausgewählte Wirkungskategorien	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum)
Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, Stärken und Limitationen der Ökobilanz zu erläutern.	Auflistung von Stärken und Limitationen der Methode	Kenntnis der Stärken und Limitationen der Methode	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) ggf. Anschauungsbeispiele für Stärken und Limitationen 	

CO ₂ -Bilanz				
Hauptkompetenz	Subkompetenz	Zugehörige Handlungen	Wissensbasis (was, wie, warum)	Notwendige Infrastruktur in der Lernfabrik
Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, eine CO ₂ -Bilanz durchzuführen und damit Ressourceneffizienz-Hotspots zu ermitteln.	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, aus unterschiedlichen Standards und Normen zur CO ₂ -Bilanz strukturiert den für ihren Anwendungsfall passenden auszuwählen.	Auswahl eines Standards oder einer Norm für die CO ₂ -Bilanz.	Kenntnis über gängige Normen und Standards zur CO ₂ -Bilanz sowie von deren Vor- und Nachteilen	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum)
	Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, notwendige Ressourcenverbräuche für die CO ₂ -Bilanz zu ermitteln	Extraktion von erforderlichen Ressourcenverbrauchsdaten aus verschiedenen Quellen, beispielsweise aus dem Energiemonitoring-Tool	Wissen über notwendige Daten, Wissen über verschiedene Möglichkeiten, um diese Daten zu bekommen, Verständnis des Produktionsprozesses	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) Messstellenkonzept zur Aufnahme von Ressourcenverbrauchsdaten Implementierte Sensorik inklusive Verknüpfung zu Energiemonitoring-Tool oder vergleichbar
		...		
CO ₂ -Bilanz				

Hauptkompetenz	Subkompetenz	Zugehörige Handlungen	Wissensbasis (was, wie, warum)	Notwendige Infrastruktur in der Lernfabrik
		...		
	Nur bei produktspezifischer CO ₂ -Bilanzierung: Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, passende Tracking & Tracing Technologien für die produktspezifische Zuordnung von Ressourcenverbräuchen auszuwählen	Auswahl einer Tracking & Tracing Technologie	Kenntnis über verschiedene Tracking & Tracing Technologien sowie deren Vor- und Nachteilen	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierte Tracking & Tracing Technologien
	Nur bei produktspezifischer CO ₂ -Bilanz: Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die erfassten Ressourcenbedarfe produktspezifisch umzulegen, beispielsweise mit Allokationsmethoden.	Anwendung von Allokationsmethoden, Ermittlung produktspezifischer Verbräuche	Kenntnis über Allokationsmethoden	<ul style="list-style-type: none"> • Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) • reale Prozesskette mit versch. Produktvarianten für die Anwendung von versch. Allokationsmethoden
:	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, für die aufgenommenen Ressourcenverbräuche die zugehörigen Treibhausgas-Emissionen zu ermitteln.	Nutzung einer CO ₂ -Datenbank.	Verständnis über Einstellungen und Suchmöglichkeiten in CO ₂ -Datenbanken.	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂-Datenbank (verfügbar während des Workshops)
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die Ressourcenverbräuche bzw. deren zugehörigen Emissionen miteinander ins Verhältnis zu setzen und Hotspots abzuleiten.	Visualisierung der ermittelten Treibhausgas-Emissionen, Ableitung von Ressourceneffizienz-Hotspots	Kenntnis über verschiedene Visualisierungsmöglichkeiten.	<ul style="list-style-type: none"> • Visualisierungssoftware (verfügbar während des Workshops)
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, zu erläutern, warum und wie Umrechnungsfaktoren für andere Treibhausgase eingesetzt werden	Auflistung von Umrechnungsfaktoren	Verständnis über klimaschädliche Wirkung von Treibhausgasen.	<ul style="list-style-type: none"> • Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum)
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, Stärken und Limitationen der CO ₂ -Bilanz zu erläutern	Auflistung von Stärken und Limitationen der Methode	Kenntnis der Stärken und Limitationen der Methode	<ul style="list-style-type: none"> • Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) • ggf. Anschauungsbeispiele für Stärken und Limitationen

Materialflusskostenrechnung (MFCA)				
Hauptkompetenz	Subkompetenz	Zugehörige Handlungen	Wissensbasis (was, wie, warum)	Notwendige Infrastruktur in der Lernfabrik
Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, eine Materialflusskostenrechnung durchzuführen und damit Ressourceneffizienz-Hotspots zu ermitteln.	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, das Vorgehen der MFCA zu verstehen und anzuwenden	Strategische Durchführung der Schritte einer MFCA	Kenntnis über Normen der MFCA und darin enthaltene Vorgehensweise	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum)
	Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, notwendige Ressourcenverbräuche für die MFCA zu ermitteln	Extraktion von erforderlichen Ressourcenverbrauchsdaten aus verschiedenen Quellen, beispielsweise aus dem Energiemonitoring-Tool	Wissen über notwendige Daten, Wissen über verschiedene Möglichkeiten, um diese Daten zu bekommen, Verständnis des Produktionsprozesses	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) Messstellenkonzept zur Aufnahme von Ressourcenverbrauchsdaten Implementierte Sensorik inklusive Verknüpfung zu Energiemonitoring-Tool oder vergleichbar
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, für die aufgenommen Ressourcenverbräuche die zugehörigen Kosten zu ermitteln	Ermittlung von Einkaufs-/ Entsorgungskosten	Verständnis über Kostenzusammensetzung von Ressourcen	<ul style="list-style-type: none"> Zugang zu Einkaufs-/ Entsorgungskosten der Prozesskette
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die Personalkosten im Zusammenhang mit der Produktion zu ermitteln	Ermittlung von Personalkosten	Verständnis über Zusammensetzung von Personalkosten	<ul style="list-style-type: none"> Zugang zu Einkaufs-/ Entsorgungskosten der Prozesskette
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die Ressourcenverbräuche bzw. deren zugehörigen Kosten miteinander ins Verhältnis zu setzen und Hotspots abzuleiten	Visualisierung der ermittelten Treibhausgas-Emissionen, Ableitung von Ressourceneffizienz-Hotspots	Kenntnis über verschiedene Visualisierungsmöglichkeiten.	<ul style="list-style-type: none"> Visualisierungssoftware (verfügbar während des Workshops)
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, Stärken und Limitationen der MFCA zu erläutern	Auflistung von Stärken und Limitationen der Methode	Kenntnis der Stärken und Limitationen der Methode	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) ggf. Anschauungsbeispiele für Stärken und Limitationen

Hauptkompetenz	Subkompetenz	Zugehörige Handlungen	Wissensbasis (was, wie, warum)	Notwendige Infrastruktur in der Lernfabrik
Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die Energiewertstrommethode durchzuführen und damit Ressourceneffizienz-Hotspots zu ermitteln.	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die klassische Wertstrommethode durchzuführen - siehe bestehende Literatur/separate Kompetenztabelle	Siehe Literatur/separate Kompetenztabelle	Siehe Literatur/separate Kompetenztabelle	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) Whiteboards zur Durchführung der Wertstromanalyse weiteres Equipment zur Durchführung der Wertstromanalyse (bspw. Stoppuhr) - siehe Literatur
	Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, notwendige Energiebedarfe für die einzelnen Prozessschritte zu ermitteln	Extraktion von erforderlichen Energiedaten aus verschiedenen Quellen, beispielsweise aus dem Energiemonitoring-Tool	Wissen über notwendige Daten, Wissen über verschiedene Möglichkeiten, um diese Daten zu bekommen, Verständnis des Produktionsprozesses	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) Messstellenkonzept zur Aufnahme von Energiebedarfen Implementierte Sensorik inklusive Verknüpfung zu Energiemonitoring-Tool oder vergleichbar Schnittstelle um die Energiedaten während des Workshops für Teilnehmer*innen zugänglich zu machen, bspw. Visualisierungssoftware
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die Energiebedarfe miteinander ins Verhältnis zu setzen, entsprechende Kenngrößen zu berechnen und Hotspots abzuleiten	Visualisierung der ermittelten EWSM-KPIs, Ableitung von Ressourceneffizienz-Hotspots	Kenntnis über Wertstromdarstellung, Kenntnis über EWSM-Kenngrößen	<ul style="list-style-type: none"> Whiteboards zur Visualisierung des Wertstroms
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, Stärken und Limitationen der EWSM zu erläutern	Auflistung von Stärken und Limitationen der Methode	Kenntnis der Stärken und Limitationen der Methode	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) ggf. Anschauungsbeispiele für Stärken und Limitationen

Hauptkompetenz	Subkompetenz	Zugehörige Handlungen	Wissensbasis (was, wie, warum)	Notwendige Infrastruktur in der Lernfabrik
Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, mit Hilfe einer Checkliste Ressourceneffizienz-Hotspots zu identifizieren.	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, aus unterschiedlichen Checklisten die für ihren Anwendungsfall passende auszuwählen oder sich selbst zusammenzustellen	Auswahl einer Ressourceneffizienz-Checkliste	Kenntnis über verfügbare Checklisten sowie deren Vor- und Nachteilen	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum)
	Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, eine Prozesskette entsprechend der aufgeführten Checkpunkte zu analysieren und Hotspots zu identifizieren	Analyse der Produktion auf Checkpunkte, Ableitung von Ressourceneffizienz-Hotspots	Kenntnis über einzelne Checkpunkte der Checkliste, Kenntnis über die Prozesskette	<ul style="list-style-type: none"> Prozesskette mit möglichst vielen Checkpunkten der ausgewählten Checkliste als Anschauungsbeispiele
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, Stärken und Limitationen der Checkliste zu erläutern	Auflistung von Stärken und Limitationen der Methode	Kenntnis der Stärken und Limitationen der Methode	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) ggf. Anschauungsbeispiele für Stärken und Limitationen

ABC-Analyse				
Hauptkompetenz	Subkompetenz	Zugehörige Handlungen	Wissensbasis (was, wie, warum)	Notwendige Infrastruktur in der Lernfabrik
Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, eine ABC-Analyse durchzuführen und damit Ressourceneffizienz-Hotspots zu ermitteln.	Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die Anschlussleistungen der Maschinen zu ermitteln	Extraktion von Anschlussleistungen bspw. von Typenschildern oder Datenblättern	Wissen über die Ermittlung der Anschlussleistung aus Typenschildangaben (bspw. synonyme Wörter), Verständnis des Produktionsprozesses	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) Einsehbarkeit von Typenschildern und/oder Datenblättern alternativ Anbringung von Schildern mit der Anschlussleistung
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die Anschlussleistungen der Maschinen miteinander ins Verhältnis zu setzen, in A, B und C Kategorien einzuteilen und darauf basierend Hotspots abzuleiten	Kategorisierung der Maschinen nach A, B und C	Kenntnis über ABC-Kategorisierung	<ul style="list-style-type: none"> Klemmbretter zum Schreiben und Rechnen für die Teilnehmer*innen
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, Stärken und Limitationen der ABC-Analyse zu erläutern	Auflistung von Stärken und Limitationen der Methode	Kenntnis der Stärken und Limitationen der Methode	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) ggf. Anschauungsbeispiele für Stärken und Limitationen

Portfolio-Matrix				
Hauptkompetenz	Subkompetenz	Zugehörige Handlungen	Wissensbasis (was, wie, warum)	Notwendige Infrastruktur in der Lernfabrik
Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die Portfolio-Matrix anzuwenden und damit Ressourceneffizienz-Hotspots zu ermitteln.	Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die Anschlussleistungen der Maschinen zu ermitteln	Extraktion von Anschlussleistungen bspw. von Typenschildern oder Datenblättern	Wissen über die Ermittlung der Anschlussleistung aus Typenschildangaben (bspw. synonyme Wörter), Verständnis des Produktionsprozesses	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) Einsehbarkeit von Typenschildern und/oder Datenblättern alternativ Anbringung von Schildern mit der Anschlussleistung
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die Betriebszeiten der Maschinen zu ermitteln	Ermittlung von Betriebszeiten	Bedienung eines Zeiterfassungsgerätes (bspw. Stoppuhr)	<ul style="list-style-type: none"> Produktionspläne/ Equipment zur Erfassung der Durchlaufzeit (bspw. Stoppuhr)
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die Anschlussleistungen der Maschinen und deren Betriebszeiten miteinander ins Verhältnis zu setzen, die vier Quadranten der Portfolio-Matrix einzuteilen und darauf basierend Hotspots abzuleiten	Kategorisierung der Maschinen entsprechend der vier Quadranten	Kenntnis über Quadranten der Portfoliomatrix	<ul style="list-style-type: none"> Klemmbretter zum Schreiben und Rechnen für die Teilnehmer*innen
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, Stärken und Limitationen der Portfolio-Matrix zu erläutern	Auflistung von Stärken und Limitationen der Methode	Kenntnis der Stärken und Limitationen der Methode	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) ggf. Anschauungsbeispiele für Stärken und Limitationen

Kumulierter Energieaufwand (KEA)				
Hauptkompetenz	Subkompetenz	Zugehörige Handlungen	Wissensbasis (was, wie, warum)	Notwendige Infrastruktur in der Lernfabrik
Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, den kumulierten Energieaufwand (KEA) und damit Ressourceneffizienz-Hotspots zu ermitteln.	Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, notwendige Energieaufwände mit Bezug zur Produktion zu ermitteln	Extraktion von erforderlichen Energiebedarfsdaten aus verschiedenen Quellen, beispielsweise aus dem Energiemonitoring-Tool	Wissen über notwendige Daten, Wissen über verschiedene Möglichkeiten, um diese Daten zu bekommen, Verständnis des Produktionsprozesses	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) Einsehbarkeit von Typenschildern und/oder Datenblättern alternativ Anbringung von Schildern mit der Anschlussleistung
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die erfassten Energiebedarfe produktspezifisch umzulegen, beispielsweise mit Allokationsmethoden	Anwendung von Allokationsmethoden, Ermittlung produktspezifischer Verbräuche	Kenntnis über Allokationsmethoden	<ul style="list-style-type: none"> Klemmbretter zum Schreiben und Rechnen für die Teilnehmer*innen
...				

Kumulierter Energieaufwand (KEA)				
Hauptkompetenz	Subkompetenz	Zugehörige Handlungen	Wissensbasis (was, wie, warum)	Notwendige Infrastruktur in der Lernfabrik
			...	
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die Energiebedarfe miteinander ins Verhältnis zu setzen und Hotspots abzuleiten	Vergleich der Energiebedarfe, Ableitung von Ressourceneffizienz-Hotspots	Kenntnis über Umrechnungsfaktoren von Einheiten (bspw. kWh in MJ)	<ul style="list-style-type: none"> Berechnungssoftware (verfügbar während des Workshops)
:	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, Stärken und Limitationen des KEA zu erläutern	Auflistung von Stärken und Limitationen der Methode	Kenntnis der Stärken und Limitationen der Methode	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) ggf. Anschauungsbeispiele für Stärken und Limitationen

Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)				
Hauptkompetenz	Subkompetenz	Zugehörige Handlungen	Wissensbasis (was, wie, warum)	Notwendige Infrastruktur in der Lernfabrik
Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, den kumulierten Rohstoffaufwand (KRA) und damit Ressourceneffizienz-Hotspots zu ermitteln.	Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, notwendige Rohstoffaufwände mit Bezug zur Produktion zu ermitteln	Extraktion von erforderlichen Rohstoffbedarfsdaten aus verschiedenen Quellen, beispielsweise aus dem Energiemonitoring-Tool	Wissen über notwendige Daten, Wissen über verschiedene Möglichkeiten, um diese Daten zu bekommen, Verständnis des Produktionsprozesses	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) Messstellenkonzept zur Aufnahme von Energiebedarfsdaten Implementierte Sensorik inklusive Verknüpfung zu Energiemonitoring-Tool oder vergleichbar
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die erfassten Rohstoffbedarfe produktspezifisch umzulegen, beispielsweise mit Allokationsmethoden	Anwendung von Allokationsmethoden, Ermittlung produktspezifischer Verbräuche	Kenntnis über Allokationsmethoden	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) reale Prozesskette mit versch. Produktvarianten für die Anwendung von versch. Allokationsmethoden
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, die Rohstoffbedarfe miteinander ins Verhältnis zu setzen und Hotspots abzuleiten.	Vergleich der Rohstoffbedarfe, Ableitung von Ressourceneffizienz-Hotspots	Kenntnis über Umrechnungsfaktoren von Einheiten (bspw. kWh in kg)	<ul style="list-style-type: none"> Umrechnungsfaktoren (zur Umrechnung in massebezogene Einheiten) Berechnungssoftware (verfügbar während des Workshops)
	Die Teilnehmer*innen besitzen die Kompetenz, Stärken und Limitationen des KRA zu erläutern.	Auflistung von Stärken und Limitationen der Methode	Kenntnis der Stärken und Limitationen der Methode	<ul style="list-style-type: none"> Platz für theoretische Einheiten (bspw. Seminarraum) → ggf. Anschauungsbeispiele für Stärken und Limitationen

Anhang A-5 Fragebogen zur systematischen Ermittlung der Randbedingungen von Lernfabriken

Der folgende Fragebogen dient zur Ermittlung des Ist-Standes einer Lernfabrik sowie anderen potenziellen Randbedingungen für eine Erweiterung.

Auf Basis der Antworten kann anschließend genauer abgestimmt werden, wie eine Erweiterung der Lernfabrik um das Thema Ressourceneffizienz konkret aussehen kann und was dafür notwendig ist (Schritte 2 bis 5 der Methodik). Die Antworten müssen nicht final ausformuliert sein, vielmehr dient der Fragebogen als Ideenstütze, um schon frühzeitig in Gesprächen mit den Lernfabrik-Stakeholdern die Randbedingungen für die Erweiterung zu ermitteln.

Organisationales Umfeld

1. Gibt es ein Budget für die Erweiterung? Wenn ja, wie hoch ist dieses circa?

2. Welche zeitlichen Kapazitäten und Kompetenzen sind auf Seiten des Trainingspersonals vorhanden?

3. Welche zeitlichen Kapazitäten und Kompetenzen sind auf Seiten des technischen Personals vorhanden?

Ziele der Lernfabrik

4. Welche Themen werden aktuell in der Lernfabrik vermittelt?

5. Was sind die Gründe für eine Erweiterung der Lernfabrik um das Thema Ressourceneffizienz?

6. Welchen zeitlichen Umfang soll das neue Ressourceneffizienz-Lernmodul haben?

Zielgruppe

7. Werden bestimmte Branchen in der Lernfabrik adressiert? Wenn ja, welche?

8. Welche Zielgruppe(n) wird/werden aktuell adressiert?

9. Soll mit der Erweiterung eine neue Zielgruppe adressiert werden? Wenn ja, welche?

10. Von welchen Kompetenzen kann bei der geplanten Zielgruppe ausgegangen werden? Was sind Randbedingungen (bspw. Zeit, finanzielles Budget...) der Zielgruppe?

Ist-Zustand

11. Welche Anlagen und Prozesse sind in der Lernfabrik aktuell vorhanden bzw. werden abgebildet?

12. Welche Ressourcen kommen bei den Anlagen zum Einsatz?

13. Welche Versorgungstechnischen Anlagen werden für die Prozesse benötigt? Sind diese Teil der Lernfabrik?

14. Welches Produkt bzw. welche Produkte werden aktuell in der Lernfabrik gefertigt? Aus welchen Materialien sind diese? Wie sieht die Prozesskette dazu aus?

15. Gibt es bereits Sensorik zur Erfassung von Ressourcenverbräuchen in der Lernfabrik? Wenn ja, welche?

16. Wenn Sensorik vorhanden ist: wo laufen die Werte auf? Gibt es ein Energiemonitoringsystem oder vergleichbares?

17. Ist Messtechnik für Ressourcenverbräuche (neben stationärer Sensorik) vorhanden? Wenn ja, welche?

18. Können in der Lernfabrik verschiedene Zustände der Produktion abgebildet werden (bspw. Ineffizient vs. Lean)? Wenn ja, welche?

19. Was ist die durchschnittliche Dauer der aktuellen Lernmodule?

20. Welche sonstige Ausstattung ist in der Lernfabrik aktuell vorhanden (bspw. Seminarraum, Whiteboards, weitere Sensorik, weitere Technologien etc.)?

Anhang A-6 Aufschlüsselung der Kostenpunkte zur Bewertung der Hotspot-Analysemethoden

Anzahl Strommesspunkte LEP	9
Preis pro Multimessgerät	265,00 €
Preis pro Stromwandler	40,00 €
Sonstiges Equipment (Buskoppler, Spannungsversorgung, Gehäuse, Messkarte)	680,00 €
Gesamt Strom LEP	3.425,00 €
Anzahl Durchflusssensoren LEP	3
Preis pro Durchflusssensor	220,00 €
Gesamt Druckluft LEP	660,00 €
Weiteres Equipment	
Feinwaage	150,00 €
Ecoinvent Education Lizenz	4.500,00 €
Ecoinvent, nur GWP-Faktoren	1.300,00 €
Umberto Efficiency +	4.500,00 €

Resultierende Kosten für die einzelnen Methoden:

Methode	Kosten Datenaufnahme	Kosten Berechnung/ Visualisierung	Begründung
LCA	4.235,00 €	4.500,00 €	Strom, Druckluft, Waage und eine Ecoinvent Lizenz mit allen Umweltwirkungen (Education Lizenz)
CF	4.235,00 €	1.300,00 €	Strom, Druckluft, Waage und eine Ecoinvent Lizenz mit GWP-Faktoren
MFCA	4.235,00 €	4.500,00 €	Strom, Druckluft, Waage und eine Umberto Efficiency + Lizenz zur Berechnung und Visualisierung
EWSM	3.425,00 €	-	Strom
KEA	3.425,00 €	-	Strom
KRA	4.235,00 €	4.500,00 €	Strom, Druckluft, Waage und eine Ecoinvent Lizenz mit allen Umweltwirkungen (Education Lizenz)

Anhang A-7 Reflexionsfragen für die einzelnen Hotspot-Analysemethoden**Ökobilanz****Was sind die Vorteile der Ökobilanz?**

- Detaillierte Bewertung des gesamten Produktlebenszyklus möglich
- Bewertung der Umweltwirkungen mit verschiedenen Indikatoren
- Effizienzpotenziale einzelner Maßnahmen gut quantifizierbar, weil für Analyse bereits Messungen notwendig
- Vergleich verschiedener Ressourcenbedarfe möglich

Was sind die Nachteile der Ökobilanz?

- Hoher Zeitaufwand für Einarbeitung und Durchführung
- Sensorik für Messungen notwendig
- Ggf. zusätzliche Kosten für Verrechnungssoftware und Ökobilanz-Datenbank notwendig

Durch welche Maßnahmen kann der Aufwand für die Durchführung der Ökobilanz reduziert werden?

- Beschränkung auf einen Wirkungsindikator, bspw. GWP → CO₂-Bilanz
- Implementierung eines Energiemonitorings zur kontinuierlichen Quantifizierung (zumindest bei mehrfacher Durchführung ergibt sich dadurch eine Zeitersparnis)

CO₂-Bilanz**Was sind die Vorteile der CO₂-Bilanz?**

- Detaillierte Bewertung des gesamten Produktlebenszyklus möglich
- Effizienzpotenziale einzelner Maßnahmen gut quantifizierbar, weil für Analyse bereits Messungen notwendig
- Bewertung der Umweltwirkungen mit CO₂-Äquivalenten
- Vergleich verschiedener Ressourcenbedarfe möglich

Was sind die Nachteile der CO₂-Bilanz?

- Hoher Zeitaufwand für Einarbeitung und Durchführung
- Sensorik für Messungen notwendig
- Ggf. zusätzliche Kosten für Verrechnungssoftware und CO₂-Datenbank notwendig

Durch welche Maßnahmen kann der Aufwand für die Durchführung der CO₂-Bilanz reduziert werden?

- Implementierung eines Energiemonitorings zur kontinuierlichen Quantifizierung (zumindest bei mehrfacher Durchführung ergibt sich dadurch eine Zeitersparnis)
- Nutzung von Allokationsmethoden bei produktspezifischer CO₂-Bilanz

Materialflusskostenrechnung

Was sind die Vorteile der Materialflusskostenrechnung?

- Bewertung der Ressourcenbedarfe hinsichtlich Kosten
- Effizienzpotenziale einzelner Maßnahmen gut quantifizierbar, weil für Analyse bereits Messungen notwendig
- Bewertung der Umweltwirkungen mit CO₂-Äquivalenten möglich
- Vergleich verschiedener Ressourcenbedarfe möglich

Was sind die Nachteile der Materialflusskostenrechnung?

- Hoher Zeitaufwand für Einarbeitung und Durchführung
- Zusätzlicher Aufwand für die Ermittlung der Kosten
- Ggf. zusätzliche Kosten für Verrechnungssoftware und CO₂-Datenbank notwendig
- Sensorik für Messungen notwendig
- Allokation der Kosten über Gewichtsanteile nicht intuitiv verständlich

Durch welche Maßnahmen kann der Aufwand für die Durchführung der Materialflusskostenrechnung reduziert werden?

- Implementierung eines Energiemonitorings zur kontinuierlichen Quantifizierung (zumindest bei mehrfacher Durchführung ergibt sich dadurch eine Zeitersparnis)

Checkliste

Was sind die Vorteile der Checkliste?

- Schnell und einfach durchführbar (wenn Checkliste verfügbar)
- Diverse Quellen für Checklisten im Internet verfügbar
- Keine Sensorik notwendig → kostengünstig

Was sind die Nachteile der Checkliste?

- Basierend auf allgemeinen Annahmen – keine Abbildung tatsächlicher Ressourcenbedarfe
- Ggf. Aufwand für die initiale Erstellung notwendig
- Kein Effizienzpotenzial der Anlagen auf Basis der Analyse quantifizierbar
- Kein Vergleich zwischen verschiedenen Energieformen und Ressourcenbedarfen möglich
- Nur grobe Bewertung der Ressourcenbedarfe möglich

Energiewertstrommethode

Was sind die Vorteile der Energiewertstrommethode?

- Darstellung der Ergebnisse in Form der verbreiteten Wertstrommethode
- Effizienzpotenziale einzelner Maßnahmen gut quantifizierbar, weil für Analyse bereits Messungen notwendig

Was sind die Nachteile der Energiewertstrommethode?

- Hoher Zeitaufwand für Einarbeitung und Durchführung
- Sensorik für Messungen notwendig
- Ggf. zusätzliche Kosten für Visualisierungssoftware notwendig
- Nur eine Energieform betrachtet
- Kein Vergleich zwischen verschiedenen Energieformen und Ressourcenbedarfen möglich

Durch welche Maßnahmen kann der Aufwand für die Durchführung der Energiewertstrommethode reduziert werden?

- Implementierung eines Energiemonitorings zur kontinuierlichen Quantifizierung (zumindest bei mehrfacher Durchführung ergibt sich dadurch ein Zeitersparnis)
- Empfehlenswert, wenn Kenntnis der klassischen Wertstrommethode vorhanden

ABC-Analyse**Was sind die Vorteile der ABC-Analyse?**

- Schnell und einfach durchführbar
- Keine Sensorik notwendig → kostengünstig

Was sind die Nachteile der ABC-Analyse?

- Verhältnis Bedarf zu Anschlussleistung unklar
- Faktor Zeit nicht betrachtet → Leistung statt Energie
- Kein Effizienzpotenzial der Anlagen auf Basis der Analyse quantifizierbar
- Nur eine Energieform betrachtet
- Kein Vergleich zwischen verschiedenen Energieformen und Ressourcenbedarfen möglich
- Nur grobe Bewertung der Energieverbraucher möglich

Durch welche Verbesserungen kann die Genauigkeit der ABC-Analyse erhöht werden?

- Lastprofil heranziehen → durchschnittliche Leistung statt Anschlussleistung verwenden
- Auslastung der Maschinen/Anlagen heranziehen → Portfolio-Matrix
- Anwendung der ABC-Analyse für weitere Energieformen

Portfolio-Matrix**Was sind die Vorteile der Portfolio-Matrix?**

- Schnell und einfach durchführbar
- Keine Sensorik notwendig → kostengünstig

Was sind die Nachteile der Portfolio-Matrix?

- Verhältnis Bedarf zu Anschlussleistung unklar
- Kein Effizienzpotenzial der Anlage auf Basis der Analyse quantifizierbar
- Nur eine Energieform betrachtet
- Kein Vergleich zwischen verschiedenen Energieformen und Ressourcenbedarfen möglich
- Nur grobe Bewertung der Energieverbraucher möglich

Durch welche Verbesserungen kann die Genauigkeit der Portfolio-Matrix erhöht werden?

- Lastprofil heranziehen → durchschnittliche Leistung statt Anschlussleistung verwenden
- Anwendung der Portfolio-Matrix für weitere Energieformen

Kumulierter Energieaufwand**Was sind die Vorteile des kumulierten Energieaufwands?**

- Effizienzpotenziale einzelner Maßnahmen gut quantifizierbar, weil für Analyse bereits Messungen notwendig
- Trotz Messungen keine separate Software für Verrechnung oder Visualisierung der Messwerte notwendig

Was sind die Nachteile des kumulierten Energieaufwands?

- Hoher Zeitaufwand für Einarbeitung und Durchführung
- Sensorik für Messungen notwendig
- Nur eine Energieform betrachtet
- Kein Vergleich zwischen verschiedenen Energieformen und Ressourcenbedarfen möglich

Durch welche Maßnahmen kann der Aufwand für die Durchführung des kumulierten Energieaufwands reduziert werden?

- Implementierung eines Energiemonitorings zur kontinuierlichen Quantifizierung (zumindest bei mehrfacher Durchführung ergibt sich dadurch eine Zeitersparnis)

Kumulierter Rohstoffaufwand**Was sind die Vorteile des kumulierten Rohstoffaufwands?**

- Bewertung der Ressourcenbedarfe hinsichtlich benötigter Rohstoffe
- Effizienzpotenziale einzelner Maßnahmen gut quantifizierbar, weil für Analyse bereits Messungen notwendig
- Vergleich verschiedener Ressourcenbedarfe möglich

Was sind die Nachteile des kumulierten Rohstoffaufwands?

- Hoher Zeitaufwand für Einarbeitung und Durchführung
- Ggf. zusätzliche Kosten für Datenbank zur Umrechnung der Ressourcenbedarfe in Kilogramm notwendig
- Sensorik für Messungen notwendig
- Quantifizierung aller Ressourcen in Kilogramm nicht intuitiv verständlich

Durch welche Maßnahmen kann der Aufwand für die Durchführung des kumulierten Rohstoffaufwands reduziert werden?

- Implementierung eines Energiemonitorings zur kontinuierlichen Quantifizierung (zumindest bei mehrfacher Durchführung ergibt sich dadurch eine Zeitersparnis)

Anhang A-8 Handlungsempfehlungen für die Erweiterung der CiP

Abstimmung über Lerninhalte des potenziellen Workshopmoduls

1. Hotspotmethoden

- Kombination der Energiewertstrommethode in Kombination mit digitalem Wertstromboard → Kombination mit Digitalisierungsinhalten

2. Ressourceneffizienzmaßnahmen

Welche Maßnahmen sollen im Shopfloor der CiP gezeigt werden?

Empfehlung auf Basis der Hotspots:

- Abschalten bei Leerlauf/Stand-by → gut kombinierbar mit Lean-Prinzipien
 - Sofortige Meldung von Qualitätsprobleme → gesonderte Erfassung notwendig, wie viel Energie auf Qualitätsprobleme entfällt
 - Wahl der Zykluszeit unter Berücksichtigung von Ressourceneffizienz (Optimierung Vorschubgeschwindigkeit Zerspanungsmaschinen) → Sensibilisierung für Trade-Offs zwischen Lean und Ressourceneffizienz
 - Einsatz ressourceneffizienter Fertigungsverfahren → Elektro- statt Druckluftschrauber in der Montage
 - Einsatz effizienter Schaltschrank- und/oder Maschinenkühler an den Zerspanungsmaschinen (Säge, Dreh- und Fräsmaschine)
- für alle Maßnahmen sollte zumindest eine initiale Quantifizierung erfolgen, die dann möglichst gut für den Workshop visualisiert werden kann

Erweiterungen in der Lernfabrik

Die genauen Erweiterungen sind abhängig von den Ressourceneffizienzmaßnahmen und der Ausgestaltung der Energiewertstrommethode, aber als Idee:

Für Energiewertstrommethode:

- Implementierung von Sensorik zur Erfassung der elektrischen Energie aller Prozessschritte der Werkstattfertigung, inklusive Druckluftkompressor
- Bereitstellung der Messwerte (elektrischer Energiebedarf und Druckluftbedarf) für alle Prozessschritte der Werkstattfertigung entweder:
 - über Grafana-Dashboard
 - über ablesbare Sensorik
 - oder über „Abzug“ aus (zukünftigem) Energiemonitoring-Tool Apról (csv)
- Nutzung von Apról für die Einbindung von energiebezogener Sensorik → keine separate Energiemonitoringsoftware notwendig

Für Ressourceneffizienzmaßnahmen:

- Prozess zur Abschaltung der Maschinen im Leerlauf durch die Mitarbeiter*innen oder automatisierte Abschaltung ggf. in Abgleich mit Produktionsplan
- Prozess zur Meldung von Qualitätsproblemen sichtbar machen
- Einstellung alternativer Zerspanungsprogramme
- Implementierung von Elektroschraubern
- Ggf. Implementierung von effizienten Schaltschrank- und/oder Maschinenkühlern

Weitere mögliche Maßnahmen können dem entwickelten Maßnahmenkatalog entnommen werden (Link folgt) – die ermittelten Maßnahmen dort dienen als Inspiration und Diskussionsgrundlage darüber, welche Maßnahmen ggf. noch in der CiP möglich wären.

Erstellung des Foliensatzes und der Übungsunterlagen

Sind die Inhalte des Workshops festgelegt, gilt es noch, den entsprechenden Foliensatz und Übungsunterlagen zu erstellen. Als Inspiration können hier Unterlagen aus der ETA-Fabrik der TU Darmstadt dienen, in der bereits ein Foliensatz für die Energiewertstrommethode entwickelt wurde.

Als mögliches Konzept für einen Workshop (2 Tage) wird Folgendes vorgeschlagen:

Tag 1

Begrüßung und Einführung	9:00 - 9:15
Wiederholung Grundlagen der Wertstrommethode	9:15 - 10:00
Praxis I: Wertstromerfassung CiP inkl. Diskussion der Ergebnisse	10:00 - 11:00
<i>Pause</i>	<i>11:00 - 11:15</i>
Theorie: Grundlagen Energiewertstrom	11:15 - 12:15
<ul style="list-style-type: none"> • Symbole und Kennzahlen • Grundlagen Energieformen • Messtechnik zur Erfassung des Energiebedarfs 	
<i>Pause</i>	<i>12:15 - 13:00</i>
Praxis II: Erstellung des Energiewertstroms für die CiP inkl. Diskussion der Ergebnisse	13:00 - 14:15
Bewertung des Energiewertstroms über Effizienzgrad	14:15 - 14:45
<i>Pause</i>	<i>14:45 - 15:00</i>
Theorie: Energieverschwendungsarten	15:00 - 15:45

Wrap Up Tag 1	15:45 - 16:00
----------------------	---------------

Tag 2

Wiederholung Tag 1	9:00 - 9:30
Erweiterter Energiewertstrom inkl. Druckluft und thermischer Energie	9:30 - 10:00
Theorie: Energiewertstromdesign basierend auf Gestaltungsrichtlinien bzw. Energieverschwendungsarten	10:00 - 10:30
<i>Pause</i>	<i>10:30 - 10:45</i>
Theorie: Energiewertstromdesign (Fortsetzung)	10:45 - 11:30
Maßnahmen CiP („Nachher - Zustand“) - Zuordnung zu den Gestaltungsrichtlinien	11:30 - 12:30
<i>Pause (Mittagessen)</i>	<i>12:30 - 13:15</i>
Theorie: digitaler (Energie-)Wertstrom	13:15 - 14:00
Vorstellung digitaler (Energie-)Wertstrom CiP	14:00 - 15:00
<i>Pause</i>	<i>15:00 - 15:15</i>
Rückblick und Wiederholung	15:15 - 15:45
Abschluss, offene Fragen, Feedback	15:45 - 16:00

Anhang A-9 Handlungsempfehlungen für die Erweiterung des ILC

Abstimmung über Lerninhalte des potenziellen Workshopmoduls

1. Hotspotmethoden

Welche Methode(n) sollen geschult werden? → Vergleichstool und Folien können zur Einordnung genutzt werden

Resultat:

- ABC-Analyse zum „Kennenlernen“/leichten Einstieg in das Thema – Theorie und Durchführung einer interaktiven Übung für die gesamte Prozesskette
- gefolgt von der CO₂-Bilanz zur tieferen Analyse – Theorie und Durchführung einer interaktiven Übung für repräsentative Maschine (am besten eine Maschine wählen, an der auch ein tatsächlicher Betrieb im Workshop möglich ist)
- optional/in Absprache mit ONIQ: Energiewertstrommethode mit Darstellung im Digitalen Wertstromboard

2. Ressourceneffizienzmaßnahmen

Welche Maßnahmen sollen im Shopfloor des Innovation and Learning Centers Aachen gezeigt werden?

Empfehlung:

- Wärmedämmung beim Thermosetting
- Betriebsoptimierung für Parameter beim Thermosetting und ggf. auch beim Drucken
- Ausschussminimierung durch In-Line-Qualitätsmonitoring

→ für alle Maßnahmen sollte zumindest eine initiale Quantifizierung erfolgen, die dann möglichst gut für den Workshop visualisiert werden kann

Erweiterungen in der Lernfabrik

Die genauen Erweiterungen sind abhängig von den letztlich gewählten Methoden und den Ressourceneffizienzmaßnahmen, aber als Idee:

Für ABC-Analyse:

- Anbringung von Schildern mit der Anschlussleistung gut sichtbar an den Maschinen

Für CO₂-Bilanz:

Ziel: Veranschaulichung von verschiedenen Wegen, um Verbrauchswerte für die CO₂-Bilanz zu ermitteln (vgl. Folie zu den Erfassungsarten)

- Bereitstellung beispielhafter Messwerte für einen Prozess, entweder:
 - über Grafana-Dashboard (Werte prüfen und ggf. Rücksprache halten mit Elektrik-Abteilung ILC),
 - über ablesbaren Sensor
 - oder über „Abzug“ aus Energiemonitoring-Tool (csv)

- Bereitstellung einer Waage im Workshop für Gewicht Endprodukt, RFID-Tags etc.
- Bereitstellung von Datenblättern mit verbrauchsrelevanten Infos, bspw. zum Druckluftbedarf
- Bereitstellung von Angaben zur Dauer der einzelnen Prozessschritte (wenn eine produktspezifische Bilanz erfolgen soll)
 - Über die Werker*innen, die diese Infos auf Nachfrage rausgeben
 - Über eigene Messungen im Workshop, bpsw. Mit einer Stoppuhr
 - Über das Wertstromabbild (wenn hier produktspezifische Zeiten vorhanden sind)
- Bereitstellung von „Verrechnungsgeräten“, bspw. Tablets – oder die Bitte an Teilnehmende, Laptops mitzubringen

Für Ressourceneffizienzmaßnahmen:

- Dämmmaterialien bzw. Abdeckungen für die Thermosetting-Maschine besorgen oder bauen → im Anschluss Prozessparameter prüfen und entsprechend anpassen)
- Quantifizierung der vorhandenen Betriebsoptimierung hinsichtlich Energieeinsparung und Emissionsminderung sowie Einbau dieser Potenziale in vorhandene Visualisierungen zum Thema
- Quantifizierung weiterer Einsparmaßnahmen bspw. Ausschussminimierung durch Qualitätsüberwachung und Darstellung in geeigneter Form, bspw. auf Plakat, in Form eines Sankey-Diagramms o.ä.
- Beschaffung alternativer Garne zur Visualisierung des Einflusses der Rohmaterialien → hier sollten zunächst geeignete Daten zur Quantifizierung dieser Maßnahmen gesucht werden

Weitere mögliche Maßnahmen können dem entwickelten Maßnahmenkatalog entnommen werden – die ermittelten Maßnahmen dort dienen als Inspiration und Diskussionsgrundlage darüber, welche Maßnahmen ggf. noch am ILC möglich wären.

Erstellung des Foliensatzes und der Übungsunterlagen

Sind die Inhalte des Workshops festgelegt, gilt es noch, den entsprechenden Foliensatz und Übungsunterlagen zu erstellen. Als Inspiration können hier Unterlagen aus der IALF-Arbeitsgruppe bspw. von den Universitäten Darmstadt und Graz dienen.

Als mögliches Konzept für einen Workshop (1 Tag) wird Folgendes vorgeschlagen:

Begrüßung	9:00 - 9:10
Lernziele und Motivation	9:10 - 9:40
<ul style="list-style-type: none"> • Warum ist das Thema Ressourceneffizienz (für Unternehmen) relevant? • Was sind verschiedene Ziele, die mit dem Thema Ressourceneffizienz verfolgt werden können? 	

<ul style="list-style-type: none">• Wie geht man vor, um das Thema Ressourceneffizienz im eigenen Betrieb zu adressieren?	
CO₂-Bilanz – Grundlagen	9:40 - 10:20
<ul style="list-style-type: none">• Überblick über Standards zur CO₂-Bilanz• Mögliche Erfassungsarten für Ressourcenverbräuche	
Praxis I – ABC-Analyse und CO₂-Bilanz einer Anlage	10:20 - 12:00
<i>Pause</i>	12:00 - 13:15
Führung durch das ILC	13:15 - 14:15
Ressourcenverschwendungsarten	14:15 - 14:45
<ul style="list-style-type: none">• Theoretischer Input zu typischen Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Industrie• Ggf. explizit Bezug zur Textilbranche	
Praxis II – Ressourcenverschwendungsarten:	14:45 - 15:30
<ul style="list-style-type: none">• Im ILC: Teilnehmende versuchen, so viele Maßnahmen wie möglich zu sammeln (ggf. nach Kategorien oder Maschinen sortiert)• im Anschluss wird „aufgelöst“, was für Maßnahmen im ILC (theoretisch) möglich wären• falls möglich werden die implementierten Maßnahmen gezeigt	
Abschluss, offene Fragen, Feedback	15:30 - 16:00

Anhang A-10 Handlungsempfehlungen für die Erweiterung der LEP

Abstimmung über Lerninhalte des potenziellen Workshopmoduls

1. Hotspotmethoden

Welche Methode(n) sollen geschult werden? → Vergleichstool und Folien können zur Einordnung genutzt werden

Resultat:

- Energiebezogene Methoden werden teils schon geschult, Pflichtkriterium ist die Adressierung weiterer Ressourcen → CO₂-Bilanz eignet sich gut
- Spezifizierung auf produktspezifische CO₂-Bilanz, da besonders interessant und „neu“ für die Zielgruppe

2. Ressourceneffizienzmaßnahmen

Welche Maßnahmen sollen in der LEP gezeigt werden?

Empfehlung:

- Da bereits viele Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in der LEP gezeigt werden, wird davon abgesehen, weitere Maßnahmen zu implementieren
- Quantifizierung sollte aber in CO₂-Äquivalenten erfolgen und auch die Auswirkungen auf weitere Betriebsmittel (bspw. das Thermalöl) sollte berücksichtigt werden

→ für alle Maßnahmen sollte zumindest eine initiale Quantifizierung in CO₂-Äquivalenten erfolgen, die dann möglichst gut für den Workshop visualisiert werden kann

Erweiterungen in der Lernfabrik

Für die produktspezifische CO₂-Bilanz:

Ziel: Veranschaulichung von verschiedenen Wegen, um Verbrauchswerte für die CO₂-Bilanz zu ermitteln (vgl. Folie zu den Erfassungsarten)

- Bereitstellung beispielhafter Messwerte für einen Prozess, über „Abzug“ aus Energiemonitoring-Tool Eneffco (csv)
- Bereitstellung einer Waage im Workshop für Gewicht Endprodukt, Späne etc.
- Bereitstellung von Zugängen zum manuellen Ablesen von Sensoren (bspw. Druckluftsensor WZM)
- Bereitstellung von Angaben zur Dauer der einzelnen Prozessschritte über eigene Messungen im Workshop, bpsw. mit einer Stoppuhr
- Implementierung von passender Traceability-Sensorik (bspw. Handscanner, Lichtschranke am Ofen) zur produktspezifischen, automatisierten Berechnung → Vorarbeiten des PTW (Gruppe MiP) können genutzt werden
- Bereitstellung von „Verrechnungsgeräten“, bspw. Tablets – oder die Bitte an Teilnehmende, Laptops mitzubringen

Für Ressourceneffizienzmaßnahmen:

- „Kontroverse“ am Ölbad rausstellen: durch effizienten Zustand kann an vielen Stellen elektrische Energie gespart werden, allerdings wird dadurch, dass bereits vor dem

Ölbad montiert wird, ein größerer Korb beim Ölbad verwendet, an dem mehr Öl hängen bleibt → der Bedarf an Thermalöl steigt also tatsächlich im effizienten Zustand der LEP

Erstellung des Foliensatzes und der Übungsunterlagen

Sind die Inhalte des Workshops festgelegt, gilt es noch, den entsprechenden Foliensatz und Übungsunterlagen zu erstellen. Dies erfolgt im Rahmen des Mittelstand Digital Zentrum (MDZ) Darmstadt.

Als mögliches Konzept für einen Workshop (1 Tag) wird Folgendes vorgeschlagen:

Begrüßung	9:00 - 9:10
Lernziele und Motivation	9:10 - 9:25
<ul style="list-style-type: none"> • Warum ist das Thema Ressourceneffizienz (für Unternehmen) relevant? • Was sind verschiedene Ziele, die mit dem Thema Ressourceneffizienz verfolgt werden können? • Wie geht man vor, um das Thema Ressourceneffizienz im eigenen Betrieb zu adressieren? 	
CO₂-Bilanz – Grundlagen	9:25 - 10:40
<ul style="list-style-type: none"> • Überblick über Standards zur CO₂-Bilanz • Herausforderungen der produktspezifischen CO₂-Bilanz inkl. Anschauungsbeispiel • Priorisierung von Messungen mittels ABC-Analyse • Mögliche Erfassungsarten für Ressourcenverbräuche 	
Praxis I – ABC-Analyse und CO₂-Bilanz einer LEP-Anlage	10:40 - 12:15
<i>Pause</i>	12:15 - 13:15
Führung durch die ETA	13:15 - 14:15
Ressourcenverschwendungsarten	14:15 - 14:45
<ul style="list-style-type: none"> • Theoretischer Input zu typischen Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Industrie 	
Praxis II – Ressourcenverschwendungsarten:	14:45 - 15:30
<ul style="list-style-type: none"> • Teilnehmende versuchen, so viele Maßnahmen wie möglich zu sammeln (nach Kategorien oder Maschinen sortiert) • im Anschluss wird „aufgelöst“, was für Maßnahmen in der LEP möglich sind • implementierten Maßnahmen werden auf dem CO₂-Dashboard gezeigt 	

Abschluss, offene Fragen, Feedback

15:30 - 16:00

Anhang A-11 Zusammenfassung der Rückmeldungen der Befragung

Die nachfolgende Tabelle stellt dar, wie oft die einzelnen Rückmeldungen der Bewertungsskala von den 16 Befragten jeweils getätigt wurden.

Evaluationsthese	Bewertungsskala					
	Stimme voll zu	Stimme eher zu	Teils - teils	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Kann ich nicht beurteilen
T1: In der erweiterten Lernfabrik lassen sich (nach Umsetzung der Handlungsempfehlungen) Ressourceneffizienzworkshops durchführen	11	3				2
T2: Die aus der Methodik resultierenden Handlungsempfehlungen sind inhaltlich passend.	10	4				2
T3: Die Methodik adressiert das Vorgehen zur Steigerung von Ressourceneffizienz in Unternehmen in geeigneter Weise.	6	5	1			4
T4: Die Methodik ist zur Erweiterung von Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz geeignet.	16					
T5: Die Methodik ist hilfreich bei der Erweiterung von Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz.	13	3				
T6: Die Methodik ist strukturiert und nachvollziehbar aufgebaut.	13	2	1			
T7: Die Methodik hat einen angemessenen Umfang.	12	3				1
T8: Die Methodik fokussiert sich auf wesentliche Elemente.	12	3				1
T9: Die aus der Methodik resultierenden Handlungsempfehlungen sind in geeignetem Umfang konkretisiert.	11	3				2
T10: Die Methodik lässt sich auf unterschiedliche Randbedingungen anpassen.	9	3				4
T11: Die mit der Methodik bereitgestellten Werkzeuge bieten eine geeignete Unterstützung für die Anwendung.	11	4				1
T12: Der zeitliche Aufwand für die Anwendung der Methodik ist angemessen.	6	1	2			7
T13: Die Anwendung der Methodik ist empfehlenswert.	9	5				2

Im Folgenden sind die Antworten auf die Freitextfelder gesammelt.

1. Wo sehen Sie den Mehrwert der Methodik zur Erweiterung von Lernfabriken?

- Es werden notwendige Schritte und Informationen bei der Erweiterung von Lernfabriken aufgezeigt, strukturiert und Ansätze/Tools zur Verfügung gestellt, um an diese Informationen zu gelangen und die Ergebnisse zu verwerten.

- Bereitstellung von geeigneten Werkzeugen zur Anwendung der Methodik, Grundsätzlich strukturierte Vorgehensweise zur Anwendung der Werkzeuge, Geeignete Aufbereitung von Vorwissen zur Anwendung
- Die Methodik hilft dabei, einen strukturierten Ansatz bei der Weiterentwicklung der Lernfabrik zu wählen und Veränderungsbedarfe gezielt zu erkennen und umzusetzen.
- Fokus auf Analysemethoden und umsetzbare Maßnahmen führt zu gut nachvollziehbaren Ergebnissen
- Adaption des Vorgehens auf jeweilige Lernfabrik: Vorgehen gemäß Problem-Pull und nicht Theory-Push
- Lernfabriken können durch die erlernte Methode neue Kompetenzen entwickeln und diese an Studierende und Industrie weitergeben. Auf Basis der Methoden können zudem neue Use Cases auf dem Shopfloor entwickelt und das Partnernetzwerk erweitert werden.
- In der strukturiert geführten Erweiterung durch Ressourceneffizienzmaßnahmen und damit als Grundlage für den Wissenstransfer in diesem Themenfeld.
- Geordnete, klar strukturierte Herangehensweise um Lernfabriken im Thema Nachhaltigkeit zu verbessern, dadurch auch bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse, wenn von allen die gleiche Methodik genutzt wurde
- Die Methodik bietet die Möglichkeit, das bestehende Konzept der eigenen Lernfabrik um neue, zukunftsweisende Themen zu erweitern. Dabei werden die Besonderheiten der eigenen Lernumgebung berücksichtigt und gezielt hieran angeknüpft.
- Methodik gibt den Lernfabrikverantwortlichen die Möglichkeit, die Erweiterung quasi nach Checkliste durchzuführen -> Robustheit durch Nachvollziehbarkeit
- Ressourceneffizienz wird wahrscheinlich auch langfristig ein wichtiges Thema bleiben, wodurch Lernfabriken, die sich mit diesem Thema beschäftigen, einen großen Wissensbeiwert haben werden
- Methodik zeigt zum einen Bandbreite an Möglichkeiten, unterstützt aber auch die Entscheidungsfindung (welche Schwerpunkte, Maßnahmen, etc.). Hilfreich ist sicherlich das Vorhandensein von quantitativen und qualitativen Kriterien.
- Die Methodik macht die Auswahl/Entscheidung nachvollziehbar.
- Methodik dürfte auch gut im Team funktionieren.
- Die Methodik bietet ein allumfassendes Rahmprogramm, welches eine Orientierung zur Optimierung der Energieeffizienz in einer Lernfabrik darstellt. Man kann Ressourcenweise (Maschinen, Lifecycle, Verantwortlichkeit) eine Übersicht des Energiebedarfes erzeugen

2. Was würden Sie an der Methodik zur Erweiterung von Lernfabriken um das Thema Ressourceneffizienz verbessern?

- Tatsächlich ist mir unklar, inwiefern die Kompetenz der Lehrenden bzw. Entscheider berücksichtigt wird. Womöglich ist dieser Aspekt in Schritt 1 (Organisationales Umfeld?) abgedeckt. Die Trainer in der Lernfabrik benötigen selbst hinreichendes Wissen und Fähigkeiten um Ressourceneffizienz vermitteln zu können.
- Den Mehrwert der Hotspot-Analysemethoden klarstellen (in Lernfabriken weniger wichtig (bzw. eher zur Maßnahmenpriorisierung), in Unternehmen schon wichtig).
- Vorgehen bei der Zusammenführung von Ergebnissen der Hotspot-Analysemethoden vorgeben bzw. in der Methodik klarstellen, dass die Ergebnisse der Analysemethoden jeweils separat ausgewertet werden und zum Schluss zusammengeführt werden. Erwähnen, dass die Ergebnisse der Analysemethoden auch relativiert werden müssen.

- Klärung: Sind Schritt 2 und 3 parallel und aufeinanderfolgend? (Auswahl und Anwendung der Hotspotanalysen klarer darstellen)
- Welche Schritte der Reihe nach durchlaufen werden, ist teilweise schwer ersichtlich in der Darstellung.
- Iteration/Rückführung nach einzelnen Teilschritten der Methode eventuell sinnvoll? Bspw. nach Anwendung der Hotspot-methode in der eigenen Lernfabrik?
- Eigentlich nichts – aber ich freue mich auf das Tool zur Auswahl der besten Methode
- Ein Tutorial-Video für den Maßnahmenkatalog zur schnellen Einarbeitung, weil der Katalog zahlreiche Optionen hat, ist es im ersten Blick schwierig zu verstehen.
- Erfassung des Ist-Zustands basierend auf Fragebogen könnte systematischer erfolgen. Was ändert sich durch RE im Vergleich zu bereits adressierten Themen?

3. Haben Sie weitere Anmerkungen oder Kommentare zur Methodik?

- Vergleichstool: Akronyme der Methoden klarstellen, zu bearbeitende Felder visuell hervorheben zur Erleichterung der Nutzung, ggf. zusätzliches Kriterium: Notwendige Informationen/Tools für die Umsetzung der Analyseverfahren vorhanden/nicht vorhanden (Bsp. Checkliste)
- Nicht direkt zur Methodik: das „Vergleichstool Methoden“ ist für mich nur schwer nutzbar, da ich die einzelnen Methoden nicht kenne. Hier wäre eine Kurzbeschreibung zu den einzelnen Methoden hilfreich, um bspw. auch den Aufwand einzuschätzen
- Ist der Methodenvergleich problemlos erweiterbar (z.B. falls neue Methoden hinzukommen oder sich für bestehende die Rahmenbedingungen ändern)?
- Die Begrifflichkeiten von Stellhebeln und Hotspots könnten etwas detaillierter beschrieben sein.
- Entwicklung der Lernmodule: Da es hierfür keine (Teil-)Methodik gibt, ggf. Grundlagen zu den verschiedenen Formaten und/oder Best-Practices als Orientierung einführen.
- Für Steigerung Ressourceneffizienz in Unternehmen schon auch interessant und so durchführbar, allerdings ist der Fokus in den Schritten dann ja jeweils ein anderer (Zielgruppe entfällt bspw.; Methodenauswahl unter anderen Aspekten, etc.)
- Ich habe die Methodik nicht selbst angewandt (daher nur bedingte Bewertungsmöglichkeit)
- Maßnahmen sind für mich leider nur schwer zu bewerten
- Anmerkung: Bei dem Punkt „Handlungsempfehlungen sind in geeignetem Umfang konkretisiert“ ging ich vom Maßnahmenkatalog aus, den ich damals getestet hatte – fand ich sehr geeignet für das Vorhaben!
- Im ersten Eindruck ist die Methodik sehr verständlich und umfassend, weitere Anmerkungen werden möglicherweise nach der ersten Nutzung auftreten.
- Ich habe zweimal Punkte abgezogen, aber nicht wegen meiner persönlichen Meinung, sondern eher wegen Industrie- (und Akademia-)meinungen, die ich immer wieder mitbekomme; CO₂/THG-Bilanzierung bietet mMn einen großen Hebel, um Ressourceneffizienz zu thematisieren. Allerdings gibt es immer wieder die Aussage, dass das CO₂-Thema nur kurzfristiger Hype/unwichtig ist, da Klimawandel über andere Mittel angegangen werden muss (zB Wasserverbrauch, Landnutzung, etc). Insofern sehe ich hier den Aspekt, dass es (natürlich) Nein-Sager geben wird, die sich beim Wort CO₂ mindestens mental abschalten, wodurch der Mehrwert der Lernfabrik sinkt. Allerdings kenne ich keine Möglichkeit, alle Beteiligten zu 100% abzuholen, weswegen ich diesen Punkt nicht als tragisch empfinde.

Berechnungs- und Visualisierungssoftware wie bspw. Ökobilanz-Datenbanken oder eine Ökobilanz-Software ist vorhanden:

		Methoden			
Kriterium		LCA	CF	MFCA	KRA
Aufwand	Kosten				
	für die Berechnung und Visualisierung	1 ●	1 ●	1 ●	1 ●

Die Zielgruppe des Workshops ist im Unternehmen für die Implementierung von Messtechnik bzw. die Koordination zuständig und benötigt hier noch Kompetenzen:

		Methoden					
Kriterium		LCA	CF	MFCA	EWSM	KEA	KRA
Aufwand	Zeitwand						
	für das initiale Erlernen	0 ○	0 ○	0 ○	0 ○	0 ○	0 ○

Die Zielgruppe des Workshops ist mit der klassischen Wertstrommethode vertraut:

		Methode
Kriterium		EWSM
Aufwand	Zeitwand	
	für das initiale Erlernen	0,5 ●

Ist die Bewertung ggf. angepasst und die Gewichtung eingetragen, zeigt das Tool eine Gesamtbewertung für den Vergleich der einzelnen Methoden.

Wichtig: das Ergebnis dient als Diskussionsgrundlage für weitere Gespräche innerhalb des Lernfabrik-Teams und sollte nicht als „Muss“ angesehen werden. So kann bspw. die Frage, ob die unterrichtete Methode eine Quantifizierung erlauben sollte, zum Abschluss mehrerer Methoden führen.

Schritt 3

Nach der Auswahl einer oder mehrerer Hotspot-Analysemethoden, die in der Lernfabrik zukünftig geschult werden sollen, kann es sich anbieten, die jeweilige(n) Methode(n) einmal in der eigenen Lernfabrik durchzuführen und auf diese Weise Hotspots zu ermitteln. Im nächsten Schritt können diese Hotspots zur Filterung nach Maßnahmen für Ressourceneffizienz genutzt werden, die in der erweiterten Lernfabrik gezeigt werden sollen. Für die Auswahl von Maßnahmen steht ein entwickelter Maßnahmenkatalog, bereitgestellt in einem Maßnahmentool, über TUDatalib zur Verfügung (Weyand et al., 2024). Darin kann nach verschiedenen Kategorien gefiltert werden. Da in der Lernfabrik nicht zwangsläufig nur Maßnahmen an den Hotspots gezeigt werden müssen, sondern auch Maßnahmen für die Teilnehmer*innen spannend sein können, die in der

Prozesskette der Lernfabrik keinen Hotspot adressieren, kann das Maßnahmentool auch einfach nach allen Anlagen gefiltert werden, die in der Lernfabrik vorhanden sind. Außerdem kann im Tool noch nach bis zu fünf Kategorien priorisiert werden. Bei der Filterung und Priorisierung der Maßnahmen können wieder die in Schritt 1 erfassten Randbedingungen genutzt werden. Die resultierende Liste an Ressourceneffizienzmaßnahmen sollte im Anschluss im dem Lernfabrik-Team besprochen werden. Teilweise sind Maßnahmen ggf. schon im Rahmen der anderen Lernfabrikthemen implementiert, oder können aufwandsarm umgesetzt werden, weil entsprechende Projekte vorgesehen sind etc.

Schritt 4 und 5

Sind die zu schulenden Hotspot-Analysemethoden ausgewählt, kann mit Hilfe der Kompetenztabellen in Anhang A-4 ermittelt werden, welche Infrastruktur dafür in der Lernfabrik notwendig ist. In Kombination mit den ausgewählten Ressourceneffizienzmaßnahmen ergibt sich dadurch eine Liste mit Equipment, welches in der Lernfabrik erforderlich ist. Nach Abgleich mit dem Ist-Zustand, der im Fragebogen von Schritt 1 erfasst ist, lässt sich dann ableiten, was hinsichtlich der technischen Infrastruktur konkret implementiert werden muss.

Aus den Kompetenztabellen in Anhang A-3 und Anhang A-4 ergibt sich zudem die Wissensbasis, die im Workshop vermittelt werden sollte. Mit Hilfe des Lernmodul-Grundkonzeptes in Tabelle 4-13 kann dann das angepasste Lernmodul-Konzept für die Lernfabrik erarbeitet werden. Anschließend gilt es, dieses umzusetzen. Hierbei kann ggf. ein Austausch mit anderen Lernfabriken von Vorteil sein – siehe die Liste in Abschnitt 2.3 oder die Mitglieder der IALF-Abreitsgruppe „Sustainability and Circular Economy in Learning Factories“